

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PIV DE BAJO COSTO CON PIVLAB COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE FLUJOS EN INGENIERÍA

IMPLEMENTATION OF A LOW-COST PIV SYSTEM USING PIVLAB AS A DIDACTIC TOOL FOR THE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FLOWS IN ENGINEERING

Mario Vargas Díaz

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, México
20233mc121@utez.edu.mx

Guillermo Ramírez Zúñiga

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, México
guillermoramirez@utez.edu.mx

Heriberto Adamas Pérez

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, México
heribertoadamas@utez.edu.mx

Jorge Salvador Valdez Martínez

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, México
jorgevaldez@utez.edu.mx

Guillermo Hernández Cruz

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, México
ghc@ier.unam.mx

Recepción: 17/febrero/2026

Aceptación: 27/mayo/2026

Resumen

El estudio experimental de la dinámica de fluidos requiere herramientas que permitan a los estudiantes obtener y analizar datos de manera accesible y precisa. Sin embargo, los sistemas comerciales de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) presentan altos costos que limitan su uso en entornos académicos. Este trabajo documenta la implementación de un banco experimental de bajo costo junto con PIVlab, un software libre para análisis PIV aplicado a la caracterización del flujo generado por un propulsor de viento iónico de alto voltaje. Se describe la adaptación

del montaje experimental, el procedimiento de adquisición y procesamiento de imágenes mediante correlación cruzada y los resultados obtenidos. El uso del sistema permite generar campos vectoriales que facilitan la interpretación del flujo y, sobre todo, demostrar la viabilidad de un entorno experimental didáctico accesible que fortalece el aprendizaje práctico, promueve el uso de software libre y fomenta competencias técnicas en estudiantes de ingeniería.

Palabras Clave: Dinámica de fluidos, educación en ingeniería, PIV, PIVlab, propulsión eléctrica.

Abstract

The experimental study of fluid dynamics requires tools that enable students to obtain and analyze data in an accessible and accurate manner. However, commercial Particle Image Velocimetry (PIV) systems involve high costs that limit their use in academic environments. This work documents the implementation of a low-cost experimental setup combined with PIVlab, an open-source software for PIV analysis, applied to the characterization of the flow generated by a high-voltage ionic wind thruster. The adaptation of the experimental setup, the image acquisition and processing procedure using cross-correlation, and the obtained results are described. The system allowed the generation of vector fields that facilitate flow interpretation and, most importantly, demonstrated the feasibility of an accessible didactic experimental environment that enhances practical learning, promotes the use of open-source software, and fosters technical competencies among engineering students.

Keywords: Electric propulsion, engineering education, fluid dynamics, PIV, PIVlab.

1. Introducción

El aprendizaje de la dinámica de fluidos en ingeniería requiere de prácticas experimentales que complementen los fundamentos teóricos [Cengel, 2018]. No obstante, la adquisición de sistemas comerciales para medición avanzada, como los equipos de PIV, supone una barrera económica para muchas instituciones educativas [Adrian, 2011; Margraves, 2023]. Esta limitación restringe la posibilidad

de que estudiantes tengan acceso directo a tecnologías de vanguardia, reduciendo las oportunidades de aprendizaje experimental profundo y de familiarización con técnicas modernas de investigación en dinámica de fluidos para ingeniería. Estas experiencias prácticas son importantes dentro de este contexto, ya que no solo consolidan conceptos teóricos, sino que también permiten a estudiantes desarrollar habilidades críticas de análisis, interpretación de resultados y resolución de problemas aplicados [Minichiello, 2021; Elliott, 2021]. La Velocimetría por Imágenes de Partículas es una técnica óptica no invasiva que obtiene campos de velocidad a partir del seguimiento digital de partículas trazadoras en un fluido, utilizada en campos tales como la educación, la investigación e incluso a nivel industrial [SmartPIV, 2021]. Esta técnica permite determinar de manera instantánea el campo de velocidades, así como las líneas de corriente y diferentes propiedades en flujos laminares y turbulentos [Escutia, 2022].

Un sistema PIV típicamente integra una fuente láser, un generador de partículas, una cámara y un software de análisis [Raffel, 2018]. El diseño del sistema PIV debe considerar el tipo de fluido a estudiar y, en particular, la correcta selección de las partículas trazadoras. Estas deben presentar propiedades físicas que permitan que sigan fielmente la dinámica del flujo sin alterar su comportamiento [Scharnowski, 2012]. Por otro lado, esta metodología ha sido ampliamente utilizada debido a su capacidad de proporcionar información detallada sobre el comportamiento de los flujos, incluyendo patrones de vorticidad, perfiles de velocidad y evolución temporal de estructuras fluidas [Ergin, 2018; Balducci, 2025].

PIVlab es una herramienta de software libre y una aplicación para MATLAB que permite realizar análisis de Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) a partir de datos de imagen [Thielicke, 2021]. Es importante mencionar que no se requiere contar con MATLAB para la utilización de PIVlab. En este contexto, PIVlab surge como una alternativa gratuita y accesible que facilita la introducción de prácticas experimentales sofisticadas sin la necesidad de realizar grandes inversiones económicas, promoviendo la equidad educativa y el acceso a tecnologías de investigación modernas [Thielicke, 2014]. No obstante, existen diversas herramientas para el análisis PIV, entre las que destacan Davis, OpenPIV y PIVlab.

Davis es ampliamente utilizado en investigación avanzada por su precisión y compatibilidad con hardware especializado; sin embargo, su costo elevado y dependencia de licencias propietarias limitan su aplicación en entornos educativos [LaVision, 2023]. OpenPIV es una plataforma de código abierto desarrollada en Python y MATLAB que ofrece algoritmos robustos para análisis PIV. Aunque actualmente dispone de interfaces gráficas experimentales, su uso más extendido continúa siendo a través de entornos de programación, lo que puede representar una barrera en contextos educativos donde no hay conocimientos o experiencia previa en programación o se prioriza la facilidad de uso y la interacción visual [Liberzon, 2019]. En cambio, PIVlab combina la accesibilidad del software libre con una interfaz visual intuitiva, facilitando su adopción como herramienta didáctica [Thielicke, 2021; Sciacchitano, 2022], justificando su elección en este trabajo como una solución idónea para la enseñanza y experimentación de bajo costo en ingeniería. La confiabilidad de PIVlab como herramienta de análisis ha sido validada en múltiples estudios independientes demostraron su precisión mediante comparación con datos sintéticos y experimentales, reportando errores inferiores al 3% en condiciones controladas [Thielicke, 2021]. Adicionalmente, estudios recientes han corroborado su exactitud en configuraciones de bajo costo; Sciacchitano et al. [2023] validaron PIVlab contra sistemas PIV comerciales en flujos turbulentos, mostrando excelente concordancia en la caracterización de campos vectoriales ($R^2 > 0.95$), mientras que Discetti et al. [2022] verificaron su robustez en la medición de flujos complejos con diferentes tipos de partículas trazadoras. Además, diversos esfuerzos por crear sistemas PIV de bajo costo para enseñanza han empleado PIVlab como herramienta principal debido a su capacidad de ejecución sin necesidad de licencias comerciales, facilitando prácticas replicables y teniendo un incremento constante en su adopción académica, con más de 700 citas reportadas en Google Scholar [PIVlab, 2025]. Más aún, trabajos recientes han comenzado a usar PIV/PIVlab para estudiar la dinámica de propulsores iónicos, abordando retos como la selección de trazadores y el efecto de la descarga corona en las mediciones PIV. Si bien esta línea de investigación es incipiente y el número de estudios publicados que aplican específicamente PIVlab a propulsores de viento

iónico es aún reducido, su aparición en literatura reciente [Noelle, 2025; Suvanjumrat, 2025], marca una tendencia creciente y evidencia la actualidad y relevancia de este enfoque. Sin embargo, una limitante importante para su adopción en entornos hispanohablantes es la escasez de información y recursos didácticos en español, así como la falta de videos prácticos en este idioma que muestren de manera detallada su uso, lo que puede dificultar el aprendizaje autónomo y su implementación efectiva en proyectos académicos. En el caso particular del análisis del propulsor de viento iónico, esta carencia representó una limitación considerable, ya que se requirió invertir tiempo adicional en la búsqueda, comprensión y adaptación de materiales mayoritariamente en inglés, lo que retrasó algunas fases del análisis experimental.

Este trabajo adapta todos los componentes descritos en un banco experimental de bajo costo PIV en conjunto con PIVlab para el análisis experimental de un propulsor de viento iónico de alto voltaje, un dispositivo que genera flujo mediante la ionización del aire y cuya dinámica representa un desafío interesante para el estudio de fluidos. Además, se plantea una metodología que integra el uso de PIVlab en la educación en ingeniería, con el objetivo de fomentar el aprendizaje activo, el desarrollo de competencias técnicas en los estudiantes y la aproximación a herramientas empleadas en investigación científica y aplicaciones tecnológicas actuales. El presente estudio busca potenciar tanto la comprensión conceptual como la capacidad práctica de los futuros ingenieros para afrontar problemas complejos en ingeniería y contribuir al desarrollo de proyectos innovadores con técnicas no convencionales de visualización de flujos. Por otro lado, al combinar técnicas de visualización modernas con una metodología educativa estructurada, este trabajo contribuye a cerrar la brecha entre el conocimiento teórico y la práctica experimental, fomentando una cultura de experimentación, análisis riguroso y desarrollo tecnológico que puede ser replicada y adaptada en distintos entornos educativos y de investigación. Este proyecto recurrió a material en inglés, principalmente los videos del creador del software, William Thielicke, y a la documentación oficial, adaptando el contenido al caso particular del propulsor de viento iónico.

Como resultado, este trabajo no solo documenta la implementación experimental, sino que también busca servir como una guía de referencia en español para la construcción de un sistema PIV de fácil acceso en conjunto con PIVlab, reduciendo la curva de aprendizaje y facilitando su incorporación en futuras prácticas académicas y proyectos de investigación.

2. Métodos

Para construir el sistema experimental PIV, se plantea la siguiente metodología:

- Definir características del montaje con todos los componentes necesarios para el análisis PIV en el flujo del prototipo de propulsor.
- Captura de imágenes consecutivas del flujo.
- Procesamiento en PIVlab de las imágenes obtenidas.
- Calibración dentro de PIVlab para el análisis digital.
- Comparación de resultados obtenidos en PIVlab con instrumentos de medición físicos.

Componentes del sistema experimental PIV

El diseño del sistema experimental PIV se definió utilizando componentes de fácil acceso y disponibilidad en el mercado mexicano, con el objetivo de asegurar que la implementación del sistema pudiera replicarse sin necesidad de adquisiciones costosas o importaciones complicadas. Debido a que algunos componentes por su costo o disponibilidad son inaccesibles para la mayoría de las instituciones, el montaje PIV se basó en las siguientes características:

- Componentes de fácil acceso y costo reducido.
- Seguridad y operación controlada del láser utilizado.
- Flexibilidad y modularidad en los ajustes de cámara.
- Captura de imágenes adecuada para el análisis en PIVlab.

Se seleccionó un láser convencional de 532 nm, el cual fue adaptado mediante un sistema óptico para generar el plano laminar de iluminación. Este tipo de láser,

ampliamente disponible en el mercado, representa una opción económica y funcional en comparación con los sistemas especializados utilizados en laboratorios de investigación avanzada. Para la generación de partículas trazadoras se optó por un humidificador doméstico, que actúa como generador de un aerosol fino y homogéneo. La elección de este dispositivo responde a su bajo costo, alta disponibilidad en tiendas locales o plataformas en línea y a que produce un flujo de partículas adecuado para el seguimiento visual sin modificar significativamente la dinámica del fluido.

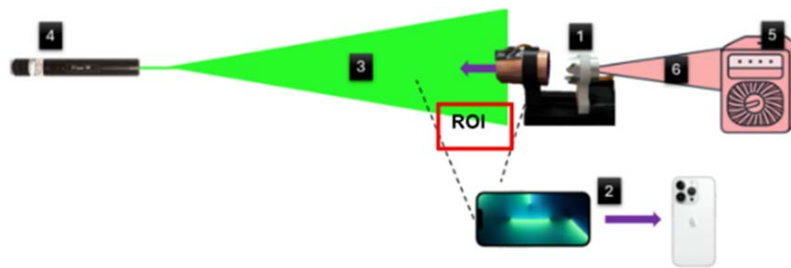
Como sistema de captura se empleó la cámara digital de un teléfono celular convencional, configurada con una tasa mínima de adquisición de 30 fotogramas por segundo (*fps*) y una resolución nativa de 1920×1080 *píxeles* (Full HD), lo que permite una relación adecuada entre nitidez de imagen y capacidad de análisis. En caso de disponer de un equipo más avanzado, es recomendable emplear cámaras con velocidades superiores a 60 *fps* y resoluciones mayores (por ejemplo, 3840×2160 *píxeles*) para registrar con mayor precisión los desplazamientos de partículas en flujos rápidos o turbulentos. De forma opcional, contar con ajustes manuales de exposición, apertura y enfoque mejora considerablemente la calidad de las imágenes y reduce el ruido en el análisis posterior con PIVlab.

Para asegurar una captura estable y precisa, se recomienda utilizar un soporte ajustable para la cámara, que permita fijar su posición y variar el ángulo de observación según la geometría del experimento. Esta solución no solo evita vibraciones que puedan distorsionar los resultados, sino que también otorga mayor flexibilidad al sistema, facilitando la alineación con el plano láser y la región de interés del flujo.

Alineación óptica

En la configuración experimental, la región de interés (ROI) se definió en la salida del propulsor iónico. El plano láser se posicionó verticalmente frente a la salida del propulsor, a una distancia de 20 *cm*, iluminando directamente la estela del flujo. La cámara se orientó perpendicularmente al plano láser 90° , enfocando específicamente la ROI para capturar los desplazamientos de las partículas en el

plano de medición. Adicionalmente, se construyó un concentrador de flujo para dirigir y maximizar las partículas generadas por el humidificador, este concentrador fue introducido a la entrada del propulsor iónico para que las partículas fueran iluminadas por el plano láser en la región de interés y registradas mediante una secuencia de imágenes capturadas por la cámara. En el diagrama de montaje (Figura 1) se ilustran todas las configuraciones descritas, así como su disposición espacial y ajustes respecto a la región de interés. Esta configuración busca optimizar la captación de datos y garantizar que el análisis de velocidades obtenido sea representativo del comportamiento real del flujo generado por el propulsor.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Diagrama de montaje PIV.

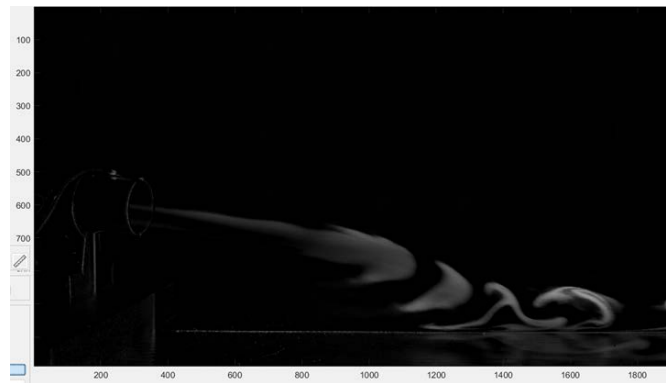
En el diagrama se aprecia los siguientes elementos:

- Sistema Experimental (1).
- Cámara de teléfono celular (2).
- Plano laminar de láser (3).
- Láser convencional de 532 nm (4).
- Humidificador convencional (5).
- Concentrador (6).

Captura y subida de imágenes a PIVlab

Para la captura de imágenes en el montaje PIV, se utilizó una resolución de 1920×1080 píxeles a 60 fotogramas por segundo, obteniendo 127 fotogramas capturados en total para el análisis PIV, es necesario de igual manera contar un fotograma de calibración, en el cuál debe estar un instrumento de medición como una regla o una cinta métrica. Dentro del software de PIVlab, es posible añadir

directamente los videos capturados, sin embargo, se sugiere primero obtener todos los fotogramas por separado y cargarlos de esta manera, esto con el fin de optimizar la carga y análisis dentro de PIVlab. Una vez cargados todos los fotogramas a PIVlab, la interfaz muestra los pares de imágenes (A y B), y se puede navegar o alternar entre ellas con Toggle A/B, de igual forma PIVlab nos muestra una vista previa de nuestros fotogramas como se muestra en la Figura 2. Por otra parte, PIVlab sigue una estructura horizontal, es decir, que es necesario ir por cada apartado de izquierda a derecha en el menú superior para cada análisis.



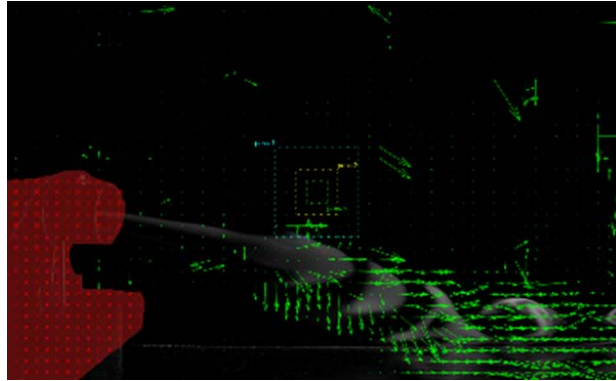
Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Carga de imágenes en PIVlab.

Preprocesado y configuración

Una vez cargadas las imágenes, es importante optimizarlas dentro de PIVlab, marcando el área de interés (ROI) y discriminando áreas que no se deseen utilizar, empleando máscaras. También, es posible aplicar filtros CLAHE (ecualización de histograma adaptativo) para mejorar la calidad de las imágenes, sin embargo, al colocar los fotogramas en PIVlab, automáticamente se coloca un filtro con este mismo propósito. Para el análisis se tienen disponibles distintos tipos de algoritmos de correlación, el algoritmo por defecto y el utilizado en este trabajo fue el de Transformada Rápida de Fourier con deformación de ventanas (Multipass FFT Window Deformation). Este algoritmo ajusta ventanas a través de múltiples pasadas para lograr buena resolución y relación señal-ruido. Es posible configurar entre 2 y 3 pasadas, se recomienda comenzar con áreas de interrogación grandes y reduciéndolas gradualmente para obtener una mayor precisión en el análisis

[Thielicke, 2021]. En la Figura 3, se muestra el resultado de un fotograma con 3 pasadas de 256, 128 y 64 píxeles, y pasos de 128, 64 y 32 píxeles respectivamente. Es imprescindible realizar distintas configuraciones de pasadas y áreas de interrogación con el fotograma seleccionado hasta obtener vectores solamente en el flujo y nuestra área de interés o con la menor cantidad de vectores fuera de esta.



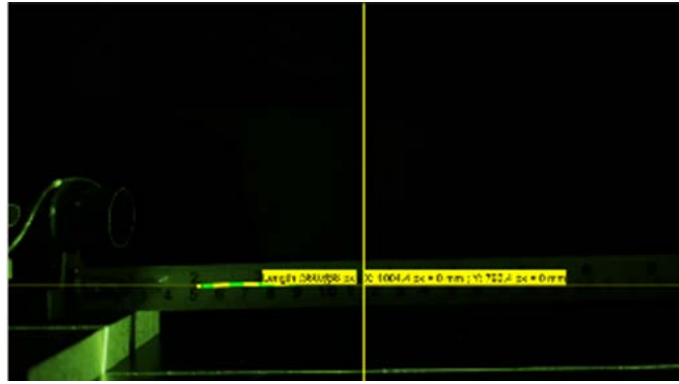
Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Configuración de pasadas en PIVlab.

Procesamiento y calibración

Una vez obtenido un resultado certero en el preprocesamiento de un fotograma, se procede a hacer el análisis a todos los fotogramas, este proceso puede tardar dependiendo de la capacidad de cómputo del equipo empleado, la robustez de correlación seleccionada y la cantidad de fotogramas a analizar.

Realizado el análisis a todos los fotogramas, es necesario hacer una calibración con un fotograma patrón, en la cual se visualice la escala de un instrumento de medición o alguna distancia conocida, como, una regla o una cinta métrica para indicar a PIVlab la relación entre los píxeles y las distancias reales. En la sección de calibración se requiere marcar en el fotograma una distancia que corresponda al instrumento de medición utilizado, es decir, si en el fotograma se emplea una regla que marque 50 mm, es necesario indicar al software que esa medición es equivalente a 50 mm, esto es muy útil para realizar posteriormente un mapa codificado por colores y otras herramientas visuales en el posprocesamiento para interpretar los resultados del análisis PIV. En la Figura 4 se observa la calibración realizada con una cinta métrica indicando 50 mm en el software.

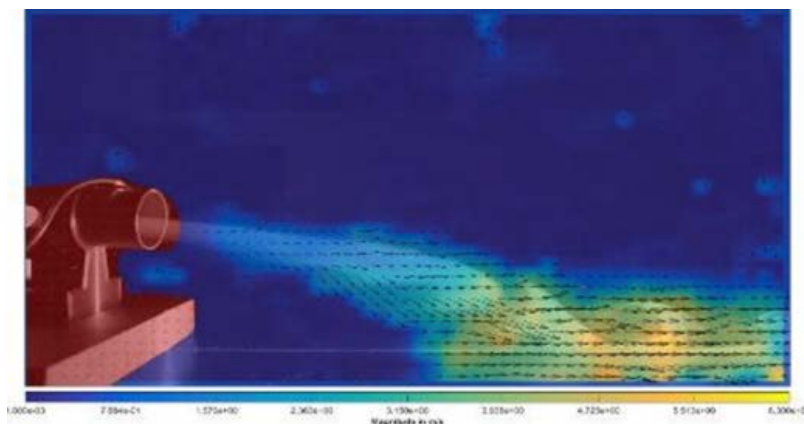


Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Calibración en PIVlab.

Posprocesamiento y validación

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos en el análisis de PIVlab, se recomienda utilizar los filtros de validación para eliminar vectores erróneos por velocidad o desviación estándar. Todas estas herramientas están disponibles en el apartado Validation [Thielicke, 2021]. Para finalizar con el análisis en PIVlab, se utilizaron las herramientas de validación Plot, la cual extrae datos específicos, como perfiles de velocidad o valores promedio, en el caso de estudio del propulsor de viento iónico de alto voltaje, se deseaba obtener las velocidades del flujo turbulento que presentaba, por lo que se utilizó el Contour Plot / Color Map (velocity magnitude), el cual, es un mapa de colores continuo donde cada tono de color representa una magnitud de velocidad. En la Figura 5 se puede observar el Plot utilizado y los valores expresados en m/s en la escala ubicada en la parte inferior.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Validación en PIVlab.

3. Resultados

Los resultados obtenidos del análisis realizado en el software PIVlab, arrojaron que el comportamiento del flujo de aire producido por el Propulsor de Plasma construido era de tipo turbulento. Esto principalmente debido a las velocidades cambiantes de los campos vectoriales que arrojó el programa obteniendo velocidades de entre 3.15 a 6.30 m/s . Además, el análisis de los campos vectoriales reveló un chorro turbulento bien definido con velocidades que decaían gradualmente hacia los bordes tal y como se aprecia en la Figura 5, estos patrones son consistentes con la naturaleza electroaerodinámica del propulsor, donde la aceleración de iones crea el flujo observado.

Para validar estos resultados, se optó por utilizar un anemómetro EXTECH de Termómetro Infrarrojo con Veleta Giratoria, dispositivo el cual cuenta con una precisión $\pm 3\%$ de la lectura y un rango de 0.40 a 30 m/s . Las mediciones obtenidas con el anemómetro fueron bastante similares a las mediciones de PIVlab como se aprecia en la Figura 6, teniendo lecturas de 3.90 a 6.77 m/s , validando de esta forma los valores obtenidos en el análisis.



a) Lectura de 6.77 m/s . b) Lectura de 3.90 m/s .

Fuente: elaboración propia

Figura 6 Mediciones con anemómetro EXTECH.

Con los datos obtenidos, se logró satisfactoriamente el objetivo de observar la dinámica del flujo de aire generado por la propulsión de viento iónico de alto voltaje mediante la técnica PIV, así como la construcción de un montaje PIV funcional y la correcta utilización del software PIVlab. Por otra parte, en PIVlab, se generó una animación del análisis realizado que está disponible para su consulta ubicado en: <https://youtu.be/O9jqYj360pg>.

4. Discusión

Una vez realizado el montaje PIV y el análisis en PIVlab, se observó la capacidad del banco experimental como herramienta de análisis de flujos, en el contexto de la educación en ingeniería demostró que es posible realizar caracterizaciones experimentales precisas utilizando recursos de bajo costo. Desde el punto de vista didáctico, la implementación de un banco experimental PIV no solo facilitó la adquisición de datos cuantitativos sobre el flujo, sino que también promovió el aprendizaje activo, ya que es necesario participar en todas las fases del proceso, como lo es el diseño del montaje, captura de datos, calibración, procesamiento y validación de resultados. Este enfoque fomenta competencias clave en ingeniería, como la resolución de problemas, el pensamiento crítico y la interpretación de resultados experimentales. Además, en el desarrollo del trabajo, se observa que el uso del banco experimental con PIVlab presenta ventajas clave para la educación en ingeniería:

- Gratuito y de fácil acceso [Thielicke, 2021].
- Resultados confiables en entornos de bajo costo.
- Facilidad de uso y con distintas herramientas disponibles.
- Capacidad de integración con MATLAB para ampliar funciones.

En comparación con métodos tradicionales de enseñanza de dinámica de fluidos, que suelen apoyarse principalmente en simulaciones o en prácticas de laboratorio limitadas, la propuesta ofrece un entorno experimental que integra el uso de software libre con técnicas avanzadas de análisis, lo que contribuye a una formación más cercana a la investigación aplicada.

Los resultados demuestran la viabilidad del sistema para caracterización de flujos, aunque cabe señalar que el presente estudio se basó en un número limitado de ensayos. Si bien la validación con anemómetro comercial confirmó la fiabilidad metodológica en estas condiciones, es importante implementar campañas experimentales más extensas con múltiples repeticiones, análisis estadístico robusto y variación sistemática de parámetros operativos. No obstante, la experiencia evidenció desafíos asociados al aprendizaje autónomo del uso de la

técnica PIV, principalmente debido a la escasez de recursos didácticos en español. Esto subraya la necesidad de generar más material formativo en este idioma para favorecer su adopción en instituciones de habla hispana.

5. Conclusiones

El estudio demostró que el banco experimental PIV es una herramienta viable y efectiva para la caracterización experimental de flujos en un entorno educativo de bajo costo. La metodología implementada permitió obtener campos vectoriales claros y cuantitativos.

En el ámbito académico, la experiencia resaltó el potencial de crear sistemas experimentales accesibles como recurso didáctico que fortalece la comprensión teórica de la dinámica de fluidos y desarrolla competencias prácticas en los estudiantes de ingeniería. Su accesibilidad y facilidad de implementación lo convierten en una alternativa atractiva para instituciones con recursos limitados, ofreciendo la posibilidad de incorporar prácticas experimentales avanzadas en el plan de estudios sin incurrir en costos elevados.

Las principales recomendaciones que futuras implementaciones podrían incluir dos ejes principales: el perfeccionamiento del análisis del flujo y mejoras en el diseño experimental. En primer lugar, sería altamente beneficioso continuar el estudio de la dinámica de fluidos mediante una técnica estequiométrica o métodos avanzados de visualización tridimensional, como técnicas láser más precisas manteniendo el enfoque didáctico y accesible para los estudiantes o profesores. Esto permitiría obtener una caracterización más completa y en 3D del comportamiento del flujo que se desea estudiar, profundizando así en la comprensión del fenómeno y su relación con diferentes configuraciones de este. Complementando de igual forma con la realización de al menos 10 repeticiones por condición experimental, análisis de incertidumbre cuantitativa y la caracterización de la repetibilidad del sistema, lo que permitirá establecer bandas de confianza en las mediciones PIV.

En cuanto a mejoras en el diseño experimental, se recomendaría el uso de cámaras de mayor velocidad, láseres más potentes y configuraciones ópticas optimizadas, así como el desarrollo de guías y tutoriales en español que reduzcan la curva de

aprendizaje. De igual forma, se sugiere explorar la aplicación de PIVlab en otros escenarios educativos y experimentales, incluyendo flujos compresibles, reactivos o multifase, para ampliar su alcance como herramienta de enseñanza e investigación en ingeniería.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Adrian, R. J., & Westerweel, J., (2011). Particle Image Velocimetry. Cambridge University Press.
- [2] Balducci, A., et al., (2025). Application of the PIV Technique for the Validation of a Numerical Model of Multiphase Flow in an Atomizing Nozzle. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(2), 48. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01263-x>.
- [3] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M., (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education.
- [4] Discetti, S., et al., (2022). On the Performance of PIVlab in Complex Flow Measurements. *Measurement Science and Technology*, 33(4), 045301.
- [5] Elliott, J., Minichiello, A., & Caldwell, L., (2021). Implementation of a Low-Cost, Mobile Instructional Particle Image Velocimetry (mi-PIV) Learning Tool for Increasing Undergraduate and Secondary Learners' Fluid Mechanics Intuition and Interest. ASEE Virtual Annual Conference. <https://peer.asee.org/implementation-of-a-low-cost-mobile-instructional-particle-image-velocimetry-mi-piv-learning-tool-for-increasing-undergraduate-and-secondary-learners-fluid-mechanics-intuition-and-interest>.
- [6] Ergin, F. G., Watz, B. B., & Gade-Nielsen, N. F., (2018). A Review of Planar PIV Systems and Image Processing Tools for Lab-On-Chip Microfluidics. *Sensors*, 18(9), 3090. <https://doi.org/10.3390/s18093090>.
- [7] Escutia, M., García, A., Hernández, H., & Solorio, G., (2022). Diseño Económico de un Sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas. En XI Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación y Quinto Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán. Morelia, México.

- [8] LaVision GmbH., (2023). DaVis 10 Software for Intelligent Imaging. Göttingen, Germany.
- [9] Liberzon, A., et al., (2019). OpenPIV: Open Source Particle Image Velocimetry. *SoftwareX*, 9, pp. 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.02.009>.
- [10] Margraves, C. H., Sreenivas, K., & Blade, A., (2023). Development of a PIV System for a Junior Level Fluid Mechanics Lab. ASEE Southeast Section Conference. <https://peer.asee.org/development-of-a-piv-system-for-a-junior-level-fluid-mechanics-lab>.
- [11] Minichiello, A., Elliott, J., Caldwell, L., & Margraves, C., (2021). Developing a Mobile Application-Based Particle Image Velocimetry Tool for Enhanced Teaching and Learning in Fluid Mechanics: A Design-Based Research Approach. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(4), pp. 758–774. <https://doi.org/10.1002/cae.22290>.
- [12] Noelle, D., et al., (2025). Particle Image Velocimetry for Ion Wind Thruster Measurement in Low Density Atmosphere. In AIAA Scitech 2025 Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2025-0473>.
- [13] PIVlab, (2025). PIVlab - Particle Image Velocimetry for MATLAB. <https://www.pivlab.de/>.
- [14] Raffel, M., Willert, C., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J., (2018). Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer.
- [15] Scharnowski, S., Kähler, C. J., & Cierpka, C., (2012). Time-Resolved PIV Investigation of a Transitional Flow in a Narrow Gap. *Journal of Visualization*, 15(1), pp. 53–60.
- [16] Sciacchitano, A., Neal, D., & Discetti, S., (2022). Benchmarking Free and Commercial PIV Software Packages for Educational Use. *Flow Measurement and Instrumentation*, 85, 102183. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102183>.

- [17] Sciacchitano, A., et al., (2023). PIVlab Performance Assessment in Low-Cost Experimental Setups. *Experiments in Fluids*, 64(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03685-w>.
- [18] SmartPIV Team, (2021). SmartPIV: Flow velocity Estimates by Smartphones for Education and Field Studies. *Experiments in Fluids*, 62(1), 172. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03262-z>.
- [19] Suvanjumrat, C., et al., (2025). An Empirical Investigation into Enhancing Natural Convection Heat Transfer Through Corona Wind in a Needle-To-Cylinder Configuration. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 105864. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2025.105864>.
- [20] Thielicke, W., & Sonntag, R., (2021). Particle Image Velocimetry For MATLAB: Accuracy and Enhanced Algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software*, 9(1). <https://doi.org/10.5334/jors.334>.
- [21] Thielicke, W., & Stamhuis, E. J., (2014). PIVlab – Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1), e30.