



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo de integración curricular
previa a la obtención del título
universitario en Mecánica
Automotriz**

AUTORES:

Nick Leandro Montero Castro
Javier Alejandro Chávez Puma

TUTOR:

Ing. Guillermo Gorky Reyes Campaña

**ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD CRÍTICA EN UN SISTEMA
CONTROLADO**

DEDICATORIA

El trabajo de titulación va dirigido a nuestro tutor, ya que gracias a él por motivarnos a buscar siempre las soluciones cuando nos encontrábamos estancados, a mi familia por siempre estar presente en cada paso que lo necesitábamos, a cada persona que me ayudo con palabras o consejos para iniciar este proyecto y poder culminarlo.

Este proyecto va dedicado a mis padres y hermanos, ya que para ellos es un gran logro que otro integrante de esta familia pueda culminar sus estudios superiores y ser el primer Ingeniero en la familia, un gran merito para esta familia que ha lucha mucho.

Nick Leandro Montero Castro

Este trabajo de titulación está dedicado en primer lugar, a mi mamá, quien ha estado a mi lado en todo momento, brindándome su apoyo incondicional en cada circunstancia de mi vida.

También está dedicado a mi hermanito, que es un pilar fundamental en mi vida; a mi tío, a mi abuelita y a mi novia, quienes siempre han estado para mí, brindándome su cariño, confianza y apoyo durante este camino, que ha sido largo pero muy increíble.

A cada uno de ustedes, gracias por creer en mí y acompañarme en este logro tan importante.

Javier Alejandro Chávez Puma

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia que siempre busco la manera de que pueda culminar mi carrera, en especial a mi hermano mayor que siempre estuvo conmigo desde el primer momento y me acompañó cuando apenas iba entendiendo la vida, a mi mamá por siempre ser esa voz que te aconseja y te guía para ser una buena persona.

A mi novia que me impulso a retomar los estudios cuando todo estaba dado por perdido, su insistencia, sus consejos. Gracias por haber llegado a mi vida, y ser una gran mujer que supo usar las palabras correctas en el momento indicado.

A la mejor amiga de mi madre, Sra. Ercilia agradezco por su confianza y por su generosidad de darme la oportunidad de retomar mis estudios, estaré siempre agradecido por ese apoyo y este logro es en parte por todo lo que ha hecho por mí.

Nick Leandro Montero Castro

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a nuestro tutor, el Ing. Gorky Reyes, por todos los conocimientos compartidos, su paciencia y el acompañamiento brindado a lo largo de este proceso. Su guía, experiencia y valiosos consejos fueron fundamentales para culminar con éxito nuestro trabajo de titulación y esta importante etapa de nuestra formación profesional como personal.

Agradezco profundamente a mi mamá por creer siempre en mí, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por confiar en mis capacidades por ser la luz que ha guiado mi camino, por apoyarme incondicionalmente en cada uno de mis sueños y objetivos, y por estar siempre a mi lado.

También quiero agradecer a mi tío, a mi abuelita, a mi hermano, a mi novia y al resto de mi familia por su apoyo constante, con sus palabras de aliento y por enseñarme, con su ejemplo y cariño, que todo es posible cuando se lucha con perseverancia y dedicación.

Javier Alejandro Chávez Puma

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nuestro equipo, Nick Leandro Montero Castro, Javier Alejandro Chávez Puma, declaramos bajo juramento, la autoría de este proyecto. No ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.

Nick Leandro Montero Castro

Javier Alejandro Chávez Puma

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Guillermo Gorky Reyes Campaña**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Firma professor

ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción	2
Marco Teórico.....	4
Antecedentes del transporte de fluidos y aplicación automotriz.....	4
Sistemas de flujo: propiedades fundamentales y ecuación de continuidad.....	4
Flujo en tuberías: número de Reynolds, velocidad crítica y regímenes.....	6
Pérdidas de energía, bombas y fenómenos asociados	7
Materiales y Métodos.....	8
Enfoque metodológico	8
Banco de pruebas hidráulico	10
Bomba y control del caudal.....	13
Fluido de prueba.....	13
Tuberías y diámetros evaluados	14
Sensores y adquisición de datos	15
Procedimiento experimental.....	16
Ecuaciones utilizadas para el procesamiento	17
Resultados y Discusión	18
Datos técnicos del banco de pruebas físico	18
Resultados del número de Reynolds a 20, 40 y 60 Hz.....	18
Identificación del cambio de régimen	20
Discusión técnica de los resultados.....	20
Alcance del banco de pruebas	21
Conclusiones	21
Referencias bibliográficas.....	22

Anexos	24
Anexo A. Matriz para registro de datos experimentales	24
Anexo B. Secuencia básica del algoritmo de cálculo	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del banco de pruebas hidráulico	11
Figura 2. Regímenes de flujo, perfiles de velocidad y diagrama de Moody.....	5
Figura 3. Comparación del número de Reynolds a 20, 40 y 60 Hz.....	19
Figura S.1. Vista frontal del banco de pruebas hidráulico con sensores de caudal y panel de control.	78
Figura T.1. Vista posterior del banco de pruebas hidráulico con depósito, bomba y sistema de tuberías.	79
Figura U.1. Variador de frecuencia Optidrive E3 empleado para controlar la velocidad de la bomba.....	80
Figura V.1. Placa de características técnicas de la bomba de agua QB60.	81
Figura W.1. Vista referencial del variador de frecuencia Optidrive E3.....	82
Figura X.1. Sensores de caudal de efecto Hall conectados a tuberías transparentes.	83
Figura Y.1. Conexión de un sensor de caudal de efecto Hall a una tarjeta Arduino Uno.	84
Figura Z.1. Pantalla táctil Nextion utilizada como interfaz de visualización y monitoreo.....	85
Figura AA.1. Sensor de caudal de efecto Hall empleado para la medición del flujo.	86
Figura AB.1. Comparación visual de diámetros de tubería PVC, incluyendo 1/2 y 3/4 pulgadas.....	87
Figura AC.1. Accesorios, uniones y válvulas de PVC utilizados en circuitos hidráulicos.....	88
Figura AD.1. Banco didáctico de bombas y circuitos hidráulicos para prácticas de laboratorio.....	89
Figura AE.1. Tablero eléctrico con dispositivos de protección, control y variador de frecuencia.	90
Figura AF.1. Banco experimental para el análisis de caudal, presión y comportamiento de bombas.	91
Figura AG.1. Equipo didáctico para observar los regímenes de flujo en una tubería transparente.	92

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Matriz para registro de datos experimentales.....	22
Anexo B. Secuencia básica del algoritmo de cálculo	23
Anexo C. ASTM D445-24.....	24
Anexo D. Tesis UIDE sobre inyectores CRDI.....	26
Anexo E. Transición a la turbulencia en tuberías	28
Anexo F. Golpe de ariete y transitorios hidráulicos	30
Anexo G. Flujo transicional.....	32
Anexo H. Mecánica de fluidos.....	34

Anexo I. Frentes turbulentos	36
Anexo J. Paisaje dinámico del flujo.....	38
Anexo K. Diseño de bombas centrífugas	40
Anexo L. Estado de cavitación	42
Anexo M. ISO 5167-1:2022	44
Anexo N. ISO 3104:2023	46
Anexo O. Mecánica de fluidos aplicada.....	48
Anexo P. Fluido refrigerante	50
Anexo Q. Cavitación en bombas automotrices.....	52
Anexo R. Viscosidad y cavitación	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables de entrada y variables calculadas del banco de pruebas	9
Tabla 2 Materiales principales del banco de pruebas.....	12
Tabla 3 Propiedades del fluido de prueba	14
Tabla 4 Características geométricas de las tuberías	15
Tabla 5 Sistema de medición y procesamiento	16
Tabla 6 Ecuaciones de cálculo empleadas en el análisis.....	17
Tabla 7 Datos principales del sistema físico de medición	18
Tabla 8 Número de Reynolds y régimen de flujo a 20, 40 y 60 Hz.....	19
Tabla 9 Matriz de registro para ensayos del banco hidráulico	24
Tabla 10 Secuencia de cálculo del programa de adquisición.....	25

ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD CRÍTICA EN UN SISTEMA CONTROLADO

Ing. Gorky Reyes. MSc¹, Nick Montero.², Javier Chávez³

¹Maestría Especialidad - Universidad, Título Obtenido, goreyesro@uide.edu.ec,

Quito – Ecuador

²Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, nimonteroca@uide.edu.ec,

Quito - Ecuador

³Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, jachavezpu@uide.edu.ec,

Quito – Ecuador

Resumen

El estudio analizó la velocidad crítica y el cambio de régimen en un banco hidráulico de circuito cerrado con agua a temperatura controlada y tuberías transparentes de 1/2 in y 3/4 in. El sistema integró una bomba regulada por frecuencia, sensores de efecto Hall, Arduino Uno y pantalla Nextion para obtener caudal, velocidad media, número de Reynolds y velocidad crítica. A 20, 40 y 60 Hz, ambos conductos presentaron régimen turbulento; la tubería de 1/2 in alcanzó números de Reynolds superiores y llegó antes a la zona de transición. La comparación confirmó la relación entre diámetro, caudal y velocidad crítica, y permitió evaluar el agua como fluido de referencia. El banco constituye una herramienta didáctica para relacionar mediciones hidráulicas con pérdidas de energía, cavitación y golpe de ariete en sistemas automotrices.

Palabras clave: velocidad crítica, número de Reynolds, caudal, tuberías circulares, banco hidráulico.

Abstract

This study analyzed critical velocity and flow-regime transition in a closed-loop hydraulic test bench using temperature-controlled water and transparent 1/2 in and 3/4 in pipes. The system integrated a frequency-regulated pump, Hall-effect sensors, an Arduino Uno board, and a Nextion display to obtain flow rate, mean velocity, Reynolds number, and critical velocity. At 20, 40, and 60 Hz, both pipes operated under turbulent conditions; the 1/2 in pipe reached higher Reynolds numbers and entered the transition range earlier. The comparison confirmed the relationship among diameter, flow rate, and critical velocity and allowed water to be evaluated as a reference fluid. The bench is a didactic tool for linking hydraulic measurements with energy losses, cavitation, and water hammer in automotive systems.

Keywords: critical velocity, Reynolds number, flow rate, circular pipes, hydraulic test bench.

INTRODUCCIÓN

En la formación técnica relacionada con los sistemas hidráulicos automotrices, existe una limitación importante: no siempre se cuenta con un espacio de laboratorio donde los estudiantes puedan comprobar experimentalmente cómo se comportan los fluidos bajo diferentes condiciones de operatividad. En sistemas de lubricación, refrigeración, frenos, alimentación e inyección, el fluido circula por conductos, bombas, válvulas e inyectores, y puede mantenerse laminar, entrar en transición o volverse turbulento. Los textos actuales de mecánica de fluidos explican que estos cambios de régimen modifican la resistencia al movimiento del fluido y las pérdidas de energía en conductos cerrados (Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022). Por ello, la presente investigación busca comprender matemáticamente estas condiciones y tiene como objetivo general diseñar y construir un banco de pruebas de tuberías controladas que permita analizar experimentalmente la velocidad crítica en conductos circulares, utilizando agua como único fluido de prueba y variando el diámetro interno de la tubería (1/2 in y 3/4 in), y relacionar los resultados con problemas automotrices como cavitación y golpe de ariete.

Para cumplir este objetivo, el trabajo se desarrolla en tres etapas. En la primera etapa, se realiza una búsqueda bibliográfica con el fin de sustentar el análisis de la influencia del diámetro, manteniendo constante la viscosidad del agua, para determinar la velocidad crítica en dos diámetros distintos y verificar la relación inversa entre velocidad crítica y diámetro que predice la ecuación de Reynolds. En la segunda etapa, se construye un equipo tipo laboratorio para analizar caudal, diámetro, velocidad media y número de Reynolds bajo condiciones controladas, lo que permite evaluar la influencia del diámetro mediante el uso de agua como fluido de prueba, y comparar cómo este modifica la velocidad crítica y el régimen de flujo en las tuberías seleccionadas. Finalmente, en la tercera etapa, se tabulan y evalúan los datos mediante condiciones visuales, matemáticas y estadísticas para clasificar el flujo como laminar, de transición o turbulento, y establecer la correlación con fenómenos destructivos como cavitación y golpe de ariete, mostrando que operar por encima de la velocidad crítica puede amplificar los transitorios hidráulicos y reducir la vida útil de componentes automotrices.

Los estudios recientes sobre transición de flujo aportan criterios para interpretar el comportamiento dinámico del fluido en tuberías. Avila et al. (2023) revisan la transición a la turbulencia en flujo interno y explican que este fenómeno no depende únicamente de un

número fijo, sino también de perturbaciones y condiciones del sistema. Frishman y Grafke (2022) analizan el paisaje dinámico del flujo transicional en tuberías, mientras que Chen et al. (2022) estudian la propagación de frentes turbulentos a altos números de Reynolds. Estos aportes permiten relacionar el criterio de Reynolds con el comportamiento real que se observa en un banco de pruebas.

La selección del agua como sustancia de prueba se respalda en normas y estudios recientes sobre medición de flujo y propiedades viscosas. ASTM D445-24 e ISO 3104:2023 establecen criterios para la determinación de viscosidad cinemática, mientras que ISO 5167-1:2022 resume principios de medición de flujo en conductos circulares cerrados. En este proyecto, el agua permite mantener una viscosidad de referencia y concentrar la comparación en el efecto del diámetro y la frecuencia de operación de la bomba.

Otros trabajos permiten conectar el banco experimental con fenómenos hidráulicos reales. Hao et al. (2022) revisan el diseño hidráulico de bombas centrífugas e incluyen problemas como cavitación, excitación hidráulica y eficiencia. Ye et al. (2022) analizan la influencia de la viscosidad del fluido sobre la cavitación en bombas, y Britton y Willey (2024) describen cómo los transitorios hidráulicos pueden generar vibraciones, sobrepresiones y fallas en sistemas de conducción. Por tal motivo, la presente investigación analiza las condiciones de la bomba, el agua como fluido de prueba y los diámetros de las tuberías para comprender la velocidad crítica, el régimen de flujo y las pérdidas de energía en aplicaciones cercanas al área automotriz.

En el contexto local de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la UIDE, Avila Sánchez et al. (2023) analizaron el sistema hidráulico y electrónico de inyectores CRDI, relacionando presión, funcionamiento y diagnóstico de fallas. Ese antecedente ayuda a vincular el banco de pruebas con sistemas automotrices reales donde el caudal y la presión no son datos aislados, sino variables necesarias para interpretar el comportamiento del componente.

MARCO TEÓRICO

Antecedentes del transporte de fluidos y aplicación automotriz

El transporte de fluidos ha evolucionado desde los primeros sistemas de conducción utilizados para riego, abastecimiento y saneamiento hasta los circuitos cerrados empleados en máquinas y vehículos. Con el desarrollo de tuberías cerradas, el análisis del movimiento del fluido adquirió una dimensión más ingenieril, porque el diámetro interno, la presión, la rugosidad y la longitud influyen directamente en la pérdida de energía. En el ámbito automotriz, esta evolución se relaciona con sistemas de lubricación, refrigeración, frenos, alimentación de combustible e inyección, donde el fluido circula por conductos, bombas, válvulas e inyectores. En todos estos casos, el comportamiento depende del caudal, la presión disponible, la velocidad, la viscosidad y el régimen de flujo; por ello, comprender el paso entre flujo laminar, transición y turbulencia permite interpretar pérdidas de energía, vibraciones, cavitación y golpe de ariete (Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022; Stajuda et al., 2024).

Sistemas de flujo: propiedades fundamentales y ecuación de continuidad

Regímenes de flujo y análisis hidráulico

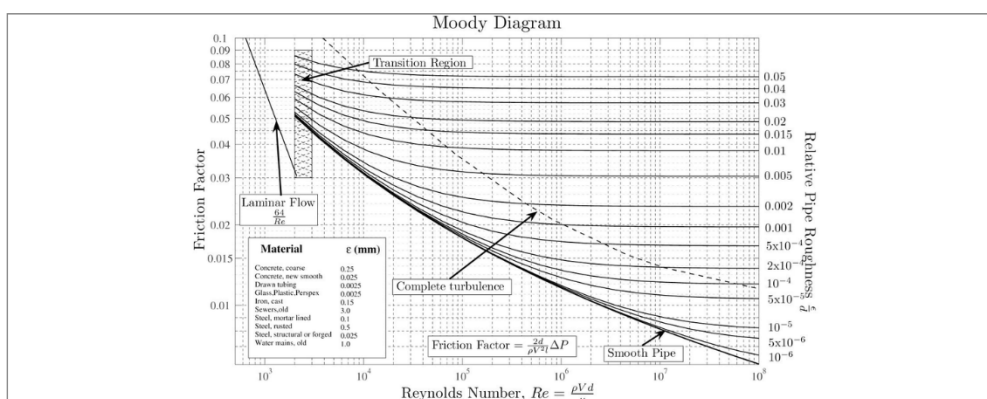
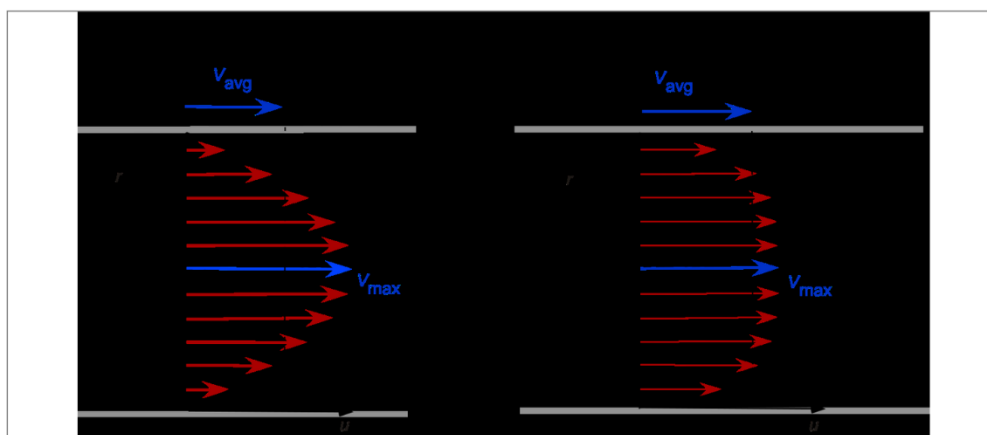
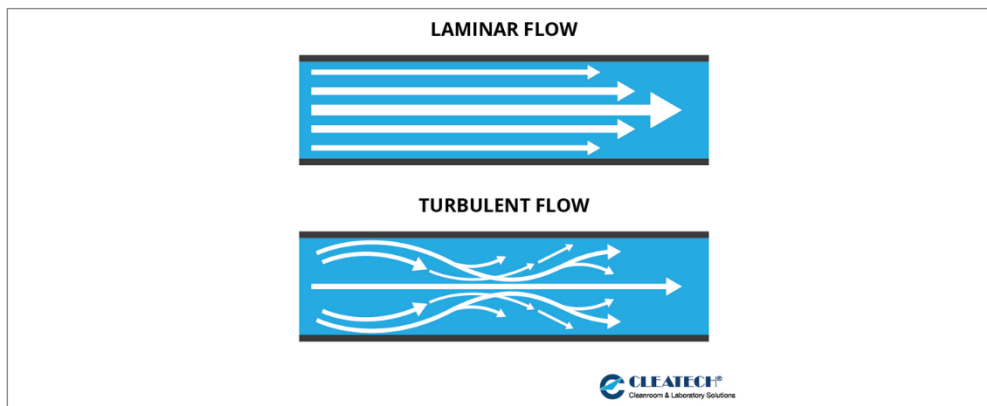


Figura 2. Regímenes de flujo, perfiles de velocidad y diagrama de Moody.

Fuente: material gráfico proporcionado por el estudiante.

Un fluido se caracteriza por su densidad ($\rho = m/V$), peso específico ($\gamma = W/V$) y viscosidad. La viscosidad dinámica (μ) expresa la resistencia interna del fluido al movimiento, mientras que la viscosidad cinemática ($\nu = \mu/\rho$) relaciona la viscosidad dinámica con la densidad y se expresa en m^2/s o en centistokes (cSt). En este trabajo se utiliza ν porque la ecuación del número de Reynolds para tuberías se expresa de forma directa mediante

velocidad, diámetro y viscosidad cinemática (Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022).

Además, la viscosidad no se analiza de manera aislada, porque puede variar con la temperatura y afectar directamente el número de Reynolds. En este trabajo, el agua se utiliza como único fluido de prueba y su viscosidad cinemática se mantiene como una propiedad de referencia bajo condiciones controladas de temperatura. Esto permite que el análisis se concentre en la influencia del diámetro interno de la tubería y del caudal sobre la velocidad media, el número de Reynolds y la velocidad crítica, manteniendo el mismo esquema de tuberías y bomba (ASTM International, 2024; ISO, 2023).

En conductos cerrados, el caudal volumétrico Q representa el volumen de fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo. Para una tubería circular llena, Q se relaciona con la velocidad media V y el área transversal A mediante la ecuación de continuidad:

Q = caudal volumétrico (m^3/s); V = velocidad media del fluido (m/s); A = área transversal interna de la tubería (m^2).

$$Q = V \cdot A \quad \text{Ec. (1)}$$

Para un diámetro interno D , el área se calcula como $A = \pi D^2/4$. Por lo tanto, para un mismo caudal, una tubería de menor diámetro genera mayor velocidad media, mientras que una tubería de mayor diámetro reduce la velocidad del fluido. Esta relación es central para analizar la influencia del diámetro sobre la velocidad crítica y también para explicar por qué los dos caudalímetros del banco no entregan el mismo número de Reynolds cuando la bomba trabaja a la misma frecuencia (Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022).

Flujo en tuberías: número de Reynolds, velocidad crítica y regímenes

El flujo de fluidos en tuberías puede representarse mediante líneas de corriente. Cuando las líneas son paralelas y ordenadas, el comportamiento tiende a ser laminar; cuando presentan fluctuaciones, mezcla y remolinos, el comportamiento se aproxima al régimen turbulento. El número de Reynolds compara las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas y, en tuberías circulares, se expresa como:

Re = número de Reynolds (adimensional); V = velocidad media (m/s); D = diámetro interno (m); ν = viscosidad cinemática (m^2/s).

$$Re = V \cdot D / \nu \quad \text{Ec. (2)}$$

En prácticas de laboratorio se considera que $Re < 2100$ corresponde a flujo laminar, que $2100 \leq Re \leq 4000$ se asocia con transición y que valores mayores indican tendencia turbulenta. Para este proyecto, también se toma $Re > 10000$ como turbulencia completamente desarrollada. Aunque el cambio de régimen depende de rugosidad, perturbaciones y longitud de entrada, Reynolds ofrece un criterio práctico para comparar fluidos y tuberías bajo condiciones similares (Avila et al., 2023; Cerbus, 2022; Frishman & Grafke, 2022).

En un banco experimental, la transición no debe entenderse como un valor único y rígido, sino como una zona donde pequeñas variaciones de caudal, vibraciones de la bomba, entrada del flujo o irregularidades de la tubería pueden cambiar el patrón de movimiento. Por esta razón, el análisis combina el cálculo matemático con la observación visual y la tabulación de datos, permitiendo relacionar los modelos teóricos con el comportamiento real del fluido en condiciones controladas.

La velocidad crítica es la velocidad media a partir de la cual el flujo alcanza el umbral de transición. Si se adopta $Re = 2100$ como límite del régimen laminar, la velocidad crítica se obtiene despejando V en la ecuación de Reynolds:

V_c = velocidad crítica (m/s); 2100 = límite superior adoptado para flujo laminar; ν = viscosidad cinemática (m^2/s); D = diámetro interno (m).

$$V_c = 2100 \cdot \nu / D \quad \text{Ec. (3)}$$

Esta expresión muestra que, a viscosidad constante, V_c disminuye cuando aumenta D ; y, a diámetro constante, V_c aumenta cuando se incrementa ν . En el presente trabajo, al emplear únicamente agua como fluido de prueba, la viscosidad cinemática se mantiene constante y el análisis se enfoca principalmente en cómo el diámetro de la tubería y el caudal modifican la velocidad media, el número de Reynolds y la condición crítica de transición. Esta orientación permite estudiar el comportamiento del flujo en tuberías bajo condiciones controladas y relacionarlo con los criterios de transición laminar-turbulenta descritos en estudios recientes sobre flujo interno (Avila et al., 2023; Chen et al., 2022; Frishman & Grafke, 2022).

Pérdidas de energía, bombas y fenómenos asociados

En cualquier sistema de tuberías, una parte de la energía suministrada por la bomba se pierde por fricción. La ecuación de Darcy-Weisbach permite estimar la pérdida de carga h_f en

función del factor de fricción f , la longitud L , el diámetro D , la velocidad media V y la gravedad g :

hf = pérdida de carga (m); f = factor de fricción de Darcy; L = longitud del tramo (m); D = diámetro interno (m); V = velocidad media (m/s); g = gravedad (9,81 m/s²).

$$hf = f \cdot (L/D) \cdot (V^2/2g) \quad \text{Ec. (4)}$$

En régimen laminar, el factor de fricción se determina con $f = 64/Re$. En flujo turbulento, f depende además de la rugosidad relativa y suele evaluarse con el diagrama de Moody o ecuaciones empíricas (Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022). La bomba centrífuga entrega energía al fluido en forma de altura o presión; al variar su velocidad o regular la válvula de salida, cambian el caudal, la presión disponible y, por tanto, la velocidad media dentro de la tubería.

La presión generada por la bomba representa la energía disponible para vencer la resistencia del circuito. Si el diámetro disminuye, la velocidad aumenta para un mismo caudal y las pérdidas por fricción tienden a incrementarse; por ello, la selección del diámetro influye directamente en la velocidad media, el número de Reynolds y la pérdida de carga. En el banco de pruebas, el uso de agua como fluido único permite mantener constante la viscosidad cinemática de referencia y centrar el análisis en la relación entre bomba, caudal, presión, diámetro y velocidad crítica antes de interpretar las pérdidas de energía (ISO, 2022; Mott & Untener, 2022).

En sistemas automotrices, una relación inadecuada entre presión de bomba, diámetro de conducción o tipo de fluido puede generar baja presión, vibraciones, cavitación o transitorios hidráulicos. La cavitación ocurre cuando la presión local cae por debajo de la presión de vapor del fluido, mientras que el golpe de ariete se relaciona con cambios rápidos de velocidad y presión en conductos cerrados. Ambos fenómenos justifican analizar caudal, presión, velocidad, Reynolds y pérdidas de carga en circuitos hidráulicos (Britton & Willey, 2024; Hao et al., 2022; He et al., 2022; Wu et al., 2022; Ye et al., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado y experimental, debido a que buscó construir y evaluar un banco de pruebas que permita analizar el comportamiento de fluidos en tuberías circulares. El objetivo general se evaluó mediante el control de variables de entrada: viscosidad cinemática del fluido, diámetro interno de la tubería, caudal impulsado

por la bomba, longitud del tramo de ensayo y temperatura de operación. A partir de estas variables se calcularon parámetros de salida como área transversal, velocidad media, número de Reynolds, velocidad crítica, factor de fricción y pérdida de carga. De esta forma, el banco permitió relacionar una condición física medible con un resultado matemático verificable.

Para cumplir los objetivos específicos se emplearon tres métodos complementarios. En una primera etapa, mediante el método bibliográfico, se revisaron libros de mecánica de fluidos, artículos científicos y normas técnicas recientes relacionadas con viscosidad, medición de flujo, transición de régimen, número de Reynolds y comportamiento de bombas. Esta revisión permitió construir la base conceptual del proyecto y sostener el análisis de los dos diámetros evaluados (ASTM International, 2024; ISO, 2022, 2023; Avila et al., 2023; Mott & Untener, 2022).

Como criterio técnico de referencia se consideraron los principios de medición de flujo en conductos circulares cerrados establecidos en ISO 5167-1:2022, aunque el banco no utiliza placas de orificio ni Venturi como método principal de medición, sino sensores de turbina de efecto Hall. Para la viscosidad cinemática del agua se tomaron como referencia los principios de ASTM D445-24 y de ISO 3104:2023, que describen la determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos. Además, el análisis se respaldó en estudios recientes sobre transición de flujo en tuberías, número de Reynolds y estabilidad del régimen laminar-turbulento, con el fin de interpretar los resultados obtenidos en los dos diámetros evaluados (ASTM International, 2024; ISO, 2022, 2023; Avila et al., 2023).

Tabla 1

Variables de entrada y variables calculadas del banco de pruebas

Tipo	Variable	Símbolo	Unidad	Uso dentro del análisis
Entrada	Viscosidad cinemática	ν	m ² /s, cSt	Define la resistencia interna del fluido y permite calcular Re y Vc.
Entrada	Diámetro interno	D	m	Permite calcular área, velocidad crítica, Reynolds y pérdida de carga.
Entrada	Caudal	Q	L/min, m ³ /s	Variable medida por el sensor para obtener velocidad media.

Tipo	Variable	Símbolo	Unidad	Uso dentro del análisis
Entrada	Longitud de tubería	L	m	Se usa en Darcy-Weisbach para estimar pérdida de carga.
Entrada	Temperatura	T	°C	Condición de control que influye en viscosidad y densidad.
Calculada	Área transversal	A	m ²	Se obtiene mediante $A = \pi D^2/4$.
Calculada	Velocidad media	V	m/s	Se obtiene mediante $V = Q/A$.
Calculada	Número de Reynolds	Re	adimensional	Clasifica el régimen de flujo.
Calculada	Velocidad crítica	V _c	m/s	Indica el límite de transición según $Re = 2100$.
Calculada	Pérdida de carga	h _f	m	Estima pérdida de energía por fricción.

Nota. Las variables se definieron a partir de las ecuaciones de continuidad, Reynolds y Darcy-Weisbach utilizadas en el desarrollo experimental.

Banco de pruebas hidráulico

El banco de pruebas se diseñó como un circuito hidráulico cerrado. Esta configuración permite recircular el agua mediante una bomba de agua a presión 1/2 HP QB60, luego conducirla hacia el tramo de ensayo formado por mangueras transparentes y finalmente retornarla al punto de alimentación del sistema. La elección de un circuito cerrado reduce el desperdicio de fluido, facilita repetir los ensayos y permite trabajar con agua como único fluido de prueba sin necesidad de un sistema de descarga continua. Además, las mangueras transparentes facilitan la observación del comportamiento del fluido durante el aumento progresivo del caudal.

El sistema se construyó con una bomba de agua a presión 1/2 HP QB60, un módulo dimmer AC 8 A 110/220 V con cruce por cero TTL, mangueras transparentes de 1/2 in y 3/4 in, sensores de flujo correspondientes a cada diámetro, una válvula para ajuste fino de caudal, uniones, codos de agua, una estructura de madera como soporte del montaje y un condensador para la bomba. La adquisición y visualización de datos se realizó con Arduino Uno y pantalla Nextion de 7 in. El programa incorporado calcula en tiempo real la velocidad

media, el número de Reynolds y la clasificación del régimen en la pantalla del banco de pruebas.

Figura 1

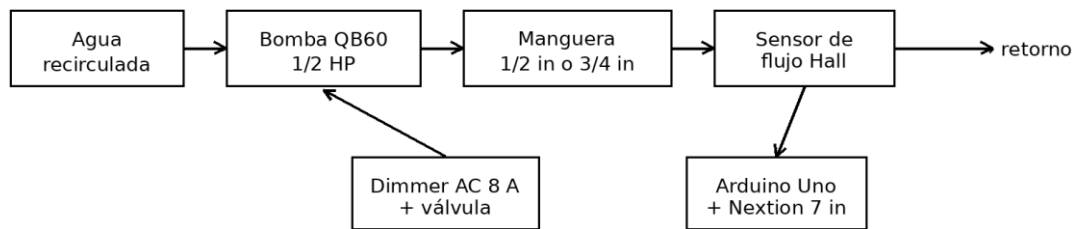
Esquema general del banco de pruebas hidráulico

Banco hidráulico y elementos de medición



Figura 3. Banco hidráulico, control de la bomba y elementos de medición.

Fuente: material gráfico proporcionado por el estudiante.



Nota. El diagrama resume la trayectoria del fluido y la relación entre los componentes físicos y el sistema de adquisición de datos. Fuente: elaboración propia a partir del avance del proyecto.

Tabla 2

Materiales principales del banco de pruebas

Componente	Especificación	Función técnica	Función dentro del banco de pruebas
Arduino Uno	Tarjeta de adquisición y procesamiento de datos.	Permite programar el cálculo en tiempo real.	Procesar señales, calcular variables hidráulicas y enviar información a la pantalla.
Sensor de flujo 1/2 in	Sensor tipo turbina con efecto Hall para el conducto de 1/2 in.	Registra pulsos proporcionales al caudal en el diámetro menor.	Medir caudal para calcular velocidad media y número de Reynolds.
Sensor de flujo 3/4 in	Sensor tipo turbina con efecto Hall para el conducto de 3/4 in.	Registra pulsos proporcionales al caudal en el diámetro mayor.	Medir caudal para comparar el comportamiento hidráulico entre diámetros.
Pantalla Nextion de 7 in	Pantalla táctil de visualización.	Permite mostrar datos del ensayo de manera clara.	Visualizar caudal, velocidad, Reynolds y régimen de flujo durante la práctica.
Módulo dimmer AC 8 A 110/220 V con cruce por cero TTL	Módulo de control eléctrico para corriente alterna.	Permite regular gradualmente la alimentación de la bomba.	Modificar el caudal de operación durante el ensayo.
Bomba de agua a presión 1/2 HP QB60	Equipo de impulsión hidráulica del banco.	Suministra energía mecánica al agua y permite circulación continua.	Generar flujo en el circuito para alcanzar distintos regímenes.

Componente	Especificación	Función técnica	Función dentro del banco de pruebas
Estructura de madera	Soporte físico del banco de pruebas.	Brinda estabilidad y organiza los componentes.	Sostener bomba, conductos, sensores y elementos de control.
Mangueras transparentes	Conductos de ensayo para el paso del agua.	Permiten observar visualmente el comportamiento del flujo.	Conducir el fluido en los diámetros de 1/2 in y 3/4 in.
Uniones	Accesorios de conexión hidráulica.	Permiten acoplar mangueras, sensores y accesorios.	Garantizar continuidad del circuito y reducir fugas.
Codos de agua	Accesorios para cambio de dirección del flujo.	Facilitan el montaje del circuito en la estructura.	Dirigir el recorrido del agua dentro del banco.
Válvula	Elemento de regulación hidráulica.	Permite ajuste fino del caudal.	Controlar progresivamente el flujo durante la prueba.
Condensador para la bomba	Componente eléctrico auxiliar de la bomba.	Favorece el arranque y funcionamiento del motor.	Apoyar la operación estable de la bomba durante los ensayos.

Nota. La selección de materiales responde al criterio de bajo costo, disponibilidad y utilidad didáctica para laboratorio académico.

Bomba y control del caudal

La bomba de agua a presión 1/2 HP QB60 es el componente encargado de suministrar energía mecánica al fluido. En el banco de pruebas, su funcionamiento se complementa con un condensador para la bomba y con un módulo dimmer AC 8 A 110/220 V con cruce por cero TTL. Esta regulación permite modificar el caudal de manera gradual y acercarse al umbral de transición sin someter el sistema a incrementos bruscos de presión. La válvula complementa el control hidráulico del flujo porque permite realizar ajustes finos durante cada ensayo.

El caudal de la bomba es una variable de entrada indirecta porque determina la velocidad media dentro de la tubería. Si el caudal aumenta y el diámetro se mantiene constante, la velocidad media también aumenta y el número de Reynolds se incrementa. Por ello, la bomba no se analiza únicamente como un elemento de impulsión, sino como el dispositivo que permite llevar el fluido desde régimen laminar hacia transición y, cuando el sistema lo permite, hacia turbulencia.

Fluido de prueba

Se seleccionó agua como único fluido de prueba, debido a su disponibilidad, bajo costo, seguridad de manejo en laboratorio, comportamiento newtoniano y viscosidad cinemática conocida cercana a 1,004 cSt a 20 °C. Su uso permite desarrollar ensayos didácticos en un banco hidráulico cerrado sin introducir variaciones adicionales asociadas a

mezclas, concentración o fluidos de alta viscosidad. De esta manera, el análisis se concentra en el efecto del diámetro interno de la tubería y del caudal sobre la velocidad media, el número de Reynolds, la velocidad crítica y la pérdida de carga.

La elección del agua responde a tres razones principales. Primero, permite trabajar con un fluido seguro y de fácil recirculación dentro del sistema. Segundo, al mantener constante su viscosidad cinemática bajo temperatura controlada, facilita la comparación entre los diámetros de 1/2 in y 3/4 in. Tercero, su comportamiento newtoniano permite aplicar de forma directa la ecuación de Reynolds y las relaciones de continuidad y pérdida de carga sin introducir modelos reológicos adicionales. La literatura reciente sobre flujo en tuberías respalda el uso de agua en estudios de transición de régimen y análisis del número de Reynolds bajo condiciones experimentales controladas (Avila et al., 2023; Çengel & Cimbala, 2024; Mott & Untener, 2022).

Tabla 3

Propiedades del fluido de prueba

Fluido	Viscosidad cinemática	Densidad a 20 °C	Comportamiento	Función experimental
Agua	1,004 cSt	998 kg/m ³	Newtoniano	Fluido de prueba para analizar la influencia del diámetro, el caudal, la velocidad media, el número de Reynolds y la velocidad crítica.

Nota. Los valores corresponden a propiedades de referencia del agua a temperatura cercana a 20 °C y se utilizan para el procesamiento de Reynolds, velocidad crítica y pérdida de carga.

Tuberías y diámetros evaluados

Para estudiar la influencia del diámetro se emplearon dos tramos de manguera transparente con longitud horizontal de referencia de 1 m. Los diámetros internos considerados fueron aproximadamente 12,7 mm para el conducto nominal de 1/2 in y 19,05 mm para el conducto nominal de 3/4 in. El uso de mangueras transparentes permite una observación visual del comportamiento del flujo y facilita la finalidad didáctica del banco.

La comparación entre ambos diámetros permite verificar una de las relaciones centrales del estudio: a viscosidad constante, la velocidad crítica es inversamente

proporcional al diámetro. Esto significa que una tubería de menor diámetro puede sostener una mayor velocidad antes de alcanzar el mismo número de Reynolds crítico. Sin embargo, en términos de caudal, una tubería de mayor diámetro puede transportar un volumen mayor con menor velocidad media, lo cual debe considerarse al interpretar los resultados.

Tabla 4

Características geométricas de las tuberías

Tubería nominal	Diámetro interno D	Longitud L	Área transversal A	Propósito de comparación
1/2 in	0,01270 m	1,0 m	0,000127 m ²	Evaluar mayor velocidad crítica por menor diámetro.
3/4 in	0,01905 m	1,0 m	0,000285 m ²	Evaluar menor velocidad crítica y mayor caudal crítico.

Nota. El área fue calculada con $A = \pi D^2/4$ a partir de los diámetros internos indicados en el avance del proyecto.

Sensores y adquisición de datos

La medición del caudal se realizó mediante sensores de flujo de turbina con efecto Hall. Estos sensores generan pulsos eléctricos cuando el fluido hace girar la turbina interna. La frecuencia de pulsos se convierte en caudal mediante un factor de conversión propio del sensor y, a partir de ese caudal, el sistema calcula la velocidad media y el número de Reynolds. Este tipo de lectura se adapta al objetivo del banco, porque permite relacionar la frecuencia de operación de la bomba con una respuesta hidráulica visible para el estudiante.

La plataforma Arduino Uno se utilizó para calcular en tiempo real la velocidad media, el número de Reynolds y la clasificación del régimen. La pantalla Nextion de 7 in permitió visualizar los datos del ensayo y el régimen como LAM, TRA o TUR, facilitando la interpretación inmediata por parte del estudiante. Esta decisión metodológica responde al propósito didáctico del proyecto, ya que permite vincular el dato medido con el concepto físico observado en el banco de pruebas.

Tabla 5

Sistema de medición y procesamiento

Componente	Parámetro asociado	Rango o característica	Razón de selección
Sensor de flujo 1/2 in	Caudal Q	Salida por pulsos; efecto Hall	Permite medir el caudal en el conducto de 1/2 in.
Sensor de flujo 3/4 in	Caudal Q	Salida por pulsos; efecto Hall	Permite medir el caudal en el conducto de 3/4 in.
Arduino Uno	Procesamiento de datos	Entradas digitales y programación en IDE Arduino	Calcula V, Re y régimen en tiempo real.
Pantalla Nextion de 7 in	Visualización	Interfaz gráfica de 7 in	Muestra caudal, velocidad, Reynolds y régimen de flujo durante la práctica.
Módulo dimmer AC 8 A 110/220 V con cruce por cero TTL	Control de bomba	Regulación de alimentación AC	Permite variar el caudal gradualmente.

Nota. Las características se organizaron según la función experimental de cada elemento dentro del banco de pruebas.

Procedimiento experimental

- Se verificó el estado de la bomba, mangueras transparentes, uniones, codos, válvula, sensores y conexiones antes de iniciar cada ensayo.
- Se seleccionó agua como único fluido de prueba.
- Se instaló la manguera transparente correspondiente al diámetro a evaluar, 1/2 in o 3/4 in, manteniendo la longitud de ensayo de 1 m.
- Se mantuvo la temperatura ambiente controlada alrededor de 20 ± 1 °C para reducir variaciones de viscosidad.
- Se introdujo en el programa de Arduino la viscosidad cinemática de referencia del agua.
- Se encendió la bomba de agua a presión 1/2 HP QB60 y se incrementó gradualmente el caudal mediante el módulo dimmer AC 8 A 110/220 V con cruce por cero TTL y la válvula.
- El sensor de flujo correspondiente al diámetro evaluado registró la frecuencia de pulsos y el programa calculó caudal, velocidad media y número de Reynolds.
- Se clasificó el flujo como laminar, de transición o turbulento según los rangos establecidos de Reynolds.
- Se registraron los valores cada 2 s para formar una tabla de datos por diámetro evaluado.

- Finalmente, se compararon los valores experimentales con los valores teóricos de velocidad crítica.

Ecuaciones utilizadas para el procesamiento

El procesamiento de datos se realizó a partir de ecuaciones básicas de flujo interno en tuberías. Primero se calculó el área transversal de cada tubería mediante $A = \pi D^2/4$. Luego, con el caudal entregado por el sensor, se obtuvo la velocidad media mediante $V = Q/A$. Posteriormente se determinó el número de Reynolds mediante $Re = V \cdot D/\nu$, donde ν representa la viscosidad cinemática del fluido. La velocidad crítica se calculó con $V_c = 2100 \cdot \nu/D$, tomando $Re = 2100$ como umbral de inicio de transición.

Para estimar la pérdida de energía por fricción se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach, $hf = f \cdot (L/D) \cdot (V^2/2g)$. En régimen laminar se empleó $f = 64/Re$. Estas ecuaciones permitieron transformar datos físicos medidos o definidos en parámetros comparables entre diámetros y condiciones de operación. Además, se calculó el error porcentual entre la velocidad crítica experimental y la velocidad crítica teórica mediante la siguiente relación:

Error (%) = diferencia porcentual; $V_{c,exp}$ = velocidad crítica experimental (m/s); $V_{c,teo}$ = velocidad crítica teórica (m/s).

$$\text{Error (\%)} = |V_{c,exp} - V_{c,teo}| / V_{c,teo} \times 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Tabla 6

Ecuaciones de cálculo empleadas en el análisis

Ecuación	Expresión	Variable principal que permite obtener
Área transversal	$A = \pi D^2/4$	Área interna de la tubería
Continuidad	$Q = V \cdot A$; $V = Q/A$	Velocidad media del fluido
Número de Reynolds	$Re = V \cdot D/\nu$	Clasificación del régimen de flujo
Velocidad crítica	$V_c = 2100 \cdot \nu/D$	Umbral de transición del flujo
Pérdida de carga	$hf = f \cdot (L/D) \cdot (V^2/2g)$	Pérdida de energía por fricción
Factor laminar	$f = 64/Re$	Factor de fricción en régimen laminar

Nota. Las expresiones corresponden a relaciones clásicas de flujo interno en tuberías circulares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos técnicos del banco de pruebas físico

Para ordenar los resultados se tomó como base la información real del banco construido, porque el comportamiento del número de Reynolds depende de la lectura del caudalímetro, del diámetro de la tubería y de la frecuencia con la que trabaja la bomba. En este proyecto se emplearon dos sensores de flujo: uno instalado en la tubería de 1/2 in y otro en la tubería de 3/4 in. De esta forma, cada lectura de frecuencia permitió comparar cómo cambia el régimen de flujo en los dos diámetros del sistema.

Tabla 7

Datos principales del sistema físico de medición

Elemento del banco	Dato técnico principal	Uso dentro del análisis
Bomba de agua Kpro	110 VAC, 60 Hz, 4,8 A, monofásica	Impulsa el agua y permite variar la condición de operación mediante el variador.
Variador Optidrive E3	110-115 VAC, 50/60 Hz, 1 HP, 8,5 A	Permite trabajar con diferentes frecuencias de la bomba, especialmente 20, 40 y 60 Hz.
Arduino Uno	5 VDC, 13 pines digitales, 5 analógicos, 500 mA	Procesa las señales de los caudalímetros y permite calcular las variables del flujo.
Pantalla Nextion	5 VDC, comunicación I2C, 480 x 320 px	Muestra los datos en vivo del caudal, Reynolds y régimen de flujo.
Sensor de flujo 1/2 in YF-S201	5-18 VDC, 15 mA, 1-30 L/min, factor 7,5	Registra el caudal en la tubería de 1/2 in.
Sensor de flujo 3/4 in FS300A	5-24 VDC, 15 mA, 1-60 L/min, factor 5,5	Registra el caudal en la tubería de 3/4 in.
Luz piloto	12 VDC, 10 A	Indica el estado de activación del sistema eléctrico.

Nota. Los datos corresponden a la configuración física utilizada en el banco de pruebas y sirven como referencia para interpretar las lecturas obtenidas durante el funcionamiento del sistema.

Resultados del número de Reynolds a 20, 40 y 60 Hz

La frecuencia, expresada en hercios (Hz), representa el número de ciclos eléctricos por segundo suministrados al motor de la bomba. Al aumentar la frecuencia, se incrementan la velocidad de giro y el caudal impulsado. Se seleccionaron 20, 40 y 60 Hz como condiciones baja, intermedia y nominal de operación. En cada punto se comparó el número de Reynolds de las tuberías de 1/2 in y 3/4 in, considerando flujo laminar para $Re < 2100$, transición para $2100 \leq Re \leq 4000$ y flujo turbulento para $Re > 4000$.

Tabla 8

Número de Reynolds y régimen de flujo a 20, 40 y 60 Hz

Frecuencia de la bomba	Re tubería 1/2 in	Régimen 1/2 in	Re tubería 3/4 in	Régimen 3/4 in
20 Hz	7694	Turbulento	5423	Turbulento
40 Hz	15636	Turbulento	11318	Turbulento
60 Hz	24323	Turbulento	18712	Turbulento

Nota. La clasificación se realizó con el criterio $Re < 2100$ para flujo laminar, $2100 \leq Re \leq 4000$ para flujo de transición y $Re > 4000$ para flujo turbulento.

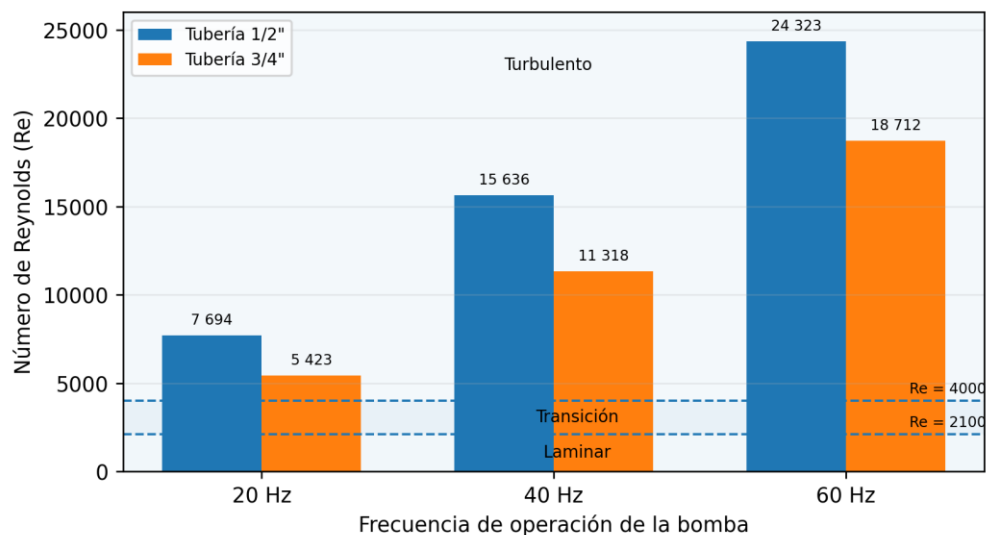
Registro utilizado para identificar el cambio de régimen

Tubería	Frecuencia observada	Número de Reynolds	Interpretación
1/2 in	10 Hz	2730	Flujo en transición
1/2 in	13 Hz	Mayor que 4000	Inicio del régimen turbulento
3/4 in	10 Hz	1886	Flujo laminar
3/4 in	11 a 15 Hz	Entre 2100 y 4000	Zona de transición
3/4 in	16 Hz	Mayor que 4000	Inicio del régimen turbulento

Nota. La tabla reúne únicamente los valores registrados en el documento para ubicar el paso de flujo laminar a transición y posteriormente a turbulento.

Figura 3

Comparación del número de Reynolds a 20, 40 y 60 Hz



Nota. Las líneas horizontales marcan los límites de referencia para régimen laminar, transición y turbulento.

Fuente: elaboración propia a partir del registro del banco de pruebas.

Identificación del cambio de régimen

La velocidad crítica teórica se calculó con agua a 20 °C ($\nu = 1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Para la tubería de 1/2 in ($D = 0,01270 \text{ m}$) se obtuvo $V_c = 0,166 \text{ m/s}$ y un caudal crítico aproximado de 1,26 L/min. En el registro experimental, a 10 Hz se alcanzó $Re = 2730$, correspondiente a transición; desde 13 Hz se superó $Re = 4000$. Por tanto, el cambio de régimen ocurrió antes de la primera condición comparativa de 20 Hz.

Para la tubería de 3/4 in ($D = 0,01905 \text{ m}$) se obtuvo $V_c = 0,111 \text{ m/s}$ y un caudal crítico aproximado de 1,90 L/min. A 10 Hz se registró $Re = 1886$, todavía laminar; entre 11 y 15 Hz el flujo se ubicó en transición y desde 16 Hz superó $Re = 4000$. El diámetro mayor presentó una velocidad crítica menor, pero necesitó un caudal crítico superior por su mayor área transversal.

Con esta lectura, los puntos de 20, 40 y 60 Hz solicitados para la comparación principal ya se encuentran en régimen turbulento para ambas tuberías. Sin embargo, el valor del Reynolds no es igual: la tubería de 1/2 in presenta siempre valores mayores que la de 3/4 in. Esto permite ver de manera práctica que la frecuencia de la bomba aumenta el caudal y la velocidad, pero el diámetro del conducto define qué tan rápido el flujo llega a la zona turbulenta.

Discusión técnica de los resultados

Los resultados obtenidos ayudan a conectar el cálculo de Reynolds con el funcionamiento real del banco. En la práctica, el sistema no solo entrega un número en la pantalla, sino que permite interpretar si el flujo todavía es ordenado, si se encuentra en transición o si ya presenta una condición turbulenta. Esta lectura es importante para una práctica de mecánica de fluidos, porque el estudiante puede relacionar la frecuencia de la bomba con el caudal medido, la velocidad media y el régimen de flujo.

Desde el punto de vista automotriz, este comportamiento se relaciona con sistemas donde el fluido debe circular por conductos de diámetro reducido, como refrigeración, lubricación, frenos, alimentación o inyección. Si la bomba trabaja a mayor frecuencia o si el paso del fluido se restringe, la velocidad puede aumentar y el flujo puede llegar más rápido a la zona turbulenta. En esas condiciones también pueden incrementarse las pérdidas de energía, las vibraciones y la posibilidad de fenómenos como cavitación o golpe de ariete.

Por esta razón, el aporte del banco de pruebas no está únicamente en calcular la velocidad crítica de manera teórica, sino en mostrar cómo los datos medidos en vivo se transforman en una clasificación del flujo. El caudalímetro entrega la lectura de caudal; con el diámetro se obtiene el área; con el área se calcula la velocidad media; y con la velocidad, el diámetro y la viscosidad cinemática del agua se determina el número de Reynolds. Esta secuencia permite que el análisis sea comprensible y verificable dentro del laboratorio.

Alcance del banco de pruebas

El banco de pruebas permite analizar el comportamiento del flujo con agua como fluido de ensayo y con dos diámetros de tubería. El sistema es útil para observar el efecto de la frecuencia de la bomba sobre el Reynolds y para comparar el comportamiento de las tuberías de 1/2 in y 3/4 in. No obstante, los resultados deben interpretarse considerando que se trabaja con sensores comerciales, con una bomba de agua a presión y con un sistema didáctico de bajo costo, por lo que pueden existir pequeñas variaciones por calibración, estabilidad del caudal y condiciones de instalación.

Aun con esas limitaciones, los datos permiten cumplir el objetivo del proyecto, porque muestran en qué momento el flujo se identifica como laminar, de transición o turbulento. Además, el gráfico de barras facilita comparar visualmente los dos caudalímetros y confirma que, para 20, 40 y 60 Hz, ambos diámetros trabajan dentro de la zona turbulenta, aunque la tubería de 1/2 in alcanza valores de Reynolds más altos.

CONCLUSIONES

La fundamentación teórica permitió establecer cualitativamente que la velocidad crítica y el régimen de flujo dependen de la relación entre caudal, diámetro, viscosidad cinemática y número de Reynolds. El banco hidráulico integra medición, procesamiento y visualización en tiempo real, por lo que constituye una herramienta didáctica adecuada para interpretar el comportamiento de fluidos en circuitos automotrices.

La evaluación experimental a 20, 40 y 60 Hz evidenció régimen turbulento en los dos diámetros. La tubería de 1/2 in alcanzó números de Reynolds de 7694, 15636 y 24323, mientras que la tubería de 3/4 in registró 5423, 11318 y 18712. Las velocidades críticas teóricas fueron 0,166 m/s y 0,111 m/s, respectivamente; el registro mostró que la transición se presentó antes de 20 Hz en ambos conductos.

La comparación de resultados confirmó que la tubería de 1/2 in genera mayores velocidades medias y números de Reynolds para condiciones semejantes, por lo que alcanza antes el cambio de régimen. La tubería de 3/4 in presentó menor velocidad crítica, pero un caudal crítico superior (1,90 L/min frente a 1,26 L/min). Esta diferencia explica por qué la selección del diámetro influye en las pérdidas de energía y en la sensibilidad frente a cavitación, vibraciones y transitorios de presión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2024). ASTM D445-24: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity).
<https://store.astm.org/d0445-24.html>
- Avila Sánchez, I. A., Proaño Proaño, M. A., & Ulco Guambi, M. A. (2023). Análisis del sistema hidráulico y electrónico en inyectores CRDI [Tesis de pregrado, Universidad Internacional del Ecuador]. Repositorio Digital UIDE.
<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077>
- Avila, M., Barkley, D., & Hof, B. (2023). Transition to turbulence in pipe flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 55, 575–602. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957>
- Britton, L. G., & Willey, R. J. (2024). Avoiding water hammer and other hydraulic transients. *Process Safety Progress*, 43(1), 101–112. <https://doi.org/10.1002/prs.12517>
- Cerbus, R. T. (2022). Prandtl–Tietjens intermittency in transitional pipe flows. *Physical Review Fluids*, 7, L011901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.L011901>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2024). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (5th ed.). McGraw Hill.

- Chen, K., Xu, D., & Song, B. (2022). Propagation speed of turbulent fronts in pipe flow at high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 935, A11. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1160>
- Frishman, A., & Grafke, T. (2022). Dynamical landscape of transitional pipe flow. *Physical Review E*, 105(4), 045108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108>
- Hao, Y., Hao, J., Zhu, Z., Su, X., Lu, W., Gruszczynski, M., Ding, Q., & Gao, P. (2022). Review of the hydraulic and structural design of high-speed centrifugal pumps. *Frontiers in Energy Research*, 10, 899093. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899093>
- He, X., Song, Y., Wu, K., Ali, A., Shen, C., & Si, Q. (2022). Intelligent identification of cavitation state of centrifugal pump based on support vector machine. *Energies*, 15(23), 8907. <https://doi.org/10.3390/en15238907>
- ISO. (2022). ISO 5167-1:2022: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full—Part 1: General principles and requirements. International Organization for Standardization.
- ISO. (2023). ISO 3104:2023: Petroleum products—Transparent and opaque liquids—Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity. International Organization for Standardization.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2022). *Applied fluid mechanics* (8th ed.). Pearson.
- Stajuda, L., Levchenko, D., Kubiak, P., Siczek, K., Boguslawski, G., Kuchar, M., Wozniak, M., Szymczyk, M., Ozuna, G., & Siczek, K. (2024). Composition, features, problems, and treatment related to cooling fluid—A review. *Combustion Engines*, 196(1), 106–125. <https://doi.org/10.19206/CE-169185>
- Wu, K., Ali, A., Feng, C., Si, Q., Chen, Q., & Shen, C. (2022). Numerical study on the cavitation characteristics of micro automotive electronic pumps under thermodynamic effect. *Micromachines*, 13(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/mi13071063>

Ye, K., He, D., Zhao, L., & Guo, P. (2022). Influence of fluid viscosity on cavitation characteristics of a helico-axial multiphase pump (HAMP). *Energies*, 15(21), 8149.
<https://doi.org/10.3390/en15218149>

ANEXOS

Anexo A. Matriz para registro de datos experimentales

La siguiente matriz organiza las lecturas del sensor, los cálculos realizados y la clasificación del régimen de flujo. Debe completarse durante cada ensayo con agua para comparar los valores medidos con los resultados teóricos en los dos diámetros evaluados.

Tabla 9

Matriz de registro para ensayos del banco hidráulico

Tiempo (s)	Fluido	D (m)	f (Hz)	Q (L/min)	V (m/s)	Re	Régimen	Observación
2	Agua							
4	Agua							
6	Agua							
8	Agua							
10	Agua							

Nota. La matriz conserva el orden de cálculo utilizado por el programa: frecuencia del sensor, caudal, velocidad media, Reynolds y régimen de flujo.

Anexo B. Secuencia básica del algoritmo de cálculo

El algoritmo implementado en Arduino sigue una secuencia sencilla para que el estudiante pueda relacionar el dato medido con el resultado hidráulico. Primero se registra la frecuencia de pulsos del sensor de flujo. Luego se convierte la frecuencia en caudal mediante la relación de calibración $Q = f/5,5$. Después se transforma el caudal a unidades del Sistema Internacional, se calcula el área de la tubería, la velocidad media, el número de Reynolds y la velocidad crítica. Finalmente, el programa clasifica el régimen como LAM, TRA o TUR y muestra el resultado en la pantalla Nextion de 7 in.

Tabla 10

Secuencia de cálculo del programa de adquisición

Paso	Operación	Resultado
1	Leer pulsos del sensor Hall	Frecuencia f en Hz
2	Aplicar $Q = f/5,5$	Caudal en L/min
3	Convertir caudal a m^3/s	Q en unidades SI
4	Calcular $A = \pi D^2/4$	Área interna de la tubería
5	Calcular $V = Q/A$	Velocidad media
6	Calcular $Re = V \cdot D/\nu$	Número de Reynolds
7	Comparar Re con 2100, 4000 y 10000	Clasificación del régimen

Nota. El algoritmo resume la lógica de procesamiento usada para convertir una señal eléctrica en una interpretación de flujo.

Anexo C. ASTM D445-24: determinación de viscosidad cinemática

Referencia: ASTM International. (2024). ASTM D445-24: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). <https://store.astm.org/d0445-24.html>



store.astm.org

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

ASTM D445-24 - Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids

Autoría / entidad	ASTM International
Publicación	Edición 2024; Book of Standards, volumen 05.01; 16 páginas
Identificador	DOI 10.1520/D0445-24
Tipo de fuente	Norma técnica
Estado de acceso	Ficha oficial pública; texto completo sujeto a compra/licencia
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Enlace verificado
<https://store.astm.org/d0445-24.html>

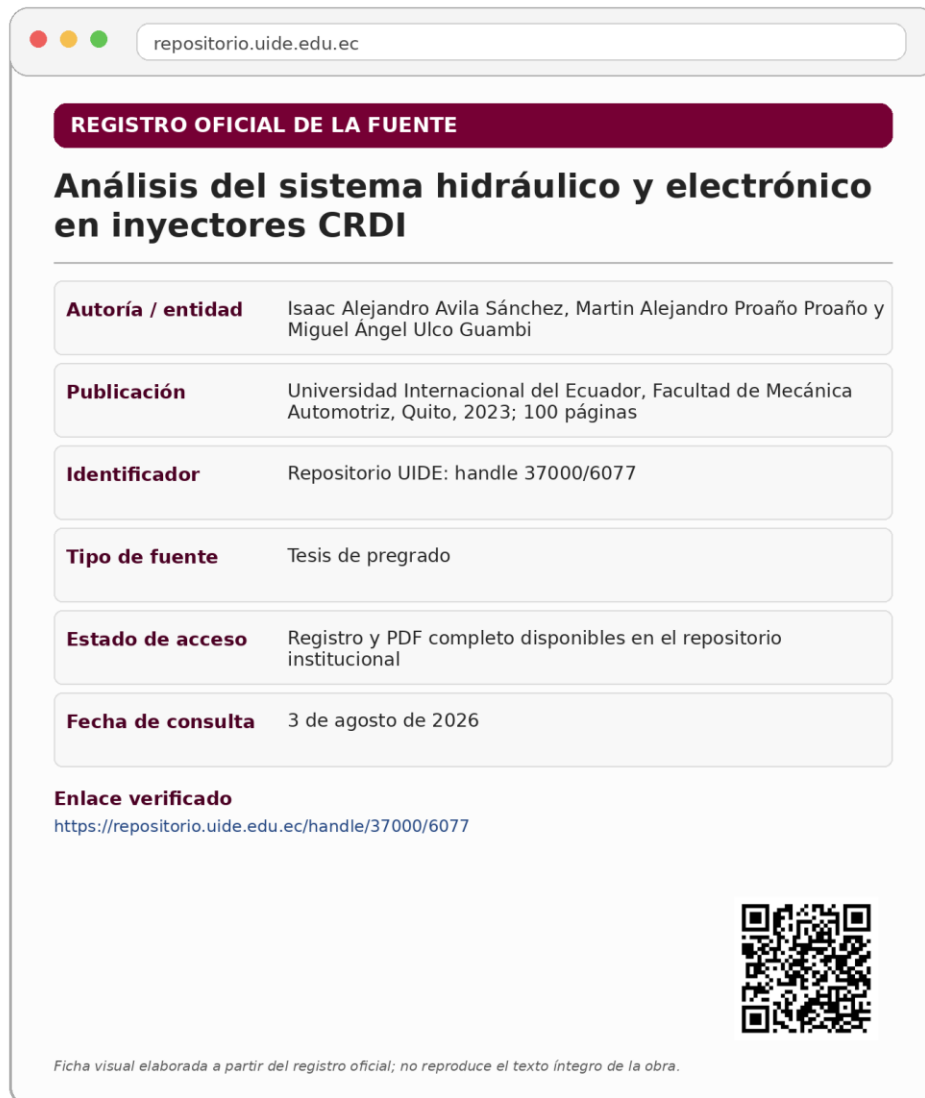


Ficha visual elaborada a partir del registro oficial; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura C. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo D. Tesis UIDE sobre sistemas hidráulicos y electrónicos en inyectores CRDI

Referencia: Avila Sánchez, I. A., Proaño Proaño, M. A., & Ulco Guambi, M. A. (2023). Análisis del sistema hidráulico y electrónico en inyectores CRDI [Tesis de pregrado, Universidad Internacional del Ecuador]. Repositorio Digital UIDE. <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077>



repositorio.uide.edu.ec

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Análisis del sistema hidráulico y electrónico en inyectores CRDI

Autoría / entidad	Isaac Alejandro Avila Sánchez, Martin Alejandro Proaño Proaño y Miguel Ángel Ulco Guambi
Publicación	Universidad Internacional del Ecuador, Facultad de Mecánica Automotriz, Quito, 2023; 100 páginas
Identificador	Repositorio UIDE: handle 37000/6077
Tipo de fuente	Tesis de pregrado
Estado de acceso	Registro y PDF completo disponibles en el repositorio institucional
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Enlace verificado
<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077>

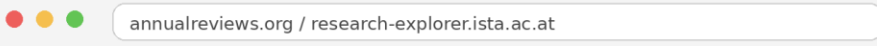


Ficha visual elaborada a partir del registro oficial; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura D. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo E. Transición a la turbulencia en tuberías

Referencia: Avila, M., Barkley, D., & Hof, B. (2023). Transition to turbulence in pipe flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 55, 575–602. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957>



REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Transition to Turbulence in Pipe Flow

Autoría / entidad	Marc Avila, Dwight Barkley y Björn Hof
Publicación	Annual Review of Fluid Mechanics, volumen 55, páginas 575-602, 2023
Identificador	DOI 10.1146/annurev-fluid-120720-025957
Tipo de fuente	Artículo científico de revisión
Estado de acceso	Acceso abierto con licencia CC BY 4.0
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Enlace verificado
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957>



Ficha visual elaborada a partir del registro oficial; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura E. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo F. Golpe de ariete y transitorios hidráulicos

Referencia: Britton, L. G., & Willey, R. J. (2024). Avoiding water hammer and other hydraulic transients. Process Safety Progress, 43(1), 101–112. <https://doi.org/10.1002/prs.12517>

aiiche.onlinelibrary.wiley.com

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Avoiding Water Hammer and Other Hydraulic Transients

Autoría / entidad

Laurence G. Britton y Ronald J. Willey

Publicación

Process Safety Progress, volumen 43, número 1, páginas 101-112, 2024

Identificador

DOI 10.1002/prs.12517

Tipo de fuente

Artículo científico

Estado de acceso

Artículo de acceso abierto en Wiley Online Library

Fecha de consulta

3 de agosto de 2026

Enlace verificado

<https://doi.org/10.1002/prs.12517>



Ficha visual elaborada a partir del registro oficial; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura F. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo G. Flujo transicional en tuberías

Referencia: Cerbus, R. T. (2022). Prandtl–Tietjens intermittency in transitional pipe flows. *Physical Review Fluids*, 7, L011901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.L011901>



Figura G. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo H. Fundamentos de mecánica de fluidos

Referencia: Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2024). Fluid mechanics: Fundamentals and applications (5th ed.). McGraw Hill.

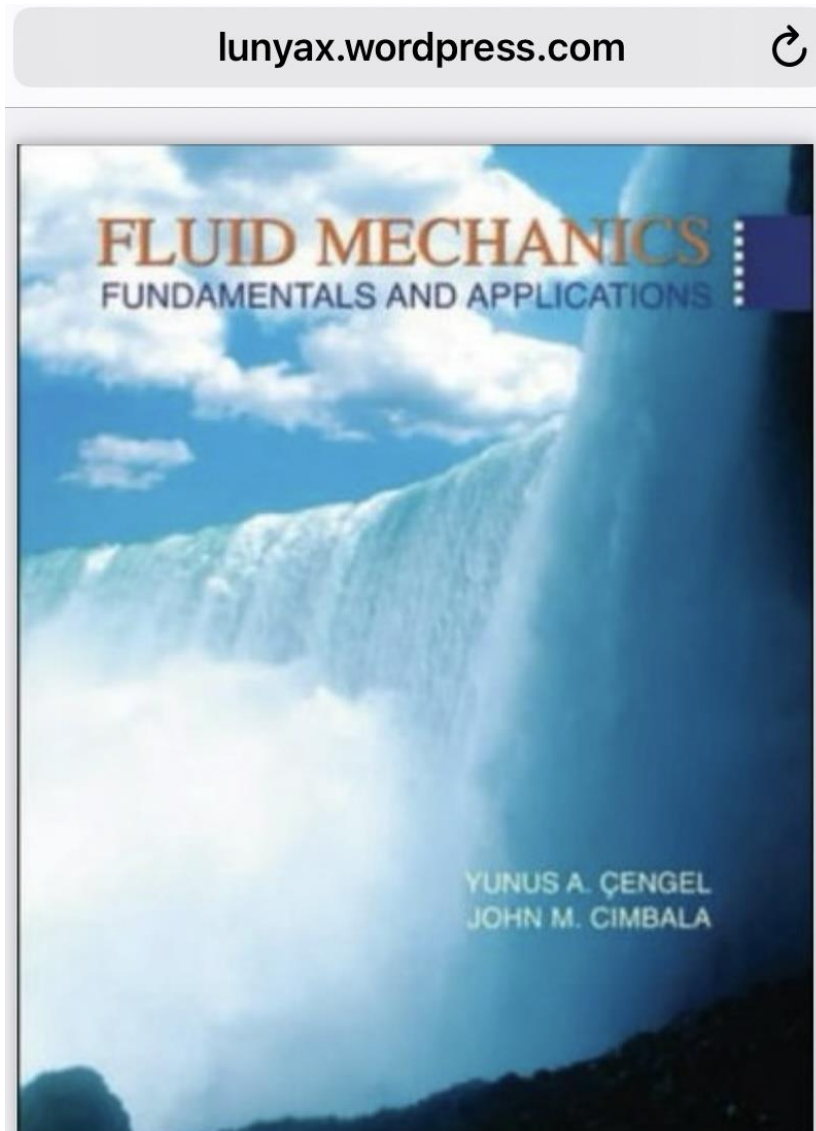
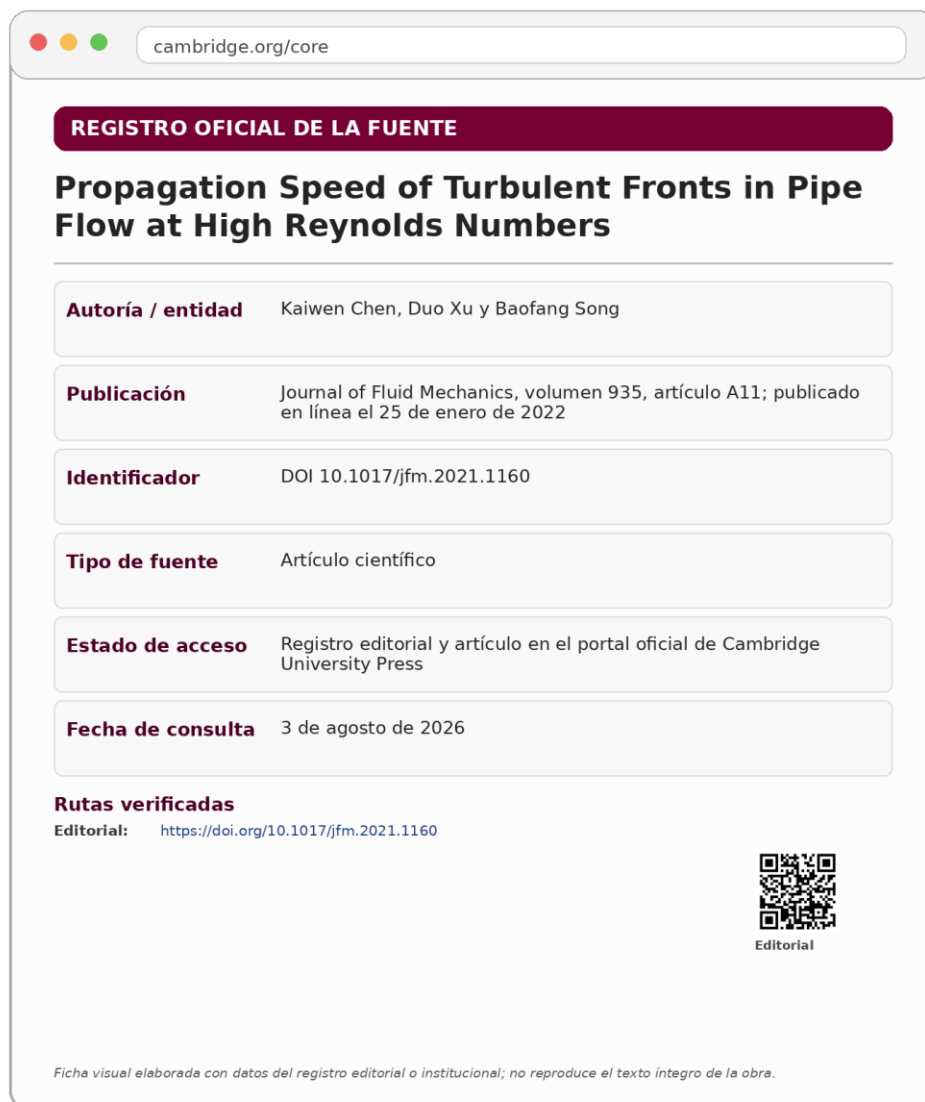


Figura H. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo I. Propagación de frentes turbulentos

Referencia: Chen, K., Xu, D., & Song, B. (2022). Propagation speed of turbulent fronts in pipe flow at high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 935, A11. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1160>



cambridge.org/core

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Propagation Speed of Turbulent Fronts in Pipe Flow at High Reynolds Numbers

Autoría / entidad	Kaiwen Chen, Duo Xu y Baofang Song
Publicación	Journal of Fluid Mechanics, volumen 935, artículo A11; publicado en línea el 25 de enero de 2022
Identificador	DOI 10.1017/jfm.2021.1160
Tipo de fuente	Artículo científico
Estado de acceso	Registro editorial y artículo en el portal oficial de Cambridge University Press
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Rutas verificadas
Editorial: <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1160>

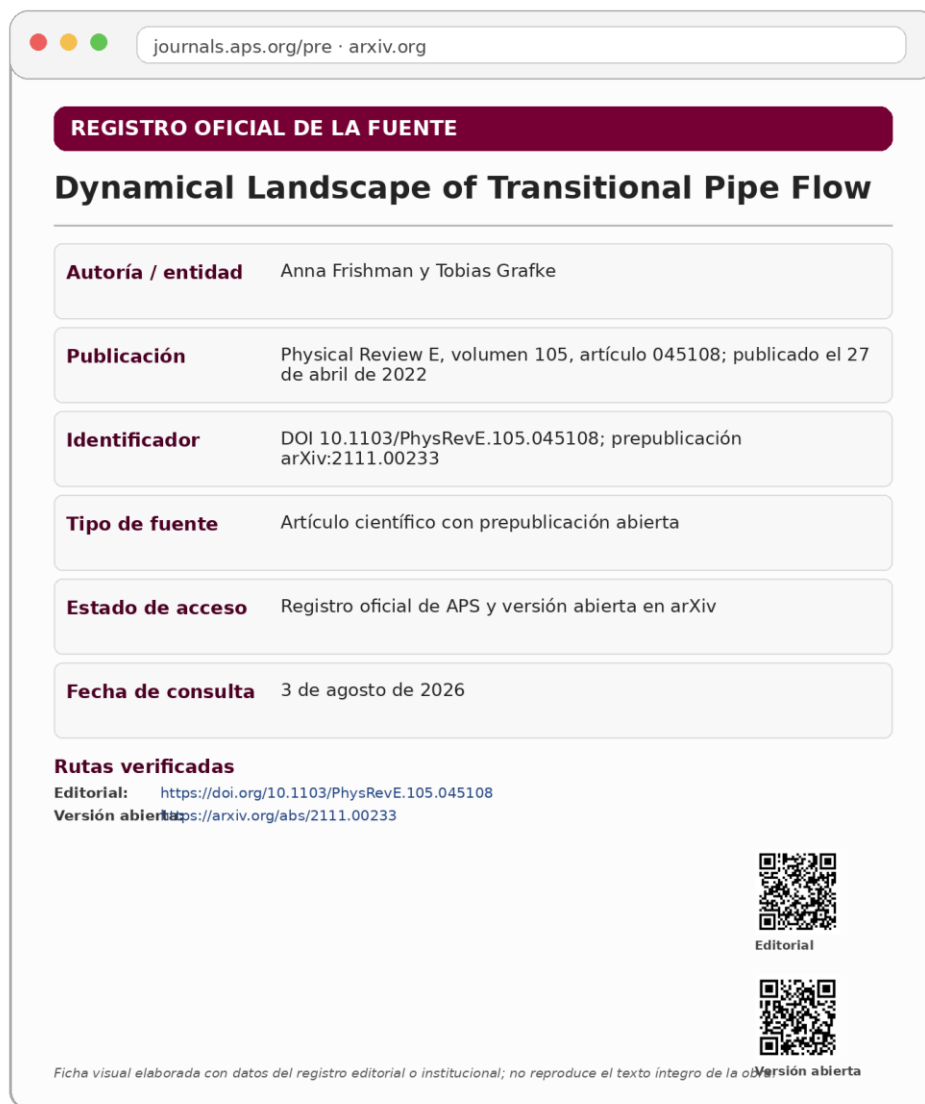

Editorial

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura I. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo J. Paisaje dinámico del flujo transicional

Referencia: Frishman, A., & Grafke, T. (2022). Dynamical landscape of transitional pipe flow. *Physical Review E*, 105(4), 045108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108>



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying "journals.aps.org/pre · arxiv.org". The main content area features a dark red header with the text "REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE". Below this, the title "Dynamical Landscape of Transitional Pipe Flow" is prominently displayed. The page lists the authors as Anna Frishman and Tobias Grafke, the publication as Physical Review E, volume 105, article 045108, published on April 27, 2022. It also provides the DOI 10.1103/PhysRevE.105.045108 and the preprint identifier arXiv:2111.00233. The source type is identified as an open preprint scientific article, and the access status is noted as the official APS record and open version on arXiv. The consultation date is August 3, 2026. Under "Verified routes", it lists the editorial URL and the open version URL. Two QR codes are provided for the editorial and open version links. A footer note states that the visual card is based on editorial or institutional records and does not reproduce the full text of the open version.

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE
Dynamical Landscape of Transitional Pipe Flow
Autoría / entidad Anna Frishman y Tobias Grafke
Publicación Physical Review E, volumen 105, artículo 045108; publicado el 27 de abril de 2022
Identificador DOI 10.1103/PhysRevE.105.045108; prepublicación arXiv:2111.00233
Tipo de fuente Artículo científico con prepublicación abierta
Estado de acceso Registro oficial de APS y versión abierta en arXiv
Fecha de consulta 3 de agosto de 2026
Rutas verificadas
Editorial: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108
Versión abierta: https://arxiv.org/abs/2111.00233

Editorial

Versión abierta

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra

Figura J. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo K. Diseño hidráulico y estructural de bombas centrífugas

Referencia: Hao, Y., Hao, J., Zhu, Z., Su, X., Lu, W., Gruszczynski, M., Ding, Q., & Gao, P. (2022). Review of the hydraulic and structural design of high-speed centrifugal pumps. *Frontiers in Energy Research*, 10, 899093. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899093>

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Review of the Hydraulic and Structural Design of High-Speed Centrifugal Pumps

Autoría / entidad

Yang Hao; Jia Hao; Zhu Zuchao; Su Xianghui; Lu Wenqi; Maciej Gruszczynski; Ding Qiangmin; Gao Panlong

Publicación

Frontiers in Energy Research, volumen 10; artículo de revisión publicado el 24 de junio de 2022

Identificador

DOI 10.3389/fenrg.2022.899093

Tipo de fuente

Artículo de revisión científica de acceso abierto

Estado de acceso

Texto completo disponible en el portal oficial de Frontiers

Fecha de consulta

3 de agosto de 2026

Rutas verificadas

Editorial:

<https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2022.899093/full>

DOI:

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899093>

Editorial

DOI

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura K. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo L. Identificación del estado de cavitación

Referencia: He, X., Song, Y., Wu, K., Ali, A., Shen, C., & Si, Q. (2022). Intelligent identification of cavitation state of centrifugal pump based on support vector machine. *Energies*, 15(23), 8907. <https://doi.org/10.3390/en15238907>

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

Intelligent Identification of Cavitation State of Centrifugal Pump Based on Support Vector Machine

Autoría / entidad	Xiaoke He; Yu Song; Kaipeng Wu; Asad Ali; Chunhao Shen; Qiaorui Si
Publicación	Energies, volumen 15, número 23, artículo 8907; publicado el 25 de noviembre de 2022
Identificador	DOI 10.3390/en15238907
Tipo de fuente	Artículo científico de acceso abierto
Estado de acceso	Texto completo y PDF disponibles en MDPI
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Rutas verificadas
 Editorial: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8907>
 DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238907>



Editorial



DOI

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura L. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo M. ISO 5167-1:2022: medición de flujo

Referencia: International Organization for Standardization. (2022). ISO 5167-1:2022: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full—Part 1: General principles and requirements.

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

ISO 5167-1:2022 — Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices

Entidad	International Organization for Standardization (ISO)
Edición / fecha	Tercera edición; publicada en junio de 2022
Alcance oficial	Principios generales, términos, símbolos, requisitos de medición, instalación y estimación de incertidumbre para flujo en conductos circulares llenos
Número de páginas	42 páginas, según la ficha oficial
Estado de acceso	Ficha y resumen públicos; texto íntegro sujeto a licencia ISO
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Rutas verificadas

Ficha ISO: <https://www.iso.org/standard/79179.html>



Ficha ISO

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura M. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo N. ISO 3104:2023: determinación de viscosidad

Referencia: International Organization for Standardization. (2023). ISO 3104:2023: Petroleum products—Transparent and opaque liquids—Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO OFICIAL DE LA FUENTE

ISO 3104:2023 — Determination of Kinematic Viscosity and Calculation of Dynamic Viscosity

Entidad	International Organization for Standardization (ISO)
Edición / fecha	Cuarta edición; publicada en noviembre de 2023
Alcance oficial	Procedimientos con viscosímetros capilares para determinar viscosidad cinemática y calcular viscosidad dinámica
Número de páginas	25 páginas, según la ficha oficial
Estado de acceso	Ficha, resumen y vista previa pública; texto íntegro sujeto a licencia ISO
Fecha de consulta	3 de agosto de 2026

Rutas verificadas
Ficha ISO: <https://www.iso.org/standard/81853.html>


Ficha ISO

Ficha visual elaborada con datos del registro editorial o institucional; no reproduce el texto íntegro de la obra.

Figura N. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo O. Mecánica de fluidos aplicada

Referencia: Mott, R. L., & Untener, J. A. (2022). Applied fluid mechanics (8th ed.). Pearson.

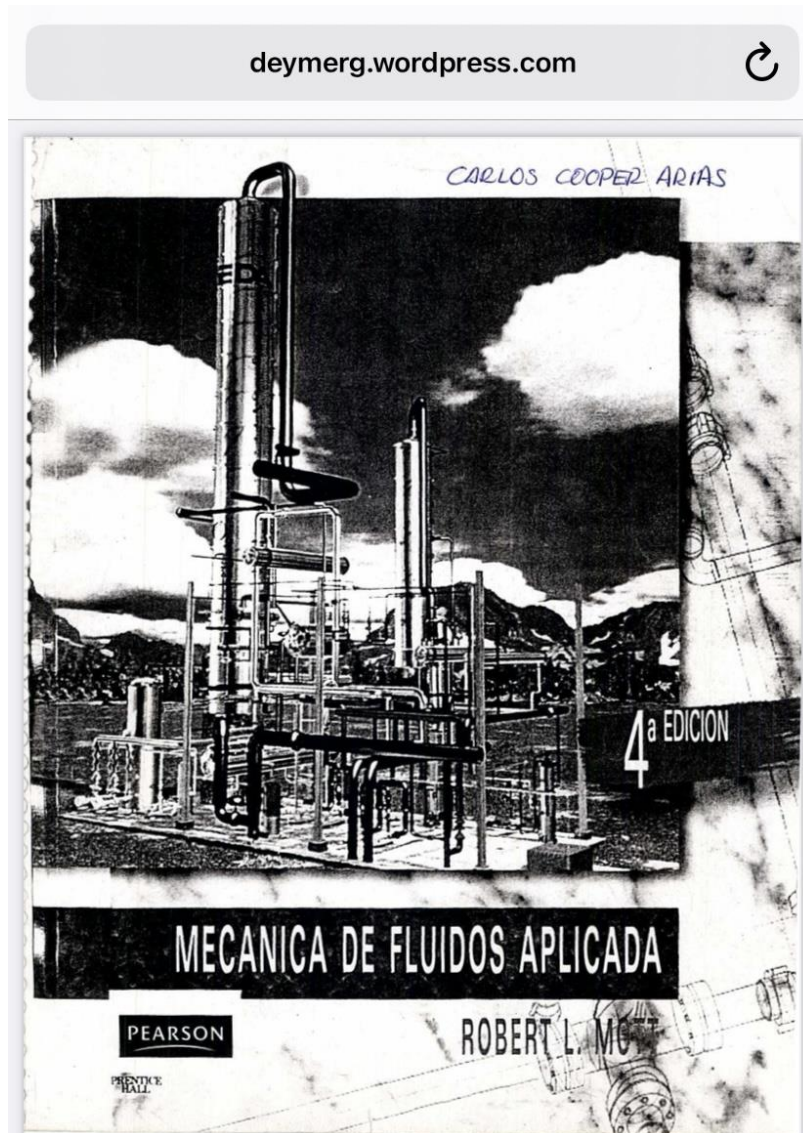


Figura O. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo P. Fluidos refrigerantes automotrices

Referencia: Stajuda, L., Levchenko, D., Kubiak, P., Siczek, K., Boguslawski, G., Kuchar, M., Wozniak, M., Szymczyk, M., Ozuna, G., & Siczek, K. (2024). Composition, features, problems, and treatment related to cooling fluid—A review. *Combustion Engines*, 196(1), 106–125. <https://doi.org/10.19206/CE-169185>

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO DE LA FUENTE

Composition, features, problems, and treatment related to cooling fluid - a review

Publicación	Combustion Engines, 196(1), 106-125
Año	2024
Identificador	DOI: 10.19206/CE-169185
Tipo de fuente	Artículo científico / revisión

Descripción pública de la fuente

Revisión sobre composición, funciones, problemas de operación y métodos de sustitución de los fluidos refrigerantes utilizados en vehículos.

Ruta verificada

<https://www.combustion-engines.eu/Composition-features-problems-and-treatment-related-to-cooling-fluid-a-review,169185,0,2.html>



Fuente oficial

Captura de identificación elaborada con datos visibles en el registro oficial de la publicación.

Figura P. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo Q. Cavitación en bombas electrónicas automotrices

Referencia: Wu, K., Ali, A., Feng, C., Si, Q., Chen, Q., & Shen, C. (2022). Numerical study on the cavitation characteristics of micro automotive electronic pumps under thermodynamic effect. *Micromachines*, 13(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/mi13071063>

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO DE LA FUENTE

Numerical Study on the Cavitation Characteristics of Micro Automotive Electronic Pumps under Thermodynamic Effect

Publicación

Micromachines, 13(7), 1063

Año

2022

Identificador

DOI: 10.3390/mi13071063

Tipo de fuente

Artículo científico / revisión

Descripción pública de la fuente

Estudio numérico y experimental de la cavitación en una bomba electrónica automotriz a diferentes temperaturas y puntos de operación.

Ruta verificada

<https://www.mdpi.com/2072-666X/13/7/1063>



Fuente oficial

Captura de identificación elaborada con datos visibles en el registro oficial de la publicación.

Figura Q. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo R. Influencia de la viscosidad sobre la cavitación

Referencia: Ye, K., He, D., Zhao, L., & Guo, P. (2022). Influence of fluid viscosity on cavitation characteristics of a helico-axial multiphase pump (HAMP). *Energies*, 15(21), 8149. <https://doi.org/10.3390/en15218149>

Registro editorial / institucional verificado

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO DE LA FUENTE

Influence of Fluid Viscosity on Cavitation Characteristics of a Helico-Axial Multiphase Pump (HAMP)

Publicación	Energies, 15(21), 8149
Año	2022
Identificador	DOI: 10.3390/en15218149
Tipo de fuente	Artículo científico / revisión

Descripción pública de la fuente

Investigación numérica y experimental sobre el efecto de distintos valores de viscosidad cinemática en la cavitación de una bomba multifásica helico-axial.

Ruta verificada

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/8149>

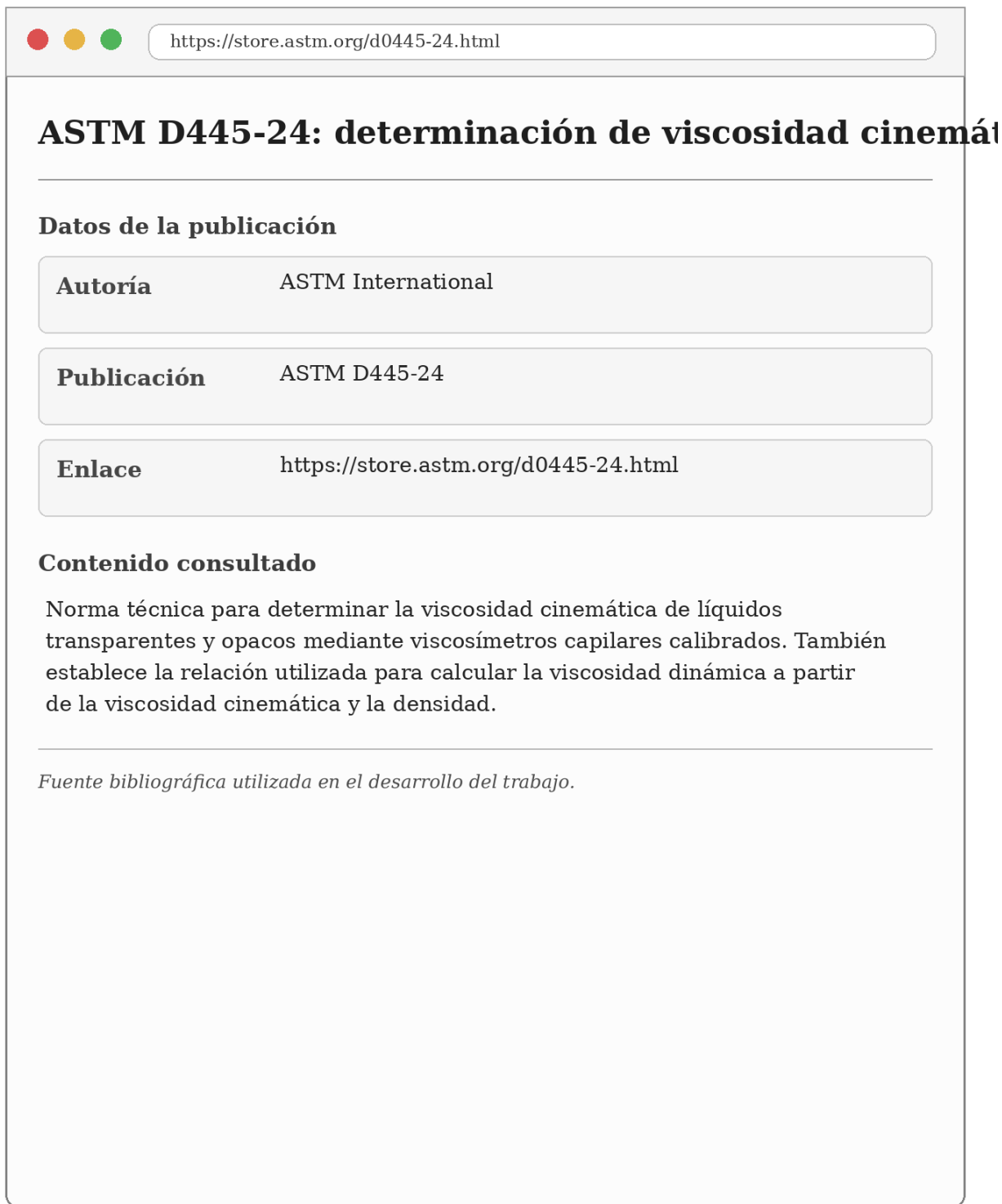


Fuente oficial

Captura de identificación elaborada con datos visibles en el registro oficial de la publicación.

Figura R. Registro de la fuente bibliográfica consultada.

Anexo C. ASTM D445-24: determinación de viscosidad cinemática (continuación)



The image is a screenshot of a web browser window displaying the ASTM D445-24 standard. The browser's address bar shows the URL <https://store.astm.org/d0445-24.html>. The page title is "ASTM D445-24: determinación de viscosidad cinemática". Below the title, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data) which contains three entries: "Autoría" (Author) is "ASTM International", "Publicación" (Publication) is "ASTM D445-24", and "Enlace" (Link) is <https://store.astm.org/d0445-24.html>. Below this section is "Contenido consultado" (Content consulted), which describes the standard as a technical norm for determining the kinematic viscosity of transparent and opaque liquids using calibrated capillary viscometers, and also establishes the relationship used to calculate dynamic viscosity from kinematic viscosity and density. At the bottom, a note states "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

ASTM D445-24: determinación de viscosidad cinemática

Datos de la publicación

Autoría	ASTM International
Publicación	ASTM D445-24
Enlace	https://store.astm.org/d0445-24.html

Contenido consultado

Norma técnica para determinar la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos mediante viscosímetros capilares calibrados. También establece la relación utilizada para calcular la viscosidad dinámica a partir de la viscosidad cinemática y la densidad.

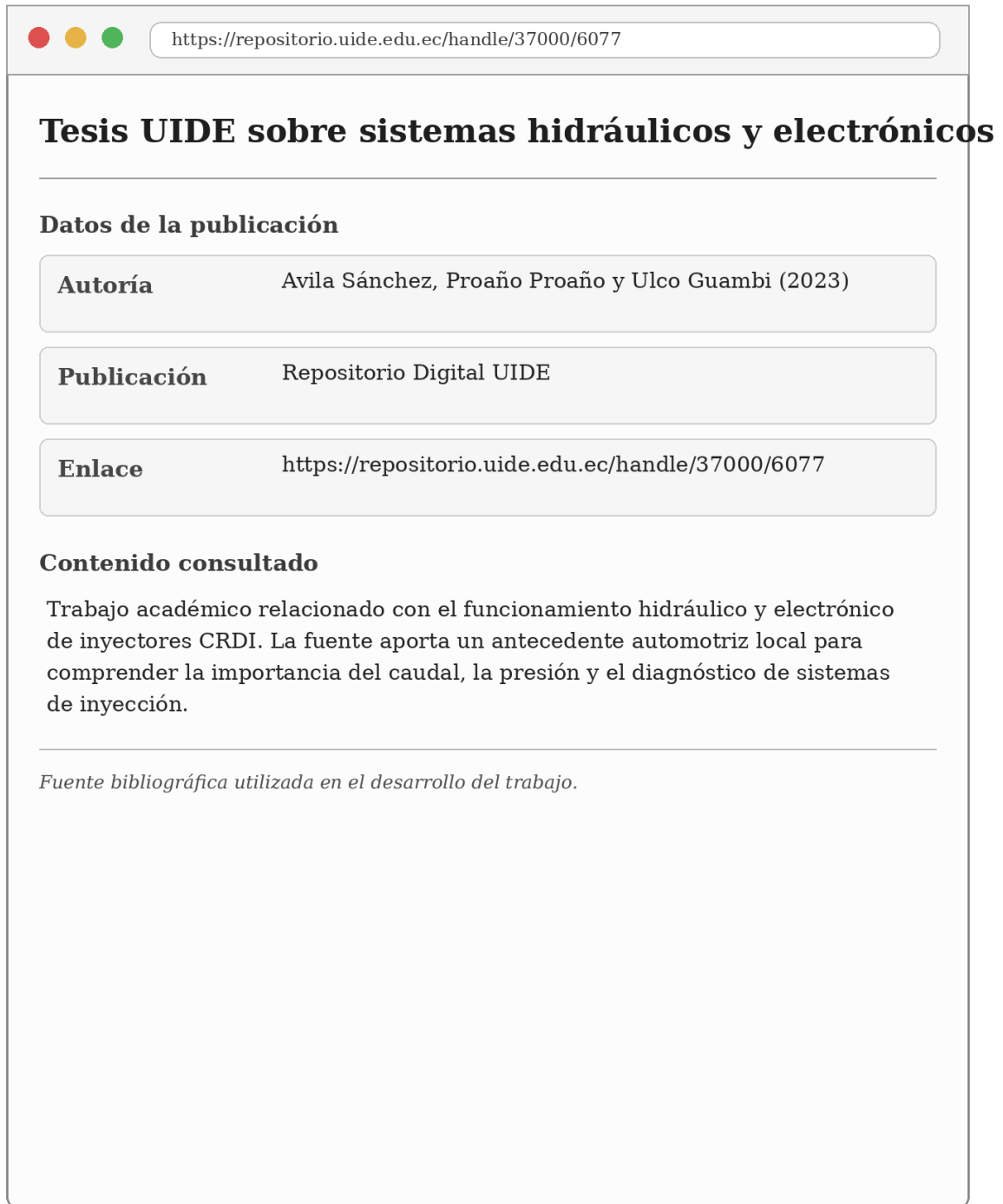
Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura C.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: ASTM International.

Anexo D. Tesis UIDE sobre sistemas hidráulicos y electrónicos en inyectores

CRDI (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the URL <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077> in the address bar. The page title is "Tesis UIDE sobre sistemas hidráulicos y electrónicos". Below the title, there is a section "Datos de la publicación" (Publication Data) containing three entries: "Autoría" (Authorship) as "Avila Sánchez, Proaño Proaño y Ulco Guambi (2023)", "Publicación" (Publication) as "Repositorio Digital UIDE", and "Enlace" (Link) as "https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077". Below this is a section "Contenido consultado" (Content consulted) with a paragraph describing the academic work related to the hydraulic and electronic functioning of CRDI injectors. At the bottom, there is a note: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

Tesis UIDE sobre sistemas hidráulicos y electrónicos

Datos de la publicación

Autoría	Avila Sánchez, Proaño Proaño y Ulco Guambi (2023)
Publicación	Repositorio Digital UIDE
Enlace	https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6077

Contenido consultado

Trabajo académico relacionado con el funcionamiento hidráulico y electrónico de inyectores CRDI. La fuente aporta un antecedente automotriz local para comprender la importancia del caudal, la presión y el diagnóstico de sistemas de inyección.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura D.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Avila Sánchez, Proaño Proaño y Ulco Guambi (2023).

Anexo E. Transición a la turbulencia en tuberías (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957>. The main heading is "Transición a la turbulencia en tuberías". Below this, there is a section titled "Datos de la publicación" containing three entries: "Autoría" (Avila, Barkley y Hof (2023)), "Publicación" (Annual Review of Fluid Mechanics, 55), and "Enlace" (https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957). A section titled "Contenido consultado" follows, containing a paragraph about the article's content. At the bottom, a note states "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo."

Transición a la turbulencia en tuberías

Datos de la publicación

Autoría	Avila, Barkley y Hof (2023)
Publicación	Annual Review of Fluid Mechanics, 55
Enlace	https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-025957

Contenido consultado

Artículo de revisión sobre la transición del flujo laminar al turbulento en tuberías. Explica la influencia de las perturbaciones, la estabilidad del flujo y el número de Reynolds en la aparición y propagación de estructuras turbulentas.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura E.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Avila, Barkley y Hof (2023).

Anexo F. Golpe de ariete y transitorios hidráulicos (continuación)

<https://doi.org/10.1002/prs.12517>

Golpe de ariete y transitorios hidráulicos

Datos de la publicación

Autoría	Britton y Willey (2024)
Publicación	Process Safety Progress, 43(1)
Enlace	https://doi.org/10.1002/prs.12517

Contenido consultado

Estudio orientado a la prevención del golpe de ariete y otros transitorios hidráulicos. Describe cómo los cambios rápidos de velocidad y presión pueden producir vibraciones, sobrepresiones y daños en sistemas de tuberías.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura F.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Britton y Willey (2024).

Anexo G. Flujo transicional en tuberías (continuación)

2

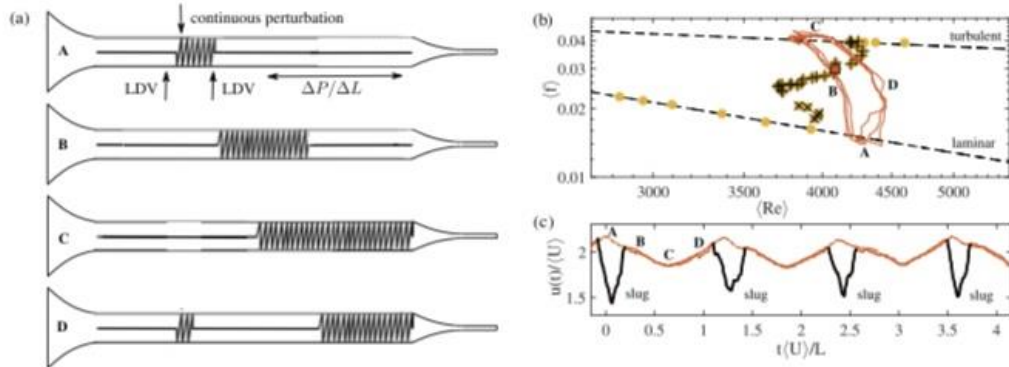


FIG. 1. (a) Schematic of the pipe experiment modelled after that appearing in Reynolds [3], with a contracting entrance section and a final narrow pipe section for added resistance. Flow is from left to right. Straight horizontal lines indicate laminar flow, and jagged flow indicates a slug. The pressure measurement section for determining $\Delta P/\Delta L$ and thus f in (b) is shown, as well as the two positions for measuring the velocity with LDVs in (c). The flow is disturbed continuously with an obstacle to set a transition Re_C . The flow state at points A→D from (b) and (c) are represented schematically. (b) Plot of average friction $\langle f \rangle$ vs. average $\langle Re \rangle$. The lower and upper curves are the laminar and turbulent friction curves, respectively. The transitional data are either periodic (+) or stochastic (x). Overlaid on the mean data (o) we plot the instantaneous $f(t) - Re(t)$ curve for one periodic transitional data point (□). This curve cycles clockwise through the points A, B, C, and D. (c) The normalized streamwise velocity $u(t)/\langle U \rangle$ at the centerline vs. the normalized time $t(U)/L$ for □, with A→D also denoted. The velocity was measured $100D$ downstream (—) and $10D$ upstream (---) from the perturbation. The shape of both curves is the same as $Re(t)$ but for the slugs (solid black line superimposed over —).

For our experiments we carry out measurements of the flow rate, velocity, and the friction in a 2020 cm long, smooth, cylindrical glass pipe of diameter $D = 1 \text{ cm} \pm 10 \mu\text{m}$. The working fluid is water. Driven by gravity, the flow remains laminar up to $Re \approx 10000$. We restrict our attention to $3000 \lesssim Re \lesssim 7000$, for which the turbulent patches, called “slugs” [4], grow, an essential ingredient in the PT mechanism. We perturb the flow $\approx 404D$ downstream (see Fig. 1a) either continuously with an obstacle (a small $\approx 0.63 \text{ mm}$ diameter rod oriented perpendicular to the flow) or instantaneously with a syringe pump which injects a small amount of fluid from a 1 mm hole in the pipe wall. We denote by L the distance from the perturbation to the end of the pipe. We can set a natural transition Re when the flow becomes unstable, Re_C , by adjusting the rod protrusion. (This Re_C should not be confused with the lower and universal critical Re_C investigated by experiments of puff lifetimes [8].) We determine the instantaneous flow rate using a magnetic flowmeter (Yokogawa) and the total pressure drop ΔP_{tot} by measuring the difference between the height of water surface in the source reservoir from the height of the water at the exit of the pipe, Δh . We also measure the instantaneous pressure drop in a $505D$ section that is $101D$ from the end of the pipe (see Fig. 1a). Two Laser Doppler velocimeters (LDV, MSE) were also used to probe the flow (see Fig. 1b). More experimental details can be found in the Supplementary Material (SM, Sec. II) and in Ref. [18].

We begin by revisiting PT’s mechanism through an examination of our experimental data for Re and the non-dimensional friction factor $f = D\Delta P/\Delta L/(\rho U^2/2)$, where ρ is the density, and ΔP is the pressure drop over a length ΔL . We refer to Fig. 1b, a traditional plot of $\langle f \rangle$ vs. $\langle Re \rangle$, to investigate the state of the system, where $\langle \rangle$ refers to the time-averaged value. As ΔP_{tot} slowly increases (via Δh), the data (o) initially conform to the lower laminar curve, but the flow becomes unstable due to the finite disturbance for $Re > Re_C \approx 4000$ (set by the obstacle) and the position of $\langle f \rangle - \langle Re \rangle$ deviates from the laminar curve thereafter. The first slugs appear stochastically (x) [19], but this behavior spans only a narrow range of ΔP_{tot} . Thereafter the flow displays periodic behavior (+), which was the original focus of PT and thus ours as well.

In Fig. 1c we plot the instantaneous $f(t) - Re(t)$ curve corresponding to one periodic data point (□). To understand this curve, consider the point A where the flow is laminar. Because $Re(t) > Re_C \approx 4000$, a slug is created by the perturbation and begins to invade the flow, as indicated by a thick black line in Fig. 1c; (see also Fig. 1a), and it expands aggressively as it is convected downstream [4]. The increased friction with $\Delta P_{\text{tot}} = \text{const.}$ requires $Re(t)$ to decrease. The slug eventually reaches the pressure measurement section and partially fills it, raising the value of $f(t)$ to point B, until the flow there is fully turbulent at point C on the upper curve. As the turbulent patch leaves the pipe, $Re(t)$ increases and the flow’s intermittency decreases, taking us through point D (Fig. 1a), until finally the flow is fully laminar again and we return to point A to begin the cycle again. We now attempt to gain further insight

Figura G.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Cerbus (2022).

Anexo H. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones (continuación)

lunyx.wordpress.com

5 de 2036

The McGraw-Hill Companies

**Mc
Graw
Hill** Higher Education

FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS

Published by McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020. Copyright © 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written consent of The McGraw-Hill Companies, Inc., including, but not limited to, in any network or other electronic storage or transmission, or broadcast for distance learning.

Some ancillaries, including electronic and print components, may not be available to customers outside the United States.

This book is printed on acid-free paper.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 DOW/DOW 0 9 8 7 6 5 4

ISBN 0-07-247236-7

Senior Sponsoring Editor: *Suzanne Jeans*
Managing Developmental Editor: *Debra D. Matteson*
Developmental Editor: *Kate Scheinman*
Senior Marketing Manager: *Mary K. Kittell*
Senior Project Manager: *Sheila M. Frank*
Senior Production Supervisor: *Sherry L. Kane*
Media Technology Producer: *Eric A. Weber*
Senior Designer: *David W. Hash*
(USE) Cover image: © Getty/Eric Meola, Niagara Falls
Senior Photo Research Coordinator: *Lori Hancock*
Photo Research: *Judy Ladendorf/The Permissions Group*
Supplemental Producer: *Brenda A. Erzen*
Compositor: *Lachina Publishing Services*
Typeface: *10.5/12 Times Roman*
Printer: *R. R. Donnelley Willard, OH*

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

Çengel, Yunus A.

Fluid mechanics : fundamentals and applications / Yunus A. Çengel, John M. Cimbala.—1st ed.
p. cm.—(McGraw-Hill series in mechanical engineering)

ISBN 0-07-247236-7

I. Fluid dynamics. I. Cimbala, John M. II. Title. III. Series.

TA357.C43 2006

620.1'06—dc22

2004058767

CIP

www.mhhe.com

Figura H.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Çengel y Cimbala (2024).

Anexo I. Propagación de frentes turbulentos (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1160>. The main heading is "Propagación de frentes turbulentos". Below this, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data) containing three entries: "Autoría" (Authorship) as "Chen, Xu y Song (2022)", "Publicación" (Publication) as "Journal of Fluid Mechanics, 935, A11", and "Enlace" (Link) as the same DOI. A section titled "Contenido consultado" (Content consulted) follows, with a paragraph describing the article's focus on the velocity of turbulent front propagation in pipe flow at high Reynolds numbers. At the bottom, a note states: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

Propagación de frentes turbulentos

Datos de la publicación

Autoría	Chen, Xu y Song (2022)
Publicación	Journal of Fluid Mechanics, 935, A11
Enlace	https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1160

Contenido consultado

Artículo que estudia la velocidad de propagación de los frentes turbulentos en flujo de tubería a números de Reynolds elevados. La fuente permite comprender cómo la turbulencia avanza dentro del conducto.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura I.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Chen, Xu y Song (2022).

Anexo J. Paisaje dinámico del flujo transicional (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108>. The main heading is "Paisaje dinámico del flujo transicional". Below this, under the section "Datos de la publicación", there are three entries: "Autoría" (Frishman y Grafke (2022)), "Publicación" (Physical Review E, 105(4), 045108), and "Enlace" (<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108>). Under the section "Contenido consultado", there is a paragraph describing the research on dynamic states during the transition of flow in pipes. At the bottom, there is a note about the bibliographic source used.

Paisaje dinámico del flujo transicional

Datos de la publicación

Autoría	Frishman y Grafke (2022)
Publicación	Physical Review E, 105(4), 045108
Enlace	https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.045108

Contenido consultado

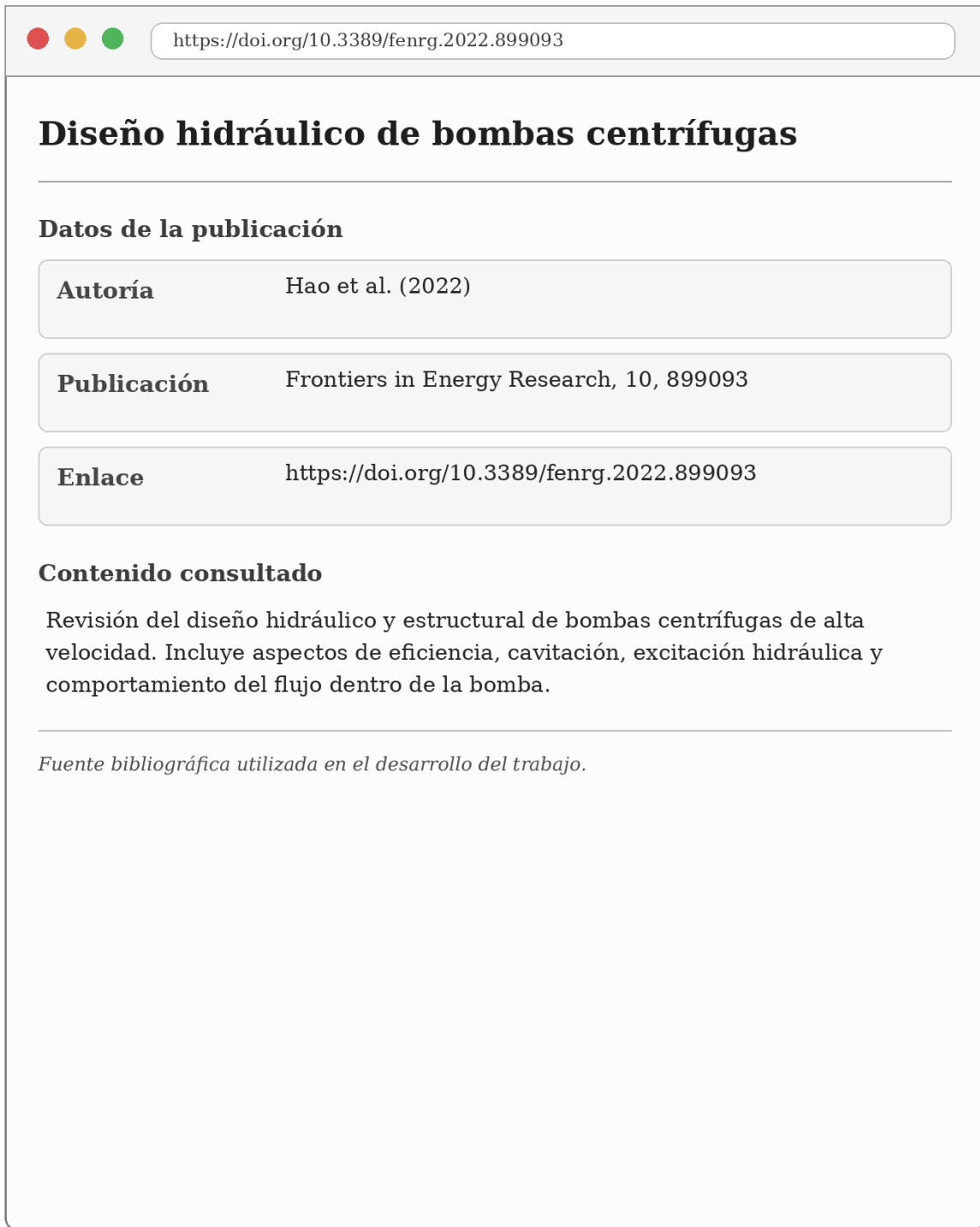
Investigación sobre los estados dinámicos que aparecen durante la transición del flujo en tuberías. Relaciona las perturbaciones del sistema con la permanencia o desaparición de estructuras turbulentas.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura J.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Frishman y Grafke (2022).

Anexo K. Diseño hidráulico de bombas centrífugas (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899093>. The main heading of the page is "Diseño hidráulico de bombas centrífugas". Below this, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data) which contains three entries: "Autoría" (Authorship) listed as "Hao et al. (2022)", "Publicación" (Publication) listed as "Frontiers in Energy Research, 10, 899093", and "Enlace" (Link) listed as the same DOI URL. Below the publication data, there is a section titled "Contenido consultado" (Content consulted) which provides a brief description of the paper: "Revisión del diseño hidráulico y estructural de bombas centrífugas de alta velocidad. Incluye aspectos de eficiencia, cavitación, excitación hidráulica y comportamiento del flujo dentro de la bomba." At the bottom of the page, a note states: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

Diseño hidráulico de bombas centrífugas

Datos de la publicación

Autoría	Hao et al. (2022)
Publicación	Frontiers in Energy Research, 10, 899093
Enlace	https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899093

Contenido consultado

Revisión del diseño hidráulico y estructural de bombas centrífugas de alta velocidad. Incluye aspectos de eficiencia, cavitación, excitación hidráulica y comportamiento del flujo dentro de la bomba.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura K.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Hao et al. (2022).

Anexo L. Identificación del estado de cavitación (continuación)

<https://doi.org/10.3390/en15238907>

Identificación del estado de cavitación

Datos de la publicación

Autoría	He et al. (2022)
Publicación	Energies, 15(23), 8907
Enlace	https://doi.org/10.3390/en15238907

Contenido consultado

Estudio sobre la identificación de estados de cavitación en bombas centrífugas mediante variables de funcionamiento y técnicas de clasificación. Sirve como referencia para relacionar cambios del flujo con condiciones perjudiciales en la bomba.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura L.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: He et al. (2022).

Anexo M. ISO 5167-1:2022: medición de flujo (continuación)



The image is a screenshot of a web browser displaying the ISO 5167-1:2022 standard page. The browser's address bar shows the URL <https://www.iso.org/standard/79179.html>. The page title is "ISO 5167-1:2022: medición de flujo". Below the title, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data). This section contains three rows of information: "Autoría" (Author) is "International Organization for Standardization", "Publicación" (Publication) is "ISO 5167-1:2022", and "Enlace" (Link) is <https://www.iso.org/standard/79179.html>. Below this section, there is a section titled "Contenido consultado" (Content consulted). This section contains a paragraph: "Norma que presenta principios generales y requisitos para medir el caudal mediante dispositivos de presión diferencial instalados en conductos circulares cerrados que funcionan completamente llenos." Below this paragraph, there is a line of text: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

<https://www.iso.org/standard/79179.html>

ISO 5167-1:2022: medición de flujo

Datos de la publicación

Autoría	International Organization for Standardization
Publicación	ISO 5167-1:2022
Enlace	https://www.iso.org/standard/79179.html

Contenido consultado

Norma que presenta principios generales y requisitos para medir el caudal mediante dispositivos de presión diferencial instalados en conductos circulares cerrados que funcionan completamente llenos.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura M.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: International Organization for Standardization.

Anexo N. ISO 3104:2023: determinación de viscosidad (continuación)



The image is a screenshot of a web browser displaying the ISO 3104:2023 standard page. The browser's address bar shows the URL <https://www.iso.org/standard/79982.html>. The page title is "ISO 3104:2023: determinación de viscosidad". Below the title, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data) which contains three entries: "Autoría" (Author) as "International Organization for Standardization", "Publicación" (Publication) as "ISO 3104:2023", and "Enlace" (Link) as <https://www.iso.org/standard/79982.html>. Below this section is "Contenido consultado" (Consulted Content), which states: "Norma para determinar la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos y calcular la viscosidad dinámica. Se utiliza como referencia metodológica para el tratamiento de esta propiedad del fluido." At the bottom of the page, there is a note: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo." (Bibliographic source used in the development of the work).

ISO 3104:2023: determinación de viscosidad

Datos de la publicación

Autoría	International Organization for Standardization
Publicación	ISO 3104:2023
Enlace	https://www.iso.org/standard/79982.html

Contenido consultado

Norma para determinar la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos y calcular la viscosidad dinámica. Se utiliza como referencia metodológica para el tratamiento de esta propiedad del fluido.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura N.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: International Organization for Standardization.

Anexo O. Mecánica de fluidos aplicada (continuación)

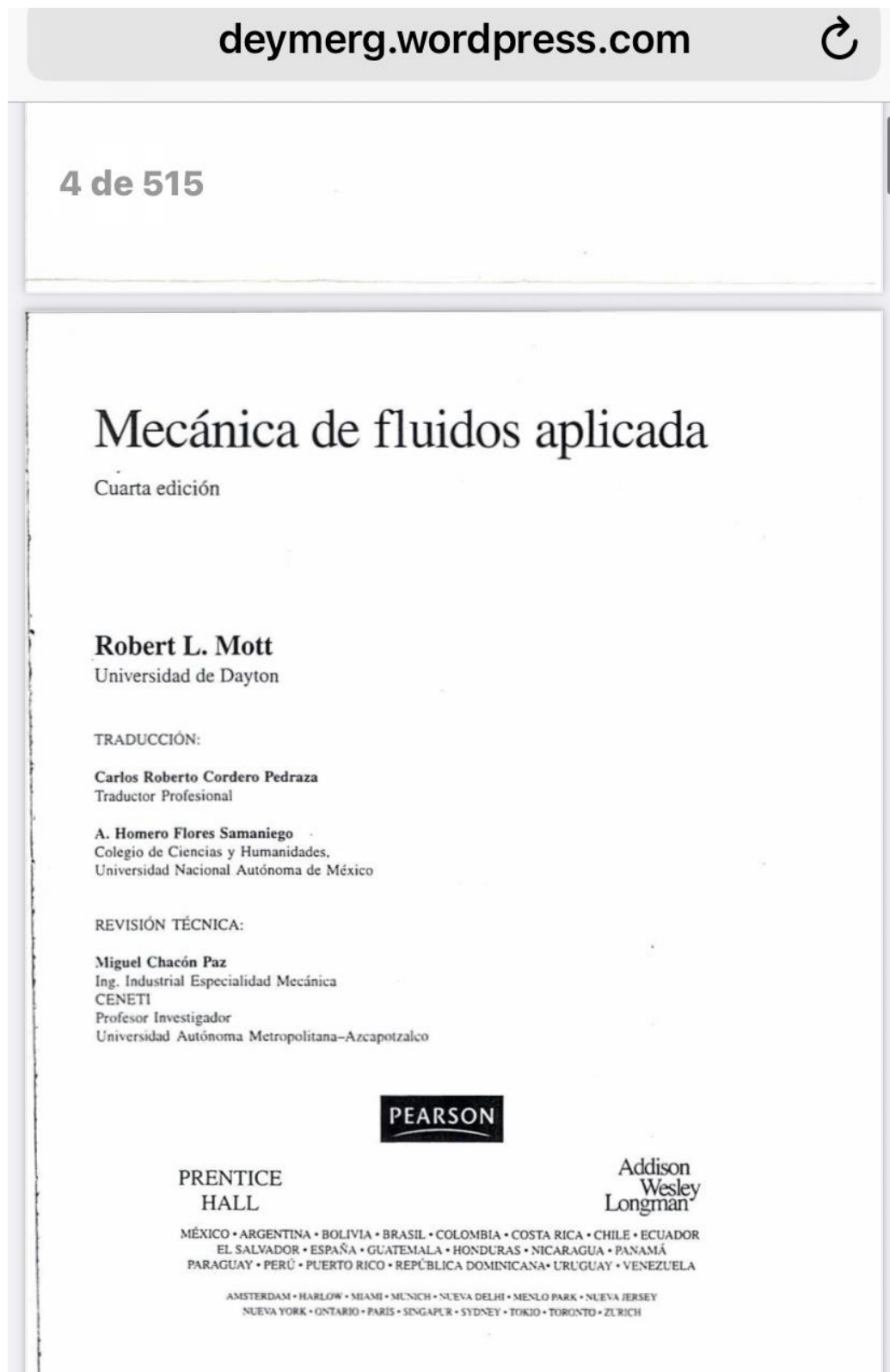


Figura O.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Mott y Untener (2022).

Anexo P. Fluidos refrigerantes automotrices (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying <https://doi.org/10.19206/CE-169185>. The main heading is "Fluidos refrigerantes automotrices". Below this, there is a section titled "Datos de la publicación" containing three entries: "Autoría" (Stajuda et al. (2024)), "Publicación" (Combustion Engines, 196(1), 106-125), and "Enlace" (<https://doi.org/10.19206/CE-169185>). A section titled "Contenido consultado" follows, containing a paragraph about a review article on the composition, properties, problems, and treatment of automotive refrigerants. At the bottom, a note states: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo."

Fluidos refrigerantes automotrices

Datos de la publicación

Autoría	Stajuda et al. (2024)
Publicación	Combustion Engines, 196(1), 106-125
Enlace	https://doi.org/10.19206/CE-169185

Contenido consultado

Artículo de revisión sobre la composición, propiedades, problemas y tratamiento de fluidos refrigerantes. La fuente relaciona las propiedades del fluido con el funcionamiento y mantenimiento de sistemas automotrices.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura P.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Stajuda et al. (2024).

Anexo Q. Cavitación en bombas electrónicas automotrices (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the DOI link: <https://doi.org/10.3390/mi13071063>. The main heading of the page is "Cavitación en bombas electrónicas automotrices". Below this, there is a section titled "Datos de la publicación" (Publication Data) which contains three entries: "Autoría" (Authorship) as "Wu et al. (2022)", "Publicación" (Publication) as "Micromachines, 13(7), 1063", and "Enlace" (Link) as the same DOI link. Below the publication data, there is a section titled "Contenido consultado" (Content consulted) which contains a paragraph: "Estudio numérico de la cavitación en microbombas electrónicas utilizadas en aplicaciones automotrices. Analiza la influencia de las condiciones termodinámicas en la formación y desarrollo de cavidades." At the bottom of the screenshot, there is a line of text: "Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo."

Cavitación en bombas electrónicas automotrices

Datos de la publicación

Autoría	Wu et al. (2022)
Publicación	Micromachines, 13(7), 1063
Enlace	https://doi.org/10.3390/mi13071063

Contenido consultado

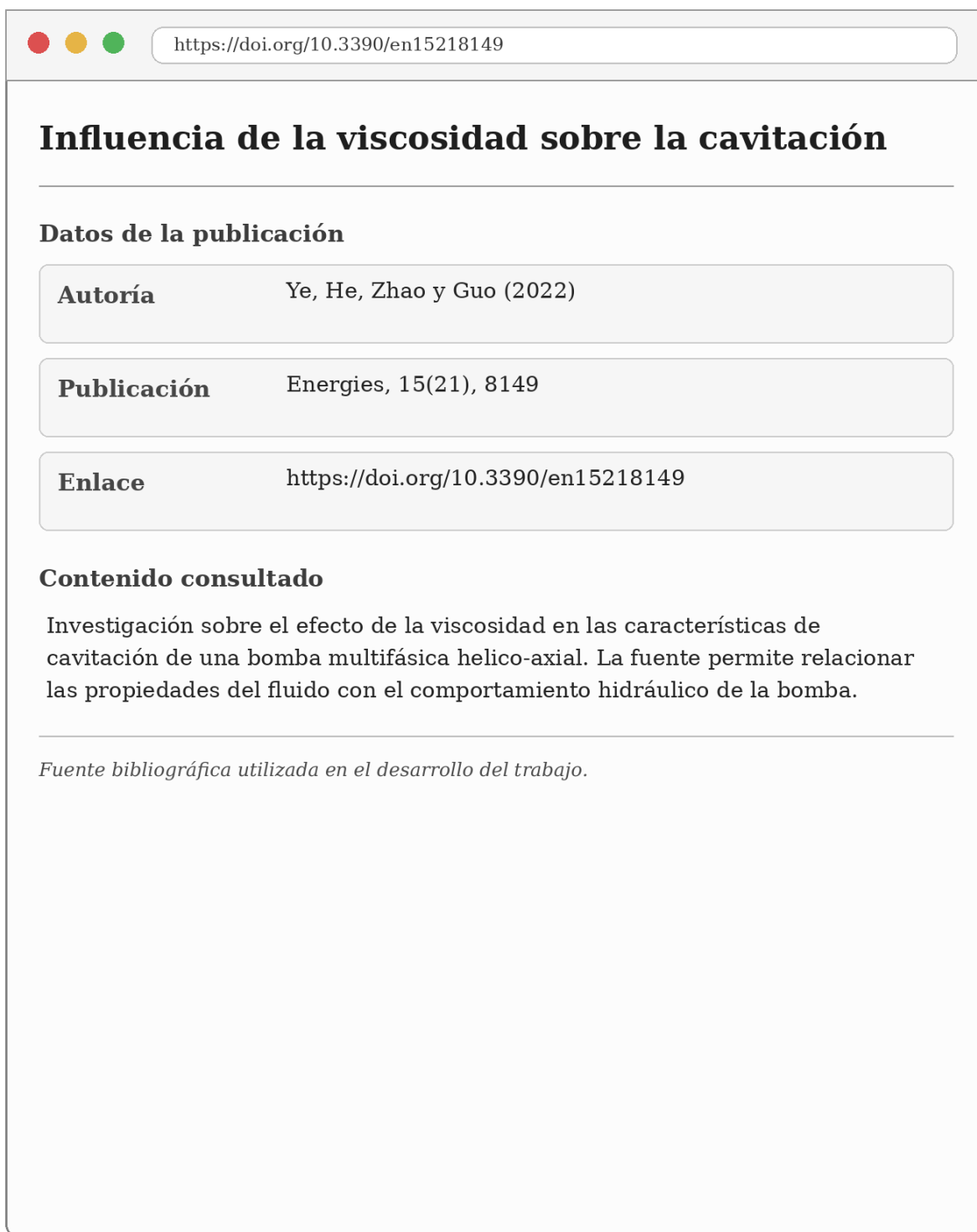
Estudio numérico de la cavitación en microbombas electrónicas utilizadas en aplicaciones automotrices. Analiza la influencia de las condiciones termodinámicas en la formación y desarrollo de cavidades.

Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.

Figura Q.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Wu et al. (2022).

Anexo R. Influencia de la viscosidad sobre la cavitación (continuación)



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying <https://doi.org/10.3390/en15218149>. The main heading is **Influencia de la viscosidad sobre la cavitación**. Below this, there is a section titled **Datos de la publicación** containing three rows of information:

Autoría	Ye, He, Zhao y Guo (2022)
Publicación	Energies, 15(21), 8149
Enlace	https://doi.org/10.3390/en15218149

Below the publication data, there is a section titled **Contenido consultado** with the following text:

Investigación sobre el efecto de la viscosidad en las características de cavitación de una bomba multifásica helico-axial. La fuente permite relacionar las propiedades del fluido con el comportamiento hidráulico de la bomba.

At the bottom of the screenshot, there is a line of text: *Fuente bibliográfica utilizada en el desarrollo del trabajo.*

Figura R.2. Información de la fuente consultada.

Fuente: Ye, He, Zhao y Guo (2022).

Anexo C. Evidencia gráfica complementaria

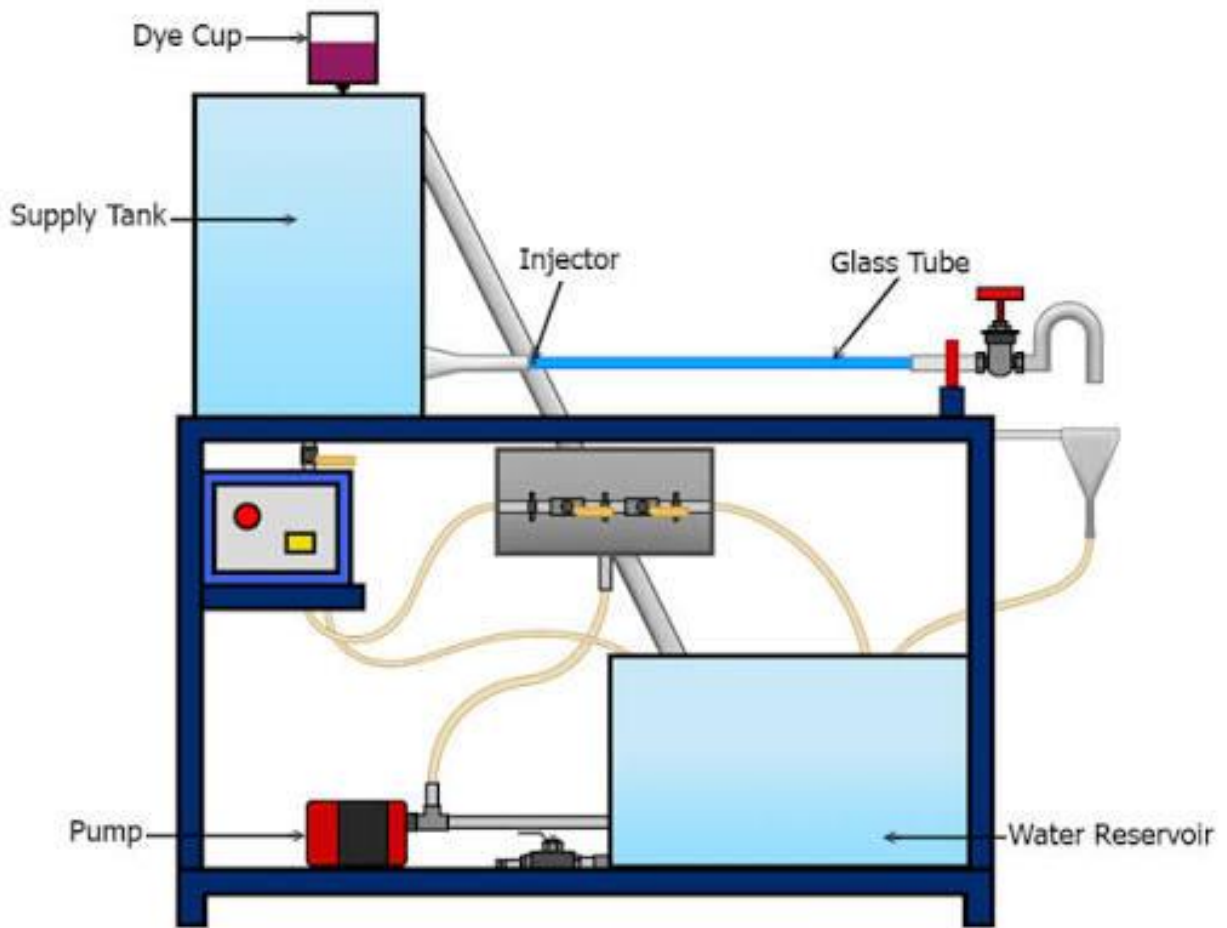


Figura C.3. Montaje básico para visualizar el flujo en una tubería.

Anexo D. Evidencia gráfica complementaria

LAMINAR FLOW



TURBULENT FLOW

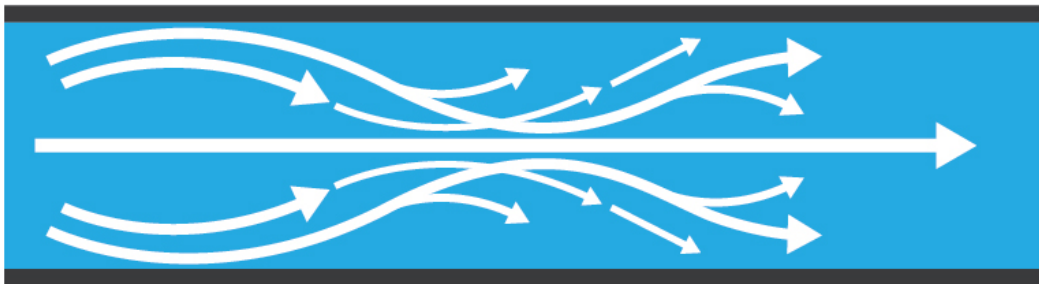


Figura D.3. Comparación entre flujo laminar y flujo turbulento.

Anexo E. Evidencia gráfica complementaria

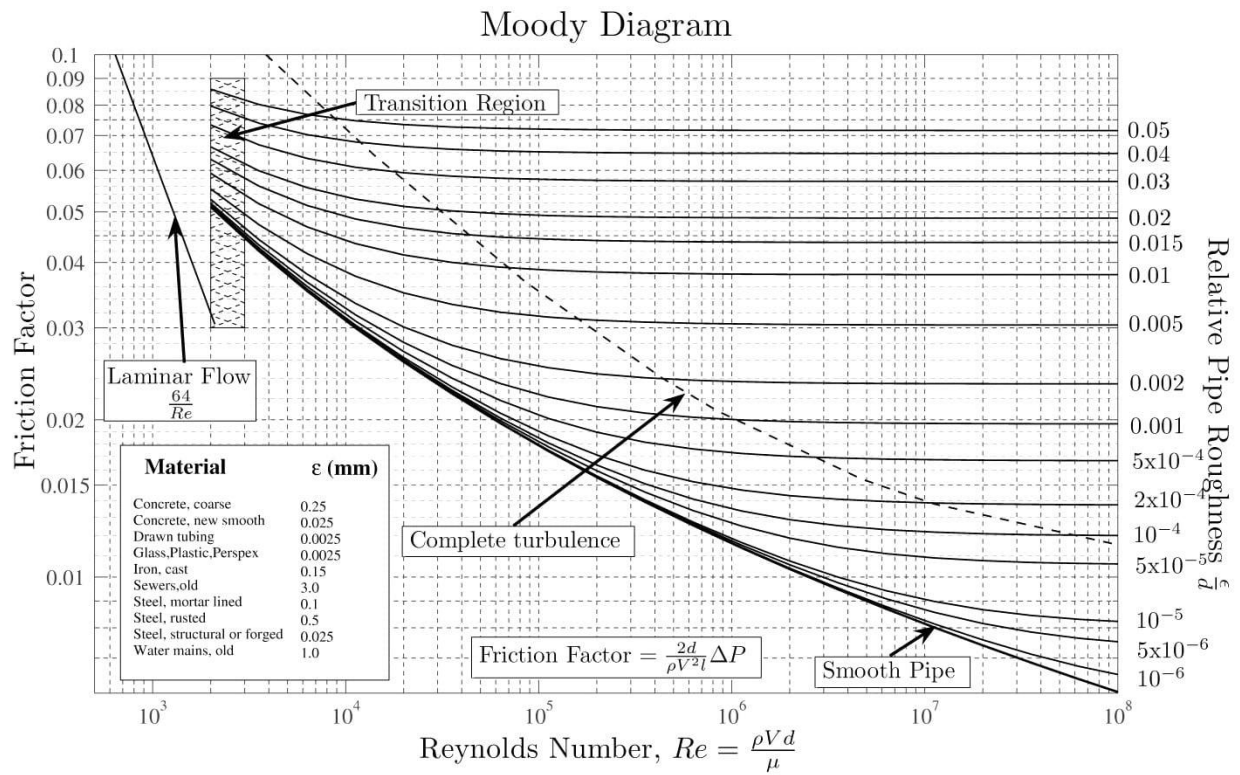


Figura E.3. Diagrama de Moody para el análisis del factor de fricción.

Anexo F. Evidencia gráfica complementaria

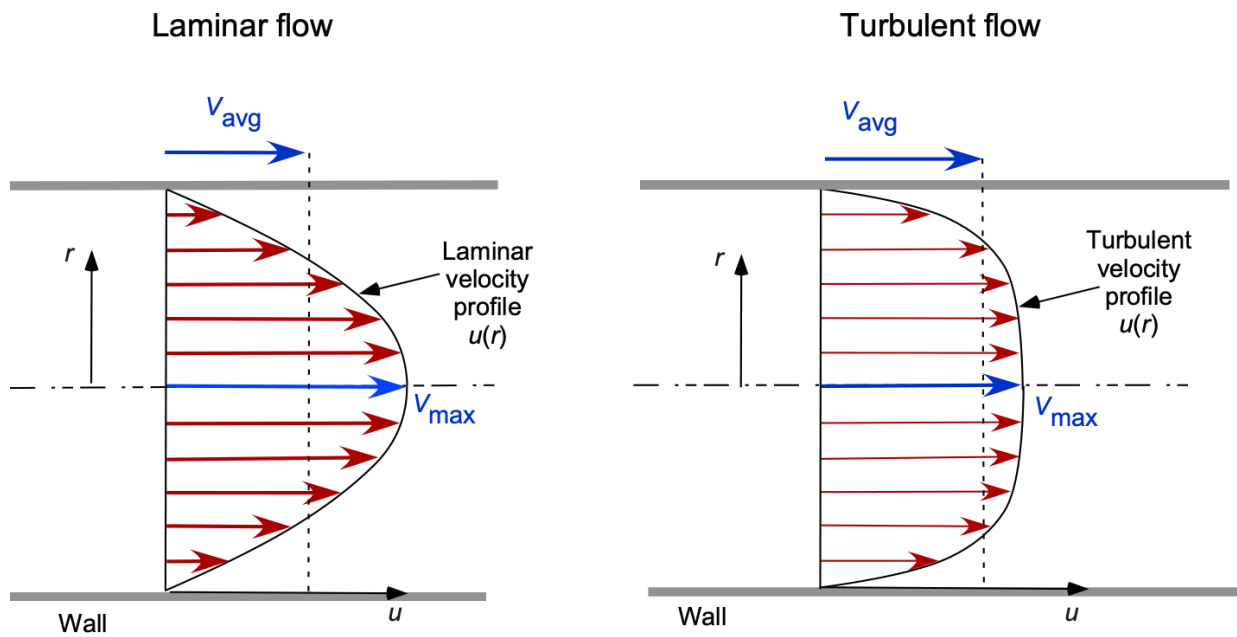


Figura F.3. Perfiles de velocidad en el interior de una tubería.

Anexo G. Evidencia gráfica complementaria

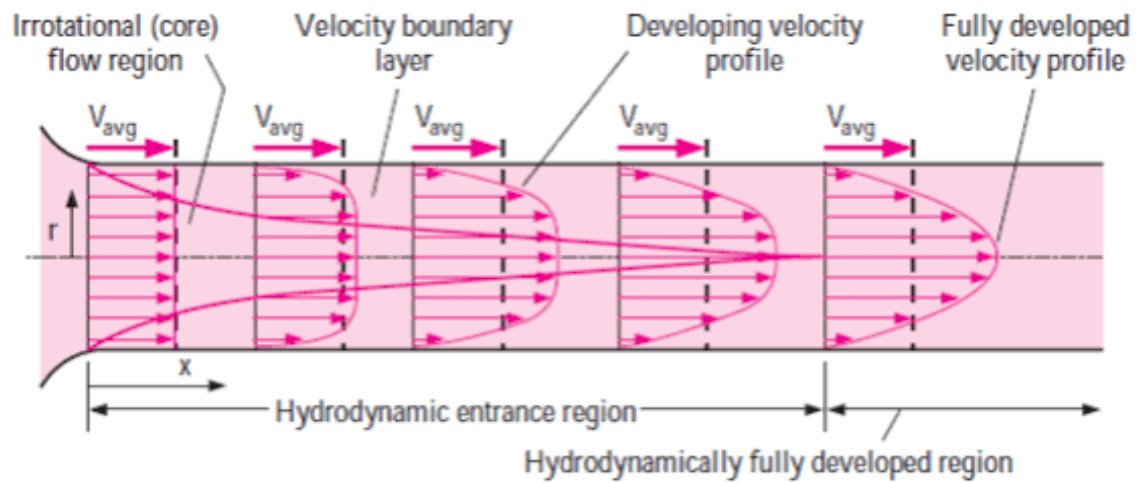


Figura G.3. Desarrollo del perfil de velocidad en la región de entrada.

Anexo H. Evidencia gráfica complementaria



Figura H.3. Banco experimental con bomba centrífuga.

Anexo I. Evidencia gráfica complementaria

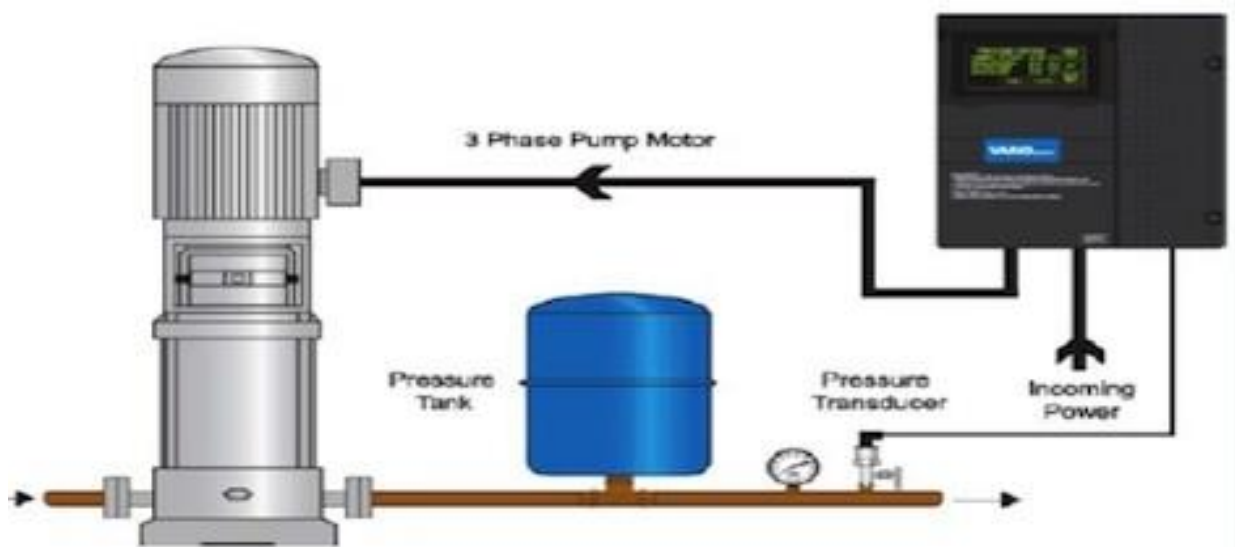


Figura I.3. Esquema de control de una bomba mediante variador de frecuencia.

Anexo J. Evidencia gráfica complementaria



Figura J.3. Equipos didácticos para prácticas de mecánica de fluidos.

Anexo K. Evidencia gráfica complementaria



Figura K.3. Laboratorio equipado para ensayos hidráulicos.

Anexo L. Evidencia gráfica complementaria

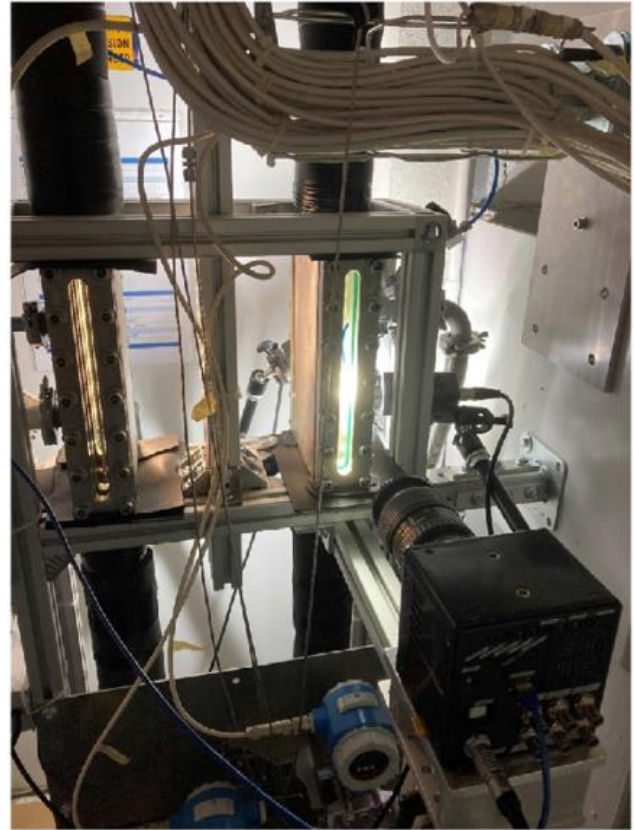
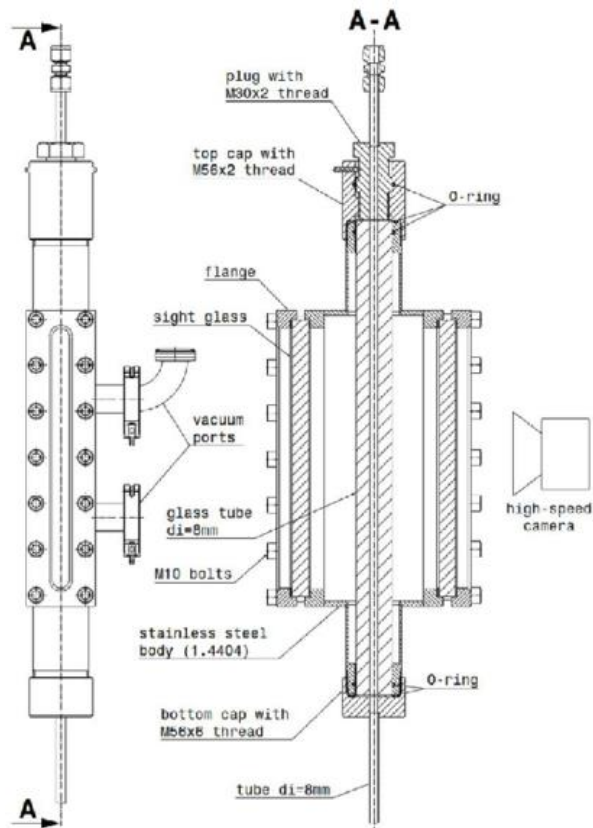


Figura L.3. Celda experimental para observación de flujo y cavitación.

Anexo M. Evidencia gráfica complementaria

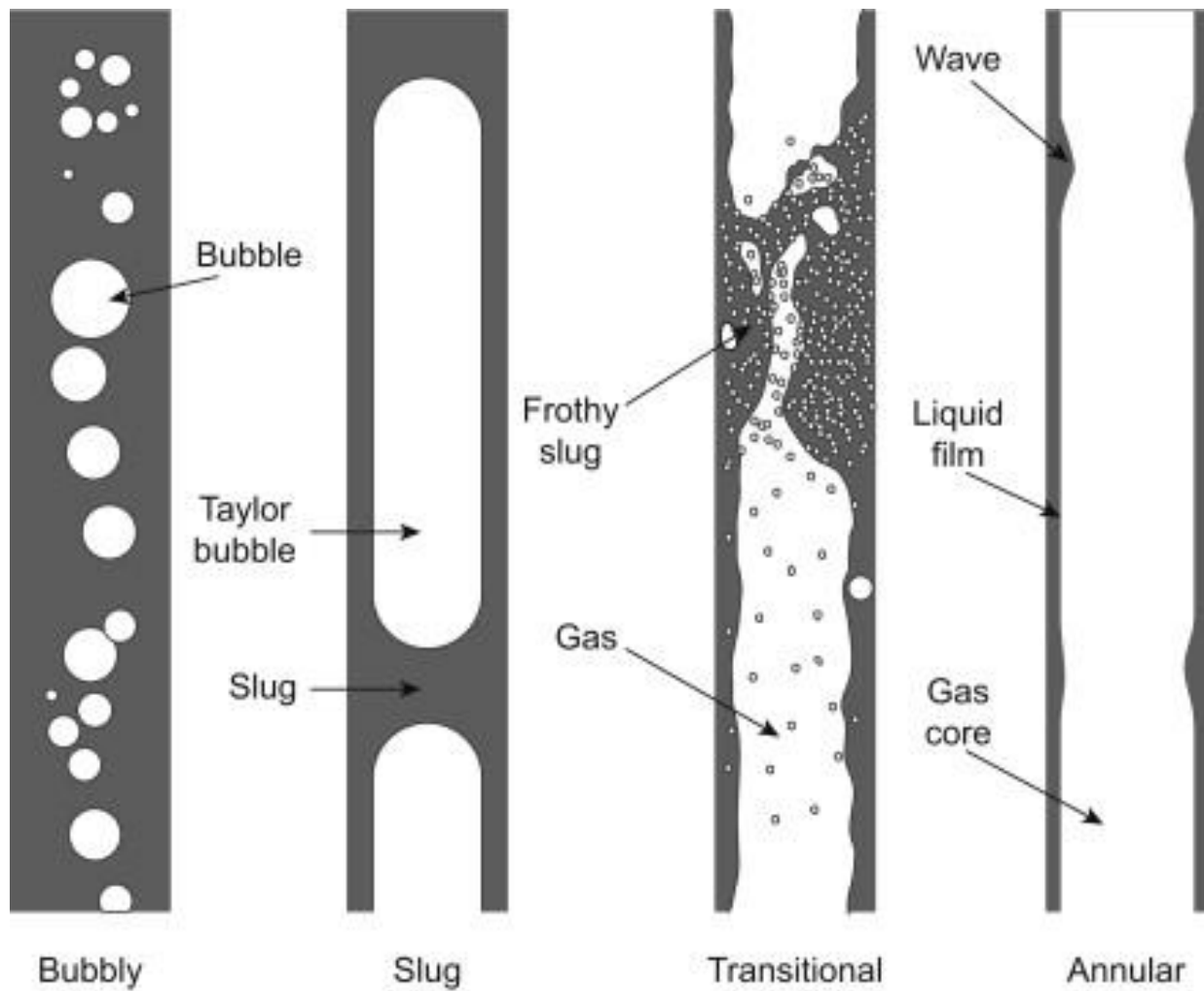


Figura M.3. Regímenes de flujo multifásico en conductos verticales.

Anexo N. Evidencia gráfica complementaria

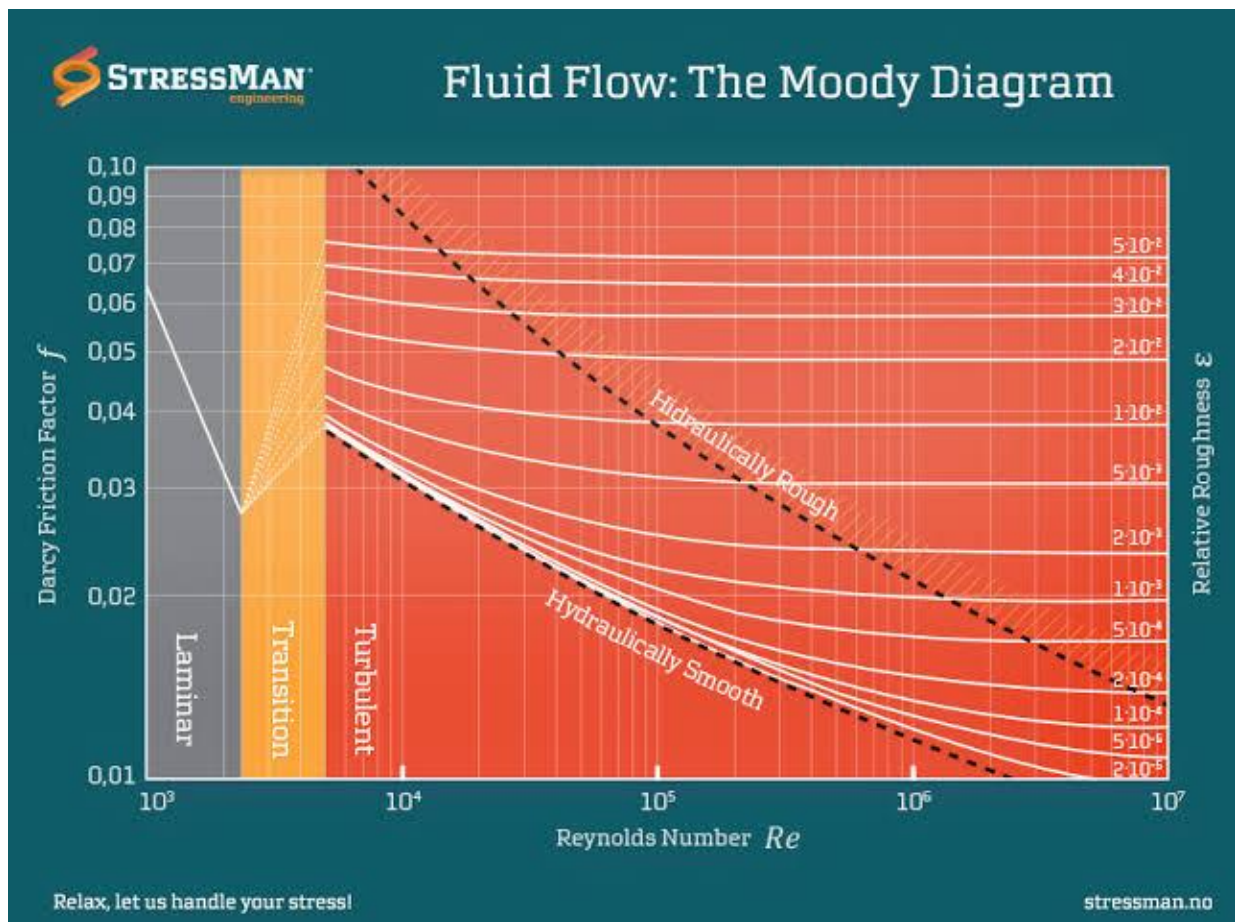


Figura N.3. Diagrama de Moody con regiones laminar, transicional y turbulenta.

Anexo O. Evidencia gráfica complementaria

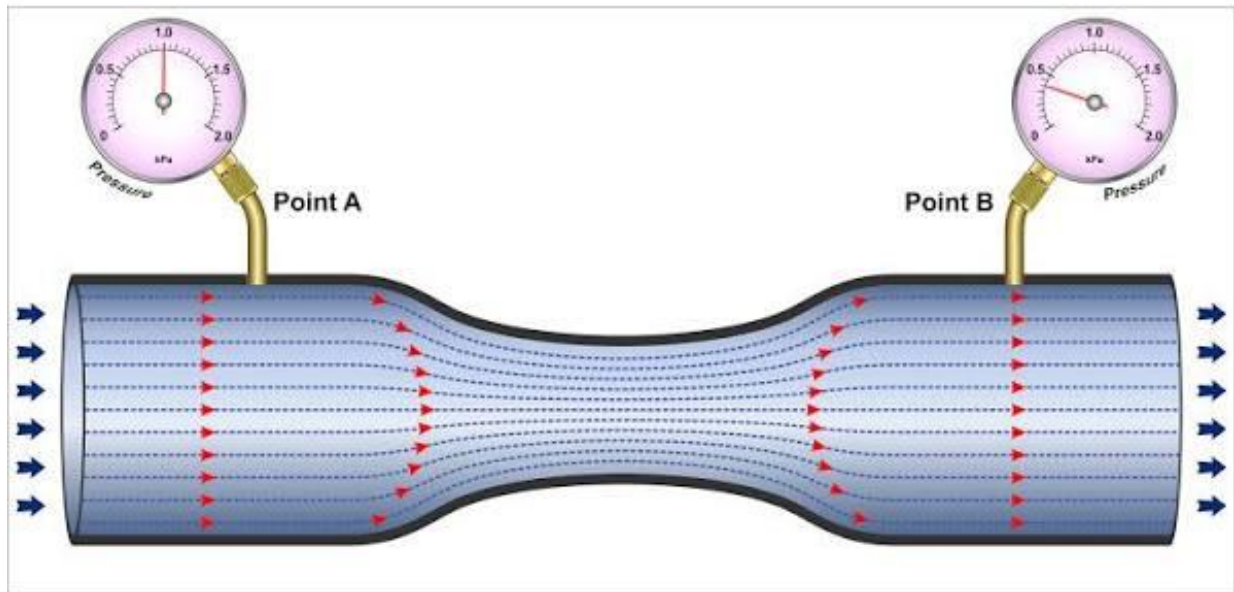


Figure 1: Visual example of a pressure drop in a pipe where a narrowing of the pipe causes a drop in pressure from point "A" to point "B".

Figura O.3. Variación de presión producida por una reducción de diámetro.

Anexo P. Evidencia gráfica complementaria

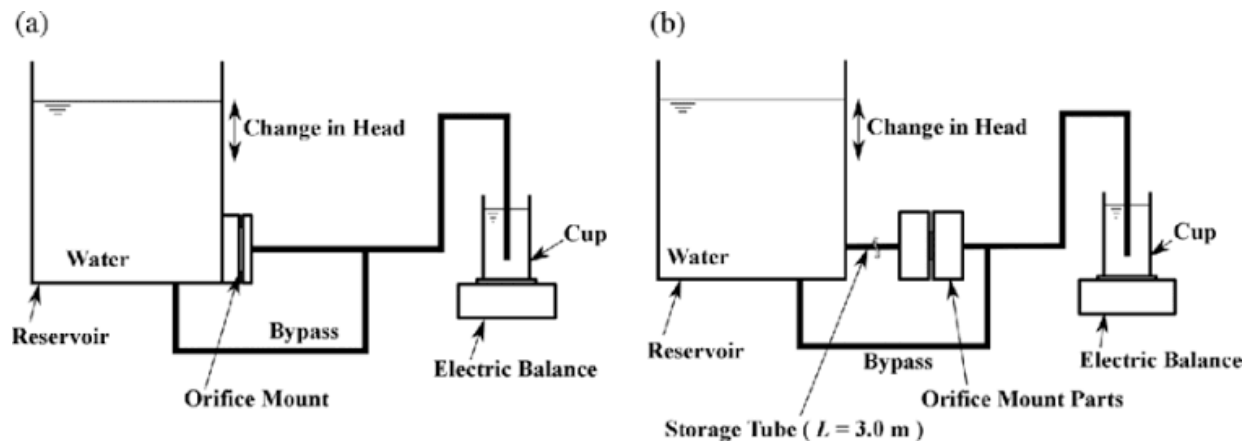


Figura P.3. Montaje experimental con depósito, derivación y medición.

Anexo Q. Evidencia gráfica complementaria



Figura Q.3. Rotámetros empleados para la medición de caudal.

Anexo R. Evidencia gráfica complementaria



Figura R.3. Caudalímetro digital para tuberías.

Anexo Q. Evidencia gráfica complementaria



Figura Q.4. Manómetro para la medición de presión.

Anexo R. Evidencia gráfica complementaria



Figura R.4. Conjunto de equipos para prácticas de mecánica de fluidos.

Anexo Q. Evidencia gráfica complementaria



Figura Q.5. Transmisor de presión diferencial utilizado para la medición de variables hidráulicas.

Anexo R. Evidencia gráfica complementaria



Figura R.5. Equipo experimental para el estudio del número de Reynolds y los regímenes de flujo.

Anexo S. Evidencia gráfica complementaria



Figura S.1. Vista frontal del banco de pruebas hidráulico con sensores de caudal y panel de control.

Anexo T. Evidencia gráfica complementaria



Figura T.1. Vista posterior del banco de pruebas hidráulico con depósito, bomba y sistema de tuberías.

Anexo U. Evidencia gráfica complementaria



Figura U.1. Variador de frecuencia Optidrive E3 empleado para controlar la velocidad de la bomba.

Anexo V. Evidencia gráfica complementaria



Figura V.1. Placa de características técnicas de la bomba de agua QB60.

Anexo W. Evidencia gráfica complementaria



Figura W.1. Vista referencial del variador de frecuencia Optidrive E3.

Anexo X. Evidencia gráfica complementaria

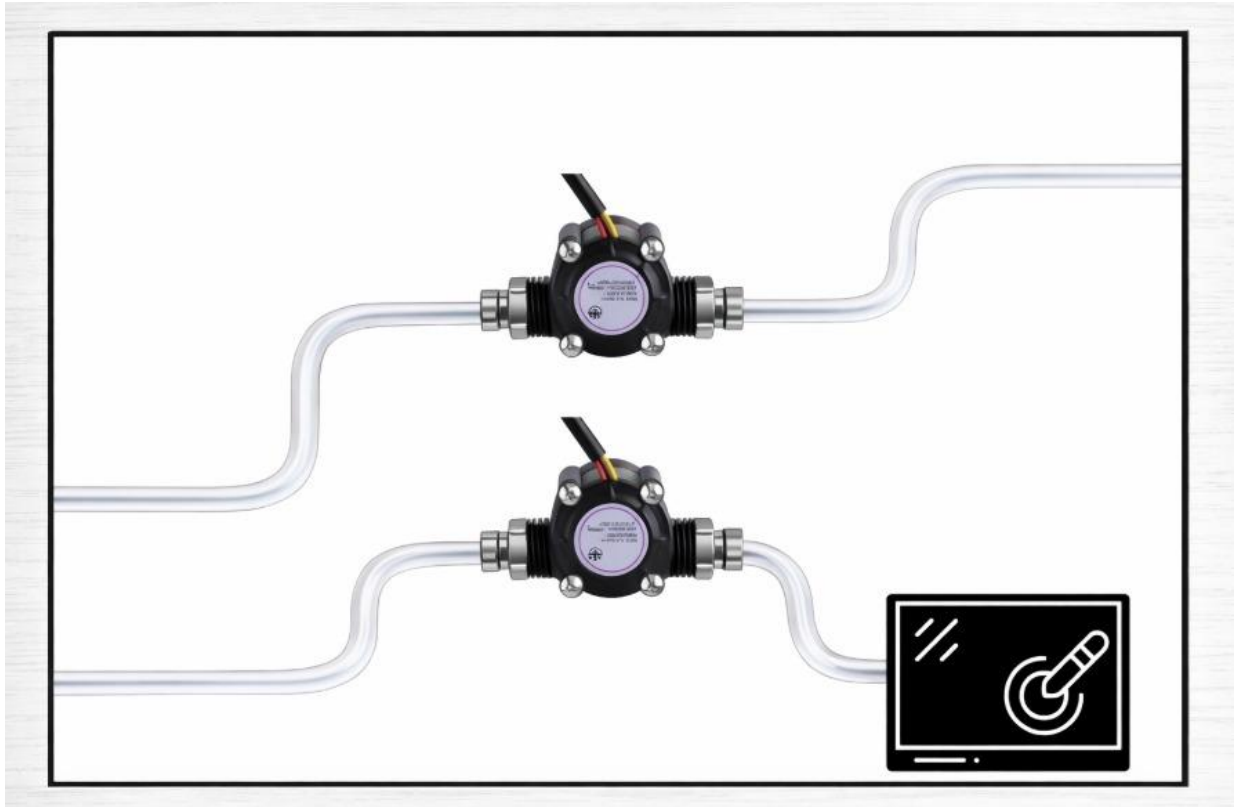


Figura X.1. Sensores de caudal de efecto Hall conectados a tuberías transparentes.

Anexo Y. Evidencia gráfica complementaria



Figura Y.1. Conexión de un sensor de caudal de efecto Hall a una tarjeta Arduino Uno.

Anexo Z. Evidencia gráfica complementaria

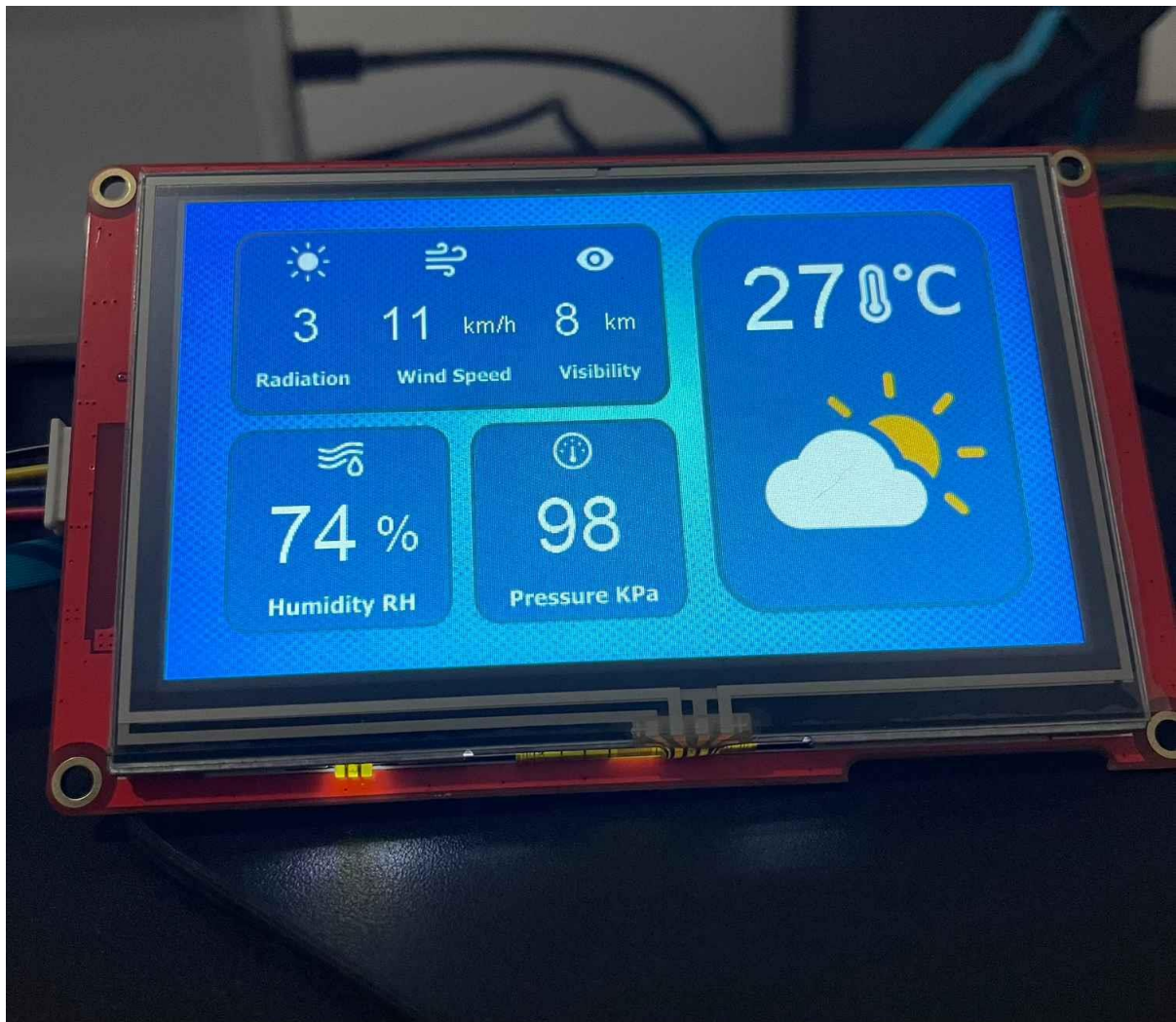


Figura Z.1. Pantalla táctil Nextion utilizada como interfaz de visualización y monitoreo.

Anexo AA. Evidencia gráfica complementaria



Figura AA.1. Sensor de caudal de efecto Hall empleado para la medición del flujo.

Anexo AB. Evidencia gráfica complementaria



Figura AB.1. Comparación visual de diámetros de tubería PVC, incluyendo 1/2 y 3/4 pulgadas.

Anexo AC. Evidencia gráfica complementaria



Figura AC.1. Accesorios, uniones y válvulas de PVC utilizados en circuitos hidráulicos.

Anexo AD. Evidencia gráfica complementaria



Figura AD.1. Banco didáctico de bombas y circuitos hidráulicos para prácticas de laboratorio.

Anexo AE. Evidencia gráfica complementaria

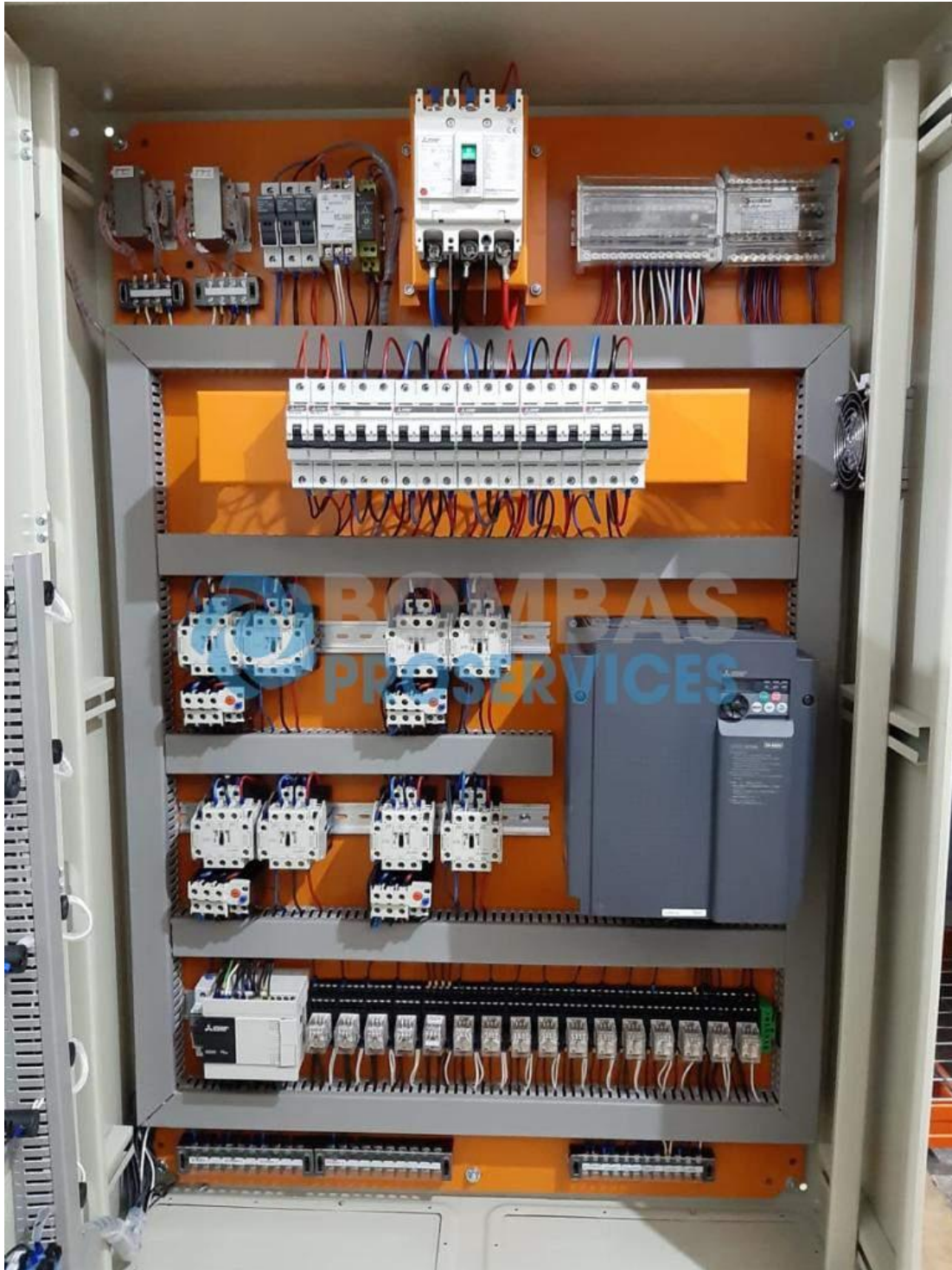


Figura AE.1. Tablero eléctrico con dispositivos de protección, control y variador de frecuencia.

Anexo AF. Evidencia gráfica complementaria

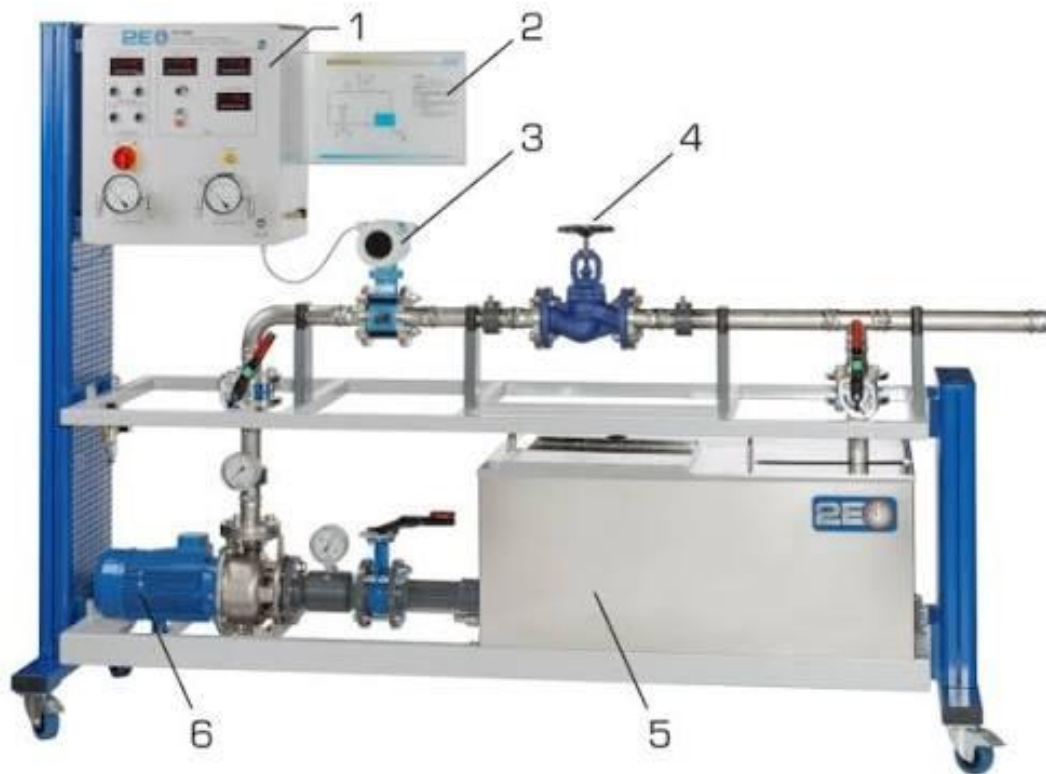


Figura AF.1. Banco experimental para el análisis de caudal, presión y comportamiento de bombas.

Anexo AG. Evidencia gráfica complementaria



Figura AG.1. Equipo didáctico para observar los regímenes de flujo en una tubería transparente.