

Banco de pruebas para sistemas de fluidos no estacionarios

Héctor Suarez, José Barriola, Miguel Pérez

Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela
hesuarez99@gmail.com, jbarriola@unimet.edu.ve, mperez@unimet.edu.ve

Resumen— Con el propósito de establecer una plataforma versátil para la investigación y la enseñanza de la ingeniería y la ciencia de fluidos, se diseñó y construyó un banco de pruebas especializado para la Universidad Metropolitana. Este banco se enfoca en evaluar sistemas de fluidos no estacionarios, priorizando la medición precisa de caudal, presión y nivel en tanques. El desarrollo se centró en la selección de sensores y materiales de bajo costo, destacando la importancia de mediciones confiables y precisas. Se formuló un algoritmo en Matlab® para el cálculo sistemático de parámetros. La automatización se logró mediante un Arduino Mega, con la interfaz Humano-Máquina en Matlab® para facilitar la operación. Rigurosas pruebas demostraron la capacidad del banco para simular condiciones reales de manera efectiva. Los resultados, obtenidos experimentalmente y mediante Matlab®, respaldaron la eficacia y fiabilidad del sistema desarrollado, contribuyendo a la investigación y enseñanza en ingeniería y ciencia de fluidos.

Palabras clave— banco de pruebas, fluidos en estado no estacionario, Arduino, nivel, caudal, Matlab.

Recibido: 2 de enero de 2024. Revisado: 27 de febrero de 2024. Aceptado: 11 de junio de 2024.

Test bench for non-stationary fluid systems

Abstract— A versatile platform for research and education in fluid engineering and science was established through the design and construction of a specialized test bench for the Universidad Metropolitana. The bench focuses on evaluating non-steady fluid systems, prioritizing the precise measurement of flow rate, pressure, and tank level. Development focused on the selection of low-cost sensors and materials, emphasizing the importance of reliable and accurate measurements. A Matlab® algorithm was formulated for the systematic calculation of parameters. Automation was achieved using an Arduino Mega, with the Human-Machine Interface in Matlab® to facilitate operation. Rigorous testing demonstrated the bench's ability to effectively simulate real-world conditions. Results, obtained experimentally and through Matlab®, supported the efficacy and reliability of the developed system, contributing to research and education in fluid engineering and science.

Keywords- test bench, non-stationary fluids, Arduino, level, flow, Matlab.

1 Introducción

En el contexto laboral actual, es crucial que los ingenieros y profesionales sean altamente prácticos y estén plenamente familiarizados con los elementos con los que trabajan, incluyendo su funcionamiento, características y parámetros de operación. En respuesta a esta necesidad, se ha desarrollado un banco de pruebas, que puede definirse como un arreglo en el cual se llevan a cabo distintos procesos con el fin de estudiar, medir y observar fenómenos científicos, estos pueden ser de

distintos ámbitos, pero en el caso del proyecto a desarrollar trata del estudio del comportamiento de fluidos bajo condiciones específicas, cuyas variables serán de presión, caudal y nivel en tanques. Este banco de pruebas brindará a los estudiantes de la Universidad Metropolitana de Venezuela una valiosa experiencia práctica en el transporte de fluidos en entornos industriales, permitiéndoles evaluar, familiarizarse e interactuar con equipos como bombas, válvulas y rotámetros, entre otros dispositivos similares.

En el campo de la mecánica de fluidos, se enseña a esperar estabilidad en los valores obtenidos y a trabajar a partir de ese punto conocido como estado estacionario, donde no hay cambios significativos en el tiempo. Sin embargo, en la actualidad, la Universidad Metropolitana no cuenta con un banco de pruebas para investigar el comportamiento de los fluidos en estado no estacionario definido como aquel en el cual la cantidad de fluido que se desplaza por cierto espacio con dimensiones definidas no es constante, lo cual generalmente es un fenómeno transitorio, que podría variar su velocidad hasta convertirse en flujo estacionario o detenerse por completo. En la actualidad este tipo de flujo se encuentra en una gran cantidad de sistemas, donde factores como cierre de válvulas o variaciones de temperatura o presión generan un cambio en el comportamiento del fluido [1].

Por lo tanto, resulta indispensable diseñar y construir un banco de pruebas que brinde a los estudiantes la oportunidad de experimentar y trabajar con este tipo de estado en la mecánica de fluidos, permitiéndoles adquirir experiencias reales desde el principio.

El objetivo principal de este trabajo es la construcción de un banco de pruebas de caudal, temperatura y nivel de tanques en estado no estacionario para su uso en prácticas de laboratorio por los estudiantes de la Universidad Metropolitana. Determinando los materiales y procesos para llevar a cabo la construcción de este, además del desarrollo de un algoritmo que simule la variación de niveles en los tanques en función del tiempo, mediante el uso de la herramienta Matlab®, tomando como base las ecuaciones generales de balance de energía y procesos transitorios [2].

2 Marco metodológico y método de estudio

La metodología empleada en este trabajo fue de carácter experimental numérico y descriptivo, con un enfoque cuantitativo y aplicado, abordando un alcance prospectivo y correlacional, así como una orientación experimental [3]-[5]. Cuya población objetivo estuvo conformada por estudiantes de pregrado de las carreras de Ingeniería Mecánica, Química, Eléctrica, Producción y Civil de la Universidad Metropolitana, abarcando el programa académico de dichas carreras e incluyó asignaturas como control de procesos, autómatas programables e instrumentación y control. El objetivo principal del proyecto es reforzar la formación práctica de los estudiantes en un campo altamente demandado en la industria. Se espera que el banco de pruebas constituya una herramienta invaluable para la enseñanza y el aprendizaje.

De acuerdo con los objetivos propuestos, se establecen ciertos pasos a seguir secuencialmente para el cumplimiento de estos, los cuales describimos a continuación.

2.1 Recolección de datos

Como primera fase del proyecto se tuvo la recopilación de información necesaria para el desarrollo y diseño del sistema requerido. Detallando los aspectos claves del proceso:

2.1.1 Términos de búsqueda utilizados

Para la recopilación de información relevante y actualizada se emplearon diversos términos relacionados a la ingeniería mecánica y sistemas de fluidos para conocer a fondo el comportamiento de fluidos en estado no estacionario, así como del funcionamiento de sistemas hidráulicos y los parámetros necesarios para la construcción de un banco de pruebas. Donde se incluyeron "Banco de pruebas", "diseño de sistema de fluidos", "sistemas de fluidos", "estado no estacionario", "construcción de sistema de fluidos", entre otros.

2.1.2 Ecuación de búsqueda

Para garantizar relevancia en los resultados a obtener, se utilizó la ecuación de búsqueda ("sistemas de fluidos" OR "banco de pruebas" OR "diseño de sistemas de fluidos" OR "construcción de sistemas de fluidos")

Dicha ecuación permitió recuperar trabajos de investigación o estudios similares, los cuales cumplieron función de antecedentes o material base para el proyecto. Entre estos se encuentra "Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios" [6], trabajo de grado orientado al estudio de fluidos y sus pérdidas de energía en accesorios.

2.1.3 Ventana de observación

La ventana de observación tuvo una extensión de cuatro meses, desde junio de 2022 hasta septiembre de 2022,

permitiendo recopilar información relacionada, prestando principal atención a estudios recientes.

2.1.4 Base de datos

La principal base de datos utilizada fue Google Scholar, la cual tiene como mayor ventaja su amplia cobertura en fuentes académicas.

2.2 Diseño y selección de materiales

Luego de haber recopilado la información necesaria, se inició el proceso de diseño detallado del sistema, elaborando bosquejos de diagramas P&ID, considerando las posiciones de los distintos instrumentos en cada uno de los tramos hasta llegar al definitivo, posteriormente se elabora una lista de los materiales necesarios para la construcción, tomando en cuenta factores de precisión, disponibilidad y costos para esto. Finalmente se realizó un modelo tridimensional usando la herramienta Autodesk Inventor Professional 2022®, para tener una referencia más acertada a la hora de llevar a cabo el proceso de construcción.

Para la automatización del sistema se seleccionó un microcontrolador Arduino Mega, debido a su capacidad para gestionar una gran cantidad de señales discretas y analógicas. El sistema comprende:

- Válvulas: 1 manual, 5 electroválvulas, 2 analógicas (convertidor digital-analógico DAC implementado para su control)
- Sensores: 3 volumétricos (caudal), 3 transmisores de presión (nivel)
- Bombas: 2 para el manejo del caudal
- Todos los componentes son gestionados por el Arduino Mega.

La Fig. 1 muestra el esquema electrónico del sistema, detallando la disposición de los componentes y sus conexiones con el Arduino Mega.

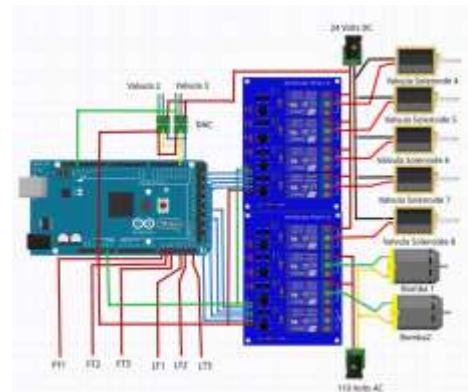


Figura 1. Esquema electrónico del sistema
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Diseño de Matlab®

En esta etapa se procedió a programar un simulador del banco de pruebas en la plataforma de Matlab®, donde con la utilización del modelo matemático desarrollado, el cual consta de fórmulas relacionadas al régimen, velocidades y pérdidas de energía del fluido en las tuberías y accesorios, además de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de los niveles en cada tanque en función del tiempo bajo ciertas condiciones iniciales, se pueden obtener resultados teóricos de dicho banco de pruebas y así tener un primer acercamiento al funcionamiento del sistema.

2.4 Construcción del banco de pruebas

Para esta etapa ya se conoce el comportamiento teórico del sistema, reflejado en los datos arrojados por el simulador, además de los distintos materiales y componentes a utilizar, como la cantidad de metros de tubería, posicionamiento de los sensores de caudal y presión tanto digitales como analógicos, por lo tanto, se construyó el banco de pruebas de manera detallada, apegándose lo más posible a las dimensiones y características del simulador y del modelo tridimensional, para lograr obtener resultados experimentales aptos para su comparación. Posteriormente se procedió a la procura e instalación del controlador, los sensores y materiales requeridos para el banco de prueba.

2.5 Análisis y comparación de resultados

Una vez realizadas las pruebas experimentales en los sistemas creados anteriormente, se pudieron comparar los resultados obtenidos en el banco de pruebas con los del simulador de Matlab®.

2.6 Elaboración de una ficha técnica y guía de laboratorio

En esta última etapa se elaboró una guía de laboratorio para los estudiantes de la Universidad Metropolitana [7], la cual se basa en una descripción teórica y de funcionamiento del banco de pruebas, así como de los objetivos a lograr. Dicha guía también expone los pasos a seguir para la realización de la práctica, con todas las medidas adecuadas para su buen funcionamiento.

3 Análisis y resultados

Para realizar el diseño y selección de materiales del banco de pruebas, se inspeccionó el laboratorio de Procesos de separación, se decidió aprovechar el espacio y estructura existente de un trabajo de grado previamente realizado “Construcción de bomba de golpe de ariete para el laboratorio de fluidos de la Universidad Metropolitana”, el cual estaba constituido por dos bases metálicas, dos tanques de 60 litros y tuberías de desagüe como se observa en la Fig. 2. Esta estructura debía modificarse sin afectar el sistema existente, por lo que se procedió a incluir válvulas de control ON/OFF que aíslan

ambos sistemas permitiendo que los estudiantes puedan operar tanto el sistema de bombas de ariete como el banco de medición sin que afecte una a la otra, además de soldar tubos metálicos que cumplirían función de soportes para los tramos de tuberías transversales y para el tanque principal (tanque cilíndrico que se puede apreciar en la Fig. 4).



Figura 2. Materiales existentes para el banco de pruebas, estructuras metálicas con sus reservorios de agua.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Procesos de separación

A partir de esto se determinó el diagrama P&ID del sistema, Fig. 3, para definir la cantidad de instrumentos a utilizar, así como el recorrido general de la red de tuberías.

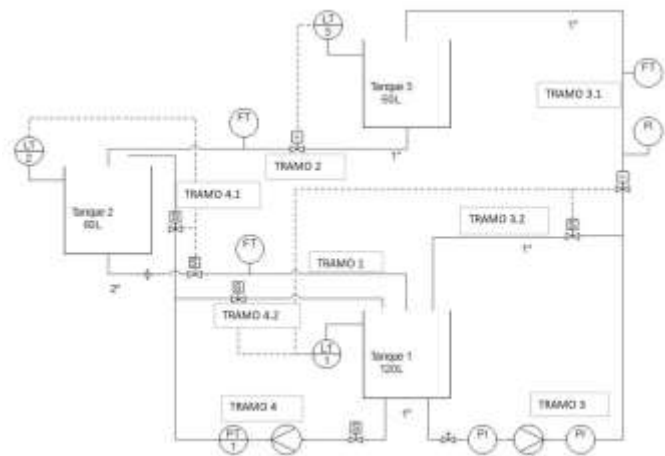


Figura 3. Diagrama P&ID

Fuente: Elaborado en el software EDraw Max [8].

Una vez establecido el esquema general del sistema se realizó un modelo tridimensional del banco de pruebas propuesto, con el fin de tener una referencia más acertada al momento de llevar a cabo la construcción con respecto a las posiciones de las bombas e instrumentos.

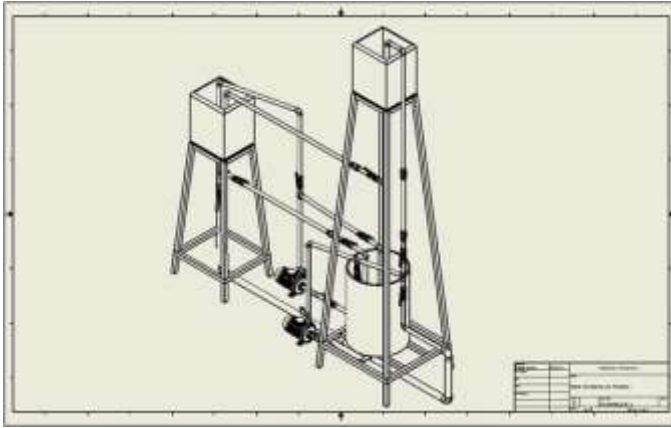


Figura 4. Plano isométrico del Banco de pruebas propuesto.
Fuente: Elaborado en el software Autodesk Inventor Professional 2022® [9].

En el proceso de diseño se tomaron en cuenta los instrumentos proporcionados y otros parámetros para la selección de materiales, teniendo en cuenta que el sistema estaría compuesto por tuberías PVC norma RDE (radio dimensional estándar) 13,5 de 1 pulgada, la cual le brinda alta resistencia a presiones y durabilidad. Además, se realizó el análisis de esfuerzo de los soportes metálicos para el tanque inferior que sería implementado, el cual contaría con una capacidad de 120 litros, como se puede observar en la Fig. 5, introduciendo los datos generales del material a utilizar se tiene que presentaría una deformación en su punto medio de 0,1513 milímetros, soportando la carga producida por el tanque a máxima capacidad.

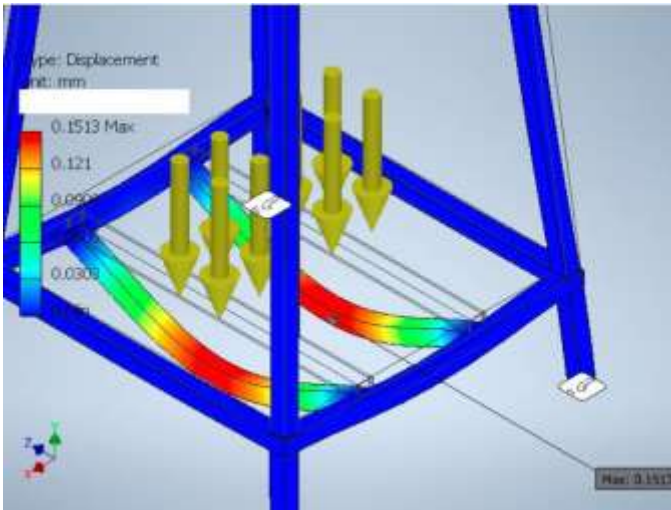


Figura 5. Simulación de deformación de estructura.
Fuente: Elaborado en el software Autodesk Inventor Professional 2022® [9].

Luego de determinar el modelo virtual del banco de pruebas, se tienen bases dimensionales para hacer los cálculos del estudio del sistema. En primer lugar, determinando las pérdidas de energía continuas [10], las pérdidas por fricción por cada metro de tubería están dadas por Pavco [11], empresa encargada de la fabricación de las tuberías utilizadas, obtenidas mediante la ecuación de Hazen & Williams [12].

Para el régimen de flujo se calcula la velocidad del fluido en la tubería mediante la ecuación del número de Reynolds [13], tomando valores de medidas de las tuberías reales y la viscosidad cinemática del agua a 20 grados centígrados [14].

Tabla 1
Datos para caudales estimados

Propiedades físicas del agua a 20°C	
Densidad (Kg/m ³)	998,2
Viscosidad cinemática (m ² /s)	1,004E-06

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo los datos de la tabla 2, los resultados de número de Reynolds extraídos indican que el flujo en el sistema es de régimen turbulento en todo momento ya que muestran valores por encima de 4000 en el rango de caudales establecido.

Tabla 2
Valores obtenidos de pérdidas por fricción en distintos diámetros de tubería

Q (m ³ /s)	V (m/s)	Reynolds	hf (m/m)
0,0001	0,1684	4611,52	0,0014
0,0002	0,3367	9223,03	0,0049
0,0003	0,5051	13834,55	0,0104
0,0004	0,6734	18446,06	0,0177
0,0005	0,8418	23057,58	0,0267
0,0006	1,0102	27669,10	0,0374
0,0007	1,1785	32280,61	0,0497
0,0008	1,3469	36892,13	0,0637
0,0009	1,5153	41503,64	0,0792
0,0010	1,6836	46115,16	0,0962
0,0011	1,8520	50726,68	0,1148
0,0012	2,0203	55338,19	0,1348
0,0013	2,1887	59949,71	0,1563
0,0014	2,3571	64561,22	0,1793
0,0015	2,5254	69172,74	0,2037
0,0016	2,6938	73784,25	0,2295
0,0017	2,8622	78395,77	0,2568

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas las pérdidas por fricción continuas por metro de tubería, se determinaron las pérdidas localizadas en cada uno de los tramos, a partir de los valores de los coeficientes de pérdida de cada accesorio presente.

Es posible calcular las pérdidas totales del sistema, para ello se procede a hacer la sumatoria de estos según corresponda para cada sección y diámetro. De igual manera ya se conocen las pérdidas por fricción continuas por metro de tubería, por lo cual se multiplica por la longitud de los tramos respectivos. Finalmente se suman estos datos obtenidos para tener la pérdida de energía en cada uno de los tramos bajo distintas condiciones de caudal.

Con esto se puede hacer el balance de energía en los tramos de tuberías relacionados a las bombas hidráulicas para interceptar las curvas del sistema con la curva característica de la bomba, utilizando la ecuación 1 [15].

$$H = \frac{P_3 - P_1}{\gamma} + Z_3 - Z_1 + \frac{V_3^2 - V_1^2}{2g} + H_r \quad (1)$$

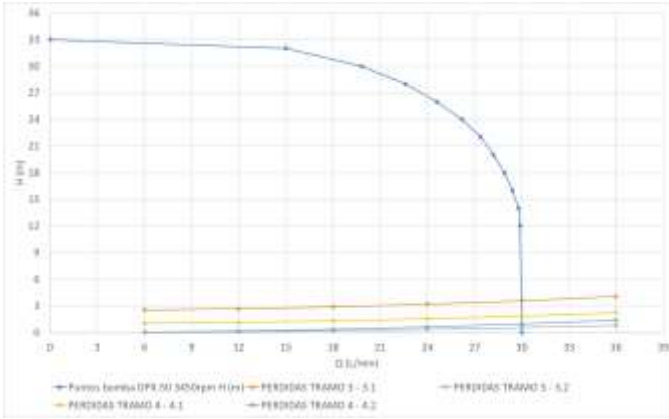


Figura 6. Curvas del sistema interceptadas con la curva característica de la bomba.
Fuente: Elaborado en software Microsoft Excel [16].

Como se puede observar en la Fig. 6, los puntos de operación indican que el montaje del sistema no genera pérdida de carga significativa para la bomba, sin embargo, el caudal suministrado por la bomba será regulado por estrangulación [17], usando una válvula de control a la salida de esta, por lo que las pérdidas de carga serán mayores, como lo indica la teoría.

Para el desarrollo del simulador en la plataforma de Matlab®, ya se conocen los parámetros fundamentales, dimensiones y comportamiento teórico del sistema, por lo que se procede a realizar los cálculos necesarios para el desarrollo del código del simulador, tomando como base la teoría de balances en procesos transitorios, que indica que un sistema se encuentra en condición transitoria, o en estado no estacionario, si el valor de alguna de las variables a estudiar cambia con el tiempo. Los sistemas continuos siempre son transitorios al arrancar o detenerse hasta que alcanzan un estado de equilibrio, de igual manera sucede al realizar cambios planeados en la operación, como la acción de abrir o cerrar válvulas, causando así variación en el volumen de fluido en algún reservorio, o la variación del caudal en las tuberías. Estos procesos se pueden analizar mediante balances de masa y energía que relacionan las entradas, salidas, generaciones, consumos y acumulaciones del fluido en el sistema. que indica que existe un diferencial de flujo o acumulación en los tanques que equivale al flujo de entrada menos el flujo de salida, se toma como base la ecuación general de balance, la cual parte de la ley de conservación de masa:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \quad (2)$$

Obteniendo así en una serie de ecuaciones diferenciales, que permiten describir el cambio de la altura de llenado de un tanque respecto al tiempo, es por ello que se toman los caudales de entrada y de salida en cada tanque y se divide entre el área efectiva del reservorio, como se muestra en las ecuaciones 3, 4 y 5.

Tanque 1:

$$\frac{dh}{dt} (1) = \frac{Q1 \cdot Va4 + Q2 \cdot Va6 + Va8 \cdot Q4 - Q1 \cdot Va1 - Q2 \cdot Va5}{\text{Area Tanque 1}} \quad (3)$$

Tanque 2:

$$\frac{dh}{dt} (2) = \frac{Q2 \cdot Va7 + Va3 \cdot Q3 - Va8 \cdot Q4}{\text{Area Tanque 2}} \quad (4)$$

Tanque 3:

$$\frac{dh}{dt} (3) = \frac{Q2 \cdot Va2 - Va3 \cdot Q3}{\text{Area Tanque 3}} \quad (5)$$

Donde:

Factores Qx: los caudales correspondientes a cada tramo

Factores Vax: variables que representan el estado de cada válvula

Área de tanque x: el área transversal de cada tanque

Una vez determinadas las ecuaciones diferenciales se desarrolló el código del simulador, que, en base a los datos iniciales, proporcionados por el usuario en la interfaz del simulador (Fig. 7), puede resolver el sistema de ecuaciones diferenciales y reflejar el comportamiento de los niveles en los tanques bajo diversas condiciones.

Para el manejo del sistema de control del banco, se desarrolló una interfaz Humano Maquina (IHM) desarrollada en Matlab, mostrada en la Fig. 8, y contenida en un ordenador dedicado a la operación del banco, mediante la aplicación de IHM, mediante esta aplicación, además de indicar las lecturas de los sensores de presión, caudal y nivel de tanques a tiempo real, se podrá controlar los caudales y niveles en los tanques, así como operar las bombas. Haciendo posible que el usuario sea capaz de interactuar con el sistema por medio del computador.

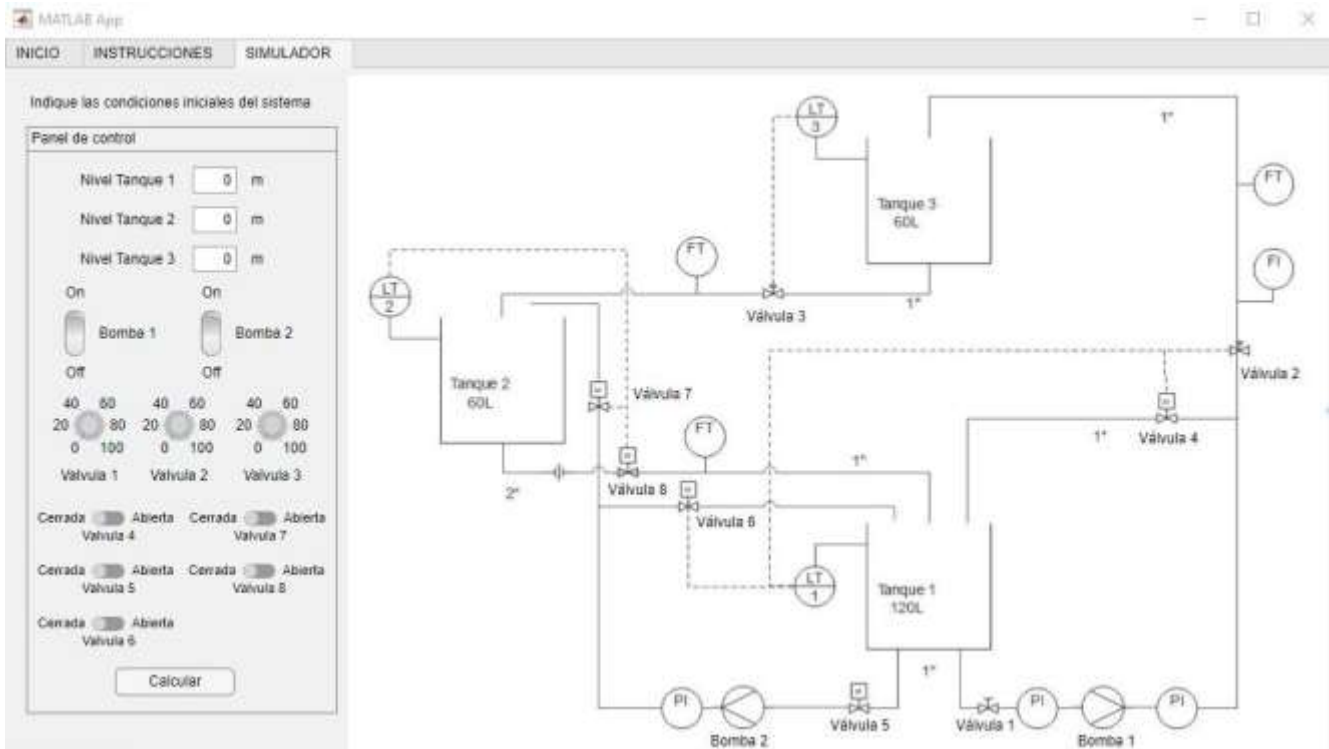


Figura 7. Interfaz de usuario del simulador. Fuente: Elaborado en software Matlab® [18].

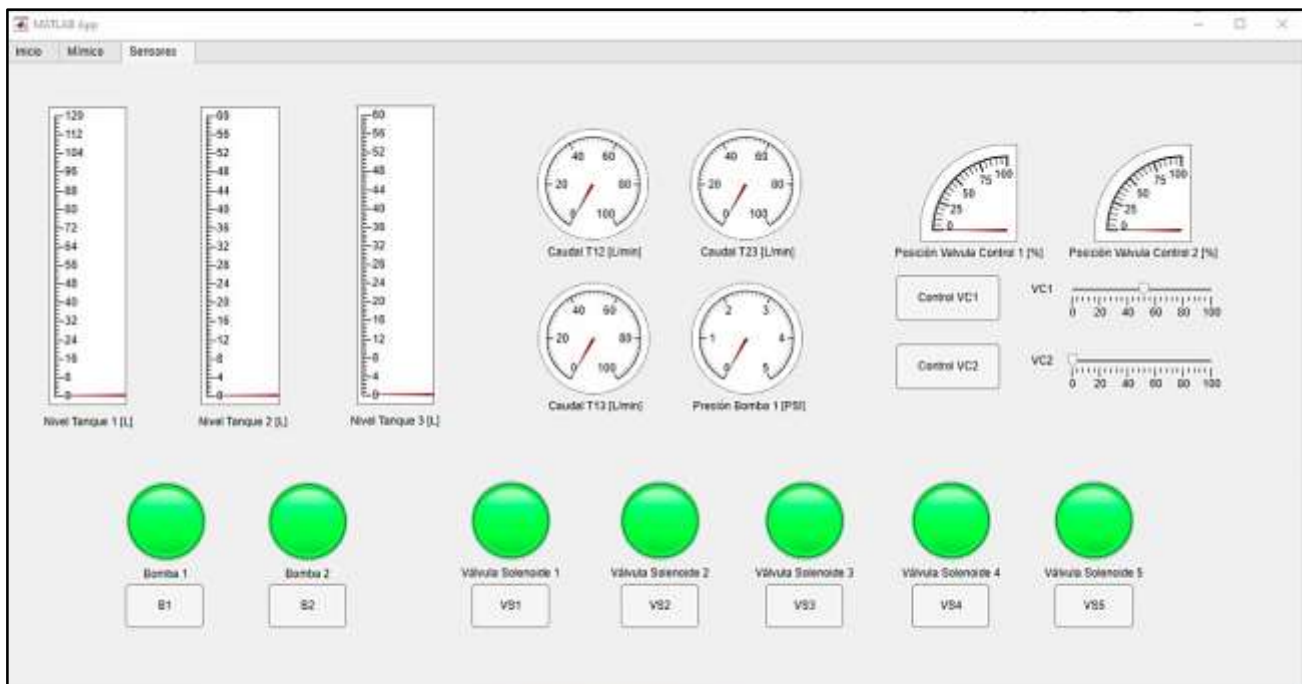


Figura 8. Interfaz de control del sistema. Fuente: Elaborado en software Matlab® [18].

Una vez culminado el proceso de diseño, se inició la fase de construcción donde fueron implementadas unas bases metálicas con tubos cuadrados de una pulgada, para ser utilizados de soporte para el tanque de agua principal y para las tuberías relacionadas transversales. Posteriormente se fabricaron unas bases para fijar las bombas, cuyas especificaciones se muestran

en la Fig. 9, al suelo, utilizando parte del tubo cuadrado de una pulgada sobrante de los soportes metálicos antes, además, se incorporaron unas pequeñas gomas con la finalidad de disipar las vibraciones que causará la bomba al estar en funcionamiento.



Figura 9. Características de la bomba según el fabricante
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Procesos de separación [19]

Luego de instalar la red de tuberías para cada tanque siguiendo los planos determinados anteriormente (Fig. 10(a)), se procedió a cablear los sensores y válvulas hasta el gabinete donde estaría el sistema de control y lectura de datos por medio de Arduino como se observa en la Fig. 10 (b).



Figura 10 (a). Montaje del sistema de tuberías. (izquierda)
Figura 10 (b). Instalación de componentes eléctricos. (derecha)
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Procesos de separación

Para la programación del sistema, se utilizó el programa Arduino IDE, el cual se encarga de enviar señales a las electroválvulas para controlar el estado de estas, además de recolectar la data en tiempo real del comportamiento del sistema.

Una vez culminado todo el proceso de instalación de instrumentos, tuberías y componentes de control, se procedió a probar el banco de pruebas para recolectar data y poder ser comparada con la obtenida en el simulador Matlab®.

Se obtuvieron datos del caudal a la salida de la bomba por medio de un sensor de flujo de paletas, un rotámetro (Fig.11) y la medición de variación de volumen en el tanque destino según el tiempo. Donde en el rotámetro mostrado en la Fig. 11, muestra una lectura de 1425 litros por hora aproximadamente teniendo la válvula de estrangulamiento totalmente abierta.

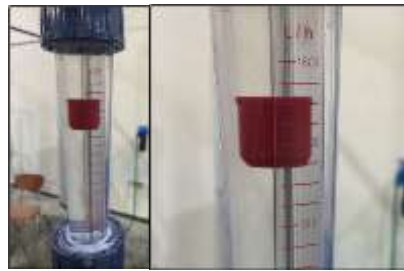


Figura 11. Lectura del rotámetro del caudal a la salida de la bomba.
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de procesos de separación.

De igual manera se obtuvieron datos del sensor de flujo mostrado en la Fig. 12, el cual en promedio arroja un caudal de 24 litros por minuto.



Figura 12. Lectura del sensor de flujo a la salida de la bomba.
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de procesos de separación

Por último, se determinó el caudal tomando el tiempo en que se alcanzan las marcas de volumen en el tanque destino, para así calcular el caudal con el que descarga la bomba en promedio.

Tabla 3
Caudal de llenado del tanque 3 teórica. (Fig. 13)

t (s)	Litros	Q (L/s)
33,19	13	0,3916
56,40	23	0,4308
81,87	33	0,3926
110,41	43	0,3503
Q promedio		0,3913

Fuente: Elaboración propia.

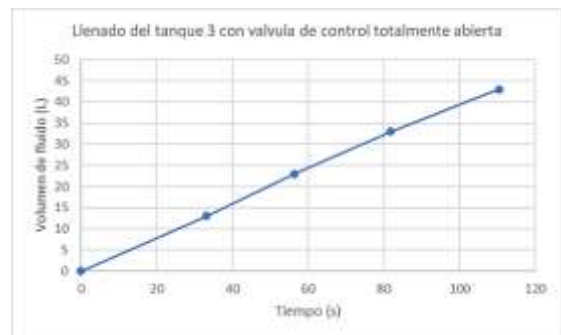


Figura 13. Llenado de tanque 3 teórico.
Fuente: Elaborado en software Microsoft Excel [16].

Llevando las tres mediciones a las mismas unidades, queda de la siguiente manera:

$$Q_{\text{Rotámetro}} \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 23,75 \frac{L}{\text{min}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{Sensor}} \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 24,0 \frac{L}{\text{min}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{cronómetro}} \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 23,48 \frac{L}{\text{min}} \quad (7)$$

Los datos anteriores se pueden afirmar que los instrumentos tienen una calibración adecuada, ya que los valores tienen una desviación de no más de 2% entre sí, lo cual entra en un rango aceptable.

En el tramo en el que se obtuvieron los datos anteriores se encuentra una válvula motorizada, con la cual variando su grado de paso se restringe el caudal. Para conocer de mejor manera el comportamiento del fluido, se realizaron distintas pruebas variando el porcentaje de apertura de la válvula para observar el cambio del caudal, obteniendo los datos reflejados en la tabla 4.

Tabla 4
Variación del caudal por estrangulamiento de la bomba (Fig. 14).

Porcentaje de apertura de válvula	Caudal (L/min)
100%	23,75
90%	23,33
80%	22,91
70%	21,66
60%	20,00
50%	16,66
40%	14,00
30%	8,33

Fuente: Elaboración propia.



Figura 14. Variación del caudal por estrangulamiento de la bomba.

Fuente: Elaborado en software Microsoft Excel [16].

Esto denota que el cambio del caudal por estrangulamiento no sigue un patrón linealmente proporcional al porcentaje de paso de la válvula de control, lo cual debe ser tomado en cuenta al momento de agregarse al simulador.

También se compararon tiempos de llenado y vaciado de los tanques de manera experimental y teórica, para demostrar la validez del modelo matemático desarrollado.

En primer lugar, se calculó el caudal teórico con el que debería descargar el tanque 3 por gravedad, esto aplicando la ecuación general de energía.

$$W_s + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hr = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \quad (8)$$

Donde:

Ws: la energía por equipo

P: la presión en el punto a evaluar

V: la velocidad del fluido

z: la altura a la que se encuentra

Y: el peso específico del fluido

g: la aceleración por gravedad

hr: las pérdidas por fricción.

Sustituyendo las ecuaciones de Darcy-Weisbach, de perdidas localizadas, la de Swamee e iterando se tiene que la velocidad del fluido es de 0,8995 m/s.

Usando la ecuación de caudal en tuberías:

$$Q = V * A \quad (9)$$

$$Q = 32,05 \frac{L}{\text{min}}$$

Siendo este el caudal teórico manejado en la descarga por gravedad del tanque 3, se compara con el caudal experimental mostrado a continuación: (Fig. 15 y 16).

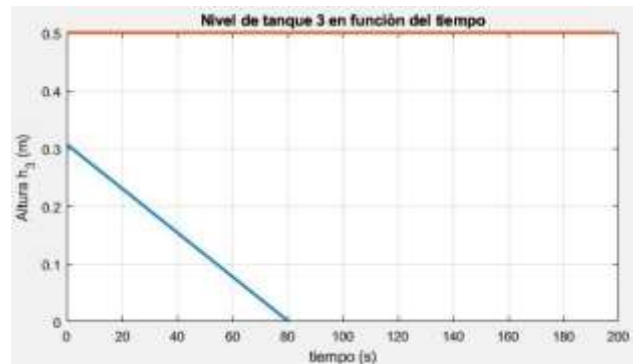


Figura 15. Vaciado del tanque 3 teórica.

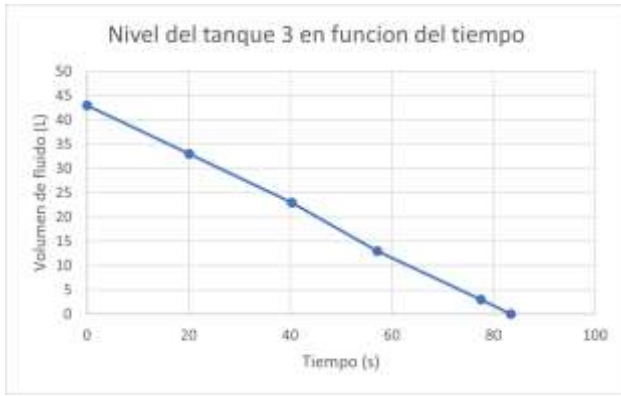


Figura 16. Vaciado del tanque 3 real.
Fuente: gráfico generado por el simulador desarrollado en Matlab® y Microsoft Excel [18] y [16].

En el gráfico anterior (Fig. 16) se muestra como teóricamente el tanque se vacía en aproximadamente 80 segundos. Para realizar la comparación de los datos teóricos con datos reales, se tomó el tiempo de vaciado del tanque teniendo como marca inicial 43 litros, donde se obtuvo un caudal promedio de 0,5170 L/s o 31,02 L/min y un tiempo de vaciado de 83,44 segundos, lo cual es muy cercano al valor teórico encontrado anteriormente.

Además, se realizaron pruebas, variando el paso de la válvula de control a la salida del tanque 3, dando los valores del comportamiento del caudal de la siguiente manera: (Tabla 5).

Tabla 5
Variación del caudal por estrangulamiento por gravedad. (Fig. 17).

Porcentaje de apertura de válvula	Caudal (L/min)
100%	31,00
90%	30,00
80%	26,00
70%	22,00
60%	14,00
50%	9,00
40%	7,00
30%	5,00
20%	4,00

Fuente: Elaboración propia.

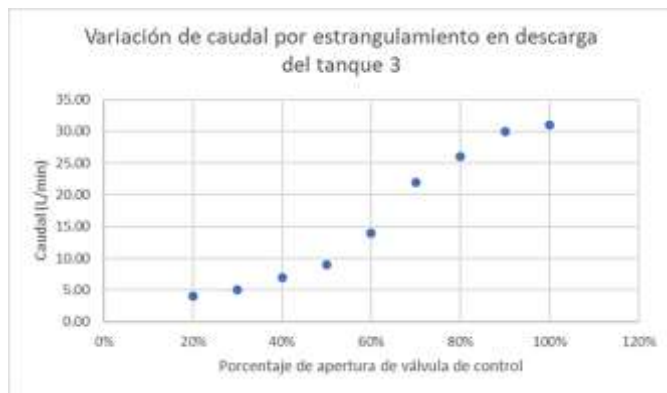


Figura 17. Gráfica de vaciado del tanque 3 teórica.
Fuente: Elaborado en software Microsoft Excel [16].

De manera similar, se hace el mismo estudio para el vaciado del tanque 2 obteniendo el comportamiento mostrado real o experimental, véase la Fig. 18 y el obtenido por el simulador desarrollado en Matlab® (Fig. 19).

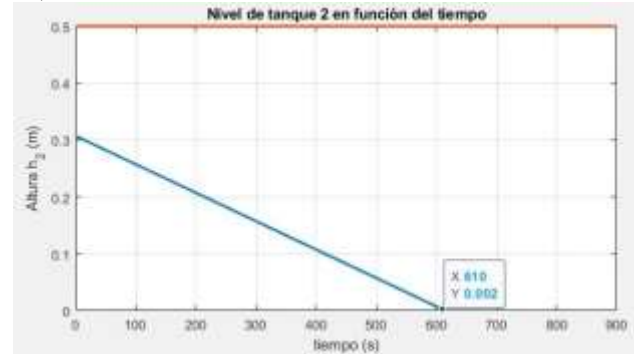


Figura 18. Gráfica de vaciado del tanque 2 experimental.



Figura 19. Gráfica de vaciado del tanque 2 real.
Fuente: gráfico generado por el simulador desarrollado en Matlab® y Microsoft Excel [18] y [16].

Los resultados muestran valores congruentes, llegando a un tiempo de vaciado en alrededor de los 610 segundos, como lo indica la teoría.

Finalmente, para el uso adecuado del sistema, se diseñó una propuesta de guía de práctica de laboratorio, la cual incluye una base teórica acerca del funcionamiento del banco de pruebas, una descripción de los elementos que lo componen, el procedimiento experimental, y un manual de uso con la finalidad de preservar la vida útil del equipo. Dicha práctica está orientada hacia el control de procesos de un sistema de bombeo y nivel en tanques, con el objetivo principal de que el usuario, con el uso de la interfaz de control desarrollada en Matlab®, pueda variar la apertura de las válvulas motorizadas ubicadas a la entrada y salida del tanque 2, hasta conseguir que el sistema entre en estado estacionario, durante el proceso el usuario puede observar el caudal en los tramos y el nivel de agua en el tanque en tiempo real. De esta forma los alumnos pueden estudiar el comportamiento del flujo transitorio por medio de instrumentos electrónicos y análogos que se podrán encontrar en el campo laboral.

El sistema implementó nuevas prácticas para la enseñanza, permitiendo la demostración de los principios

de Bernoulli y continuidad, y la comparación de resultados reales con simulaciones en Matlab. Estas prácticas inéditas fueron incorporadas por los profesores a las asignaturas de laboratorio de fluidos y transferencias (FPTEN05) y mecánica de fluidos I (BPTEN15).

4 Conclusiones

Con la construcción del banco de pruebas y el desarrollo del simulador en Matlab, se ha demostrado la validez del diseño propuesto y del modelo matemático, mostrando resultados experimentales que son congruentes con los teóricos, lo cual significa una herramienta valiosa para el estudio y comprensión de los sistemas de flujo no estacionarios.

Teniendo que el banco de pruebas se basa en la manipulación directa y observación de los fenómenos de flujo no estacionario se logra cumplir el objetivo principal del proyecto, que fue brindar a los estudiantes de la Universidad Metropolitana una experiencia práctica que mejore la comprensión de conceptos teóricos y la capacidad de aplicar estos en el campo laboral.

Por otro lado, el simulador de Matlab sirve de complemento a la práctica, brindando datos detallados del comportamiento teórico del sistema a los estudiantes, para poder visualizar y predecir las variaciones de caudal, presión y nivel en los tanques, donde su comparación con los datos experimentales promueve el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y resolución de problemas. Por lo que, tanto el banco de pruebas como el simulador de Matlab no solo han demostrado validez técnica, sino que también un aporte pedagógico. Estas herramientas ofrecen un enfoque integral para el estudio de los sistemas de flujo en estado no estacionario. El proyecto seguirá en constante evolución, explorando nuevas técnicas y evaluando el impacto en el aprendizaje de los futuros ingenieros, con el fin de maximizar el potencial educativo.

5 Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación N°A-04-21-22 titulado: “Desarrollo de un laboratorio de Instrumentación”. Decanato de Investigación y Desarrollo Académico. Universidad Metropolitana, Caracas-Venezuela. Los autores agradecen a la Universidad Metropolitana el financiamiento otorgado al presente trabajo.

6 Declaración de conflicto de intereses

Los autores que aparecen en el artículo declaran que no existe ningún conflicto de intereses potencial relacionado con él.

Referencias

- [1] B. Noguera, (septiembre, 2020). “Estado transitorio o no estacionario”, *IQR Ingeniería Química*, Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/09/estado-transitorio-o-no-estacionario.html>
- [2] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*, 1st ed., McGraw-Hill, 2004.
- [3] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6th ed., México City, México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2014. [ISBN: 978-1-4562-2396-0]
- [4] P. Arévalo-Chávez, J. Cruz-Cárdenas, C. Guevara-Maldonado, A. Palacio-Fierro, S. Bonilla-Bedoya, A. Estrella-Bastidas, J. Guadalupe-Lanas, M. Zapata-Rodríguez, J. Jadán-Guerrero, H. Arias-Flores, and C. Ramos-Galarza, *Actualización en metodología de la investigación científica*, Quito, Ecuador: Editorial Universidad Tecnológica Indoamérica, 2020. [ISBN: 978-9942-821-13-3]
- [5] F. Arias-Odón, *El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica*, 6ta edición. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, 2012. [ISBN: 980-7-8529-9]
- [6] J. Yambombo, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdida de carga en tuberías y accesorios”, *Universidad Central de Ecuador, Quito, Ecuador, 2012*
- [7] “Manual de procedimiento. Banco de pruebas de caudal, presión y nivel en tanques”, 2023. [Online]. Disponible en: https://docs.google.com/document/d/19LKehXfJOujIKJq1uE_gbcTCvQafhn3wZJ7GfpXqPJQ/edit?usp=sharing
- [8] EDrawSoft. *EDraw Max*. 2023.
- [9] Autodesk. *Inventor Professional*, 2022
- [10] Fesmex. *Perdidas por Fricción en Tuberías*. 2021. [Online]. Disponible en: <http://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/>
- [11] Pavco. *Manual presión*. 2020 [Online]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co>
- [12] V. Yepes. “Fórmula de Hazen-Williams para calcular las pérdidas por fricción en tuberías”. [Online]. Disponible en: [Fórmula de Hazen-Williams para calcular las pérdidas por fricción en tuberías](https://www.fisicaymatematicas.com/2018/05/f%C3%B3rmula-de-hazen-williams-para-calcular-las-p%C3%A9rdidas-por-fricci%C3%B3n-en-tuber%C3%ADas/)
- [13] Thermal Engineering. “¿Qué es el número de Reynolds?” 2020. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>
- [14] C. Jiménez. “Mecánica de fluidos: Viscosidad y turbulencia” 2017. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Dinamica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] F. White, *Mecánica de fluidos*, 9.ª ed., Mc Graw Hill, 2021.
- [16] Microsoft, “Excel”, 2016.
- [17] PumpsBombas. “5.7- Control del caudal por estrangulación”. 2022 [Online]. Disponible en: <https://pumpsbombas.com/curso/curso-seleccion-de-bombas-centrifugas/leccion/5-diseno-del-sistema-de-bombeo/capitulo/5-7-control-del-caudal-por-estrangulacion/>
- [18] MathWorks, “MATLAB”, 2022
- [19] Domosa, “25-DPX-50”, 2022, [Online]. Disponible en: <https://www.domosa.com/articulo/25-DPX-50>
- [20] J. A. Sandoval Herrera, *Mecánica de fluidos*, Bogotá: Fundación Universidad de América, 2018.
- [21] R. L. Mott and J. A. Untener, *Mecánica de fluidos* (7th ed.), Pearson, 2015.

H. F. Suárez Contreras recibió el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Metropolitana, en 2023, con tesis de grado titulada “Construcción de un banco de pruebas de caudal, presión y nivel de tanques en estado no estacionario para la Universidad Metropolitana”, con Mención Honorífica. <https://orcid.org/0009-0009-5098-5884>

J. M. Barriola Damborenea recibió el título de Ingeniero Electricista en 1973, de la Universidad Central de Venezuela. De 1973 a 2018 trabajó para compañías de ingenierías dedicadas a la automatización y control de procesos industriales con énfasis en la Industria eléctrica y Petrolera. Se vinculó a la Universidad Central de Venezuela, sede en Caracas desde el año 2002 y es Profesor Titular desde el año 2019 de la Universidad

Metropolitana (Unimet), Caracas, Venezuela. Sus intereses investigativos incluyen: Automatización y Control de procesos, robótica e Internet de las cosas IOT. Miembro del C.I.V. Colegio de Ingenieros de Venezuela con el No. 12.151, AVIEM Asociación Venezolana de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, No. 1.070 y AVICE Asociación Venezolana de Ingeniería de Computación y Electrónica No. 154. <https://orcid.org/0009-0001-6214-9850>

M. M. Pérez Hernández recibió el título de Licenciado en Química opción tecnológica de la Universidad Simón Bolívar (1979), Diplomado de Estudios Avanzados (DEA) en Química Física de la Universidad de Dijon (1981), Doctor de Tercer Ciclo, Especialidad Fisicoquímica, Universidad de Dijon (1983). Se

vinculó a la Universidad Metropolitana (Unimet), Caracas, Venezuela desde el año 1984 y es Profesor Titular de esta institución desde el año 2006 hasta la presente fecha. Miembro cofundador de la Asociación Venezolana de Corrosión (ASVENCOR), 1992. Miembro NACE INTERNATIONAL (National Association of Corrosion Engineers) No. 075191, (1995-2005) y No. 137232 desde 2019. Artículos indexados escritos y presentación en congresos en el área de corrosión a alta temperatura, carbón activado, procesos de separación y pinturas industriales.

<https://orcid.org/0000-0002-8237-8538>