

## Workbench for the Study of Confined Water Flow Systems

Banco de Trabajo para el Estudio de Sistemas Confinados de Flujo de Agua

Xavier Chávez Cárdenas<sup>1</sup>, José Marcelino Gutiérrez Villalobos<sup>2</sup>, Daniel Ezequiel Silva Jauregui<sup>3</sup>, Juan Alejandro Medina Bolaños<sup>4</sup>, Ariana Sánchez Soto<sup>5</sup>

Universidad de Guanajuato, Ingeniería Civil Campus Celaya-Salvatierra<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>

x.chavez@ugto.mx<sup>1</sup>, jmgutierrez@ugto.mx<sup>2</sup>, de.silvaj Auregui@ugto.mx<sup>3</sup>, ja.medinabolanos@ugto.mx<sup>4</sup> a.sanchezsoto@ugto.mx<sup>5</sup>

### Resumen

Se construyó un banco de trabajo para el estudio de sistemas confinados de flujo de agua, aprovechando recursos y materiales adquiridos a través de otros proyectos y apoyos institucionales con el objetivo de mejorar las condiciones del laboratorio de hidráulica. El diseño garantiza diversas variables de estudio y tiene, por su flexibilidad, la capacidad de modificarse para atender necesidades futuras. El diseño se validó con base en un análisis teórico y numérico (EPANET).

**Palabras clave:** Sistemas de Distribución; Sistema en Serie, Simulación Numérica, Ecuación General de la Energía

### 1. Introducción

La distribución adecuada y eficiente del agua es de vital importancia para cualquier desarrollo urbano, por lo tanto, es primordial contar con equipo experimental de sistemas de flujo confinado durante la formación del ingeniero civil. El estudio de los sistemas de flujo se encuentra extensa y detalladamente descrito en la literatura de Mecánica de Fluidos, sin embargo, para un gran número de estudiantes resulta un tema complejo que demanda el complemento de la parte práctica. Por este motivo, el presente proyecto se enfoca en mejorar la práctica docente y posteriormente la investigación, a través de la creación de un banco de trabajo para el estudio de sistemas confinados de flujo de agua.

En 2000, Karney define y contrasta al sistema de flujo confinado (tubería presurizada) contra el sistema de canal abierto:

El término "tubería presurizada" se refiere a un sistema de tuberías en el que casi nunca se encuentra una superficie de agua libre dentro del propio conducto. Precisar esta definición es difícil porque incluso en un sistema de tuberías presurizadas, existen superficies libres dentro de los depósitos y tanques y, en ocasiones, durante breves intervalos de tiempo durante eventos transitorios (es decir, inestables), pueden ocurrir dentro de la propia tubería. Sin embargo, en un sistema de tuberías presurizadas, a diferencia de los sistemas de canal abierto, las presiones dentro del sistema de transporte suelen ser muy superiores a la atmosférica. En las últimas décadas, los sistemas de tuberías presurizadas se han vuelto notablemente competitivos como medio de transporte de diversos materiales, incluyendo agua y aguas residuales. De hecho, hoy en día se pueden encontrar tuberías en todo el mundo que transportan fluidos a través de todos los entornos imaginables y sobre todos los terrenos posibles. (p. 2.1)

Los sistemas de agua son un ejemplo de sistemas de control hidráulico, los cuales se integran principalmente por el fluido (propiedades del fluido y mecánica de fluidos), la tubería (diámetro y material), accesorios (válvulas, codos, reducciones, etc.) y equipo mecánico (bombas, turbinas y motores). Entre los diversos autores que aborda los sistemas de flujo confinado se encuentra Harper (2013), Manring & fales (2019), Mott (2006), Nayyar (2000) y Zubicaray (2003).

#### 1.1. Objetivos

Diseñar, analizar e instalar un sistema confinado (red de distribución) de flujo de agua que permita el estudio de los principios hidráulicos en tuberías a presión, utilizando materiales convencionales y simulaciones numéricas con EPANET. Con este banco de trabajo se busca fortalecer las prácticas de laboratorio en las Unidades de Aprendizaje de Hidrostática e Instalaciones, ofreciendo una alternativa funcional y económica frente a equipos comerciales especializados de alto costo.

## 1.2. Metodología

En la etapa de diseño se propusieron tres configuraciones para el banco de trabajo, con la intención de analizarlas mediante simulaciones numéricas en EPANET y cálculos teóricos en Excel para seleccionar la más eficiente. Sin embargo, debido a limitaciones de tiempo, se optó por una adaptación que integró los elementos más funcionales de las tres propuestas en un solo diseño. Esta configuración fue analizada y construida de forma simultánea. Finalmente, se realizaron pruebas de validación comparando los resultados simulados con los datos reales obtenidos del banco de trabajo construido.

## 2. Diseño

La construcción del banco de trabajo para el estudio de sistemas confinados de flujo de agua inició con el inventario del material disponible, posteriormente se realizaron tres propuestas de diseño, de cuyo análisis resultó el diseño definitivo y ejecutado

### 2.1. Inventario del material disponible

Para aprovechar al máximo los recursos existentes, se realizó un inventario del material que se adquirió a través de otros proyectos y apoyos institucionales con la finalidad de mejorar las condiciones del laboratorio de Hidráulica. La Figura 1 muestra parte del material mencionado que se destinó a la ejecución del banco de trabajo.

Artículo	UNIDAD	CANTIDAD
REX3-0126-B- TUBO PVC HID.CEM. 25MM 1" RD-26	TRAMO	3.00
REX100- 1003-VALV.ESFERA 1" PVC ROSCADA	PIEZA	4.00
REX3-0704-2- ADAPT.M/PVC HID.CEM. 25MM 1"	PIEZA	8.00
REX3-0804-6- TAPA PVC HID.CEM. 25MM 1"	PIEZA	4.00
SILUBS102- PEGAMENTO PARA PVC 225 GRS.	PIEZA	2.00
ARCINTEFO2- CINTA TEFLON GARLOCK 8.3/4" X13M	PIEZA	5.00
REX3-0109-B- TUBO PVC HID.CEM. 32MM 1 1/4" RD-26	TRAMO	3.00
REX3-0906-4- RED.BUSH.HID.CEM. 32X25MM 1 1/4X1"	PIEZA	2.00
REX3-0125-6- TUBO PVC HID.CEM. 19MM 3/4" RD-26	TRAMO	3.00
REX3-0904-0- RED.BUSH.HID.CEM. 25X19MM 1 X3/4"	PIEZA	2.00
REX3-0804-6- COPLE PVC HID.CEM. 25MM 1"	PIEZA	3.00
REX3-0306-8- COPLE PVC HID.CEM. 32MM 1 1/4"	PIEZA	3.00
REX3-0303-4- COPLE PVC HID.CEM. 19MM 3/4"	PIEZA	3.00
TEE PVC C-40 ROSCADA 1"	PIEZA	4.00
NIPPLE PVC C-80 1" X 3" ROSCADA	PIEZA	20.00
TUERCA UNION PVC C-40 ROSCA 1"	PIEZA	8.00
CODO PVC C-40 CEMENTAR ROSCA 90° 1"	PIEZA	4.00
CODO PVC C-40 CEMENTAR 90° X 1" 406-010	PIEZA	4.00
VALVULA DE PIE BRONCE CON RESORTE 1" (25MM) BRONCE 4045R.25	PIEZA	2.00
ADAPTADOR PVC C-40 HEMBRA 1" 435-010	PIEZA	4.00
VALVULA ALAN DE PIE DE BRONCE 25 MM.C/BRON	PIEZA	2.00
CODO PVC C-40 CEMENTAR 90° X 3/4" 406-007	PIEZA	4.00
CODO PVC C-40 CEMENTAR 90° X 1 1/4" 406-012	PIEZA	4.00



Figura 1. Listado y fotografías del material existente (Fuente: elaboración propia).

### 2.2. Diseños propuestos

Las tres propuestas de diseño se presentan en la Figura 2. Las propuestas comparten aspectos esenciales como lo son:

1. El emplear los dos depósitos disponibles en el laboratorio, un tanque elevado (TE) compuesto por un tambo metálico de 200 litros de color rojo colocado sobre una estructura también metálica (Figura 3) y un banco hidráulico móvil (BM) de la marca Armfield de color blanco con anaranjado (Figura 3)
2. Emplear bombas para establecer el flujo entre los dos depósitos y, además, para aprovechar el desnivel, también establecer el flujo del TE al BM sin bomba, únicamente por gravedad.
3. Diseños flexibles con la capacidad de expansión y/o adaptación a futuras propuestas.

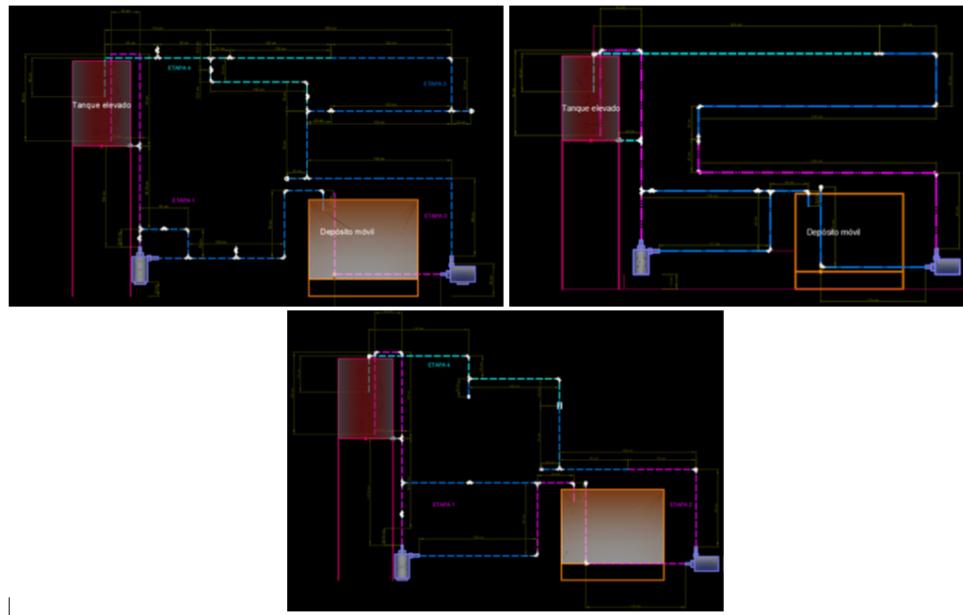


Figura 2. Las tres configuraciones propuestas del banco de trabajo (Fuente: elaboración propia).

### 2.3. Diseño definitivo

El diseño final (Figura 3) se definió integrando lo mejor de las propuestas, aprovechando al máximo el espacio y la infraestructura disponibles en el laboratorio. La configuración garantiza;

1. El estudio de sistemas en serie y paralelo.
2. El sistema en paralelo, mediante el uso de válvulas, puede ser de dos o tres ramas.
3. Para el análisis de las pérdidas de carga por fricción se integró tubería de  $\frac{3}{4}$ , 1 y  $1\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro.
4. La pérdidas menores o locales se analizan a través de los accesorios empleados (codos, tes, reducciones y válvulas)
5. El uso de tuercas de unión permite separar elementos de la red para brindarles mantenimiento o sustituirlos, como en el caso de las válvulas y bombas. Además de otorgarle flexibilidad al sistema para modificaciones futuras.



Figura 3. Diseño definitivo (Fuente: elaboración propia).

### 3. Proceso constructivo

#### 3.1. Línea del TE al BM

El proceso de construcción comenzó con la preparación y armado de la red de tuberías ubicada junto al tanque elevado. Para ello, se realizó el corte preciso de tubería de PVC, siguiendo las medidas previamente establecidas en el diseño. Posteriormente, se procedió al ensamblaje de las piezas y conexiones mediante el uso de pegamento especializado para PVC, asegurando una correcta unión en cada punto de conexión para evitar fugas.

Durante esta etapa inicial también se instalaron las conexiones correspondientes a la bomba ubicada junto al tanque elevado (Figura 4), garantizando que tanto la succión como la descarga por gravedad estuvieran alineadas por medio de una cruz. Este tramo representa una parte fundamental del sistema, ya que inicia la conducción del agua desde el TE hacia el BM.



Figura 4. Conexión de la bomba de  $\frac{1}{4}$  hp al T.E. (Fuente: elaboración propia).

A continuación, se procedió con el corte y colocación del tramo inferior de tubería, que conecta al TE con el BM. Este tramo, al tratarse de una sección larga y continua, facilitó su instalación al requerir menos uniones y minimizar posibles pérdidas, concluyendo con la descarga libre al BM como la muestra la Figura 5.

Uno de los principales retos en esta etapa fue la fijación de la tubería a la pared, la cual requirió perforaciones para instalar abrazaderas de sujeción. Este inconveniente fue solucionado utilizando un taladro, lo que permitió asegurar adecuadamente la red a lo largo del muro y garantizar la estabilidad estructural.



Figura 5. Descarga del T.E. al BM y conexión de la bomba de  $\frac{1}{2}$  hp al BM (Fuente: elaboración propia).

### 3.2. Sistema del BM al TE

El paso siguiente consistió en la instalación de un sistema modular integrado por tres ramas o líneas, ubicado en la parte media y superior de la pared del sistema, ver la Figura 6. Las ramas inferior, central y superior fueron diseñadas con diámetros distintos,  $1\frac{1}{4}$  pulgadas, 1 pulgada y una combinación de 1 pulgada y  $\frac{3}{4}$  de pulgada, respectivamente. El uso de distintos diámetros tiene el objetivo de analizar el comportamiento del flujo y las pérdidas por fricción en función del diámetro.

Se instalaron “tes” para la colocación de manómetros en cada rama, permitiendo medir la variación de presión antes y después de cada segmento. Esta configuración es clave para el estudio de pérdidas de carga por fricción y para evaluar la influencia del diámetro en las condiciones hidráulicas del flujo.



Figura 6. Plano en paralelo con manómetro en la rama superior (Fuente: elaboración propia).

Gracias a la longitud continua de ambos tramos, el proceso de corte, pegado e instalación resultó sencillo y eficiente, logrando una alineación adecuada y evitando obstrucciones o curvas innecesarias. Sin embargo,

en la rama superior se tuvo la dificultad de la altura de montaje, la cual se solucionó improvisando un andamio con una mesa, lo que permitió trabajar con seguridad y precisión

Para completar la instalación, se colocó un conjunto adicional de válvulas en las secciones verticales del sistema modular, conforme al diseño hidráulico previamente establecido. Estas válvulas permiten modificar el flujo y configuración de la red, ofreciendo una variedad de combinaciones operativas para simular diferentes casos de estudio, como flujos interrumpidos, parciales o totalmente abiertos, además de, cambiar a diferentes configuraciones en serie o paralelo.

Al finalizar el sistema, del lado izquierdo, se integró una sección en voladizo, dividida mediante una tuerca unión, permitiendo el desensamble fácil y rápido del sistema cuando se requieran mantenimientos o modificaciones. Esta línea finaliza sobre la parte superior del tanque elevado, cerrando así el circuito hidráulico completo entre el BN y el TE.

Con esta etapa se dio por terminado el proceso constructivo, logrando una red funcional, modular y didáctica; diseñada para el análisis de presiones, caudales y pérdidas de carga en distintas configuraciones hidráulicas.

## 4. Análisis del sistema por los métodos analítico y numérico

### 4.1. Escenarios analizados

Se evaluaron tres escenarios principales del sistema en serie:

1. Del tanque elevado (TE) al banco móvil (BM) sin bomba, es decir, operando únicamente por gravedad.
2. Del TE al BM con apoyo de una bomba hidráulica, simulando un sistema impulsado.
3. Del BM al TE a través de la rama superior, evaluando el retorno forzado del flujo con bomba.

Los tres escenarios corresponden a sistemas en serie, elegidos por su sencillez, en comparación con los sistemas en paralelo, y porque se analizan las dos bombas (potencias de 1/4 y ½ hp) y la línea por gravedad. En los tres escenarios, los extremos de los sistemas son tanques donde las descargas son libres. La esquematización de los tres escenarios se presenta en las Figuras 10, 11 y 12, correspondientes al análisis numérico con EPANET.

### 4.2. Método analítico

El método analítico del sistema hidráulico se realizó aplicando la ecuación general de la energía (ecuación 1), complementada con la ecuación de Darcy–Weisbach (ecuación 2) para el cálculo de pérdidas por fricción, utilizando el factor de fricción,  $f$ , obtenido mediante la expresión empírica de P. K. Swamee y A. K. Jain (ecuación 3). Para detalle de las ecuaciones consultar Mott (2006)

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - h_L + h_A - h_R = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad [1]$$

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad [2]$$

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7 \left( \frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad [3]$$

Los cálculos se resolvieron utilizando hojas de cálculo en Excel y la función buscar objetivo, con base en los parámetros físicos del sistema: longitudes de tubería, diámetros, elevaciones y características de los accesorios.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los análisis analíticos de los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. En dichos análisis el objetivo principal fue la obtención del caudal y las velocidades en los distintos tubos.

La Figura 7 corresponde al escenario 1, en el cual el agua se conduce desde el TE hasta el BM por gravedad. Al establecer la ecuación general de la energía (ecuación 1), se elimina la carga removida,  $h_R$ , porque no se cuenta con motores o turbinas; la carga agregada,  $h_A$ , se elimina al no contar con bombas, las cargas de presión,  $p_1/\gamma$ , y velocidad,  $v_1^2/2g$ , en el punto 1, correspondiente al TE, también se eliminan, puesto que se toma la superficie libre del agua; por otro lado, en el punto 2, el BM, la carga de presión,  $p_2/\gamma$ , es igualmente despreciada (igual a cero), porque la descarga es libre. Finalmente, la ecuación general de la energía para el escenario 1 queda de la siguiente forma:

$$z_1 - h_L = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad [4]$$

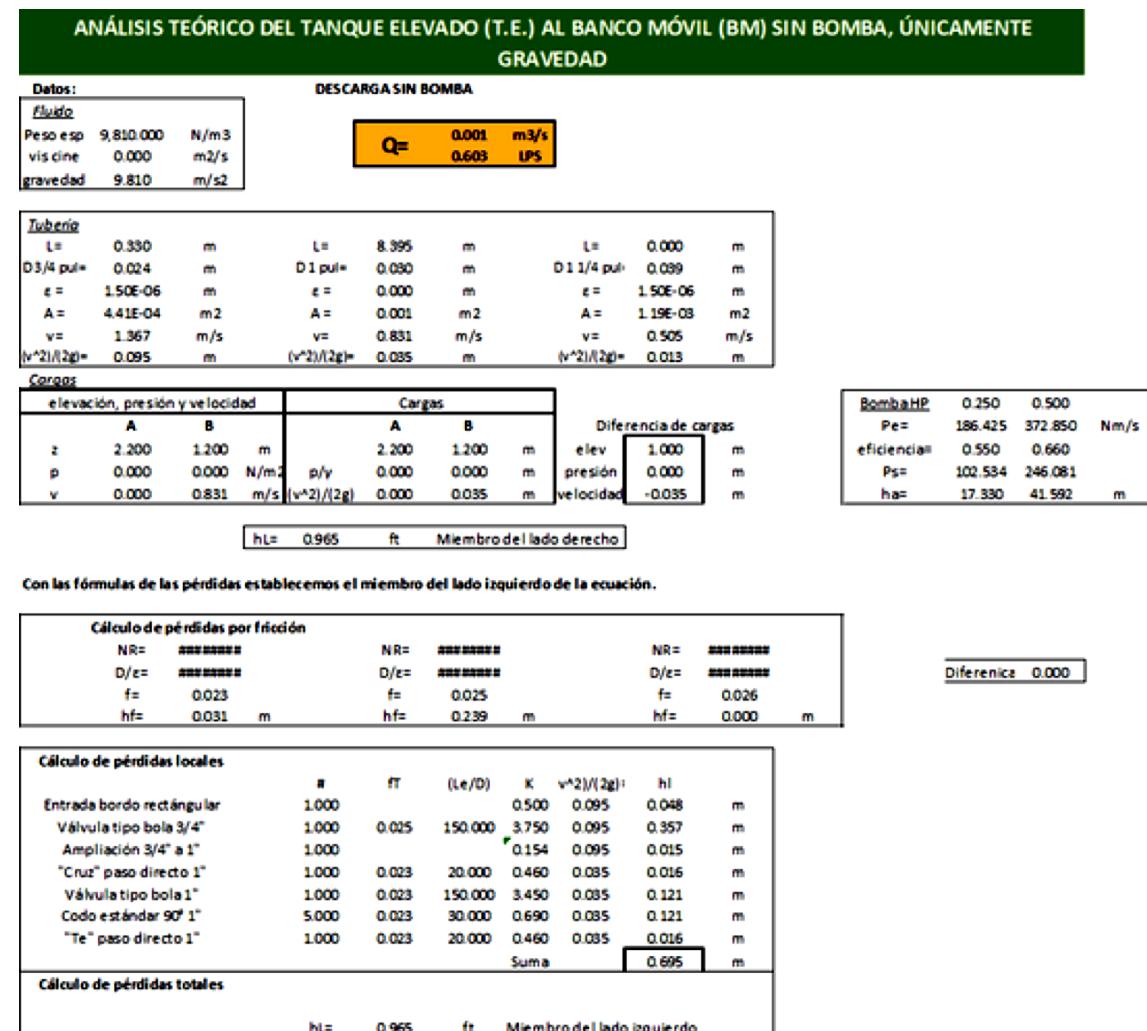


Figura 7. Hoja de cálculo del escenario 1 (Fuente: elaboración propia).

Las pérdidas de carga,  $h_L$ , desglosadas en la Figura 7, correspondientes a las pérdidas por fricción consisten en 0.33 m de tubería de  $\frac{3}{4}$  de pulgada (conexión al tanque elevado) y los 8.95 m restantes, son de tubería de 1 pulgada; mientras que, las pérdidas locales se conforman por la entrada de bordos rectangulares en el TE, una válvula tipo bola de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, una ampliación de  $\frac{3}{4}$  a 1 pulgada, una cruz de paso directo de 1 pulgada, una válvula tipo bola de 1 pulgada, 5 codos estándar  $90^\circ$  de 1 pulgada y una "Te" paso directo de 1 pulgada. Al sustituir en la ecuación general (ecuación 4), la única incógnita que queda es la velocidad,  $v$ , la cual se sustituye por el caudal,  $Q$ , al emplear la fórmula de  $Q = AV$ . En la hoja de cálculo de Excel se resuelve mediante la función buscar objetivo para la variable del caudal, siendo el resultado del escenario 1  $Q = 0.603 \text{ LPS}$  (litros por segundo).

En el escenario 2, la ecuación general de la energía se establece como lo ilustra la ecuación 5, considerando que, a diferencia del escenario 1, se cuenta con carga agregada,  $h_A$ , por la bomba con potencia de  $\frac{1}{4} \text{ hp}$ . Las cargas (posición, presión y velocidad), información de la bomba y pérdidas se desglosan en la Figura 8.  $Q = 1.654 \text{ LPS}$  fue el caudal obtenido

$$z_1 + h_A - h_L = z_2 + \frac{v^2}{2g} \quad [5]$$

ANÁLISIS TEÓRICO DEL TANQUE ELEVADO (T.E.) AL BANCO MÓVIL (BM) CON BOMBA									
Datos:		DESCARGA CON BOMBA							
<u>Fluido</u>									
Peso esp.	9.810.000	N/m <sup>3</sup>							
viscine	0.000	m <sup>2</sup> /s							
gravedad	9.810	m/s <sup>2</sup>							
		<b>Q= 0.002 m<sup>3</sup>/s</b>							
		<b>1.654 LPS</b>							
<u>Tubería</u>									
L=	0.000	m	L=	10.175	m	L=	1.200	m	
D 3/4 pul=	0.024	m	D 1 pul=	0.030	m	D 1 1/4 pul=	0.039	m	
ε =	0.000	m	ε =	0.000	m	ε =	0.000	m	
A =	0.000	m <sup>2</sup>	A =	0.001	m <sup>2</sup>	A =	0.001	m <sup>2</sup>	
v=	3.749	m/s	v=	2.278	m/s	v=	1.384	m/s	
(v <sup>2</sup> )/(2g)=	0.716	m	(v <sup>2</sup> )/(2g)=	0.265	m	(v <sup>2</sup> )/(2g)=	0.098	m	
<u>Cargas</u>									
elevación, presión y velocidad			Cargas			Diferencia de cargas			
A	B		A	B		elev	1.000	m	
z	2.200	1.200	m	2.200	1.200	m	presión	0.000	m
p	0.000	0.000	N/m <sup>2</sup>	p/g	0.000	0.000	velocidad	-0.265	m
v	0.000	2.278	m/s	(v <sup>2</sup> )/(2g)	0.000	0.265			
hl= 7.056 ft Miembro del lado derecho									
Con las fórmulas de las pérdidas establecemos el miembro del lado izquierdo de la ecuación.									
<u>Cálculo de pérdidas por fricción.</u>									
NRe=	00000000000000000000000000000000	NRe=	00000000000000000000000000000000	NRe=	00000000000000000000000000000000				
D/c=	00000000000000000000000000000000	D/c=	00000000000000000000000000000000	D/c=	00000000000000000000000000000000				
f=	0.019	f=	0.020	f=	0.021				
hf=	0.000	m	hf=	1.739	m	hf=	0.062	m	
Diferencia 0.000									
<u>Cálculo de pérdidas locales</u>									
#	ft	(Le/D)	K	(v <sup>2</sup> )/(2g):	hl				
Válvula de pie de vástago 1"	1.000	0.023	420.000	9.660	0.265	2.556	m	9.814	
Ampliación 1" a 1 1/4"	1.000		0.154	0.265		0.041	m		
Codo estándar 90° 1 1/4"	2.000	0.022	30.000	0.660	0.098	0.129	m		
Reducción 1 1/4" a 1"	1.000		0.130	0.265		0.034	m	4.730	
"Cruz" paso directo 1"	1.000	0.023	20.000	0.460	0.265	0.122	m		
Válvula tipo bola 1"	1.000	0.023	150.000	3.450	0.265	0.913	m		
Codo estándar 90° 1"	6.000	0.023	30.000	0.690	0.265	1.095	m		
"Te" paso por el remate 1"	1.000	0.023	60.000	1.380	0.265	0.365	m		
			Suma		5.255		m		
<u>Cálculo de pérdidas totales</u>									
hl=	7.056	ft	Miembro del lado izquierdo						

Figura 8. Hoja de cálculo del escenario 2 (Fuente: elaboración propia).

El escenario 3 es muy parecido al escenario 2, de modo que la ecuación generadora de la energía resulta igual (ecuación 5), la diferencia principal al sustituir, además de las pérdidas de carga, radica en que la carga agregada se debe a una bomba con potencia de  $\frac{1}{2}$  hp en lugar de  $\frac{1}{4}$  y a que la descarga se realiza en el TE variando la carga de posición de los puntos 1 y 2, ver Figura 9 para conocer a detalle los valores involucrados.  $Q = 1.806 \text{ LPS}$  fue el resultado.

ANÁLISIS TEÓRICO DEL BM AL T.E. ÚNICAMENTE POR LA RAMA SUPERIOR, SISTEMA EN SERIE							
Datos:		Sistema en serie, rama superior					
<b>Líquido</b>		<b>Q = 0.002 m<sup>3</sup>/s</b>					
Peso esp.	9.810.000 N/m <sup>3</sup>	<b>1.806 LPS</b>					
vis. cíne.	0.000 m <sup>2</sup> /s						
gravedad	9.810 m/s <sup>2</sup>						
<b>Tubería</b>							
L=	4.240 m	L=	4.200 m	L=	0.000 m		
D 3/4 pul.	0.024 m	D 1 pul.	0.030 m	D 1 1/4 pul.	0.039 m		
E =	0.000 m	E =	0.000 m	E =	0.000 m		
A =	0.000 m <sup>2</sup>	A =	0.001 m <sup>2</sup>	A =	0.001 m <sup>2</sup>		
v <sub>m</sub>	4.093 m/s	v <sub>m</sub>	2.488 m/s	v <sub>m</sub>	1.511 m/s		
(v <sup>2</sup> /2g)=	0.854 m	(v <sup>2</sup> /2g)=	0.315 m	(v <sup>2</sup> /2g)=	0.116 m		
<b>Cargas</b>							
elevación, presión y velocidad		Cargas					
A B		A B		Diferencia de cargas			
z	0.400 2.200 m	p	0.400 2.200 m	elev.	-1.800 m		
p	0.000 0.000 N/m <sup>2</sup>	v/y	0.000 0.000 m	presión	0.000 m		
v	0.000 2.488 m/s	(v <sup>2</sup> /2g)	0.000 0.315 m	velocidad	-0.315 m		
<b>hl = 11.778 ft Miembro del lado derecho</b>							
Con las fórmulas de las pérdidas establecemos el miembro del lado izquierdo de la ecuación.							
<b>Cálculo de pérdidas por fricción.</b>							
NR=	0000000000	NR=	0000000000	NR=	0000000000		
D/g=	0000000000	D/g=	0000000000	D/g=	0000000000		
f=	0.018	f=	0.019	f=	0.020		
hf=	2.814 m	hf=	0.840 m	hf=	0.000 m		
<b>Diferencia 0.000</b>							
<b>Cálculo de pérdidas locales</b>							
#	ft	(le/D)	K	(v <sup>2</sup> /2g)	hl		
Válvula de pie de vástago 1"	1.000	0.023	420.000	9.660 0.315	3.047 m	10.350	
Reducción 1" a 3/4"	1.000			0.130 0.315	0.041 m	4.730	
"Te" paso directo 1"	2.000	0.023	20.000	0.460 0.315	0.290 m	1.840	
Válvula tipo bola 1"	1.000	0.023	150.000	3.450 0.315	1.088 m	0.820	
Codo estándar 90° 1"	3.000	0.023	30.000	0.690 0.315	0.653 m		
"Te" paso por el ramal 1"	2.000	0.023	60.000	1.380 0.315	0.870 m		
"Te" paso directo 3/4"	2.000	0.025	20.000	0.500 0.854	0.854 m		
Codo estándar 90° 3/4"	2.000	0.025	30.000	0.750 0.854	1.281 m		
			Suma	8.124 m			
<b>Cálculo de pérdidas totales</b>							
hl=	11.778 ft	Miembro del lado izquierdo					

Figura 9. Hoja de cálculo del escenario 3 (Fuente: elaboración propia).

### 4.3. Método numérico

La simulación numérica del sistema hidráulico se llevó a cabo utilizando el software EPANET, con base en los mismos datos físicos y operativos empleados en el análisis analítico: diámetros de tubería, longitudes, cotas de elevación, tipo de accesorios, características de las bombas y los gastos estimados. Teniendo definidos los caudales analíticos, se procedió a ejecutar las simulaciones en EPANET con el objetivo de corroborar las velocidades y presiones a lo largo del sistema. El modelo hidráulico fue configurado para representar el sistema en serie bajo tres condiciones operativas generales ya analizadas de manera teórica posteriormente. Para ello, se incorporaron nodos, tramos, bombas, depósitos y accesorios que reflejan fielmente la configuración del banco de trabajo físico, incluyendo las pérdidas menores por elementos locales como codos, válvulas y entradas/salidas.

Los caudales obtenidos con el método analítico se emplearon para las simulaciones numéricas realizadas con EPANET, cuya finalidad principal fue corroborar las velocidades y estimar las presiones en los diversos nodos o conexiones; los resultados se aprecian en las Figuras 10, 11 y 12.

En el escenario 1, la velocidad que se presenta en la tubería de  $\frac{3}{4}$  de pulgada es de 1.37 m/s, mientras que en la tubería de 1 pulgada es de 0.83 m/s, ver Figura 10. Respecto a la presión, es importante indicar que el valor que arroja EPANET en realidad corresponde a la carga de presión más la carga de velocidad, este aspecto se especifica a detalle en el escenario 3 (Figura 12). El escenario 1 presenta una presión máxima de 8,484055 Pa, en la conexión N4, y una mínima de -442.55 Pa, en la conexión N6.

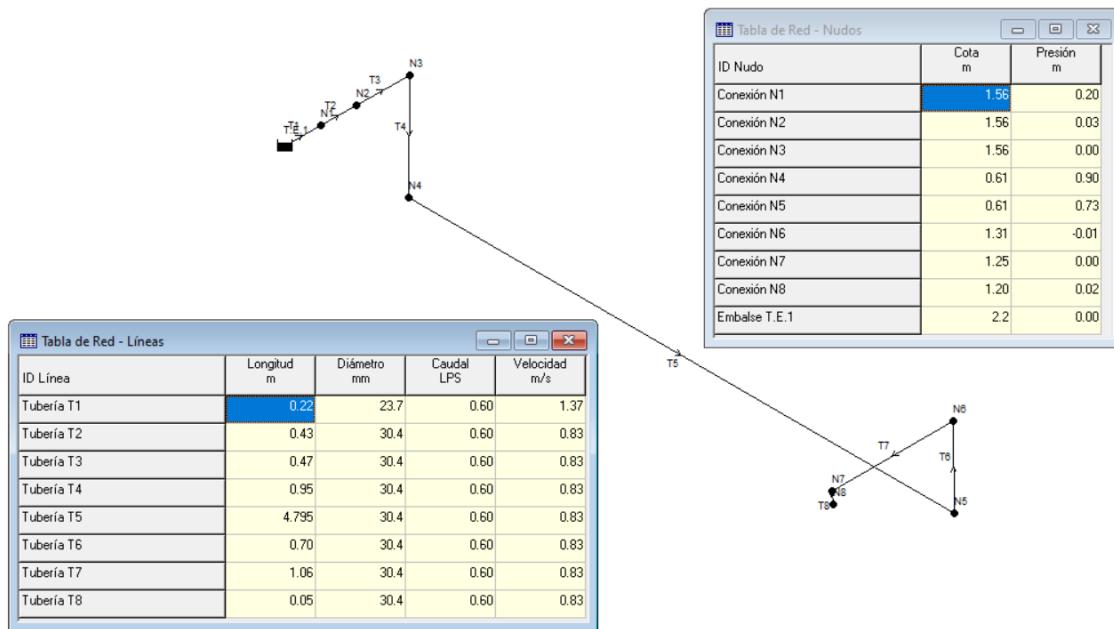


Figura 10. Resultados de la simulación numérica del escenario 1 [Fuente: elaboración propia].

En el escenario 2 (Figura 11), se presenta una velocidad de 2.28 m/s en la tubería de 1 pulgada y de 1.38 m/s en la tubería de  $1 \frac{1}{4}$  de pulgada. En cuanto a las presiones, como es de esperarse, la máxima se encuentra a la salida de la bomba (conexión N6) y la mínima en la línea de succión (conexión N3), siendo estas de 28,694.7 Pa y -30,970.8 Pa, respectivamente.

Por último, en el escenario 3 (Figura 12), las velocidades presentes son de 2.5 m/s y 4.11 m/s, en las tuberías de 1 pulgada y  $\frac{3}{4}$  de pulgada, respectivamente. Para este escenario, el análisis de la presión se centró en la conexión N9, donde se instaló un manómetro de carátula para el correspondiente monitoreo. En este punto la presión obtenida con EPANET fue de 5.39 m, resultado de restar la cota del nodo (2.44 m) a la carga total (7.83 m). Cabe recordar que este valor representa la suma de la carga de presión y la carga de velocidad. Al sustraer la carga de velocidad (0.854 m), se obtiene una carga de presión real de 4.536 m. Multiplicando este valor por el peso específico del agua (9810 N/m<sup>3</sup>), se obtiene una presión de 44,498.16 Pa, equivalente a 6.454 psi.

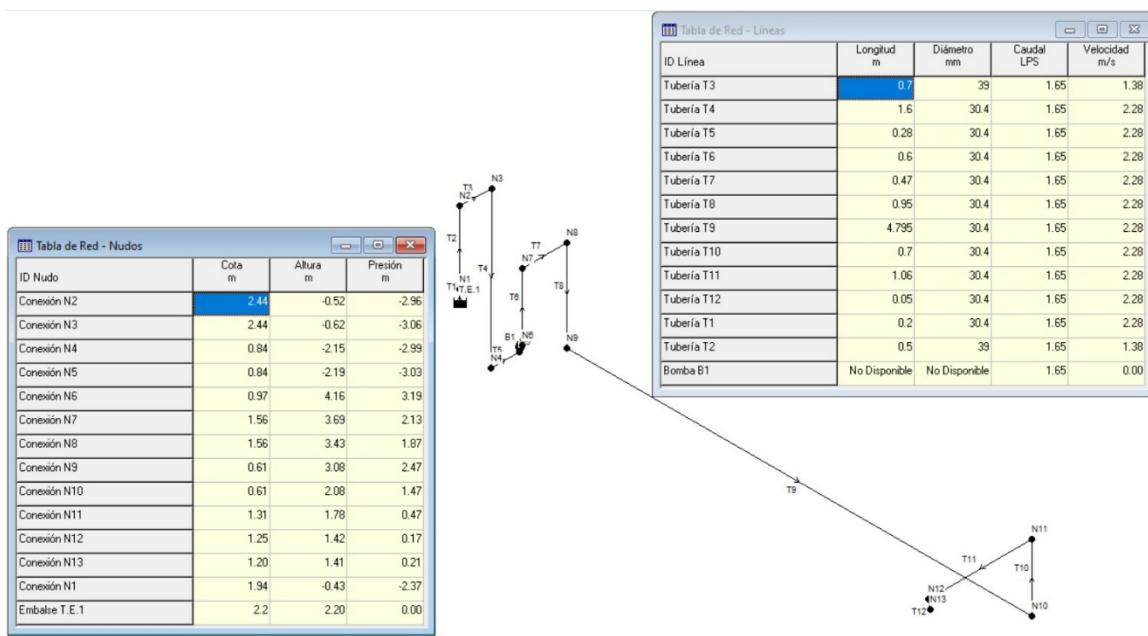


Figura 11. Resultados de la simulación numérica del escenario 2 (Fuente: elaboración propia).

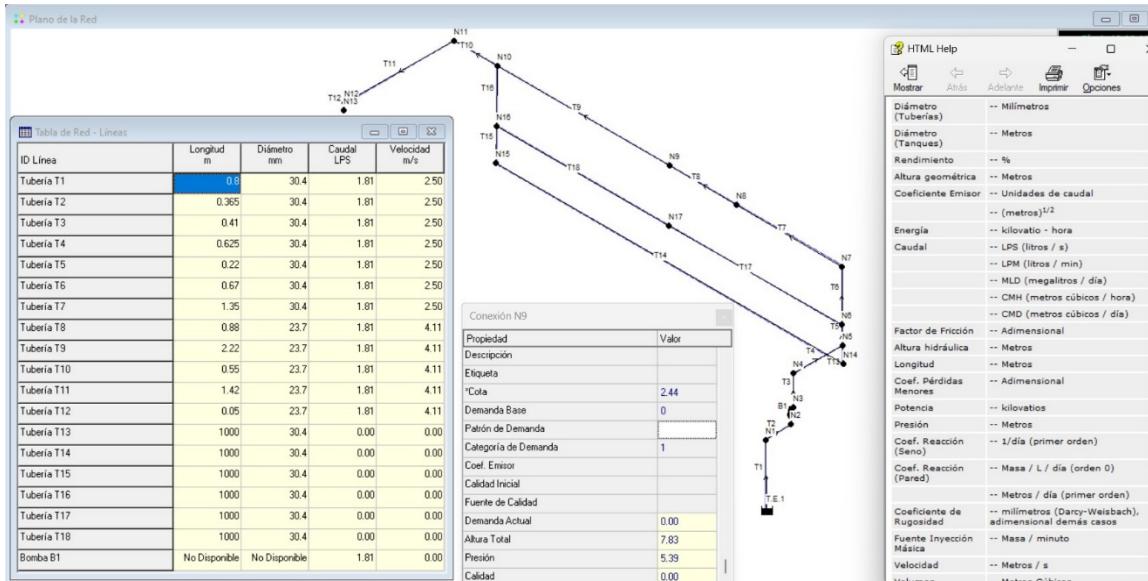


Figura 12. Resultados de la simulación numérica del escenario 3 (Fuente: elaboración propia).

## 5. Validación del comportamiento hidráulico

La validación de los análisis mediante los métodos analítico y numérico se realizó comparando con los resultados de mediciones reales (ver Figura 13). Para los casos 1 y 2, se efectuaron aforos directos para determinar el caudal, estos aforos se realizaron en la descarga (BM) con la captación de volumen y registro de su tiempo asociado. En el escenario 1, el aforo arrojó un caudal de 0.597 LPS que, comparado con el caudal de 0.603 LPS obtenido con método analítico, representa el 99%. En el escenario 2, la medición del

caudal resultó en 1.561 LPS, representando el 94% con referencia al caudal de 1.654 LPS calculado con el método analítico.

Finalmente, en el escenario 3, el parámetro de comparación fue la presión en la conexión N9, debido a la complejidad para aforar en el TE. La presión que se obtuvo con el método numérico (EPANET) fue de 6.545 psi, valor muy similar al que se registró con el manómetro de carátula, ver Figura 13.

RESULTADOS					
Caso	Condición	Dato comparado	Medición real	EPANET	Excel
1	T.E. → B.M. (sin bomba, gravedad)	Caudal (lps)	0.597	0.6	0.603108
2	T.E. → B.M. (con bomba)	Caudal (lps)	1.561	1.65	1.653689
3	B.M. → T.E. (serie, rama superior)	Caudal (lps)	-	1.81	1.805553



Figura 13. Comparación de resultados (Fuente: elaboración propia).

## 6. Conclusiones

El banco de trabajo se logró construir con el material existente y la adquisición de uno cuantos accesorios más.

El banco de trabajo cumple el objetivo de ser una herramienta de apoyo para el estudio de los sistemas de flujo confinado de agua. Destacando su diseño flexible y modular que permite; establecer sistemas en serie y paralelo con diversas configuraciones, estudiar las pérdidas de carga, tanto por fricción como locales, monitoreo de presiones y análisis de accesorios y bombas.

También es posible realizar estudios con variación del nivel dentro de los depósitos, para determinar tiempos de llenado y vaciado.

La instrumentación del banco de trabajo es un objetivo a futuro para mejorar la precisión de los aforos, reduciendo así, el grado de incertidumbre en las comparaciones.

## 7. Bibliografía/Referencias

- Harper, G. E. (2013). *Calculo de instalaciones hidraúlicas y sanitarias, residenciales y comerciales*. Limusa.
- Karney, B. W. (2000). *Hydraulics of pressurized flow. Water Distribution Systems Handbook*, 2-1.
- Manring, N. D., & Fales, R. C. (2019). *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons.
- Martinez, F. (2002). "Manual de EPANET 2.0 en español". [www.redhisp.upv.es](http://www.redhisp.upv.es)
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos 6/e*. Pearson educación.
- Nayyar, M. L. (2000). *Piping handbook*. McGraw-hill.
- Zubicaray, M. V. (2003). *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones*. Editorial Limusa.