

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021
EVENTO VIRTUAL**

BANCO VIRTUAL DE ENSAYOS DE BOMBAS

Mauricio Angulo, Cecilia Lucino, Victoria Lugo, Julieta Buscetti y Facundo Ortiz

Cátedra de Proyecto de Instalaciones Hidromecánicas – Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina

*mauricio.angulo@ing.unlp.edu.ar, clucino@ing.unlp.edu.ar, victoria.lugo@ing.unlp.edu.ar,
julieta.buscetti@ing.unlp.edu.ar, facundo.ortiz@ing.unlp.edu.ar*

RESUMEN:

La restricción de las clases presenciales dada por las medidas sanitarias en el contexto de la pandemia impidió la realización de prácticas de laboratorio en las universidades de nuestro país. La Facultad de Ingeniería cuenta con instalaciones para que los alumnos puedan realizar ensayos de bombas centrífugas, pero dada esta situación, se propuso la realización de estos ensayos en forma virtual mediante un “Banco virtual de ensayos de bombas”. Este banco, cuenta con la posibilidad de realizar ensayos de rendimiento y cavitación de una bomba y así construir experimentalmente sus cuatro curvas características. Para diseñarlo, se propuso como objetivo que el mismo sea programado en un entorno accesible a los alumnos y que tuviera una apariencia realista desde lo visual y lo funcional.

En este trabajo, se describe con detalle la programación del mismo, el cual está compuesto por cuatro elementos que interactúan entre sí: la planilla de cálculo, los elementos de control, los sensores y las macros; todos estos presentes en una única pantalla principal de control. El objetivo final del trabajo, es que dicha estructura pueda ser aplicada y desarrollada en proyectos similares en materias que requieran de apoyo experimental. Su aplicación permitió no solo cumplir satisfactoriamente con los objetivos de aprendizaje, sino que también permitió ensayar situaciones para las cuales el banco de ensayos físico no tiene capacidad en la actualidad.

ABSTRACT:

Face-to-face classes have been restricted by health measures in pandemic context. This carried out the impossibility to do laboratory practices around all the universities in our country. The Faculty of engineering has laboratory facilities for students to perform tests of centrifugal pumps, but taking into account the situation mentioned before, tests were proposed to be carry out on a “Virtual platform for pump test”. The platform has the possibility to perform efficiency and cavitation tests of a pump and thus experimentally constructing its four characteristics curves. To design it, it was proposed to be programmed on an accessible software and to have a realistic performance and visual appearance.

In this work, the programming is described in detail, which is composed by four elements interacting one each other: the worksheet, the control components, the sensors and the macros. All of them visualized on a unique main control screen. The final goal of this work is that this structure can be applied and developed in similar projects in subjects that require experimental support. The implementation of the virtual tests allowed to comply with learning objectives. Besides, it made possible to test under conditions that were not possible on the current test rig.

PALABRAS CLAVES: Ensayo virtual, bombas

INTRODUCCIÓN

En las asignaturas Proyecto de Instalaciones Hidromecánicas (Ing. Hidráulica y Civil) y Máquinas Hidráulicas (Ing. Mecánica y Electromecánica) la realización de ensayos de bombas en bancos de pruebas cumple una función importante, no solamente por la utilidad de este conocimiento para la práctica profesional sino porque las actividades experimentales también constituyen una situación de aprendizaje particular, diferenciada de la clase teórico-práctica. Esto se da en nuestro caso, disponiendo de infraestructura de laboratorio de máquinas hidráulicas específica para la docencia, que es poco usual en el ámbito universitario y que inclusive es utilizada por docentes y alumnos de otras universidades del país.

En el contexto de pandemia, surgió la posibilidad de ofrecer a los alumnos una alternativa de simulación de estos ensayos desde la virtualidad, que se presenta en este trabajo, centrada en los aspectos que nos parecen más relevantes desde el punto de vista formativo.

OBJETIVOS

Los ensayos de laboratorio en bombas centrífugas tienen por finalidad verificar conceptos planteados en la teoría, obtener información característica de una bomba en particular y adquirir habilidades en la medición y manipulación de los dispositivos e instrumental, entendiendo que la medición con fines de diagnóstico y monitoreo es una de las actividades comunes en la ingeniería hidráulica, civil, mecánica y electromecánica, especialidades para las que se dictan las materias.

En las clases de teoría se plantea el principio de funcionamiento de las bombas rotodinámicas del cual surgen las curvas características Salto – Caudal (H-Q), Potencia – Caudal (P-Q) y Rendimiento – Caudal (η -Q), en el llamado Ensayo de Rendimiento (Apuntes de cátedra, 2021). Respecto a la cavitación, se plantea en forma teórica su origen, desarrollo y efectos, así como la necesidad de anticipar las condiciones de instalación que provocan su inicio y desarrollo, lo cual es caracterizado en el Ensayo de Cavitación mediante la Altura Neta Positiva de Aspiración requerida ($ANPA_{req}$) (Apuntes de cátedra, 2021; International Standard, 1999). Se plantea que, a pesar de poder hacer una aproximación teórica a las curvas características, las mismas se obtienen a partir de ensayos en bancos de prueba, para luego llevarlas a otras condiciones de operación semejantes aplicando las leyes de la similitud.

Siendo estos los objetivos de la actividad de laboratorio, para el banco virtual de bombas (BVB) se propusieron criterios de diseño que permitan su utilización como herramienta didáctica, con la posibilidad de ser operada por los alumnos en forma autónoma, emulando la realización de ensayos reales, tanto de rendimiento como de cavitación. El laboratorio se puede descargar desde el siguiente enlace <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/125797>

CRITERIOS DE DISEÑO

Al igual que sucede con un banco de ensayos real, para el diseño del banco virtual deben establecerse los criterios de diseño en base a las funciones que debe cumplir y el alcance de los ensayos que se pretenden realizar. Esto ayuda, además, a definir el software mediante el cual se resolverán los cálculos internos y la pantalla de comandos a través de la cual el usuario interactuará. En este caso se eligió una planilla de cálculo, con el que los alumnos están habituados a trabajar en los trabajos prácticos y del cual pueden acceder a licencias estudiantiles; no obstante, existen otros softwares como LabVIEW® o MATLAB® mediante los cuales podría realizarse la programación de banco virtual.

Se estableció una lista de requerimientos que el banco virtual debía satisfacer, es decir que debía cumplir las siguientes pautas de diseño:

- ✓ Emular una instalación real no solamente en los aspectos funcionales sino también en su apariencia.
- ✓ Permitir la ejecución de ensayos de rendimiento y cavitación sobre una bomba específica.

- ✓ Permitir realizar todas las operaciones que requieren los ensayos mencionados, incluyendo operaciones secundarias que permiten la puesta en marcha del mismo, como: el purgado de instrumentos, la apertura de válvulas, el encendido de motores, etc.
- ✓ Controlar variables ambientales como presión atmosférica y temperatura del agua.
- ✓ Tener una respuesta instantánea en los instrumentos, ante la operación de válvulas y motores.
- ✓ Tener un error asociado a la lectura de los instrumentos, de forma tal que reproduzca con mayor aproximación un experimento real.
- ✓ Tener la posibilidad de operarse en forma autónoma, para lo cual se deberá contar con una guía que permita a un usuario sin experiencia poder realizar los ensayos.

El instrumental del BVB, que se indica en la Figura 1, satisface los requerimientos planteados. Si bien su manejo es sencillo, se incluye provee al alumno de un manual de operación donde se detalla la función y operación de cada componente.

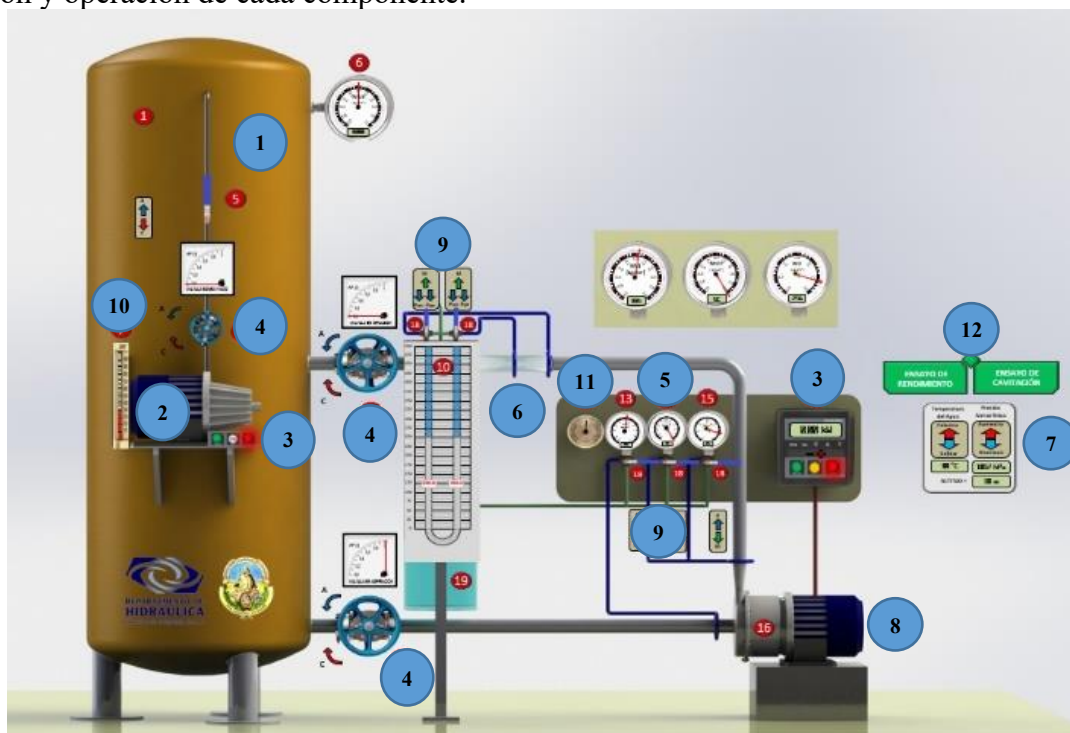


Figura 1.- Vista del tablero de comando del BVB tal como es percibida por el operador. Referencias: 1) Tanque de vacío, 2) Bomba de vacío, 3) Tablero eléctrico, 4) Válvula esclusa e indicador de apertura 5) Tablero de manómetro y manovacúmetros, 6) Tubo Venturi y Piezómetro diferencial, 7) Control de temperatura y presión atmosférica, 8) Bomba centrífuga, 9) Válvula de 3 vías para purgado, 10) Termómetro, 11) Barómetro y 12) Botones de ayuda desplegable.

METODOLOGÍA

El BVB está completamente desarrollado en una planilla de cálculo. Este tipo de software no requiere una computadora con características especiales. Dispone de una pantalla principal desde donde el alumno puede operar el banco de ensayo y realizar la medición de todas las variables en juego.

Internamente existe una vinculación entre diferentes elementos que se denominarán: Planilla de cálculo, elementos de control, instrumentos y macros. Se describirán en detalle con el objetivo de que su lógica pueda ser aplicada a cualquier otro tipo de instalación experimental sobre la cual se pretenda desarrollar un banco virtual de ensayos.

1 – Planilla de cálculo

La planilla de cálculo consta de una serie de columnas que se recalculan cada vez que el operador realiza una maniobra en la pantalla principal, por lo tanto, el punto de funcionamiento en

cuestión requiere de una sola fila de cálculo, que se denominará “A”. Antes de comenzar los cálculos se definen las constantes del banco de ensayos.

Tabla 1.- Constantes del banco de ensayos virtual

Constante	Descripción
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	Aceleración de la gravedad local
$S_1 = 0.48 \text{ m}$	Distancia entre el eje de la sección de entrada a la bomba y el manovacuómetro 1
$S_2 = 0.30 \text{ m}$	Distancia entre el eje de la sección de salida de la bomba y el manovacuómetro 2
$D_1 = 0.05 \text{ m}$	Diámetro de la tubería de aspiración de la bomba centrífuga
$D_2 = 0.05 \text{ m}$	Diámetro de la tubería de impulsión de la bomba centrífuga
$N_{TV} = 1 \text{ m}$	Nivel del agua en el tanque de vacío respecto del eje de la brida de aspiración
$k_{emb} = 0.3$	Coefficiente de pérdida local en la embocadura
$k_{TA} = 0.72$	Coefficiente de pérdida friccional de la tubería de aspiración.
$P_{ev} = 250 \text{ mm}$	Posición de equilibrio de las ramas del piezómetro conectados al tubo Venturi
$f_1 = 50 \text{ Hz}$	Frecuencia de la red. Valor de referencia
$n_1 = 2900 \text{ rpm}$	Velocidad del giro del motor de la bomba para f_1

Tabla 2.- Condiciones iniciales - Planilla de cálculo columnas 1 a 8

Condiciones iniciales							
T_a	H_v	ρ	z	P_{atm}	P_{atm}	f_2	n_2
[°C]	[m]	[kg/m³]	[m]	[hPa]	[m]	[Hz]	[rpm]
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8

Al iniciar la operación debe fijarse la temperatura del agua, definiendo así la presión de vapor del agua y la densidad de esta. El valor de la temperatura (A1) es modificado por las macros “Subir_temp” y “Bajar_temp”.

La presión de vapor (A2) es $H_v = \frac{10^{2.7862+0.0312 * T_a - 0.000104 * T_a^2}}{1000 * g}$ [1]

La densidad del agua (A3) es $\rho = 1000.1800014 + 0.0084284 * T_a - 0.0052857 * T_a^2$ [2]

Posteriormente se debe fijar la altitud del sitio donde se encuentra el banco de ensayos determinando así la presión atmosférica local. El valor de la altitud en z (A4) es modificada por las macros “Aumentar_altitud” y “Bajar_altitud”.

Luego la presión atmosférica local (A5) resulta $P_{atm} [hPa] = \frac{101325 * (1 - 0.000022558 * z)^{5.255}}{g/1000}$ [3]

Su conversión en metros de columna de agua (A6) es $P_{atm} [m] = \frac{P_{atm} [hPa]}{10 * g}$ [4]

Otra variable importante por definir antes del ensayo es la frecuencia de entrada al motor, ya que por tratarse de motores asincrónicos permite controlar la velocidad de giro y en consecuencia se pueden modificar las curvas características de la bomba.

El valor de la frecuencia de operación f_2 (A7) es modificado por las macros “Subir_frec” y “Bajar_frec”. Mediante la aplicación de las leyes de similitud puede calcularse el cambio de la velocidad de giro del motor-bomba (A8) $n_2 = \frac{n_1 * f_2}{f_1}$ [5]

Tabla 3.- Válvulas esclusas - Planilla de cálculo columnas 9 a 16

V1 - Válvula (impulsión)		V2 - Válvula (aspiración)			V1 + V2	V3 - Válvula Bomba de vacío	
Ap macro	Ap Lectura	Ap macro	Ap Lectura	K_{V2}		Ap macro	Ap Lectura
[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[%]
A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16

Una vez definidas las condiciones iniciales, el control de los ensayos se realiza mediante tres válvulas esclusas. Una en el tramo de impulsión (V1), otra en la aspiración (V2) de la bomba centrífuga y una tercera en la entrada a la bomba de vacío (V3).

La apertura de V1 (A9) es definida por las macros “Abrir_V1” y “Cerrar_V1”. La lectura de la apertura (A10) contiene un condicional que evita que la válvula indique valores por fuera del rango 0 a 100 % del instrumento de visualización de apertura.

Por lo tanto si $A9 < 0 \rightarrow A10 = 0$. Si $A9 > 100 \rightarrow A10 = 100$ y si $0 < A9 < 100 \rightarrow A10 = A9$

La apertura de V2 (A11) es definida por las macros “Abrir_V2” y “Cerrar_V2”. La lectura de la apertura (A12) contiene un condicional que evita que la válvula indique valores por fuera del rango 1 a 100 % del instrumento y evita el cierre total de la válvula.

Por lo tanto si $A11 < 1 \rightarrow A12 = 1$. Si $A11 > 100 \rightarrow A12 = 100$ y si $1 < A11 < 100 \rightarrow A12 = A11$

La V1 controlará el caudal en los ensayos de rendimiento, mientras que la V2 será utilizada en los ensayos de cavitación para introducir pérdidas de carga locales cuando la depresión en el tanque no sea suficiente. Esto sucede para caudales bajos. Por este motivo más adelante será necesario calcular las pérdidas locales en V2 según su apertura y para esto se define (A13) calculado como:

$$k_{V2} = 20 - 0.2 * Ap_{V2} \quad [6]$$

Dado que ambas válvulas pueden controlar el caudal del circuito el valor de $V_1 + V_2$ (A14) será quién controla el caudal de circulación. Donde: $V_1 + V_2 = Ap_{V1} + [Ap_{V2} - 100]$ [7]

La bomba de vacío es controlada por la apertura de V3 (A15) y es definida por las macros “Abrir_V3” y “Cerrar_V3”. La lectura de la apertura (A16) dependerá de que tanto el estado de la bomba de vacío como el de la válvula V4 sea 1, esto significa que la bomba está encendida y que la válvula está abierta. En esta situación al igual que el resto de las válvulas contiene un condicional que evita que la válvula indique valores por fuera del rango 0 a 100 % del instrumento.

Por lo tanto si $A15 < 0 \rightarrow A16 = 0$. Si $A15 > 100 \rightarrow A16 = 100$ y si $0 < A15 < 100 \rightarrow A16 = A15$.

Si la bomba de vacío está apagada o la V4 está cerrada la lectura $A16 = 0$.

Tabla 4.- Tubo Venturi y datos de la bomba - Planilla de cálculo columnas 17 a 23

Q	Piezómetro del Venturi			Características de la bomba		
	Δ_H	L_{izq}	L_{der}	H	η_{tot}	ANPA _{req}
[m³/h]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[%]	[m]
A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23

El caudal (A17) que circula por la instalación estará definido por la apertura de las válvulas V1 y V2 (A14), y por la frecuencia de entrada a la bomba centrífuga (A7). Con este fin se construyó una curva de ajuste que define un caudal circulante según la apertura de las válvulas, resultando:

$$Q = \frac{[4.04*(A14/100)-4.04]*(3600/1000)}{f_1/f_2} \quad [8]$$

Este caudal es calculado solo si el estado de la bomba centrífuga es 1 (encendido) de lo contrario $Q = 0$.

Obtenido el caudal, es posible calcular la diferencia entre las ramas del piezómetro diferencial (A18) conectado al tubo Venturi, ya que es conocida la ecuación del instrumento.

$$\Delta_H = \left[\frac{(Q*1000/3600)}{0.06} \right]^{\frac{1}{0.8}} \quad [9]$$

Entonces es posible conocer las lecturas de las ramas derecha (A19) e izquierda (A20) ya que estas se mueven respecto de la posición de equilibrio del piezómetro (P_{ev}) igual a 250 mm.

La visualización de las lecturas está condicionada a que estén purgadas tanto la rama del piezómetro como la rama que conecta al Venturi. Esta condición se define mediante la suma del estado de las ramas. Si la suma es 5 entonces ambas ramas están purgadas y se indicará un valor de:

$$L_{izq} = P_{eV} - \Delta h/2 + E_{Dh} \quad [10]$$

$$L_{der} = P_{eV} + \Delta h/2 + E_{Dh} \quad [11]$$

El error de lectura (inducido) del instrumento es un número entero aleatorio entre -10 y 10, y es dividido 10 de forma tal que resulte un error inducido de $E_{Dh} = \pm 1$ mm.

Si la rama no está purgada (piezómetro o Venturi) la lectura de esa rama será cero.

Las curvas características de la bomba centrífuga (Q-H, Q- η_{tot} , Q-ANPA $_{req}$) son conocidas y provienen de ensayos reales de una bomba comercial con el motor funcionando a 50 Hz. La curva Q- P_{electr} es deducida de las anteriores. Las tres curvas fueron tabuladas y definidas con 11 puntos cada una. Luego mediante una simple función de interpolación lineal se pueden calcular el valor de η_{tot} (A22) y ANPA $_{req}$ (A23) para caudales de funcionamiento intermedios.

El salto de la bomba H (A21) también es interpolado, H_{int} , usando como valor de entrada Q (A17) pero dado que la bomba podría estar funcionando a una frecuencia diferente a 50 Hz, el valor de H se calcula entonces aplicando similitud:

$$H = \frac{H_{int}}{\left(f_1/f_2\right)^2} \quad [12]$$

Tabla 5.- Presiones en el circuito - Planilla de cálculo columnas 24 a 30

Tanque de vacío		E_{cin1}	Presiones			
P_{rel}	P_{abs}		P_1/γ	P_2/γ	Lectura MV1	Lectura MV2 y M2
[m]	[m]	[m]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30

A continuación se definirán las presiones internas en el circuito que permitirán calcular el salto de la bomba y las condiciones de presión en la brida de entrada a la bomba centrífuga. La presión del tanque de vacío es función del nivel de apertura de la válvula V3. Esta válvula se encuentra entre la aspiración de la bomba de vacío y la parte superior del tanque ocupada por aire. Si el estado de la válvula de tres vías (V4) es 1, es decir está abierta, entonces cuanto más abierta esté la válvula V3 mayor será la depresión dentro del tanque. Dado que existe una limitación de la bomba de vacío para alcanzar presiones cercanas al cero absoluto, la máxima depresión se fijó en 9 m. De esta forma:

$$P_{rel} = - (Ap_{V3} * 0.9) / 10 \quad [13]$$

Donde la apertura de la V3 corresponde con A16.

Para calcular la presión absoluta en el tanque (A25):

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm} \quad [14]$$

Donde la P_{atm} (A6) es consecuencia de la condición inicial de altitud fijada por el operador.

La energía cinética en la entrada a la bomba (A26) se calcula como:

$$E_{cin1} = \frac{U_1^2}{2 * g} = \frac{Q^2}{\left[\frac{\pi * D_1^2}{4}\right]^2 * 2 * g} \quad [15]$$

Para conocer la presión en la brida de entrada a la bomba centrífuga (A27), partimos del nivel energético del tanque de vacío y descontamos las pérdidas friccionales y locales en el tramo de succión:

$$\frac{P_1}{\gamma} = [(N_{TV} + P_{rel}) - (k_{V2} + k_{emb} + k_{TA}) * E_{cin1} - E_{cin1}] / 10 \quad [16]$$

Para conocer la presión en la brida de salida de la bomba centrífuga (A28) partimos de que el salto de la bomba (A21) es:

$$H = (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}\right) + (E_{cin2} - E_{cin1}) \quad [17]$$

Dado que la diferencia de energía de posición z_1 y z_2 es equivalente a la diferencia entre las distancias s_1 y s_2 y, considerando que la diferencia de energía cinética entre entrada y salida es nula dado que $D_1 = D_2$, resultará:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \left[\frac{H - (s_1 - s_2)}{10} \right] \quad [18]$$

La lectura de los manovacuómetros y manómetros solo será posible si los instrumentos se purgaron previamente, esto equivale a que su estado sea 2 (purgado). En esta situación la lectura del MV1 (A29) será:

$$Lectura\ MV1 = \left[\frac{P_1}{\gamma} - \left(\frac{s_1}{10} \right) \right] + E_{pres} \quad [19]$$

$$Lectura\ MV2 = Lectura\ M2 = \left[\frac{P_2}{\gamma} - \left(\frac{s_2}{10} \right) \right] + E_{pres} \quad [20]$$

El error de lectura (inducido) del instrumento es un número entero aleatorio entre -10 y 10, y es dividido 1000 de forma tal que resulte un error inducido de $E_{pres} = \pm 0.01 \text{ kg/cm}^2$. La lectura de los instrumentos en la impulsión es idéntica, aunque el rango de medición de MV2 es $\pm 1.0 \text{ kg/cm}^2$, por lo tanto, si supera el máximo el display indicará “SC”. El M2 tiene un rango de 0 a 3 kg/cm^2 , por lo que solo podrá indicar valores de presión relativa positiva. Si cualquiera de estos instrumentos no es purgado el display indicará “ER” y las agujas indicarán cero.

Tabla 6.- Afectación del rendimiento y potencia consumida - Planilla de cálculo columnas 31 a 35

			Potencia consumida	
ANPA _{disp}	Δ_{ANPA}	$\Delta_{\eta_{tot}}$	P _{electr}	Lectura P _{electr}
[m]	[m]	[%]	[kW]	[kW]
A31	A32	A33	A34	A35

Para la ejecución de los ensayos de cavitación es necesario evaluar la caída de rendimiento (A33) asociada a la aparición de cavitación en el rodete de la bomba. Para esto se evaluará el ANPA disponible del sistema en la brida de entrada a la bomba (A31) y se calcula cuán lejos está dicho valor del ANPA_{req} (A23). Por lo tanto, a medida que descienda la energía total en la brida de entrada por descenso de la presión en el tanque de vacío y/o cierre de la válvula V2 en la aspiración, el rendimiento irá descendiendo hasta que esta caída sea aproximadamente 3 %, en este punto el ANPA_{disp} = ANPA_{req} que es la condición límite que define la curva de ANPA_{req} de la bomba.

$$ANPA_{disp} = P_{atm} - H_v - E_{cin1} + \frac{P_1}{\gamma} * 10 \quad [21]$$

$$\Delta_{ANPA} = ANPA_{disp} - ANPA_{req} \quad [22]$$

$$\Delta_{\eta_{tot}} = 0.8485 * \Delta_{ANPA}^2 - 3.1103 * \Delta_{ANPA} + 2.9027 \quad [23]$$

La ecuación [23] asume una caída cuadrática del rendimiento en la medida que se acercan los valores de ANPA, o visto de otra forma a medida que la presión en la cara de baja presión del rodete se acerca a la presión de vapor. En BVB está configurado para que la caída del rendimiento tenga efecto solo a partir de que la diferencia de ANPA es de 2 m, por encima de este valor no hay afectación del rendimiento, esto equivale a decir que no se produce cavitación en el rodete.

Posteriormente es posible calcular la potencia eléctrica que entrega el motor de la bomba (A34). En este caso asumimos que tenemos un conjunto motor-bomba y evaluamos el rendimiento del conjunto sin discriminar entre rendimiento hidráulico, mecánico ni eléctrico. Tomando los valores de caudal (A17), salto (A21) y rendimiento total (A22) interpolados podremos calcular la potencia sin afectación del rendimiento como:

$$P_{electr} = \frac{\rho * g * H}{1000} * \frac{Q}{3600} * \frac{100}{\eta_{tot}} \quad [24]$$

Finalmente, la lectura del vatímetro del tablero eléctrico de la bomba indicará la potencia eléctrica entregada por el motor (A35). Si la diferencia de ANPA (A32) es mayor a 2 m, entonces:

$$\text{Lectura } P_{electr} = P_{electr} + E_P \quad [25]$$

Si la diferencia de ANPA es menor a 2 m, habrá afectación del rendimiento y resultará:

$$\text{Lectura } P_{electr} = P_{electr} * \frac{\Delta \eta_{tot} + 100}{100} + E_P \quad [26]$$

Donde el error de lectura (inducido) del vatímetro es un número entero aleatorio entre -10 y 10, y es dividido 1000 de forma tal que resulte un error inducido de $E_P = \pm 0.01$ kW.

2 – Elementos de control

Como se mencionó anteriormente existen varios elementos de control del BVB. Están aquellos que permiten controlar las condiciones iniciales de temperatura y altitud sobre el nivel del mar del banco de ensayo. También las válvulas esclusas: V1 (impulsión), V2 (aspiración) y V3 (bomba de vacío), cuyas aperturas son controladas por macros.

Tabla 7.- Elementos de control, estados, botones y macros asignadas.

Nro	Elemento	Estado	Step	Cód.	Botón de control	Macro asignada al botón	Celdas modificadas por la macro	
1	Control de temperatura	Calentar	+1 °C		Flecha arriba roja	Subir temp	A1+1	
		Enfriar	-1 °C		Flecha abajo azul	Bajar temp	A1-1	
2	Control de Altitud	Aumentar	+50 m		Flecha arriba roja	Aumentar altitud	A4+50	
		Disminuir	-50 m		Flecha abajo azul	Bajar altitud	A4-50	
3 y 4	V1 y V2	Abrir	+1 %		Flecha curva azul	Abrir_V1	A9+1	
						Abrir_V2	A11+1	
		Cerrar	-1 %		Flecha curva roja	Cerrar_V1	A9-1	
						Cerrar_V2	A11-1	
5	V3	Abrir	+2 %		Flecha curva azul	Abrir_V3	A15+2	
		Cerrar	-2 %		Flecha curva roja	Cerrar_V3	A15-2	
6, 7 y 8	Válvulas de 3 vías MV1, MV2 y M2	Purgar		0	Flecha arriba azul	Purgar_MV1	E1=0 y E2=2	
						Purgar_MV2	E3=0 y E3=2	
		Medir		1	Flecha abajo verde	Purgar_M2	E5=0 y E6=4	
						Medir_MV1	E1=1	
						Medir_MV2	E3=1	
		Purgado		2	-			
9 y 10	Válvula de 3 vías Venturi izq y der	Purgar		0	Flecha abajo Der. azul	Purgar_piezo_der	E7=0 y E8=2	
					Flecha Abajo Izq. azul	Purgar_piezo_izq	E10=0 y E11=2	
		Medir		1	Flecha Arriba verde	Purgar_Venturi_der	E7=0 y E9=3	
						Purgar_Venturi_izq	E10=0 y E12=3	
						Medir_piezo_der	E7=1	
		Piezo. purgado		2	-			
		Venturi purgado		3	-			
11	Válvula de 3 vías V4	Cerrada	0	Flecha abajo roja	Cerrar_V4	E13=0		
		Abierta	1	Flecha arriba azul	Abrir_V4	E13=1		
12	Tablero Bomba centrífuga	Encendido		1	Círculo verde	Encender_bomba	E14=1 y A11=1	
		Apagado		0	Círculo rojo	Apagar_bomba	E14=0 A11=100 E2=E4=E6=0 E8=E9=E11=E12=0 E13=A9=A15=0	
							Visualiza Pot.	1
		Visualiza Frec.		2	Círculo Amarillo	Selector_tablero	E15=2	
		Visualiza Vel.		3	Círculo Amarillo	Selector_tablero	E15=3	
		Aumentar Frec.		+1 Hz		Botón rojo (+)	Subir_frec	A7+1
		Disminuir Frec.		-1 Hz		Botón rojo (-)	Bajar_frec	A7-1
13	Tablero Bomba de vacío	Encendido		1	Círculo verde	Encender_BV	E16=1	
		Apagado		0	Círculo rojo	Apagar_BV	E16=2	

Además, pueden controlarse las válvulas de tres vías que permiten el purgado de los manómetros y manovacuómetros (MV1, MV2 y M2), las válvulas para purgado de cada rama del piezómetro diferencial y de las ramas de conexión al tubo Venturi. Adicionalmente la válvula de 3 vías (V4) se puede controlar para conectar el tanque de vacío con la atmósfera o con la aspiración de la bomba.

Por último, otros elementos de control son los tableros eléctricos de la bomba de vacío y de la bomba centrífuga (BC). Ambos poseen botón de encendido (verde) y de apagado (rojo). El tablero de la BC, posee además un botón central amarillo que apretado cíclicamente alterna la visualización de la potencia, frecuencia y velocidad de giro del motor. Luego con los botones (+ y -) puede modificarse la frecuencia de la red.

En la tabla 7, se listan todos los elementos de control indicando los diferentes estados posibles, y el código asociado a cada estado. El estado de cada elemento está escrito en una celda de la planilla de cálculo, la cual es modificada por las macros al ejecutarse.

En aquellos controles que son graduales se indica el paso incremental de su variación cada vez que se lo presiona (step). También, se indica en la tabla la macro asignada a cada botón, la que transforma la acción de presión en un cambio numérico de la planilla de cálculo llevándola así a otro estado de funcionamiento. Las figuras 2, 3 y 4 muestran cómo se ven los elementos de control en la pantalla principal del operador.

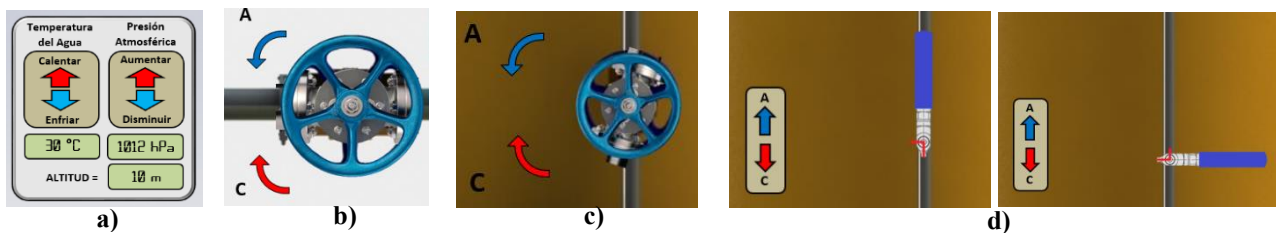


Figura 2.- Elementos de control. a) Tablero de control de condiciones iniciales. b) Válvula esclusa 1 y 2. c) Válvula esclusa 3. d) Válvula de 3 vías V4, secuencia abierta – cerrada.



Figura 3.- Elementos de control. a) Tablero de control de la bomba centrífuga. Se puede observar la secuencia: bomba apagada – bomba encendida con la posibilidad de alternar el display entre: potencia, frecuencia y velocidad de giro del motor. b) Tablero de control de la bomba de vacío (apagado - encendido)

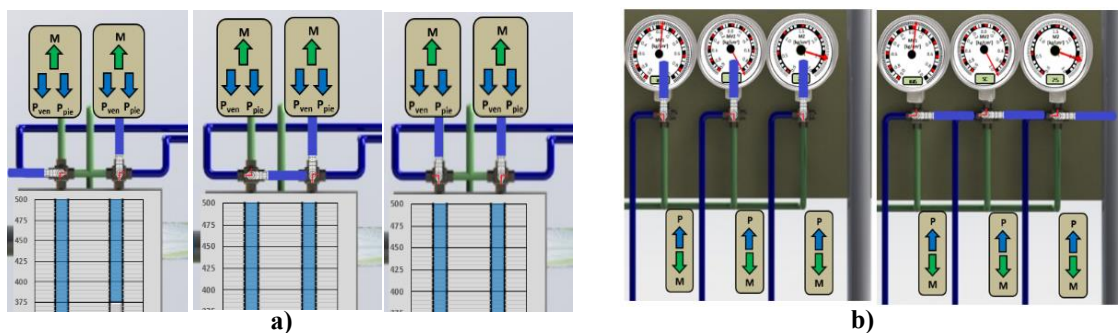


Figura 4.- Elementos de control. a) Válvulas de 3 vías del Venturi. Secuencia de purgado de la rama izquierda (purgar piezómetro – purgar Venturi – medir) b) Válvulas de 3 vías MV1, MV2 y M2. Secuencia: purgar – medir.

3 – Sensores

Los sensores constituyen elementos a través de los cuales se obtendrán las lecturas necesarias para poder relevar diferentes magnitudes en cada punto de ensayo como: presiones en el circuito, presión atmosférica, potencia, temperatura del agua y apertura de las válvulas.

Para darle un aspecto realista, cada elemento es una imagen del instrumento (cuadrante) con un gráfico superpuesto. El gráfico es del tipo dispersión para los elementos que tienen aguja y del tipo barra para el termómetro y el piezómetro del tubo Venturi. Los elementos que cuentan con un

display digital para una lectura más simple y precisa están conformados por un rectángulo con texto referenciado a la celda correspondiente. Para construir las agujas de los elementos analógicos primero se define el ángulo que barre el instrumento desde cero al fondo de escala. Luego la lectura actual del instrumento se transforma a coordenadas polares y luego a coordenadas rectangulares que representada en un gráfico de dispersión definen la aguja del instrumento.

En las figuras 5 y 6 se observan los sensores y se indica entre paréntesis la celda con la cual está vinculado el display, el gráfico de barras o de dispersión. En el caso del tablero de la bomba centrífuga el display está vinculado a las celdas A35 (potencia), A7 (frecuencia) y A8 (vel. de giro).

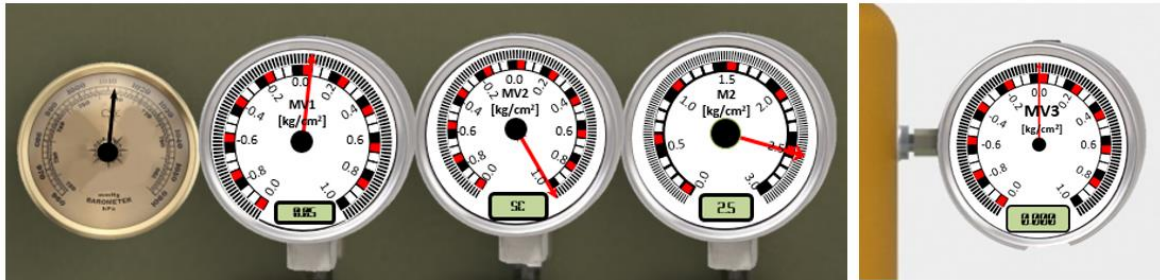


Figura 5.- Barómetro (A5), manovacuómetros 1 (A29), 2 (A30) y 3 (A24); y Manómetro 2 (A30).

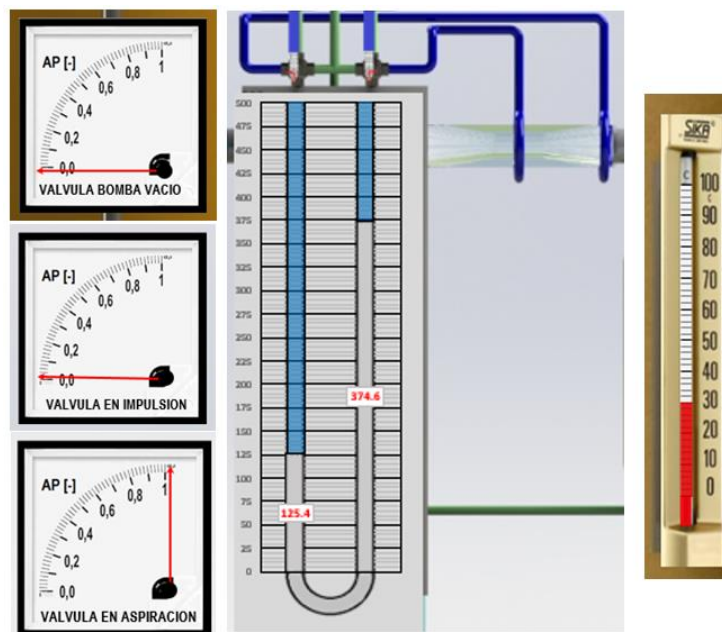


Figura 6.- Indicador de apertura de V1 (A10), V2 (A12), V3 (A16); Piezómetro del Tubo Venturi (A19 y A20), Termómetro (A1).

4 – Macros

Las macros nos permiten vincular los elementos de control con la planilla de cálculo y además animan imágenes para darle mayor realismo a la operación. En la tabla 7, se indica la vinculación entre los botones que comandan los elementos de control, la macro asociada al mismo y las celdas que modifica cada macro al presionar el botón. Algunas de las celdas modificadas pertenecen a la planilla de cálculo (Celdas “A”) y otras pertenecen al estado del elemento (Celdas “E”).

La planilla de cálculo está protegida por una contraseña, esto tiene como función bloquear el acceso a la planilla para que el operador no pueda ver los resultados y para que no altere la estructura de la pantalla de control principal por accidente. Todas las macros ejecutan al inicio la subrutina “desproteger” y al final la subrutina “proteger”, de lo contrario las macros no podrían escribir o modificar elementos. Una vez modificada la celda vuelve a bloquear la hoja con contraseña.

Los elementos de control 1, 2, 3, 4, 5 y 12 (botones +/-) están controlados por macros que adicionan o restan el incremento indicado en la tabla y no realizan ninguna otra operación.

Los elementos 6, 7, 8, 9, 10 y 11 están controlados por macros que además de modificar el estado de cada elemento también operan sobre la imagen de la correspondiente válvula rotándola respecto de su centro para poder visualizar la operación claramente.

Los tableros de las bombas tienen botones de encendido y apagado que al presionarlos además de cambiar el estado del elemento modifica las propiedades del círculo para que tenga un efecto de iluminación. Al apagar el tablero principal resetea todos los estados de las válvulas de 3 vías a “no purgado”, además cierra las válvulas V1, V3 y V4, y abre totalmente la V2 para que al volver a encender deba realizarse la secuencia de purga. La macro que controla el selector del tablero (botón amarillo) solo escribe un estado diferente en la celda E15 de forma tal que el rectángulo que representa el display cambiará la información que muestra. Al presionar los botones de ayuda desplegables (figura 1), aparece una guía con los pasos para realizar ensayos de cavitación y rendimiento.

RESULTADOS

Para la bomba a ensayar se cargaron previamente sus curvas características, que serán los resultados a obtener en los ensayos de rendimiento y cavitación. En función de la apertura de las válvulas se establece el caudal en régimen permanente del sistema y con este se interpola sobre las curvas características, luego le asigna el valor de lectura a cada instrumento de medición de forma tal que el alumno pueda reconstruir dichas curvas.

Ensayo de rendimiento

Para comenzar el ensayo, el operador deberá realizar una serie de operaciones para que los instrumentos estén listos para medir. Primero, debe asegurarse que la bomba de vacío este apagada y la válvula (V4) cerrada para que el tanque se conecte a la atmósfera. Para que el ensayo no tenga afectación por cavitación la válvula en la aspiración (V2) deberá estar abierta y se controlará el caudal con la válvula en la impulsión (V1). Luego debe encender la bomba desde el tablero principal, purgar los manómetros, el tubo Venturi y el piezómetro diferencial y asegurarse que las válvulas queden en posición de medición. También, al comenzar deberá tomar nota de la temperatura del agua, de la presión atmosférica y la frecuencia de entrada a la bomba. Realizadas todas estas operaciones, el usuario está en condiciones de comenzar el ensayo. Entonces, deberá hacer lecturas de los manómetros, piezómetro diferencial y potencia eléctrica para cada punto de ensayo. Para pasar a otro punto deberá abrir la V1 y establecer un nuevo caudal, nuevamente registrará las lecturas de los instrumentos. Repitiendo esta operación tantas veces como puntos se quieran registrar el operador podrá, cálculos mediante, construir las curvas HQ, PQ y $\eta - Q$ (Figura 7 curvas cian, violeta y roja respectivamente).

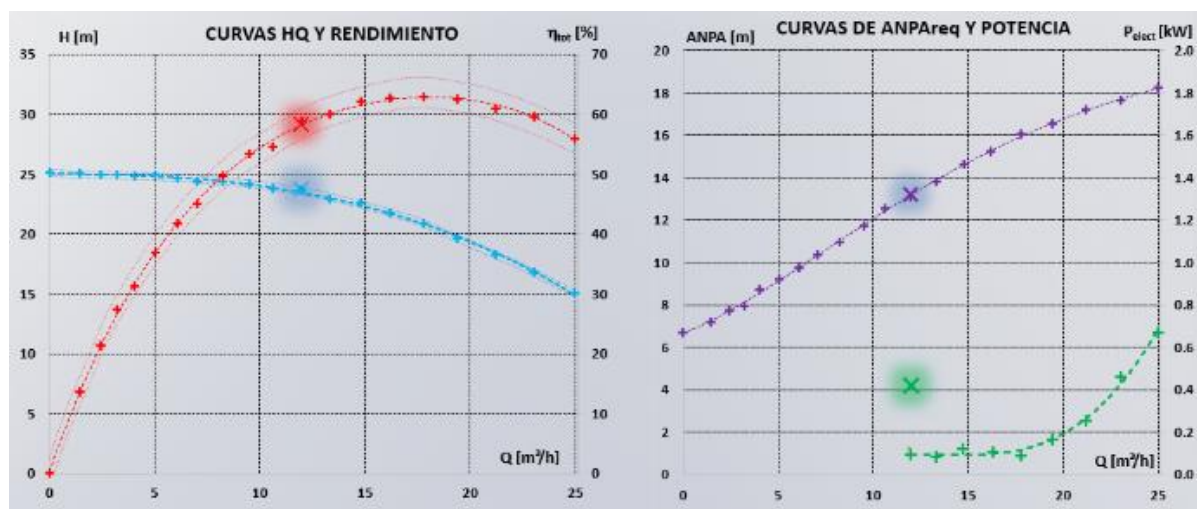


Figura 7.- Curvas características de la bomba ensayada. Las cruces indican el punto de operación actual

Ensayo de cavitación

Este ensayo se realiza luego del ensayo de rendimiento ya que es necesario conocer la curva de $\eta - Q$ que no está afectada por cavitación. Para comenzar este ensayo el operador deberá mantener iguales condiciones que al inicio del ensayo de rendimiento. Luego, abrirá la válvula (5) para conectar el tanque con la bomba de vacío y encenderá la bomba de vacío. Para realizar la primera medición deberá posicionarse en un punto H_Q donde ya es conocido el rendimiento y, abriendo la válvula V3, deprimirá el tanque. Para una depresión dada, la cavitación aparecerá en el rodete de la bomba, y el rendimiento comenzará a caer, por lo que será necesario leer nuevamente los instrumentos, recalcular el rendimiento y continuar aproximándose sucesivamente hasta una caída del 3 % respecto del punto inicial. Este punto por definición es el que define el límite de operación de la bomba para ese caudal. Seguidamente se calculará el $ANPA_{disp}$ de la instalación que se convierte en el $ANPA_{req}$ para ese punto. Para construir la curva completa de $ANPA_{req} - Q$ (Figura 7, curva verde) deberá posicionarse un nuevo caudal y comenzar el proceso nuevamente. Dado que para caudales bajos no se podrá alcanzar la cavitación en la bomba aún para la máxima depresión del tanque de vacío, el operador podrá cerrar la válvula en la aspiración para generar una pérdida de carga en la succión y luego podrá combinar con la depresión del tanque.

CONCLUSIONES

Como aspectos positivos de la simulación de los ensayos con una herramienta didáctica como la presentada en este trabajo, destacamos que da autonomía a los alumnos para operar el banco de pruebas, en un entorno seguro, sin requerimientos mayores a los habituales (disposición de computadora y manejo de planilla de cálculo). Otro aspecto positivo es que permite manejar libremente el tiempo de duración de la experiencia y repetirla sin límites, así como también posibilita incluir bombas de distintos diseños para identificar particularidades de las curvas de cada una, frente a la limitación de la instalación real. Permite recrear virtual e instantáneamente entornos de diferente presión atmosférica (como estar a una cota alta sobre el nivel del mar) o de mayor temperatura del agua. El ensayo simulado propone caminos que los alumnos pueden explorar, para llegar a los mismos resultados, aspecto que se dificulta en la presencialidad física, por la necesidad de mayor tiempo.

Permite, por otra parte, adicionar valor a la observación, incorporando recursos didácticos complementarios en la secuencia de ensayos. Un hecho particular adicional, es que en la cursada virtual se pudo incorporar el ensayo de cavitación, que no se realizaba por no disponer de instalaciones específicas para ese fin.

Consideramos que, si bien el entorno real para la realización de los ensayos es único en sus características, porque se actúa en forma directa con el objeto de estudio y porque ofrece un ambiente de trabajo convocante y motivante, también observamos que la realización de experiencias de laboratorio, por diferentes motivos, suele adoptar el modelo de “demostración”, o es meramente instruccional y procedimental - incluso a veces sin intervención directa de los alumnos - con poco aprovechamiento de su potencial como herramienta de enseñanza, de problematización de los conceptos, de oportunidad para fomentar la autonomía y el trabajo grupal y otros aspectos importantes para desarrollar habilidades prácticas y criterio ingenieril.

Concluimos que la propuesta permite abordar satisfactoriamente los contenidos conceptuales previstos y cumplir los objetivos de aprendizaje del procedimiento de los ensayos y de la función que cumplen sus componentes, así como de qué manera se procesan y muestran los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Apuntes de cátedra (2021). “Bombas y Estaciones de Bombeo, Cap. II: Curvas características y similitud; Cap. IV: Cavitación; Cap. V: Ecuación de Euler. Proyecto de Instalaciones Hdromecánicas y Máquinas Hidráulicas. Fac. Ingeniería, UNLP.

International Standard (1999). “Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance test – Grades 1 and 2”. ISO 9906. Ginebra, Suiza.