

## BANCO DE PRUEBAS VIRTUAL PARA ENSAYO DE BOMBAS

ANGULO, Mauricio A., LUCINO, Cecilia V.

UIDET Hidromecánica, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP

Calle 47 N°200, LA PLATA

Mauricio.angulo@ing.unlp.edu.ar

**Palabras clave:** rendimiento, cavitación, bombas centrífugas, simulación de ensayo

### Introducción

En las asignaturas Proyecto de Instalaciones Hidromecánicas y Máquinas Hidráulicas, los ensayos de bombas en bancos de pruebas cumplen una función importante, ya que la realización de ensayos de rendimiento y cavitación está incorporada como contenido de las asignaturas y por otra parte, el ensayo en sí constituye 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 los 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 del Laboratorio de Bombas

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 áreas de intervención en la ingeniería hidráulica, civil, mecánica y electromecánica, especialidades para las que se dictan las materias.

En la teoría se plantea el principio de funcionamiento de las bombas rotodinámicas del cual surgen las curvas características Salto – Caudal (HQ), Potencia – Caudal (PQ) y Rendimiento – Caudal ( $\eta - Q$ ), en el llamado *Ensayo de Rendimiento*. Respecto a la cavitación, se plantean en forma teórica sus efectos y 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* (ANPAR) [1,2].

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.

### Descripción del banco de pruebas virtual (BVB)

#### *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 y ensayos que se pretenden realizar y también estos ayudar a definir el software mediante el cual se resolverán los cálculos

internos y la pantalla de comandos a través del cual el usuario interactuará. En este caso se eligió un software, Excel, con el cual los alumnos están habituados a trabajar en los trabajos prácticos y tienen licencias estudiantiles, no obstante, existen otros softwares como LabVIEW o Matlab mediante los cuales podría realizarse la programación de banco virtual.

Se estableció entonces 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.
- ✓ Los instrumentos tendrán una respuesta instantánea ante la operación de válvulas y motores.
- ✓ Los instrumentos deberán tener un error asociado de forma tal que reproduzca con mayor aproximación a un experimento real.
- ✓ La realización de ensayos deberá tener una guía que permita a un usuario sin experiencia poder realizarlo de forma autónoma.

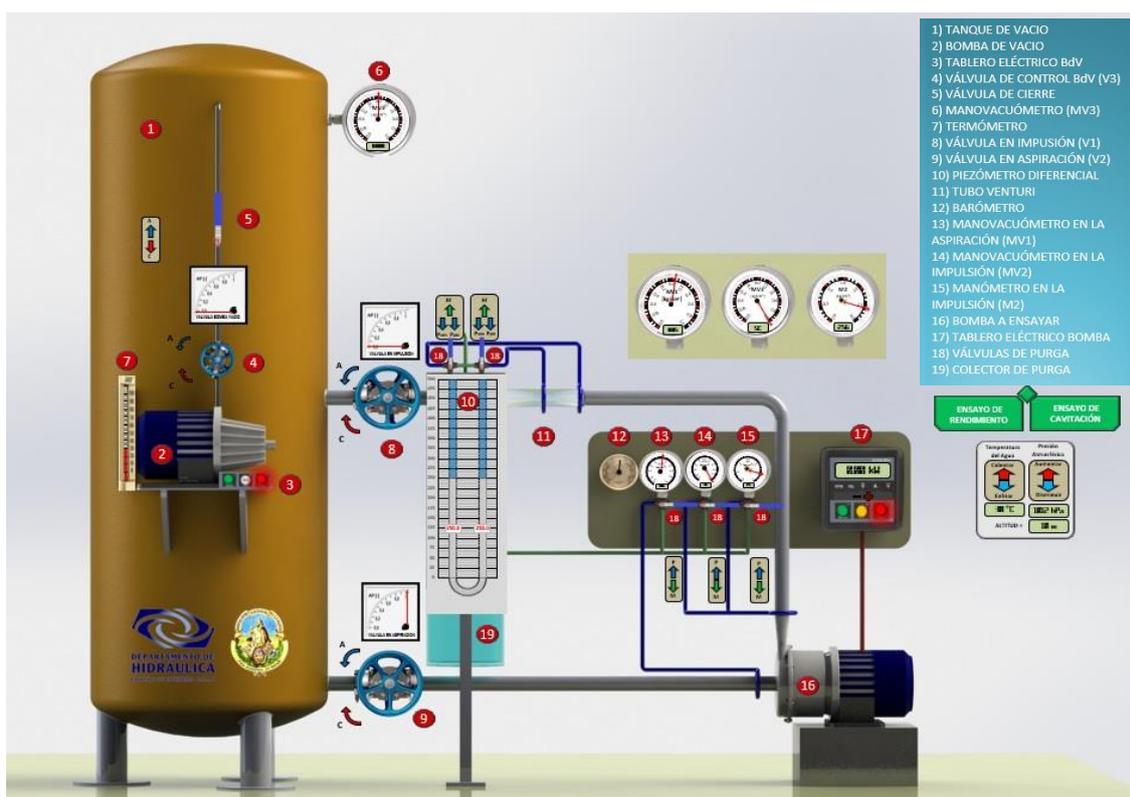


Figura 1.- Vista del tablero de comando del BVB tal como es percibida por el operador.

### Componentes principales del circuito

El BVB es un circuito cerrado compuesto por los siguientes elementos:

Tubería de aspiración e impulsión: La tubería parte desde la parte inferior del tanque de vacío y retorno por la parte superior entrando debajo del nivel de la superficie libre.

Bomba principal (16): Es el objeto de ensayo, podría programarse el banco para instalar otra bomba con diferentes características.

Tanque de vacío (1): Es un recipiente hermético preparado para soportar depresiones cercanas a la presión de vacío. Parte del mismo está ocupado por agua y parte por aire, de forma tal que la presión interna del aire pueda ser controlada por la bomba de vacío.

Bomba de vacío (2): Permite deprimir el interior del tanque logrando así la presión al ingreso de la bomba principal que se requiere para que la misma cavite.

#### *Elementos de control*

Tableros eléctricos: Existen dos tableros eléctricos, uno controla el encendido de la bomba de vacío (3) y otro controla el encendido de la bomba a ensayar (17). Además, este tablero tiene un botón central amarillo que permiten de forma cíclica alternan la indicación del display entre: Potencia eléctrica-Velocidad de giro-Frecuencia de la red. Para dar una visión realista, los botones se iluminan al presionarse de forma que el operador pueda identificar claramente el estado del equipo. Por otra parte, el BVB tiene una lógica tal que si la bomba principal está apagada las lecturas de los instrumentos no indican valores al igual que el display del mismo.

Válvulas esclusas: Hay tres válvulas esclusas instaladas en el circuito. Una está sobre la tubería de aspiración (9) denominada "V2", otra sobre la tubería de impulsión (8) denominada "V1" y una tercera instalada sobre la tubería que une el tanque de vacío y la aspiración de la bomba de vacío "V3". Para operarlas de forma gradual deben presionarse las flechas que indican el sentido de apertura "A" (abre) y "C" (cierra).

Válvulas de 3 vías: Estas válvulas admiten tres posiciones de forma de comunicar en cada posición dos tuberías. Las misma poseen dos flechas indicadoras que ayudan a identificar las tuberías que conecta. Hay seis válvulas instaladas en el circuito donde tres se utilizan para purgar los manómetros y mano-vacuómetros en la aspiración e impulsión de la bomba. Otras dos se utilizan para el purgado el tubo Venturi y las ramas del piezómetro diferencial de mercurio. La restante se utiliza para abrir el tanque de vacío a la atmósfera o conectar a este con la aspiración de la bomba de vacío. Las válvulas se pueden operar presionando las flechas con letras "P" (purgar), "M" (medir).

Tablero de control de variables ambientales: Este tablero se ubica sobre la derecha del banco y es externo al mismo. Permite controlar dos variables, la presión atmosférica y la temperatura del agua en el interior del circuito. La  $P_{atm}$  solo es posible modificar si el banco de ensayos es trasladado a un sitio geográfico con otra altitud por lo tanto este tablero permite controlar la altitud y así la presión atmosférica media, medida con el barómetro. Por otra parte, el tablero permite controlar la temperatura del agua del circuito, es decir puede calentarla o enfriarla. Luego esto tendrá influencia sobre la presión de vapor del agua. Internamente el BVB utiliza ecuaciones provistas por la norma IEC 60193 que vincula altitud y  $P_{atm}$ .

#### *Instrumentos de medición e indicadores de posición*

Manómetros y mano-vacuómetros: El banco tiene instalados tres mano-vacuómetros, uno en la aspiración (13), otro en la impulsión (14), uno en el tanque de vacío (6) y manómetro en la impulsión (15). Todos estos instrumentos tienen lectura analógica (agujas) o digital (display), tal como los instrumentos reales. Si los mismos no son purgados, su lectura será errónea. De igual forma, en los casos donde la presión supere el fondo de escala del instrumento el display indicará la leyenda "SC" y las agujas quedaran trabadas en el fondo de escala. Para ayudar a la lectura de los instrumentos se encuentra una vista ampliada en la parte superior del banco. Los manómetros tienen un error de medición asociado de +/- 2 %, valor que puede modificarse

internamente. Cada vez que se realiza una operación el valor se actualiza dentro del entorno de error de forma tal que aún en iguales condiciones de caudal y potencia la lectura de estos instrumentos puede variar otorgando mayor realismo a la experiencia. Dos operadores no obtendrán exactamente las mismas mediciones.

Barómetro (12): Este instrumento está vinculado con la altitud del sitio donde se encuentra el banco de ensayos y una vez configurada, la presión atmosférica se mantiene invariable durante el ensayo. La lectura del instrumento solo puede hacerse de forma analógica leyendo la aguja sobre el cuadrante.

Piezómetro diferencial (10) y tubo Venturi (11): Estos dos elementos permiten medir el caudal que circula por la tubería. Para ello se provee al operador de la ecuación de calibración del tubo Venturi que vincula la columna diferencial de mercurio sobre las ramas del piezómetro y el caudal. Dicha lectura también tiene un error inducido artificialmente de forma tal que el caudal tenga un error de  $\pm 1\%$ . Las ramas del piezómetro diferencial cuentan con un indicador que ayuda al operador a realizar una lectura más precisa de la escala, como sucedería en forma presencial. Para realizar la lectura se requiere el purgado de los mismos.

Termómetro (7): La temperatura del agua dentro del circuito puede ser leída por este instrumento analógico si se observa su escala. También puede leerse en el display del tablero de control de variables ambientales.

Vatímetro: Por defecto, en el display del tablero de la bomba principal, se tiene la lectura directa de la potencia eléctrica consumida por la bomba ensayada. Este valor es aleatorio dentro de un entorno de  $\pm 1\%$  y arrojará diferentes lecturas aún para HQ constantes.

Tacómetro: Si se presiona el botón amarillo del tablero principal se puede leer la velocidad de rotación de la bomba y a su vez puede modificarse dicho valor si se presiona el botón  $\pm$  que controla la frecuencia del equipo cambiando la velocidad de giro modificando así las curvas características de la bomba.

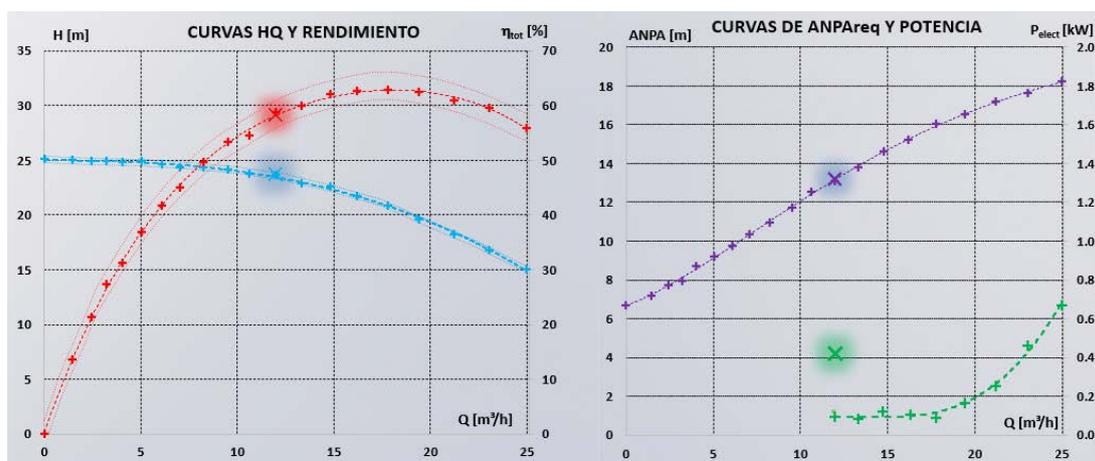
Frecuencímetro: Si se presiona nuevamente el botón amarillo del tablero principal se podrá leer la frecuencia de la corriente alterna que ingresa al motor. De igual forma si se pulsa el botón  $\pm$  podrá controlarse la velocidad de giro de la bomba y por ende modificará el punto de operación de la bomba.

Indicador de apertura: Junto con cada válvula esclusa se cuenta con un indicador analógico de la apertura que le permite al operador saber si la válvula está abierta (100 %), cerrada (0 %) o en una posición intermedia para tener como referencia durante los ensayos.

### *Ensayo de rendimiento*

Para comenzar el ensayo, el operador deberá realizar una serie de operaciones para que los instrumentos estén listo para medir. Primero, debe asegurarse que la bomba de vacío este apagada y la válvula (5) cerrada para que el tanque se conecte a la atmósfera. Para que el ensayo no tenga afectación por cavitación la válvula en la aspiración deberá estar abierta y controlará el caudal con la válvula en la impulsión. 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 y de la presión atmosférica. 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 válvula de la impulsión 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 2 curvas cian, violeta y roja respectivamente).



**Figura 2.-** Curvas características de la bomba ensayada. Las cruces indican el punto de operación de la bomba para un instante particular durante el ensayo virtual.

### Ensayo de cavitación

Este ensayo se realiza a continuación 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 HQ donde ya conoce 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 disponible de la instalación que se convierte en el ANPA para ese punto. Para construir la curva completa de ANPA  $- Q$  (Figura 2, 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.

### Discusión

Las actividades de laboratorio realizadas con presencialidad física indudablemente permiten la vivencia y la percepción directa, a través de los sentidos, de la "acción - reacción" o "causa - efecto" ante la operación de una instalación, que es una parte importante del ensayo. El efecto de una decisión tomada en el banco de ensayos real puede tener una implicancia que podría no ser percibida por el alumno en su verdadera magnitud en la simulación (como, por ejemplo: oír el sonido del motor, o que eventualmente "se inunde", o que salga el mercurio del piezómetro por una maniobra incorrecta). Por otro lado, la situación de ensayo real se da en un entorno particular, de laboratorio, donde los alumnos y docentes se ponen en acción y se vinculan de una manera diferente a la que se da en la clase tradicional. Esto suele dar mayores oportunidades de acercamiento e intercambio; es una oportunidad para crear un escenario más convocante para la participación de los alumnos, más dinámico, de "novedad" y entusiasmo. Ver y tocar los objetos y dispositivos, manipularlos, controlarlos, son acciones

irreemplazables desde lo perceptivo y desde lo motivacional. Pero lo cierto es que, por diferentes motivos, no siempre es posible que las alumnas y los alumnos accedan a los beneficios de este tipo de experiencias en todas sus dimensiones formativas, especialmente, que realicen el ensayo completo operando el instrumental del banco en forma autónoma, enfrentándose a dudas, resolviendo problemas, disponiendo del tiempo que cada uno requiera para comprender el proceso y para analizar y verificar los resultados.

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 el la cursada virtual se pudo incorporar el ensayo de cavitación, que no se hacía por no disponer de instalaciones específicas (actualmente se encuentra en etapa de ejecución una instalación con este fin).

## Conclusiones

El ensayo de bombas virtual 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. A la vez, aporta algunas ventajas respecto a los ensayos tradicionales, desde el punto de vista didáctico. Vemos la posibilidad de completar esta herramienta para proponer actividades complementarias que se incluyan en la práctica, que a su vez puedan utilizarse como recurso para la evaluación, aun cuando en el futuro los ensayos vuelvan a realizarse con presencialidad física.

Consideramos que 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, pero 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. Esto nos invita a pensar, más que en lo que perdemos con la virtualidad, en cuánto realmente aprovechamos lo irreemplazable de la presencialidad.

## Bibliografía

- [1] Bombas y Estaciones de Bombeo – Cap. V: Ecuación de Euler, Cap. II: Curvas características y similitud y Cap. IV: Cavitación (2021): Apuntes de cátedra Proyecto de Instalaciones Hdromecánicas y Máquinas Hidráulicas. Fac. Ingeniería, UNLP.
- [2] International Standard (1999): *Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance test – Grades 1 and 2*. ISO 9906. Ginebra, Suiza.