

CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN BANCO DE CAVITACIÓN PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS PEQUEÑAS

RESUMEN

En el presente artículo se describe un proyecto de pregrado financiado por la Oficina de Investigaciones de la U.T.P. y realizado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la misma, el cual tuvo como finalidad desarrollar e implementar una práctica para el Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Por medio de esta práctica, el estudiante puede verificar el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas, y adicionalmente está en capacidad de construir la curva del comportamiento $NPSH_R$ (Cabeza de succión positiva neta requerida) vs. Q (Caudal) y H (Cabeza) vs. Q (Caudal) para una bomba centrífuga pequeña (de potencia inferior a 1 kW).

PALABRAS CLAVES: NPSH requerido, NPSH disponible, caudal, cavitación, pérdidas de energía.

ABSTRACT

In this piece it is described a senior project funded by the Research Office of the Universidad Tecnológica de Pereira and dealt with in its Mechanical Engineering Department, whose end objective was to develop and implement a practice to be included in the syllabus of the Hydraulic Machines Laboratory Course. By running this practice the engineering student can verify the cavitation phenomenon that can take place in centrifugal pumps, and also be able to prepare a couple of graphs showing the behavior $NPSH_R$ (required net positive suction head) vs. Q (flowrate), as well as the behavior H (head) vs. Q (flowrate), for a small (less than 1 kW) centrifugal pump.

KEYWORDS: Required NPSH, available NPSH, flowrate, cavitation, friction losses.

1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del proyecto se procedió a diseñar el banco de pruebas de cavitación, de acuerdo con las normas establecidas para este tipo de ensayos (NTC 4990 y el Código ASME, Performance Test Code, Centrifugal Pumps, 8.2. -1965). El banco consiste esencialmente de una bomba centrífuga, un tanque de recirculación hermético con tapa desmontable, un manómetro, dos vacuómetros, un medidor volumétrico, una válvula de control de flujo, una válvula de cierre, un termómetro de contacto, y un conjunto de tuberías y accesorios que configuran un circuito cerrado. Después del diseño preliminar del circuito, se analizaron dos alternativas en relación con la obtención del tanque, las cuales consistían bien en la fabricación ó bien en la compra del mismo; se optó por la segunda alternativa por razones de tipo económico, previa verificación de que el tanque seleccionado resistía la presión de vacío @ la cual se llevan a cabo las pruebas de cavitación. Igualmente se diseñó una estructura metálica que permitiera el montaje de los componentes del sistema de bombeo: Bomba, tanque, tubería, y accesorios.

Dado que la configuración del sistema es la de un circuito cerrado, la cabeza de la bomba, H , para un determinado caudal de operación debe permanecer constante independientemente de la presión existente en la superficie libre del agua en el tanque de recirculación.

Fecha de Recepción: 31 Enero de 2006
Fecha de Aceptación: 31 Marzo de 2006

LUIS EDUARDO DÍAZ F.

Ingeniero Mecánico.
Gima-Soluciones Industriales y
Automotrices, Manizales.
ldiazflorez@yahoo.com

YAMAL MUSTAFÁ I.

Ingeniero Mecánico, M. Ing.
Profesor Asistente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
yamal@utp.edu.co

LUIS GUILLERMO RIOS A.

Ingeniero Químico, M. Ing., MBA.
Profesor Asistente
Facultad de Tecnología
Universidad Tecnológica de Pereira
luis@utp.edu.co

La prueba consiste en posicionar la válvula de control de flujo ubicada en la descarga de la bomba y cambiar gradualmente la presión en el tanque de recirculación mediante la aplicación de vacío, registrando el caudal y las presiones de succión y descarga correspondientes; una disminución de la cabeza de la bomba, H , de un 3% en relación con el valor inicial es un indicativo de la cavitación. La prueba se repite para varios caudales de operación manipulando la válvula de control de flujo; la información obtenida permite construir la curva de $NPSH_R$ vs. Q .

Para la construcción de la curva H vs. Q , el tanque de recirculación debe estar @ la presión atmosférica. Se ajusta la válvula de control de flujo, se obtienen los valores de las presiones de succión y descarga de la bomba y el caudal ésta, y se repite el procedimiento para diferentes caudales. En el presente artículo también se señalan algunos aspectos tenidos en cuenta en el diseño y montaje del banco de pruebas, fruto de la experiencia laboral de varios años obtenida por los coautores tanto en las industrias químicas como en la docencia universitaria¹.

¹ Tales aspectos no son abordados normalmente en los cursos universitarios correspondientes, los cuales están más orientados hacia el diseño y/o especificación de bombas, tuberías, válvulas, y accesorios.

2. BOMBAS

El tipo de bomba más empleado a nivel industrial es la bomba centrífuga. Sus ventajas son incuestionables, sin embargo, una instalación deficiente puede generar verdaderos dolores de cabeza. La bomba se debe montar previendo que en el futuro se van a adelantar tareas de mantenimiento, que pueden involucrar el desmontaje de la misma. A continuación se relacionan algunos aspectos que deben ser tenidos en cuenta en la etapa de diseño de los sistemas de bombeo.

- Diámetros de las tuberías de succión y descarga en relación con los diámetros de las conexiones de la bomba:

Por regla general, las tuberías de succión y descarga deben tener como mínimo el mismo diámetro que las respectivas conexiones de succión y descarga de la bomba. Lo usual es que la tubería de succión sea de un diámetro mayor que el de la conexión respectiva para disminuir las pérdidas de energía a la entrada de la bomba y alejar el peligro de la cavitación (el cual se explica posteriormente). Cuando se va a conectar una tubería de diámetro mayor a la succión de una bomba, debe emplearse una reducción excéntrica, para evitar la formación de bolsas de aire. Al emplear un diámetro mayor que el de la conexión de la bomba en la descarga se disminuyen las pérdidas de energía lo cual permite seleccionar una bomba con un motor de menor potencia.

- Carcaza libre de esfuerzos mecánicos:

Un error muy común en la instalación de la tubería de la bomba, es el de acoplar ésta a la bomba sin que se encuentre debidamente alineada. Esta práctica genera esfuerzos en la carcaza ó cuerpo de la bomba, desalineamiento entre la bomba y el motor de accionamiento, y daños en rodamientos, sellos, y empaquetaduras.

- Estrangulamiento de la válvula de succión de una bomba:

Cuando se va a regular el flujo de una bomba centrífuga, se debe manipular únicamente la válvula de descarga; la válvula de succión debe permanecer completamente abierta siempre que la bomba esté en operación. Al estrangular la válvula de la succión se incrementan las pérdidas en esta zona y se pueden dar las condiciones para que aparezca el fenómeno de la cavitación.

- Sentido de giro invertido:

Cuando se hace el mantenimiento programado de una bomba, se debe desconectar el motor de la red. Es muy importante identificar las conexiones eléctricas para evitar que al reconectar el motor se invierta, por error, el sentido de giro del rodete ó impulsor de la bomba con las consecuencias mencionadas anteriormente.

3. FENÓMENO DE CAVITACIÓN

La ebullición, ó formación de burbujas de vapor dentro de la masa de un líquido, se inicia cuando la presión

absoluta del líquido es igual a la presión de vapor de éste. En los líquidos es posible obtener una presión muy baja debido al movimiento del fluido, y si ésta disminuye hasta la presión de vapor del líquido, entonces se presenta la ebullición; lo anterior se puede presentar en los pasajes irregulares y estrechos de una bomba. Cuando en un líquido que fluye se forman burbujas de vapor, éstas son llevadas hacia regiones de mayor presión, donde repentinamente se rompen con intensidad suficiente para provocar un verdadero daño estructural. La formación y posterior ruptura de las burbujas de vapor en un líquido que fluye se denomina cavitación [1]. Es de anotarse que la menor presión total se presenta en el ojo del impulsor de una bomba y es allí donde se inicia dicho fenómeno.

Sobre la línea isoterma A-B en la Figura 1 puede verse que si la tubería de succión de la bomba está mal diseñada, la presión a la succión puede caer por debajo de la presión de vapor o de saturación del agua a dicha temperatura, obteniéndose una mezcla de líquido y vapor, la cual produce el fenómeno de cavitación. Hay que recordar que el volumen específico del vapor es mucho mayor que el volumen específico del líquido, y al estar las dos fases presentes el caudal suministrado por la bomba disminuye dramáticamente.

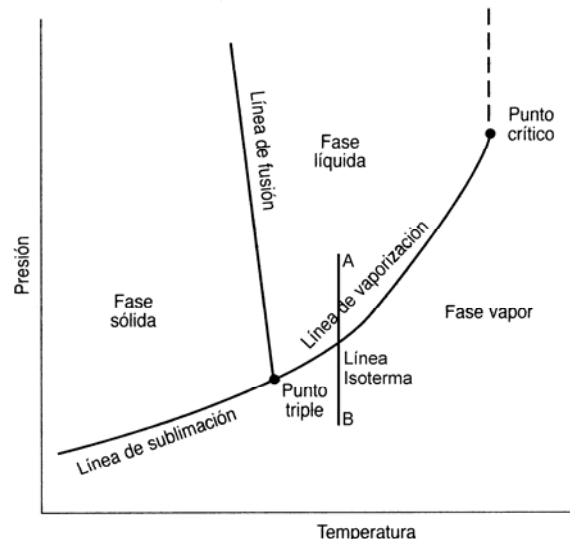


Figura 1. Diagrama de Cambios de Fase para el Agua [2].

A partir de lo anterior se puede complementar el tradicional concepto que establece que la presión de vapor de un líquido “es aquella a la que un líquido está en equilibrio con su vapor en un sistema cerrado @ una temperatura dada” agregando que “es la presión mínima para que un líquido exista como tal @ una temperatura dada” [3]. Se aclara entonces que cuando una bomba se encuentra instalada por encima del tanque de succión, se puede calcular una máxima distancia vertical de succión a ser tenida en cuenta para evitar el fenómeno de la cavitación, e igualmente, que cuando se bombea un líquido saturado, como en el caso de la corriente de reflujo en una torre de destilación, la bomba siempre debe ubicarse por debajo del tanque de succión.

4. CÁLCULO DE LA $NPSH_D$

El término más común para describir las condiciones de succión de una bomba es la cabeza de succión positiva neta (*NPSH por la sigla en inglés*), definida por el Hydraulic Institute (U.S.A.) según la siguiente expresión:

$$NPSH = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (1)$$

donde:

P_s es la presión absoluta a la entrada de la bomba,

P_v es la presión de vapor del líquido bombeado,

ρ es la densidad del líquido @ la temperatura de bombeo,

V_s es la velocidad promedio en la tubería de succión.

Es conveniente diferenciar la $NPSH$ requerida, $NPSH_R$, de la $NPSH$ disponible, $NPSH_D$; la primera se refiere a las condiciones de succión necesarias para el funcionamiento correcto de la bomba sin cavitación, mientras que la segunda expresa la forma en la cual opera la instalación [4]. Obviamente la $NPSH_D$ tiene que ser mayor que la $NPSH_R$. La $NPSH_R$ es un requerimiento característico de la bomba y se determina por medio de ensayos en las instalaciones de pruebas del fabricante. Durante los ensayos, se disminuye la presión de succión hasta que el flujo de la bomba empieza a bajar. El Hydraulic Institute (U.S.A.) define la $NPSH_R$ cuando la cabeza de la bomba ha disminuido un 3% a partir de la condición estable; existe controversia acerca de lo que significa condición estable.

Hay dos formas para disminuir la presión de succión durante las pruebas [5]:

- Por medio de la evacuación del tanque de succión
- Por medio del estrangulamiento de la válvula de succión de la bomba.

El estrangulamiento es más simple, pero la válvula causa perturbaciones en el flujo que se propagan hacia el interior de la bomba. Estas perturbaciones hacen que la cabeza de la bomba disminuya más rápido que en el caso de manejarse un flujo más uniforme (sin obstrucción de la válvula) arrojando un valor del $NPSH_R$ determinado mediante ensayo conservativamente, ó artificialmente, alto. El método del vacío es más "puro" y produce resultados más "científicos", no "oscurecidos" por la presencia de la válvula. Sin embargo, existen argumentos en el sentido de que el método de la válvula es mejor dado que éste representa en realidad las instalaciones de campo las cuales siempre tienen algunas obstrucciones a la entrada que tienen que ser tenidas en cuenta. De esta manera, un margen extra, obtenido vía la prueba del estrangulamiento, sería realmente deseable desde un punto de vista conservativo.

5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo se empleó la Norma Técnica Colombiana del ICONTEC NTC 4990 [6], en la cual se describen detalladamente las pruebas de

aceptación que deben realizar los fabricantes de equipos de bombeo.

El banco de pruebas comprende los siguientes componentes:

Una bomba centrífuga, un tanque de recirculación, un manómetro, dos vacuómetros, un medidor volumétrico, una válvula de control de flujo, una válvula de cierre, un termómetro de contacto, y tuberías y accesorios.

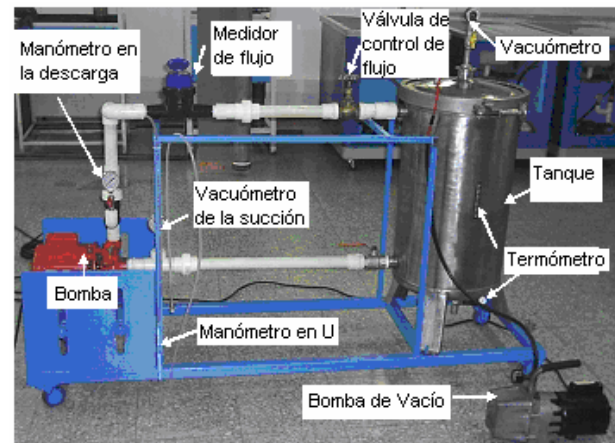


Figura 2. Componentes del Banco de Pruebas.

Las pruebas se realizaron empleando una bomba tipo monoblock marca IHM ref.: 1 x 1¼ x 4, accionada por un motor monofásico de ½ hp @ 3500 rpm; los resultados obtenidos fueron cotejados con la información suministrada por el fabricante del equipo.

Debido a la recirculación del agua, la capacidad del tanque del mismo nombre es crítica para evitar que el líquido se caliente durante el desarrollo de la práctica. En tal sentido, y dado que la disponibilidad de espacio físico en el laboratorio no permite el empleo de un tanque de alta capacitancia, se hace necesario implementar un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura del agua bombeada más ó menos constante, evitando la variación de sus propiedades físicas. El tanque que está provisto de una tapa desmontable y de un sistema de cierre que garantiza su hermeticidad, está construido en lámina de acero inoxidable de un espesor de 4 mm por lo cual resiste una presión de trabajo negativa igual a la presión estándar, y tiene un volumen de 85 L.

Como se observa en la Figura 2 el banco de pruebas está equipado con un vacuómetro y un manómetro instalados respectivamente en la tubería de succión y descarga de la bomba, y un segundo vacuómetro instalado en la tapa del tanque de recirculación. Los anteriores dispositivos de medición de presión están provistos de sus respectivas válvulas de corte.

En la tubería de descarga de la bomba se instaló un medidor volumétrico del tipo pistón oscilante, por medio del cual se puede determinar el caudal que fluye por el sistema. Aguas abajo del medidor volumétrico va

instalada una válvula de control de flujo; para tal efecto se seleccionó una válvula de globo de 1 ¼ pulg. Dado que la superficie libre del agua en el tanque de recirculación se encuentra por encima del eje de la bomba, fue necesario colocar una válvula de cierre en la tubería de descarga del tanque, para que éste pueda quedar eventualmente aislado de la bomba; para tal efecto se seleccionó una válvula de "bola" de 1 ½ pulg., en razón de su bajo coeficiente de pérdida de energía cuando está totalmente abierta.

Para monitorear la temperatura del líquido dentro del tanque de recirculación (la cual debe permanecer más o menos constante²) se colocó un termómetro de contacto en la superficie exterior del tanque, y un segundo termómetro del tipo inmersión dentro de la masa del líquido; de esta manera es posible estimar razonablemente esta última temperatura con base en la primera. Se procedió entonces a recircular el agua por espacio de varios minutos permitiendo que ésta se calentara, y se registraron las temperaturas arrojadas por los dos termómetros obteniéndose una diferencia del orden de 0.5 – 1.0°C. La temperatura @ la cual se realizaron las pruebas de cavitación fue de 27 °C, la cual fue determinada por medio del termómetro de contacto donde se leía una temperatura de 26 °C aproximadamente.

Para completar el circuito hidráulico se emplearon tuberías y accesorios de PVC, dada su versatilidad, facilidad de montaje, inmunidad a la corrosión, bajo peso, y baja rugosidad. En la succión se empleó una tubería de 1 ¼ pulg y en la descarga se empleó una tubería de 1 pulg; se colocaron uniones universales para facilitar el montaje y desmontaje de la bomba y del medidor volumétrico. Para que el nivel de la superficie libre del líquido dentro del tanque de recirculación no fuera una variable afectando el comportamiento de la bomba, la tubería de retorno se prolongó para que quedara inmersa dentro de la masa de líquido, de suerte que para el sistema se cumple que $\Delta Z = 0$ y $\Delta P = 0$, teniendo en cuenta que se configura un circuito cerrado.

6. RESULTADOS

La captura de datos se realizó mediante la lectura directa en la carátula de los instrumentos de medición usados, además se hizo uso de un cosenofímetro para verificar el factor de potencia del motor eléctrico que acciona la bomba y de una pinza voltiamperimétrica para las medidas de voltaje y corriente eléctrica. Las mediciones del factor de potencia se realizaron inicialmente con la bomba operando en vacío por un breve espacio de tiempo, para evitar daños en el sello mecánico de la misma; estas mediciones arrojaron factores de potencia

muy bajos lo cual falseaba los cálculos de la potencia del motor eléctrico de la bomba.

Para que los valores de la potencia eléctrica calculada fueran confiables fue necesario realizar mediciones del factor de potencia, voltaje, y amperaje para los diferentes caudales de operación. Se supuso una eficiencia del motor eléctrico del 66%, tomando como referencia un motor de características similares al utilizado en el banco de pruebas.

Caudal (Lpm)	P _s (bar)	P _d (bar)	Amp.	V	Cos φ
0	0.054	2.21	7.50	119.00	0.61
38	0.029	2.14	7.90	119.00	0.68
68	0.028	2.07	8.25	117.50	0.73
91	0.021	1.93	8.90	116.50	0.78
105	0.012	1.79	9.00	116.00	0.80
115	0.008	1.65	9.00	116.00	0.81
119	0.003	1.56	9.10	119.00	0.81
124	0.001	1.52	9.25	115.50	0.83
127	0	1.45	9.35	115.00	0.83
130	-0.004	1.38	9.35	114.50	0.83
132	-0.004	1.37	9.40	114.50	0.83
133	-0.005	1.34	9.45	115.00	0.83
134	-0.006	1.32	9.50	114.50	0.83
136	-0.007	1.31	9.50	114.00	0.83

Tabla 1. Datos capturados.

Para el cálculo de la cabeza de la bomba se empleó la siguiente expresión:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} + Z_d - Z_s + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} \quad (2)$$

Los subíndices d y s se refieren a succión y descarga respectivamente. Los términos Z se refieren a las diferencias de nivel entre los instrumentos.

Se emplearon las propiedades del agua @ 27 °C, de esta forma $\gamma = 9772 \text{ N/m}^3$, $P_v = 3.67 \text{ kPa (abs)}$.

Para el cálculo de las potencias, en kW, se usaron las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{eléctrica}} = \left(\frac{V \times A \times \text{Cos}\phi}{1000} \right) \quad (3)$$

$$P_{\text{eje}} = P_{\text{eléctrica}} \times \eta_{\text{motor}} \quad (4)$$

$$P_{\text{fluido}} = \gamma \times Q \times H \quad (5)$$

² La presión de vapor de un líquido es una función fuerte de la temperatura; para una variación de temperatura entre 25 y 30°C (20% de incremento) la presión de vapor del agua aumenta en un 34%.

Q [Lpm]	H [m]	Pot. Elec. [kW]	Pot. Eje [kW]	Pot. Fluid [kW]	η
0	22.22	0.54	0.36	0.00	0
38	21.78	0.64	0.42	0.13	0.32
68	21.13	0.71	0.47	0.23	0.50
91	19.83	0.81	0.53	0.29	0.55
105	18.53	0.84	0.55	0.32	0.57
115	17.18	0.85	0.56	0.32	0.58
119	16.32	0.88	0.58	0.32	0.55
124	15.96	0.89	0.59	0.32	0.55
127	15.26	0.89	0.59	0.32	0.54
130	14.6	0.89	0.59	0.31	0.53
132	14.51	0.89	0.59	0.31	0.53
133	14.21	0.90	0.60	0.31	0.52
134	14.02	0.90	0.60	0.31	0.51
136	13.94	0.90	0.59	0.31	0.52

Tabla 2. Datos procesados.

Para calcular la $NPSH_D$ de la bomba, se realizaron mediciones de las siguientes variables: presiones de succión y descarga, vacío, caudal, y temperatura.

En el desarrollo de las pruebas se seleccionaron varias posiciones de apertura de la válvula de control de flujo (1/2, 1, 2, 3, 4 giros de la volante de la válvula) con el objeto de obtener unos valores representativos del caudal que permitieran trazar la curva $NPSH_R$ vs. Q. Para cada apertura de la válvula se aumentó progresivamente la presión de vacío en el tanque de recirculación hasta alcanzar el máximo vacío suministrado por la bomba del mismo nombre que se tenía disponible; estos datos que aparecen consignados en la Tabla 3, se emplearon para calcular los valores de la $NPSH_D$ y de la cabeza de la bomba, según las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. Para el cálculo de la $NPSH_D$, la presión de succión se expresa en unidades absolutas, dado que la presión de vapor está expresada en dichas unidades.

Posición de apertura: 1/2 giro del volante						
P_{Tanque} [in Hg]	Caudal [Lpm]	P_s [bar]	P_d [bar]	H [m]	V_{entr} [m/s]	NPSH [m]
-4.0	65.0	-0.13	1.90	21.00	0.95	7.14
-6.0	64.0	-0.18	1.84	20.89	0.93	6.62
-7.0	63.0	-0.25	1.82	21.40	0.92	5.91
-10.0	62.0	-0.31	1.80	21.81	0.90	5.29
-12.0	61.0	-0.38	1.76	22.12	0.89	4.57
-14.0	60.5	-0.45	1.65	21.71	0.88	3.86
-16.0	60.0	-0.53	1.60	22.01	0.88	3.04
-18.0	58.5	-0.58	1.52	21.70	0.85	2.52

Posición de apertura: 1 giro del volante						
P_{Tanque} [in Hg]	Caudal [Lpm]	P_s [bar]	P_d [bar]	H [m]	V_{entr} [m/s]	NPSH [m]
-4.0	65.0	-0.13	1.90	21.00	0.95	7.14
-6.0	64.0	-0.18	1.84	20.89	0.93	6.62
-7.0	63.0	-0.25	1.82	21.35	0.92	5.96
-10.0	62.0	-0.31	1.80	21.81	0.90	5.29
-12.0	61.0	-0.38	1.76	22.06	0.89	4.57
-14.0	60.5	-0.45	1.65	21.71	0.88	3.86
-16.0	60.0	-0.53	1.6	22.01	0.88	3.04
-18.0	58.5	-0.58	1.52	21.70	0.85	2.52
Posición de apertura: 2 giros del volante						
P_{Tanque} [in Hg]	Caudal [Lpm]	P_s [bar]	P_d [bar]	H [m]	V_{entr} [m/s]	NPSH [m]
-4.0	126.5	-0.16	1.32	15.57	1.85	6.96
-6.0	126.5	-0.22	1.25	15.41	1.85	6.34
-7.0	124.5	-0.29	1.18	15.46	1.82	5.62
-10.0	122.0	-0.35	1.20	16.26	1.78	5.00
-12.0	118.0	-0.43	0.87	13.64	1.72	4.17
-14.0	114.0	-0.47	0.74	12.75	1.66	3.75
-16.0	107.0	-0.56	0.53	11.45	1.56	2.82
-18.0	99.5	-0.62	0.34	10.04	1.45	2.24
Posición de apertura: 3 giros del volante						
P_{Tanque} [in Hg]	Caudal [Lpm]	P_s [bar]	P_d [bar]	H [m]	V_{entr} [m/s]	NPSH [m]
-4.0	132.0	-0.17	1.22	14.62	1.93	6.92
-6.0	130.5	-0.23	1.19	14.97	1.90	6.25
-7.0	128.0	-0.29	1.10	14.60	1.87	5.68
-10.0	125.0	-0.35	0.96	13.82	1.82	5.01
-12.0	121.0	-0.42	0.79	12.68	1.77	4.33
-14.0	115.5	-0.48	0.60	11.38	1.68	3.71
-16.0	109.0	-0.55	0.40	10.02	1.59	2.97
-18.0	99.5	-0.61	0.20	8.61	1.45	2.29
Posición de apertura: 4 giros del volante						
P_{Tanque} [in Hg]	Caudal [Lpm]	P_s [bar]	P_d [bar]	H [m]	V_{entr} [m/s]	NPSH [m]
-4.0	133.0	-0.15	1.21	14.39	1.94	7.06
-6.0	132.5	-0.23	1.17	14.67	1.93	6.31
-7.0	129.0	-0.29	1.00	13.63	1.88	5.63
-10.0	125.0	-0.35	0.90	13.21	1.82	5.01
-12.0	121.0	-0.41	0.72	11.96	1.77	4.39
-14.0	116.0	-0.48	0.59	11.22	1.69	3.71
-16.0	109.0	-0.55	0.35	9.46	1.59	2.97
-18.0	101.5	-0.61	0.19	8.46	1.48	2.29

Tabla 3. Cálculo de la $NPSH_D$.

Como se aprecia en las tablas anteriores, a medida que la $NPSH_D$ disminuye, la cabeza de la bomba presenta fluctuaciones hasta llegar a un punto en el cual empieza a disminuir. Debido a estas fluctuaciones se procedió a obtener un valor promedio de la cabeza en dicha zona con el fin de aplicar el criterio del 3% para determinar la $NPSH_R$.

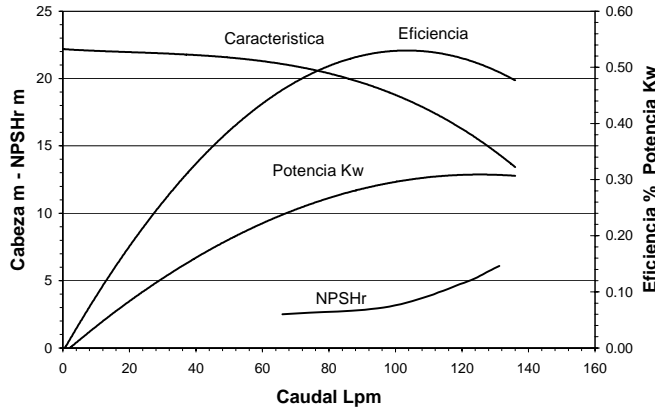


Figura 3. H vs. Q, η vs. Q, Potencia vs. Q, y $NPSH_R$ vs. Q.

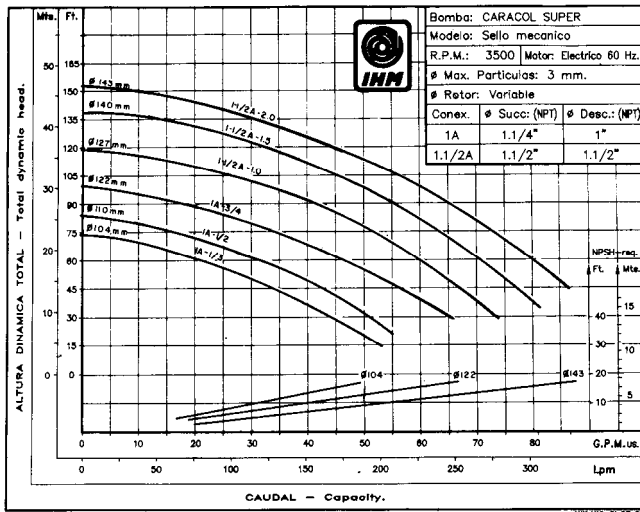


Figura 4. Curvas H vs. Q y $NPSH_R$ vs. Q suministradas por el fabricante [7].

En la Figura 3 se representan los valores de: H vs. Q, η vs. Q, Potencia vs. Q, y $NPSH_R$ vs. Q. A partir de las curvas anteriores H vs. Q y $NPSH_R$ vs. Q se puede verificar que los resultados obtenidos en las pruebas son similares a los que reporta el fabricante en la ficha técnica de la bomba usada en el equipo de cavitación (Ver Figura 4 para el rotor de 110mm). En la Tabla 3 también se verifica que en la medida en que aumenta la presión de vacío en la succión de la bomba, se observa una disminución en el caudal suministrado por la misma.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se pudo constatar que tanto la curva H vs. Q como la curva $NPSH_R$ vs. Q eran muy similares a las del catálogo de la bomba usada; en consecuencia se concluye que el banco de cavitación para bombas centrífugas pequeñas representa una buena herramienta de trabajo para los estudiantes de Ingeniería que lleven a cabo sus prácticas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.T.P.

Para mejorar la operación del banco de cavitación se recomienda instalar en el tanque de recirculación los siguientes dispositivos: Un serpentín de enfriamiento, un indicador de nivel, un visor, y una lámpara en el tanque de recirculación. Tales dispositivos permitirán observar el comportamiento de la masa de agua en la superficie libre del líquido.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] MUNSON, Bruce R, YOUNG, Donald F., y OKIISHI, Theodore H. "Fundamentos de Mecánica de Fluidos". México D. F.: Editorial Limusa, S. A. de C. V. - Grupo Noriega Editores, 1999, p. 43.

[2] VAN WYLEN, Gordon J. et al. "Fundamentos de Termodinámica" Segunda edición. México D. F.: Editorial Limusa, S. A. de C. V. - Grupo Noriega Editores, 2000, p. 65.

[3] CELEMÍN MATACHANA, Miguel. "Lecciones de Mecánica de Fluidos". Universidad de León (España): Secretariado de Publicaciones, 1996, p. 112.

[4] BURTON, John y LOBOGUERRERO, Jaime. "Bombas Rotodinámicas y de Desplazamiento Positivo" Tercera edición. Bogotá : Universidad de los Andes, 1999, pp. 107 - 108.

[5] NELIK, Lev. "Centrifugal and Rotary Pumps: Fundamentals with Applications". Boca Ratón, FL: CRC Press, 1999, p. 90.

[6] Norma Técnica Colombiana NTC 4990. "Las Bombas Rotodinámicas: Ensayos de Aceptación de Desempeño Hidráulico". Bogotá: ICONTEC, 2001, 77p.

[7] Ficha técnica Línea Caracol Super. A210.00-II. Bogotá: Industrias Hidromecánicas Ltda.,IHM, 1991.