

Procedimiento para la elaboración de la curva de *NPSH_r* en bombas centrífugas a partir de parámetros adimensionales

Procedure to obtain the net positive suction head curve for centrifugal pumps by using adimensional parameters

Santos, Rafael* y Muñoz, Jesús

Grupo de Termofluidodinámica, Departamento de Ciencias, Térmicas, Escuela de Mecánica,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.

Mérida 5101, Venezuela

*rsantosl@ula.ve

Resumen

El objetivo del presente trabajo es diseñar un procedimiento a partir del cual se pueda construir la curva de carga o altura neta positiva en la succión requerida $NPSH_r$, para bombas centrífugas; con la intención de incluirla en las curvas características y complementar la información a la hora de seleccionar una bomba. Con este propósito se trabaja con un grupo de 250 bombas centrífugas se grafica la dispersión de los puntos correspondientes a la relación velocidad específica de succión-coeficiente de caudal (s/ϕ) versus el coeficiente de caudal (ϕ), calculados en el punto de máxima eficiencia. Se encuentra la curva de tendencia adecuada, y se comparan los valores obtenidos con el valor de la velocidad específica de succión teórico, a partir del cual se establece el criterio de cavitación en bombas. Se presentan las curvas de $NPSH_r$ para bombas de fabricantes venezolanos. Finalmente se valida el método comparando estas curvas con algunas presentadas por el fabricante como resultado de pruebas realizadas en bancos de ensayo. Palabras Claves: Deformación, blake, espiral logarítmica, ammonites.

Palabras clave: Bomba centrífuga, cavitación, $NPSH$, adimensional.

Abstract

In this work we develop a graphic procedure to obtain the net positive suction head curve to centrifugal pumps. This is very important in the selection procedure as additional information in the characteristic curves. For this we take a group of 250 centrifugal pumps and we obtain a graphic with the dispersion points corresponding to the relation: specific suction velocity-flow coefficient (s/ϕ) with flow coefficient (ϕ) calculated at the high efficiency point. We obtain the best curve and we make comparisons with the theoretical specific suction velocity value to the pumps cavitation control. We obtain the $NPSH_r$ curves to Venezuelan manufactures and we compare with the experimental curves

Key words: Centrifugal pump, cavitation, $NPSH$, non-dimensional.

1 Introducción

En este trabajo se usan bombas centrífugas y el análisis dimensional para establecer una nueva alternativa para el control de la cavitación, considerando agua como fluido de trabajo. En virtud de que en la actualidad las dos terceras partes de las bombas usadas son turbomáquinas, este trabajo se enfoca particularmente en su estudio. En un principio, las bombas rotodinámicas tenían la desventaja de su baja eficiencia; sin embargo, las mejoras obtenidas a base de investigaciones continuas las han colocado siempre a la cabe-

za en el aspecto competitivo. Tienen a su favor las condiciones de descarga constante, a una presión dada y no presentan los problemas de válvulas que son tan comunes en las bombas reciprocantes (Mataix, 1984). Hoy en día, las turbomáquinas y específicamente, las bombas centrífugas, cubren el campo de las altas presiones, que se logran mediante el uso de bombas de varias etapas accionadas a altas velocidades. En cuanto a capacidades, las bombas centrífugas se han construido para manejar gastos que van desde 1 galón por minuto a más de 1 millón de galones por minuto. Las gigantescas bombas usadas en las represas de almacenamiento europeas y americanas requieren motores

que, en algunos casos, exceden los 100.000 HP (Karassik y Carter, 2001). Cabe destacar que los progresos en los motores eléctricos han propiciado el desarrollo de bombas centrífugas mucho más ligeras y baratas especialmente en el área industrial. El presente estudio surge debido a que en la mayoría de las curvas características de bombas centrífugas disponibles en los catálogos de fabricación venezolana no se incluye la curva correspondiente a la carga neta positiva en la succión requerida (*NPSHr*), la cual representa una herramienta sumamente importante para evitar la cavitación en bombas. El fenómeno de cavitación comienza cuando un líquido fluye hacia un espacio donde su presión se reduce a la presión de vapor o una presión menor a ésta, desarrollándose en su interior paquetes de vapor. Estas burbujas son arrastradas hasta que encuentran una región de mayor presión, en donde colapsan, esto genera un área de presión alta que causa acción erosiva en la región. La cavitación, además, disminuye la eficiencia de la bomba; presentándose acompañada por ruidos y vibraciones, y en ocasiones podría causar daños irreversibles en el interior de la bomba. El *NPSHr* siempre debe permanecer por encima de la presión de vapor del líquido que se está bombeando, esto es muy importante para mantener una operación segura y confiable de la bomba. El requisito de *NPSHr* se incrementa a medida que aumenta la capacidad de la bomba, por lo tanto, es conveniente tener en cuenta las capacidades de flujo en el momento de elegir la misma. Sin embargo, aun conociendo la importancia que encierra la curva de *NPSHr*, la mayoría de las bombas fabricadas en el país no la presentan en sus curvas características. Es ésta la principal razón de interés en este estudio.

Una alternativa para predecir la cavitación cuando se instala un sistema hidráulico en Venezuela, consiste en utilizar un valor límite teórico y adimensional para la velocidad específica de succión (*s*), el cual se ha tomado igual a 2,95, valor que señala la bibliografía para que empiece el fenómeno de cavitación (Alarcón, 1980). Para bombas centrífugas venezolanas se usa éste valor de la velocidad específica de succión para calcular un *NPSHr* que garantice que la bomba no va a “cavitar” bajo las condiciones de operación exigidas. El objetivo del ingeniero consiste en diseñar el sistema de bombeo que cumpla con las condiciones óptimas desde el punto de vista de costos y operatividad del equipo, por tanto este estudio facilitará la selección de la bomba adecuada para una determinada configuración del sistema mediante el uso del parámetro adimensional de la velocidad específica de succión (*s*), como un criterio importante a tomar en cuenta para la selección de la misma.

En el modelo teórico se presenta la descripción de los parámetros adimensionales. El procedimiento numérico describe en 7 pasos el método para obtener el gráfico que permitirá obtener los valores de velocidad específica de succión y el *NPSHr* de bombas centrífugas que no tengan esta información. En los resultados se muestra la aplicación del procedimiento numérico y la validación del mismo y finalmente las conclusiones del trabajo, las cuales resultan

favorables en cuanto a la utilización del gráfico adimensional obtenido.

2 Modelo teórico

El desarrollo de procedimientos para lograr estimar el comportamiento de una bomba centrífuga, en lo que a cavitación se refiere, debe estar fundamentado en los principios y ventajas que ofrece el análisis dimensional en cuanto a la planificación, la presentación y la interpretación de los datos experimentales. El comportamiento de todas las turbomáquinas se comprende mejor si las variables se expresan en términos adimensionales (Alarcón, 1980). Para bombas geoméricamente semejantes se espera que los coeficientes de altura y de potencia sean aproximadamente funciones únicas del coeficiente de caudal.

2.1 Coeficiente de caudal (ϕ)

Es un parámetro adimensional que relaciona el caudal impulsado por la bomba con el diámetro del impulsor y el régimen de revoluciones del motor. La ecuación para calcular el coeficiente de caudal es (Alarcón, 1980):

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (1)$$

Donde ϕ es el coeficiente de caudal, Q es el caudal, N es el régimen de revoluciones por minuto (se debe usar velocidad angular ω para trabajar la ecuación en radianes por segundo y de forma estrictamente adimensional) y D es el diámetro del impulsor. Unidades del sistema internacional.

2.2 Altura neta positiva en la succión requerida (*NPSHr*)

La cavitación puede ocurrir en cualquier bomba siempre que la presión estática local caiga por debajo de la presión de vapor de líquido. El valor de *NPSHr* es la diferencia entre la presión de estancamiento absoluta en el flujo en la succión de la bomba y la presión de vapor de líquido, expresada como la carga de líquido circulante, el valor requerido para evitar la cavitación varía según el líquido bombeado, la temperatura de éste, así como la condición de la bomba. La *NPSHr* puede medirse en una instalación de pruebas de bombas controlando la presión de entrada (Fox y McDonald, 1977). (Jiménez, 1977) define el *NPSHr* como el punto donde el funcionamiento de la bomba disminuye en un 3%.

2.3 Velocidad específica (*ns*)

Es un parámetro adimensional que relaciona la velocidad, el caudal y la altura de la bomba sin considerar el tamaño. Se calcula en el punto de mayor eficiencia y permite

establecer el tipo de bomba según el tipo de impulsor que mejor se adapta para funcionar en un sistema de bombeo, con la mayor eficiencia. La ecuación para calcular la velocidad específica en forma adimensional se indica a continuación (Alarcón, 1980):

$$ns = \frac{N\pi}{30} \frac{Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad (2)$$

Donde ns es la velocidad específica (adimensional), Q es el caudal, N es el régimen de revoluciones por minuto, el factor $\pi/30$ se usa para obtener velocidad angular en radianes por segundo, H es la altura de la bomba y g es la aceleración de la gravedad, la cual se usa en este estudio para mantener el carácter adimensional de la velocidad específica. Unidades del sistema internacional.

El rango aproximado de ns para las bombas centrífugas es el menor, ya que manejan grandes alturas y caudales menores en comparación con las bombas de flujo mixto y axial. El estudio se realizó para bombas centrífugas, las cuales abarcan el rango de velocidades específicas de 0,14 - 0,78 calculados de forma adimensional.

2.4 Velocidad específica de succión (s)

La ecuación para calcular la velocidad específica de succión en forma adimensional se indica a continuación:

$$s = \frac{N\pi}{30} \frac{Q^{1/2}}{(gNPSHr)^{3/4}} \quad (3)$$

Donde s es la velocidad específica de succión, Q es el caudal, $NPSHr$ es la altura neta positiva en la succión requerida, N es el régimen de revoluciones por minuto, el factor $\pi/30$ se usa para obtener radianes por segundo y g es la aceleración de la gravedad, la cual se usa en este estudio para mantener el carácter adimensional de la velocidad específica de succión. Unidades del sistema internacional.

Es un parámetro que relaciona la velocidad, el caudal y la altura neta positiva de succión requerida, $NPSHr$, siendo esto último lo que lo diferencia de la velocidad específica de succión (ns), sin considerar el tamaño. Un valor adecuado, el cual ha sido determinado experimentalmente y mediante análisis estadístico, según el cual ocurre la cavitación, es cuando $s \geq 2,95$ para bombas centrífugas, valor calculado en forma adimensional usando la ecuación 3.

A la hora de manejar equipos de bombeo se debe tomar en cuenta que el fabricante de la bomba determina el comportamiento de la cavitación en la bomba en un banco de pruebas, y fija el valor requerido de $NPSHr$ como una función del caudal que maneja la bomba, para garantizar una operación segura de ésta, es decir, libre de cavitación en el rango de trabajo. El control de la cavitación parte de la bomba a seleccionar, y si esta no tiene disponible la curva de $NPSHr$ es necesario utilizar algún procedimiento alterna-

tivo que nos permita fijar un valor cuantitativo para controlar la cavitación (Alarcón, 1982). Este procedimiento generalmente consiste en usar un valor límite para la velocidad específica de succión (s) y luego verificar si la bomba a utilizar sobrepasa o no este límite. Este procedimiento alternativo resulta en ocasiones la única herramienta que se tiene a la hora de seleccionar una bomba, tomando en cuenta el fenómeno de cavitación. Con la realización de este estudio podremos comparar si el valor adimensional límite utilizado para el control de la cavitación ($s \geq 2,95$) es válido para ser empleado en bombas de fabricación nacional, además se propone el uso de una gráfica para cada tipo de configuración de bomba centrífuga a partir de la cual se pueda obtener un valor particular de " s " dependiendo del coeficiente de caudal al que ésta se encuentre operando. Tomando diferentes valores de coeficientes de caudal se obtienen valores de " s " en la curva apropiada según el procedimiento propuesto en este trabajo, esto con el propósito de obtener los valores de $NPSHr$ despejando este parámetro de la ecuación 3 y construir esta curva para bombas de fabricación nacional de características dinámicas similares a las bombas del catálogo extranjero. Los valores de " s " deben ser menores que el valor dado estadísticamente. La validez de este método podrá ser corroborada con las curvas de $NPSHr$ disponibles de bombas centrífugas, elaboradas a partir de la experimentación en bancos de prueba por fabricantes nacionales que si presentan esta información

3 Metodología

Las ecuaciones descritas en el modelo teórico se aplican a bombas centrífugas considerando agua como el fluido de trabajo. La metodología seguida para la elaboración del presente estudio se resume en los siguientes pasos:

3.1. Selección, clasificación y evaluación de la muestra

Se seleccionó un grupo de 250 bombas centrífugas de un manual extranjero (Worthington Corporation, Sf). Es un catálogo de selección de bombas para la industria de Worthington Corporation. Se usó este catálogo debido a que presenta curvas características completas incluyendo la curva de $NPSHr$. La muestra se dividió en cuatro grupos principales de acuerdo a su diseño y configuración del impulsor. Las cuatro distintas configuraciones y diseño de la muestra que fueron usadas para el estudio son: impulsor abierto (B.C.I.A), impulsor cerrado (B.C.I.C), posición horizontal (B.C. con R.P.H) y de tiro trasero (B.C.T.T), en inglés: back pull-out. Constructivamente se denominan bombas de tiro trasero, las bombas de carcasa partida verticalmente, que al separar los componentes de la voluta queda descubierto el rotor, siendo de fácil inspección. Se usó un número aproximado de alrededor de 60 curvas de bombas por modelo, incluyendo en cada modelo distintos diámetros del rotor y a diferentes regímenes de revoluciones.

3.2. Recopilación de la información base

Se evaluó la curva característica de cada bomba de la muestra para extraer los valores correspondientes a velocidad de giro (N), diámetro del rotor (D), caudal (Q) y el valor de $NPSH_r$, valores tomados en el punto de máxima eficiencia. En la tabla 1, se muestran los datos para dos modelos de bombas centrífugas: uno de impulsor cerrado (B.C.I.C), datos tomados sobre dos curvas de este modelo de igual diámetro de impulsor y a diferentes RPM, en los puntos de mayor eficiencia y para un modelo de tiro trasero.

Tabla 1. Datos tomados sobre dos curvas para cada modelo de bombas centrífugas de impulsor cerrado B.C.I.C y B.C.T.T

Modelo	Velocidad de giro N (rpm)	Diámetro del impulsor (pulg)	Caudal Q de diseño (gpm)	$NPSH_r$ (pies)
A-1458	3500	4 3/4	28	4
	1750		14	1,8
A-6787-R4	3500	8	410	18
	1750		210	5,5

3.3. Determinación de la velocidad específica de succión (s)

Utilizando la ecuación 3 y la hoja de cálculo en EXCEL se obtienen los valores de velocidad específica de succión (s) para cada bomba perteneciente a la muestra. Es importante mencionar que los valores usados en la ecuación 3 corresponden a máxima eficiencia y se obtienen valores adimensionales.

3.4. Determinación del coeficiente de caudal (ϕ)

A través de la hoja de cálculo programada, se calcula el coeficiente de caudal (ϕ) usando la ecuación 1 para el punto de máxima eficiencia y la relación s/ϕ para cada una de las bombas pertenecientes a la muestra inicial.

3.5. Elaboración de gráficos de la relación de parámetros adimensionales s/ϕ y el parámetro ϕ

Usando el programa EXCEL se graficó la relación s/ϕ versus ϕ para cada configuración estudiada, mostrando una tendencia similar en cada una de los cuatro grupos y con un promedio de los valores de velocidad específica (s) muy cercano al valor teórico fijado. Éstas gráficas permiten encontrar un valor de la velocidad específica de succión (s) adecuado para cada bomba dependiendo de la configuración del impulsor y para distintos valores de ϕ .

3.6. Procedimiento para obtener las curvas de $NPSH_r$ para bombas de fabricantes venezolanos

Con el valor de ϕ y el gráfico obtenido en el paso anterior (s/ϕ vs. ϕ) se obtiene el valor de s/ϕ y el correspondiente valor de s para la bomba centrífuga que deseamos estudiar. Partiendo del valor de de velocidad específica (s) aplicamos la ecuación 3 para obtener el valor de $NPSH_r$ y construir la respectiva curva para las bombas venezolanas de configuración similar a los grupos de bombas estudiados. Este procedimiento se repite para distintos valores de ϕ , calculados a partir de distintos valores de caudal en el rango de operación de la bomba según su curva característica.

3.7. Comprobación de la efectividad del método

Como referencia se utilizaron curvas características de fabricantes venezolanos que presentan la curva de $NPSH_r$, (curva real). Con diez puntos de caudal (Q) y sus correspondientes valores de $NPSH_r$, se trasladaron estos datos a la hoja de cálculo en EXCEL y se obtuvo la grafica de la curva real. Sobre este mismo gráfico se trazó la curva de $NPSH_r$ que se obtiene al aplicar el procedimiento detallado descrito en la sub-sección anterior (procedimiento propuesto) y se comparan ambas curvas.

4 Resultados y discusión

En la figura 1, se presenta el gráfico obtenido según lo descrito en la sub-sección 3.5 de la metodología. En esta curva el coeficiente de gasto (ϕ) se encuentra en las abscisas y la relación s/ϕ en las ordenadas. En esta figura se muestra sólo las curvas de tendencia del mejor ajuste obtenido para cada configuración o grupo estudiado. Para las curvas de la figura 1, con la dispersión de puntos en máxima eficiencia, se obtuvo un ajuste de la data según el tipo de configuración, definido por la forma:

$$\frac{s}{\phi} = K \phi^n \quad (4)$$

El comportamiento (tendencia) que presentan las cuatro curvas es similar, sólo que los valores de K y de n , difieren según la configuración de bombas estudiadas. La tabla 2, presenta los valores correspondientes de K y n para el ajuste potencial de las curvas mostradas en la figura 1, según la configuración.

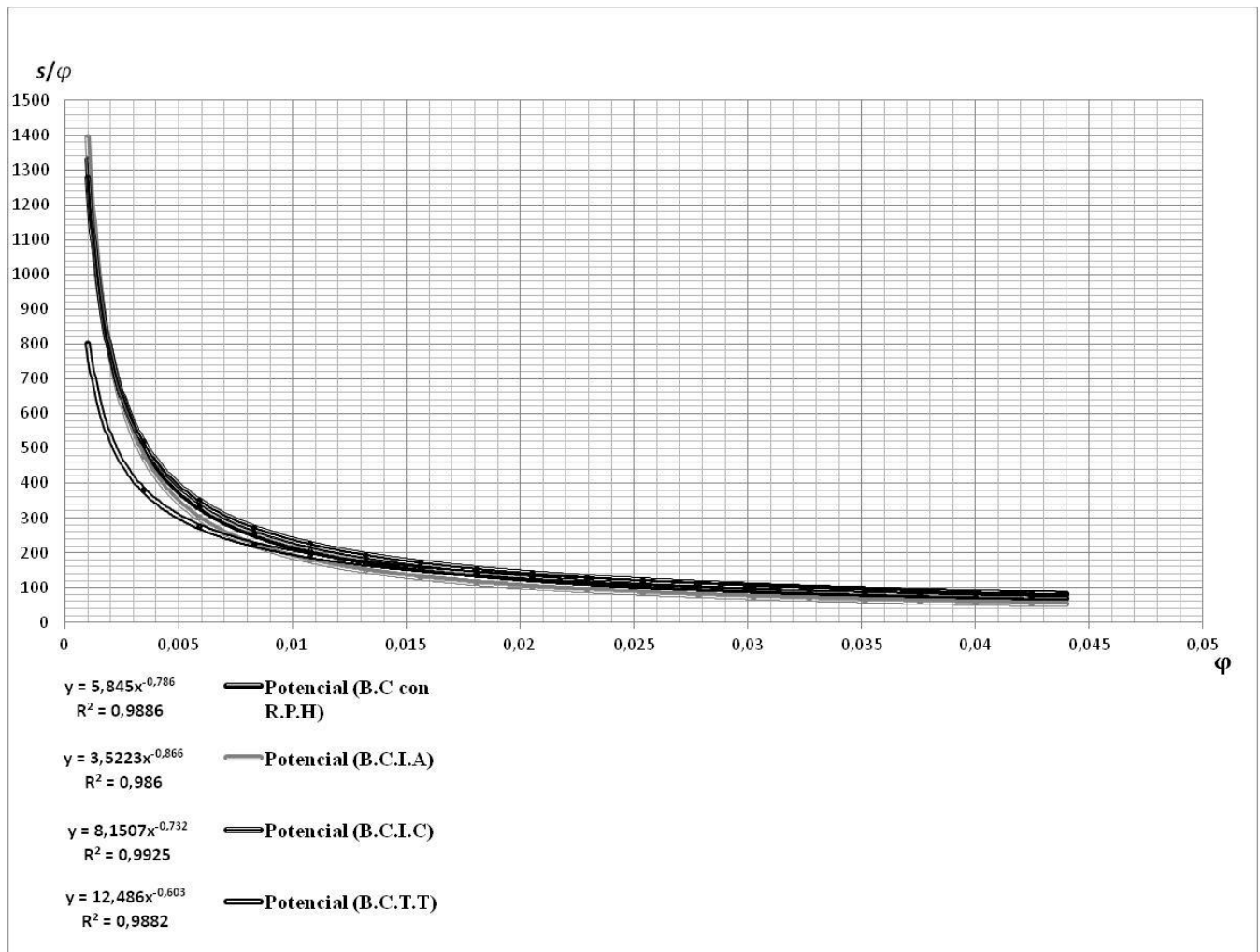


Fig. 1. Gráfica de ajuste de la data mediante líneas de tendencia exponencial (s/ϕ vs. ϕ) para los cuatro grupos de bombas centrífugas estudiados

Tabla 2. Valores de K y n , y de los coeficientes de correlación de la data para las curvas de ajuste potencial mostradas en la fig. 1, según grupo o configuración de las bombas centrífugas en la muestra inicial.

Configuración	K	n	R^2
Rotor en posición horizontal (B.C con R.P.H)	5,845	-0,786	0,9886
Impulsor abierto B.C.I.A	3,5223	-0,866	0,986
Impulsor cerrado B.C.I.C	8,1507	-0,732	0,9925
De tiro trasero (B.C.T.T)	12,486	-0,603	0,9882

La figura 1 es el resultado principal de la investigación, para elaborar las curvas de $NPSH_r$ en los casos en que no se disponga de esta información en catálogos de fabricantes. La figura presenta las mejores curvas de tendencia de la data, las cuales muestran la tendencia de la función potencial.

De los resultados se puede observar que las bombas centrífugas en todas sus configuraciones presentan un buen valor del coeficiente de correlación R^2 , con valores cercanos a la unidad. Se puede observar que el comportamiento de las cuatro curvas para valores de ϕ mayores que 0,03 es prácticamente uniforme y el valor de s/ϕ tiende a un valor

alrededor de 60 aproximadamente, esto para valores de $\phi > 0,04$. Para valores de $\phi < 0,005$ el parámetro s/ϕ aumenta rápidamente desde 300.

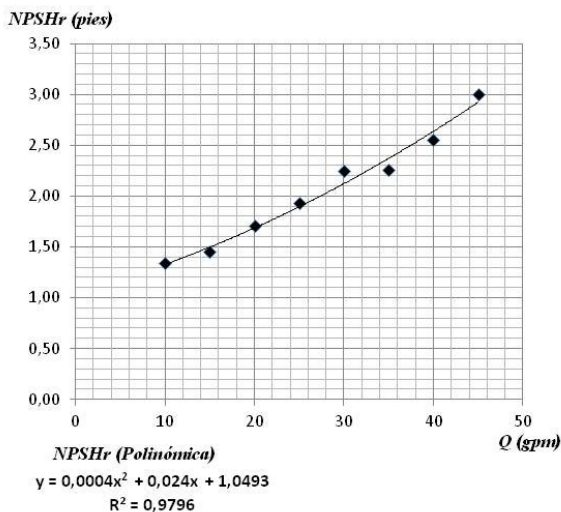
Tomando 20 valores de coeficiente de caudal en el rango presentado en la figura 1 para cada tipo de bomba, y a través del método propuesto para obtener el valor de (s) según la sección 3.3, se obtienen 20 valores de (s) y se calcula un promedio para cada configuración estudiada que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidades específicas promedio para cada configuración

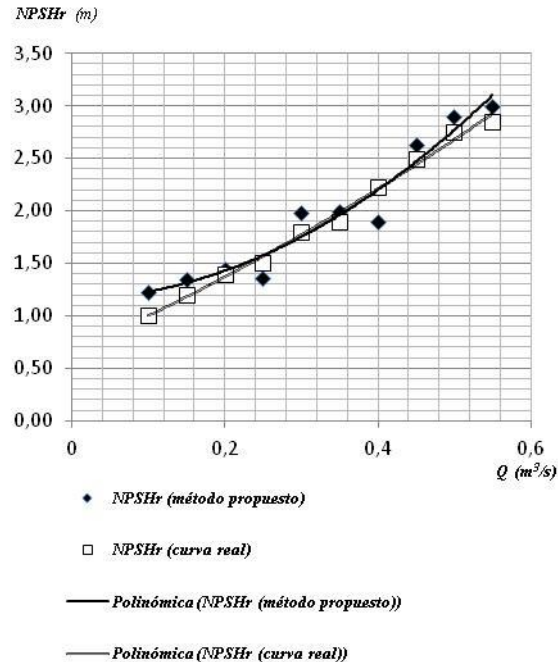
Configuración	s (promedio)
Rotor en posición horizontal (B.C con R.P.H)	2.47
Impulsor abierto B.C.I.A	2.05
Impulsor cerrado B.C.I.C	2.79
De tiro trasero (B.C.T.T)	2.60

Se obtuvieron valores mayores que 2,95 para calcular los promedios mostrados en la tabla 3. El valor límite recomendado en la bibliografía para la velocidad específica, $s = 2,95$ (Alarcón, 1982), es muy conservador, ya que garantiza valores elevados de altura neta positiva en la succión requerida para evitar la cavitación. Algunos autores (Tilne, 1993) señalan cantidades promedio superiores a este valor teórico para s .

Según la sub-sección 3.6 de la metodología, utilizando ocho valores de caudal tomados de las curvas características presentadas en catálogos de fabricantes, así como el valor del diámetro de rodete y velocidad de giro para cada tipo de bomba, se construye la curva de $NPSH_r$, la cual constituye una información muy importante como criterio de control de cavitación. En la figura 2 presentada a continuación se muestra la curva de $NPSH_r$ obtenida para una bomba de un fabricante nacional (Domosa, 1998), de la cual no se tiene la curva de $NPSH_r$.

Fig. 2. Curva de $NPSH_r$ obtenida para una bomba comercial nacional, utilizando el procedimiento propuesto

Para verificar la validez de la curva obtenida por el método desarrollado en el presente trabajo, se compara con la curva de $NPSH_r$ (curva real) presentada en un catálogo de fabricante venezolano (Pedrollo, 1995) que presenta esta información sobre las curvas de $NPSH_r$, elaborada mediante análisis experimental en un banco de pruebas. Según lo descrito en el sub-sección 3.7, se obtiene la figura 3.

Fig. 3. Comparación entre las curvas de $NPSH_r$ real presentada por el fabricante (Pedrollo, 1995) y la curva de $NPSH_r$ obtenida mediante el procedimiento propuesto en la presente investigación

Para obtener la figura 3, se usó una bomba del fabricante (Pedrollo, 1995), ya que presenta la curva de $NPSH_r$ y es una bomba de impulsor cerrado geoméricamente similar a una de las consideradas en el estudio y se puede comparar con el método propuesto. Se realizó una tabla en Excel, en donde se escriben los diez valores de caudal para una bomba con un determinado diámetro y un régimen de revoluciones fijo. Esto permitirá calcular diez valores de Q y entrar a la figura 1, para obtener los correspondientes valores de s/Q y por tanto los valores de s . Usando la ecuación 3, se calculan los diez valores de $NPSH_r$ tal como se plantea en el método propuesto. Estos valores de $NPSH_r$ se comparan con los diez valores tomados de la curva real proporcionada por el fabricante. En la figura 3 se puede observar que ambas curvas son semejantes, presentando la misma tendencia. Se realizó esta comprobación para otras bombas centrífugas de fabricantes venezolanos, con bombas geoméricamente similares a las configuraciones estudiadas en este trabajo y se obtuvieron resultados similares, esto tuvo limitaciones para hacer una extensa comparación por la falta de información sobre la curva de $NPSH_r$ en catálogos venezolanos. Con las comparaciones realizadas se comprueba la utilidad que podría tener el procedimiento propuesto para elaborar de forma aproximada la curva de $NPSH_r$ de bombas dinámicamente similares a las configuraciones estudiadas y obtener el $NPSH_r$ para un caudal específico, criterio que aunado al valor límite de 2,95 constituyen herramientas importantes para evitar la ocurrencia del problema de cavitación.

En la figura (1), se observa que en las curvas de s/Q vs.

0, la curva para bombas de impulsor cerrado sirve de envolvente del resto de las curvas, es decir, que puede ser utilizada para todos los diseños y configuraciones de impulsores. Adicionalmente en el desarrollo de la presente investigación se obtuvieron las curvas para las diferentes configuraciones de impulsor.

5 Conclusiones

Las curvas adimensionales obtenidas en este trabajo constituyen una herramienta adicional para estimar un valor de $NPSH_r$ para control de cavitación en bombas en las cuales no se tenga esta información, por lo tanto, sería un criterio adicional a tomar en cuenta junto el valor límite conocido de 2,95. Ha sido el resultado de una metódica selección y toma de datos, los cuales aunados a todas las ventajas que resultan de la aplicación del análisis dimensional y el uso de parámetros adimensionales, podría ser de utilidad para bombas geoméricamente similares a los cuatro tipos estudiados, siendo así una herramienta para el control del problema de la cavitación. De la aplicación del procedimiento para obtener los valores de $NPSH_r$, obteniendo previamente los valores de s , así como del análisis, se comprueba que el valor de la velocidad específica de succión (s) no es una constante para todas las bombas sino que varía dependiendo de las características de funcionamiento de cada una en particular. Al determinar el valor de la velocidad específica de succión (s), se observó que el valor de 2,95 es muy conservador, ya que la investigación realizada arroja algunos valores muy por debajo de éste, sin embargo puede ser tomado como un buen promedio, si no se dispone de un método adicional para calcular s para cada bomba. Con respecto a la utilidad de la metodología se observa que existe poca discrepancia entre las curvas de $NPSH_r$ reales y las del procedimiento propuesto, teniendo en cuenta que la extracción de los datos de los manuales de bombas se realizó de forma manual. Para trasladar la gráfica del $NPSH_r$ presentada por la casa fabricante al programa Excel se usaron diez valores, con los cuales se pueden obtener resultados satisfactorios. Adicionalmente no se puede determinar la exactitud con la cual fueron elaboradas las curvas de $NPSH_r$ por el fabricante de manera experimental usando un banco de pruebas para este fin. Se concluye que el procedimiento planteado es aceptable en términos de la muestra utilizada. De esta manera se puede afirmar que las curvas adimensionales obtenidas, usando la técnica de análisis dimensional, constituye una importante herramienta para el estudio del fenómeno de cavitación en bombas, ya que permite estimar el valor de $NPSH_r$, criterio fundamental para el control de la cavitación.

Referencias

- Alarcón G, 1980, Guía de Turbomáquinas, Publicaciones de La Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Alarcón G, 1982, Guía de Bombas, Publicaciones de La Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Domosa, 1998, Catálogo General de Productos, Bombas Domosa, Venezuela.
- Fox R, W y McDonald A, 1977, Introducción a la mecánica de fluidos, Mc Graw Hill, Mexico.
- Jiménez L, 1977, Manual de bombas, Editorial Blume, España.
- Karassik I y Carter R, 2001, Bombas Centrífugas, Selección, Operación y Mantenimiento, Mc Graw Hill, USA.
- Mataix, C., 1984, Turbomáquinas Hidráulicas, ICAI, España.
- Pedrollo, 1995, Catálogo de Bombas, Electrobombas Pedrollo, Venezuela.
- Tillne W, 1993, The Avoidance of Cavitation Damage, Mechanical Engineering Publications Limited, London.
- Worthington Corporation, PSI Pump Selector for Industry, USA.

Recibido: 9 de junio de 2010

Revisado: 14 de abril de 2014

Santos Luque, Rafael José: Ingeniero Mecánico. Magister en Ingeniería Mecánica. Doctor en Ingeniería Industrial. Profesor Titular. Dedicación Exclusiva. Departamento de Ciencias Térmicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. ULA

Muñoz Guerrero, Jesús Adrian: Ingeniero Mecánico. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Profesor Agregado. Dedicación Exclusiva. Departamento de Ciencias Térmicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. ULA. Correo electrónico: jesusm@ula.ve

