

# PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR Y SELECCIONAR BOMBAS CENTRÍFUGAS

## *Procedure to evaluate and select centrifugal pumps*

**Rafael Pérez Barreto**

**E-mail: rperezb@ismm.edu.cu**

**Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez**

### RESUMEN

Se analiza la velocidad específica, aplicando el análisis dimensional y la teoría de semejanza y su valor en función de los parámetros utilizados para su determinación. Se fundamenta el uso de la velocidad específica obtenida para gastos unitarios del caudal y la carga del modelo medidos en  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $\text{m}_{\text{H}_2\text{O}}$  respectivamente, cuando la velocidad de rotación se expresa en r/min. Se propone y ejemplifica un procedimiento rápido y práctico para evaluar comparativamente la calidad del diseño o de su ejecución, usando la velocidad específica y el rendimiento nominales. La conocida relación entre estos parámetros ha sido actualizada y se aplica en la evaluación y selección de bombas centrífugas. Este trabajo forma parte de una serie de artículos que analizan la esencia física de la velocidad específica, su origen y las principales imprecisiones que aparecen en la literatura, y pretende generalizar el uso de la velocidad específica recomendada, para facilitar a los usuarios —en particular a los de la industria del níquel—, evaluar, en primera instancia, la calidad del diseño o de la fabricación de bombas centrífugas, así como la confiabilidad de los datos aportados por el suministrador, y entre fabricantes, a fin de aumentar la calidad del diseño o controlar la de fabricación y con ello aumentar su competitividad.

**PALABRAS CLAVE:** Bombas centrífugas, níquel, tecnología.

### ABSTRACT

The specific speed is analysed applying the dimensional analysis and the theory of likeness and its value in function of the parameters used for its determination. The use of the specific speed, obtained for unitary expenses of the flow and the load of the pattern measured respectively in  $\text{m}^3/\text{s}$  and  $\text{m}_{\text{H}_2\text{O}}$  when the rotation speed is expressed in r/min, has been based. It has been proposed and exemplified a quick and practical procedure to evaluate the quality of the design or of its execution, using the specific speed and the nominal yield. The well-known relationship among these parameters has been modernized and it is applied in the evaluation and selection of centrifugal pumps.

This work is part of a series of articles, in which the author analyses the physical essence of the specific speed, its origin and the main inaccuracies that appear in the literature and it pretends to generalize the use of the recommended specific speed to facilitate to the users, in particular to those of the nickel industry, to evaluate, in first instance, the quality of the design or of the production of centrifugal pumps, as well as the dependability of the data contributed by the supplier, and among makers to increase the quality of the design or to control that of production and increase their competitiveness.

**KEY WORDS:** Centrifugals pumps, nickel technology.

## INTRODUCCIÓN

Las bombas centrífugas constituyen las máquinas de uso más frecuentes en los procesos de lixiviación ácida y amoniacal para la producción de níquel. Por su amplia difusión tienen gran peso en los costos de amortización de los activos tangibles fijos, en especial cuando trabajan en regímenes que incrementan el desgaste y acortan sustancialmente el tiempo de vida útil con respecto al de diseño, lo que no deja de incidir en la fiabilidad del trabajo de la máquina y obliga a incrementar los mantenimientos y el número de unidades de reserva, con el objeto de garantizar el transcurso ininterrumpido del proceso.

Por otra parte, su característica de ser grandes consumidores de energía, impacta no sólo desde el punto de vista económico, sino también desde el social, dadas las limitaciones de las fuentes primarias de energía del país y sus dificultades para importarlas, lo cual afecta ocasionalmente el abasto de electricidad a la población.

La selección inadecuada de bombas centrífugas es un fenómeno frecuente, incluso en el transporte de agua en redes simples, y provoca un aumento de los costos relativos que prácticamente no son advertidos hasta que implicaciones técnicas afecten el proceso productivo.

En general, las bombas centrífugas son seleccionadas a partir de las propuestas de diferentes suministradores o, en casos más simples, de datos técnicos obtenidos de catálogos. En ambos casos se trata de máquinas producidas en serie, elegidas entre aquellas, cuyos parámetros de trabajo se adaptan mejor a las condiciones del sistema del usuario. Sobre esta base, no es posible llegar a conclusiones que permitan evaluar la calidad de equipamiento propuesto.

Para la elección de la mejor opción, el usuario necesita de elementos adicionales que sean obtenidos fácilmente y permitan tomar en consideración la calidad del diseño, de su fabricación y los datos técnicos disponibles.

En el presente trabajo se propone un procedimiento simple para evaluar las bombas centrífugas a partir de datos técnicos del fabricante. A fin de facilitar la comprensión de los aspectos generales, se consideran bombas comunes, fabricadas con materiales comunes, y que trasiegan agua.

Entre los elementos principales que pueden influir en la selección de la bomba se encuentran:

- La velocidad específica y su relación con el rendimiento; por su incidencia en los costos de explotación y como criterio de la calidad del diseño y su ejecución.
- El tamaño de la bomba como criterio de costo en su adquisición, instalación y operación.
- La capacidad de aspiración, por su importancia en la confiabilidad del trabajo y como elemento adicional para evaluar su calidad.

Este artículo trata, específicamente, lo relativo a la velocidad específica y su relación con el rendimiento.

## VELOCIDAD ESPECÍFICA Y RENDIMIENTO

La velocidad específica constituye un criterio de amplio uso en el diseño de las turbomáquinas. Permite establecer un prototipo a partir de un modelo con formas, proporciones geométricas y velocidades conocidas. Este criterio fue empleado con éxito en el diseño y construcción de turbinas y su uso se extendió posteriormente a bombas, ventiladores y compresores.

Como quiera que en la literatura aparecen con frecuencia afirmaciones incorrectas sobre la adimensionalidad de este criterio (ABNT/PMB-778, 1975), se usan valores distintos para un mismo modelo (Pérez Barreto, 2000). Analizaremos, brevemente, el origen y la esencia de este parámetro.

Si se caracteriza el régimen de trabajo de una máquina de flujo a través de su caudal  $Q$ , la energía por unidad de masa  $Y$ , y la velocidad de rotación  $n$  y el fluido; mediante la masa específica  $\rho$ , se obtiene, de acuerdo con la teoría de semejanza, la ecuación siguiente:

$$f(Q, Y, \rho, n) = 0 \quad (1)$$

Parámetros	Símbolos	Unidades de medida	Dimensiones
Caudal	$Q$	m <sup>3</sup> /s	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
Energía específica	$Y$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	[L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ]
Densidad	$\rho$	kg /m <sup>3</sup>	[L <sup>-3</sup> M]
Número de revoluciones	$n$	r/s	[T <sup>-1</sup> ]

Los parámetros, sus símbolos, las unidades de medida y sus dimensiones físicas están dados en la tabla siguiente:

Aplicando el teorema de Buckingham se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente para la expresión (1):

$$\begin{aligned} 3x + 2y - 3z &= 0 \\ -x - 2y - 1 &= 0 \\ z &= 0 \end{aligned}$$

Cuya solución es:

$$x = 1/2 \quad y = -3/4 \quad z = 0$$

De tal manera, la expresión (1) toma la forma siguiente:

$$\frac{n\sqrt{Q}}{Y^{3/4}} \quad (2)$$

Esta expresión es un número adimensional y, por lo tanto, para comparar el modelo con el prototipo de dos máquinas semejantes, se tiene:

$$\frac{n_1\sqrt{Q_1}}{Y_1^{3/4}} = \frac{n_2\sqrt{Q_2}}{Y_2^{3/4}} \quad (3)$$

La expresión (2) es un criterio adimensional de semejanza. Si comparamos el prototipo con su modelo, se tiene:

$$\frac{n\sqrt{Q}}{Y^{3/4}} = \frac{n_m\sqrt{Q_m}}{Y_m^{3/4}}$$

El subíndice m corresponde al modelo.

Tomando en consideración que la energía específica  $Y$  se relaciona con la carga  $H$  a través de la expresión  $Y = gH$ ;  $m^2/s^2$  y eligiendo un caudal  $Q = 1 \text{ m}^3/s$ , se tiene:

$$\frac{n_m\sqrt{1}}{(g \cdot 1)^{3/4}} = \frac{n\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}}$$

Las dimensiones del caudal  $Q$  y de la carga  $H$  del prototipo se cancelan con las de caudal y de la carga unitarios. Considerando que la aceleración de la gravedad sea la misma para el modelo y el prototipo, podemos cancelar esta magnitud y sus dimensiones, de donde:

$$\frac{n_m \text{ r/s} \sqrt{m^3/s}}{m^{3/4}} = \frac{n \text{ r/s} \sqrt{Q \text{ m}^3/s}}{H^{3/4} m^{3/4}}$$

entonces:

$$n_m = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}; \text{ r/s.} \quad (4)$$

Obsérvese que una expresión igual se obtendría para cualquier unidad de medida del caudal y de la carga, siempre y cuando esas mismas unidades sean empleadas para el prototipo y el modelo. De la misma forma serán obtenidos tantos valores de  $n_m$ , cuantos

sistemas de unidades o, incluso, unidades, sean usados.

La expresión (4), conocida como velocidad específica, será designada en lo adelante a través de  $n_e$ . Si la velocidad se expresa en r/min., en esta misma unidad se expresará la velocidad específica  $n_e$ . En el Brasil esta magnitud se designa por  $n_q$  y se conoce como velocidad específica referida al caudal. Pérez Barreto (2000) demuestra que la exclusión de la gravedad  $g$  en el número puro (2) afecta su adimensionalidad y su valor absoluto, pero no altera la condición de semejanza (3) y, por lo tanto, está en capacidad de caracterizar un prototipo por medio de su modelo.

De la misma manera, diferentes unidades de medida para las mismas  $Q$ ,  $H$  y  $n$  no afectan la capacidad del criterio de caracterizar impulsores semejantes, a pesar de crear algunas dificultades adicionales relacionadas con la introducción de factores de conversión a fin de asimilar valores, para un mismo impulsor, diferentes a los acostumbrados. Esto es algo similar a lo que ocurre cuando se utilizan distintos sistemas de unidades.

En la actualidad la unidad r/min. se ha generalizado en lugar de r/s, y en los Estados Unidos, además, se utiliza gal/min. (galones por minuto) para el caudal y pie de la columna de agua ( $ft_{H_2O}$ ) para la carga (Karassik y Carter, 1976). En este caso, la velocidad específica  $n_{e(EUA)}$  se relaciona con la anteriormente descrita  $n_e$  mediante la expresión siguiente:

$$n_{e(EUA)} = 51,65 n_e$$

En la proyección de turbinas se definió el criterio de semejanza como el número de revoluciones de una máquina modelo, similar al prototipo que se diseña y desarrolla una carga de un metro de la columna de agua  $H = 1 \text{ m}_{H_2O}$  y una potencia  $N = 1 \text{ cv}$ . (De Souza, 1991). Es fácil demostrar que a estos parámetros corresponde un caudal  $Q = 0,075 \text{ m}^3/s$ . Este criterio, simbolizado por  $n_s$ , es denominado como coeficiente de rapidez (Lomakin, 1966), y en el Brasil como velocidad específica referida a la potencia (ABNT/NBR-10131).

Con estos valores se obtiene:

$$n_s = \frac{\sqrt{Q/0,075}}{H^{3/4}} = 3,65n_e$$

Como en el caso anterior, la diferencia con respecto a la velocidad específica  $n_e$  está dada por una constante: 3,65 y, por lo tanto, este número  $n_s$ , puede

ser usado para caracterizar la semejanza. En esencia, los valores se relacionan entre sí por medio de factores de conversión, en efecto:

$$n_{e(EUA)} = 14,15 n_s = 51,65 n_e$$

Los intervalos de los parámetros analizados de las bombas centrífugas son, aproximadamente, los siguientes:

$$10 < n_e < 80 \quad 36 < n_s < 290 \quad 510 < n_{e(EUA)} < 4200$$

Es evidente que la velocidad específica  $n_e$  se encuentra en un intervalo cómodo para cálculos prácticos. Por otra parte, emplea unidades del SI:  $m^3/s$  para el caudal y  $m$  para la carga. Estas características hacen a  $n_e$  preferible para caracterizar tanto las bombas centrífugas como las axiales; es decir, a las turbomáquinas en general.

La velocidad específica se establece para los parámetros nominales (rendimientos máximos) y para una sola entrada del impulsor, o sea, para la mitad del caudal en el caso de los rodetes de succión doble.

La velocidad específica determina el tipo de impulsor: radial o de simple curvatura, Francis o de doble curvatura, diagonal y axial, las proporciones entre sus parámetros principales y la forma de las características de la máquina.

En la Figura 1 se muestra de forma esquemática la construcción de diferentes impulsores en función de la velocidad específica y la forma de sus características.

Para números de Reynolds elevados ( $Re > 10^6$ ), el coeficiente de resistencia longitudinal ( $\lambda$ ) en las tuberías a presión depende sólo de la rugosidad. Ésta es la región en la cual, como regla, se proyectan las bombas centrífugas y es conocida como zona de automodelación. Para valores inferiores de  $Re$  aparecen efectos de escala y la expresión pierde calidad como criterio de semejanza. Por otro lado, para una misma velocidad específica y números de Reynolds elevados ( $Re > 10^6$ ), se observa un incremento del rendimiento con el aumento del caudal, como resultado de la disminución de la velocidad relativa. En la práctica, la rugosidad absoluta para un mismo material depende de la tecnología de fabricación y las secciones de flujo crecen con el caudal, lo que provoca la disminución de la rugosidad relativa y, en última instancia, el aumento del rendimiento en función de la velocidad específica. Las curvas  $\eta = f(n_e)$ , obtenidas del análisis de los mejores diseños y construcciones actuales y de muchos datos acumulados en la literatura especializada, se muestran en la Figura 2.

## PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

Diferentes máquinas con una misma velocidad específica pueden tener rendimientos diferentes, determinados por la calidad del diseño o de la ejecución de la bomba. Se puede obtener una evaluación de la calidad de la bomba mediante el análisis de los datos técnicos de las propuestas o de los catálogos que se ofrezcan, independientemente de su operación en un sistema dado. El procedimiento consiste en:

1. Determinar la velocidad específica para los parámetros nominales de la máquina.
2. Hallar en la Figura 2 el rendimiento alcanzable.
3. Comparar los valores obtenidos.

Valores del rendimiento muy por debajo de los obtenidos en la figura, indican deficiencias en el diseño o construcción de la bomba. Por el contrario, valores mucho más altos provocan dudas sobre la fidelidad de los datos suministrados y frecuentemente exigen una comprobación o acreditación de los mismos.

Ejemplo:

A manera de ejemplo analicemos tres propuestas de bombas centrífugas, cuyos datos son los siguientes:

$Q_1 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$	$H_1 = 36 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$	$n = 3550 \text{ r/s}$
$Q_2 = 105 \text{ m}^3/\text{h}$	$H_2 = 37 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$	$n = 3540 \text{ r/s}$
$Q_3 = 90 \text{ m}^3/\text{h}$	$H_3 = 34 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$	$n = 3560 \text{ r/s}$
$\eta_1 = 0,80$	$\eta_2 = 0,74$	$\eta_3 = 0,84$

Las respectivas velocidades específicas calculadas con los datos anteriores son:

$$n_{e1} = 40,26 \quad n_{e2} = 40,3 \quad n_{e3} = 39,98$$

es decir, las tres bombas tienen prácticamente la misma velocidad específica

$$n_{e1} = n_{e2} = n_{e3} = 40 \text{ r/min}$$

a la que corresponde un rendimiento:  $\eta = 0,79$ . Los rendimientos para cada máquina, según el gráfico  $\eta = f(n_e)$ , serán:  $\eta_1 = 0,795$ ,  $\eta_2 = 0,80$ ,  $\eta_3 = 0,79$ .

Es evidente que la bomba 2 tiene un rendimiento relativamente bajo en comparación con el alcanzable, esto indica deficiencias en el diseño, la fabricación, el montaje o el ensayo de la misma. Por otro lado, a la bomba 3 se le atribuye un rendimiento comparativamente alto, lo cual es poco probable y puede indicar deficiencias en el ensayo o insuficiente seriedad en la información, por lo que exige una acreditación.

## CONCLUSIONES

1. La velocidad específica expresada en r/min. y obtenida con los parámetros nominales de un impulsor, cuando el caudal y la carga del modelo son iguales a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$ , respectivamente, es un criterio con valores cómodos para cálculos prácticos, emplea unidades del SI y puede ser aceptado. La comparación realizada con otras expresiones y valores existentes permite recomendar su empleo para evaluar en primera instancia la calidad del proyecto o la fabricación de las bombas centrífugas, así como la confiabilidad de los datos técnicos que se suministran por el fabricante.
2. La conocida dependencia del rendimiento de las bombas centrífugas de su velocidad específica, fue actualizada sobre la base de los datos técnicos recientes de las mejores máquinas de fabricantes reconocidos y de comprobaciones realizadas por el autor

en el Laboratorio de Gasto del Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IPT) de San Pablo, Brasil.

3. El trabajo propone y ejemplifica un procedimiento práctico para evaluar la calidad del diseño o construcción de bombas centrífugas a partir de los datos técnicos que suministra el fabricante y la confiabilidad, en ciertos límites, de esos datos.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/PMB-778 (1975): *Ensaio de bombas hidráulicas de fluxo*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT/NBR-10131 (1987): *Bombas hidráulicas de fluxo*, Terminología, CDU: 621.65-322.2:001,4.-1987.

DE SOUZA, Z. (1991): *Dimensionamento de máquinas de fluxo, Turbinas, Bombas e Ventiladores*, Ed. E. Blucher, San Pablo, Brasil.

KARASSIK, I.J. Y R. CARTER (1976): *Pumps Handbook*, McGraw-Hill, New York.

LOMAKIN, A.A. (1966): *Bombas centrífugas y axiales*, Ed. Mashinostroeny, Moscú (en ruso).

PÉREZ BARRETO R. (2000): *Caracterização de ensaios de máquinas de fluxo no laboratorio de vazao do IPT*, Informe, San Pablo, Brasil.

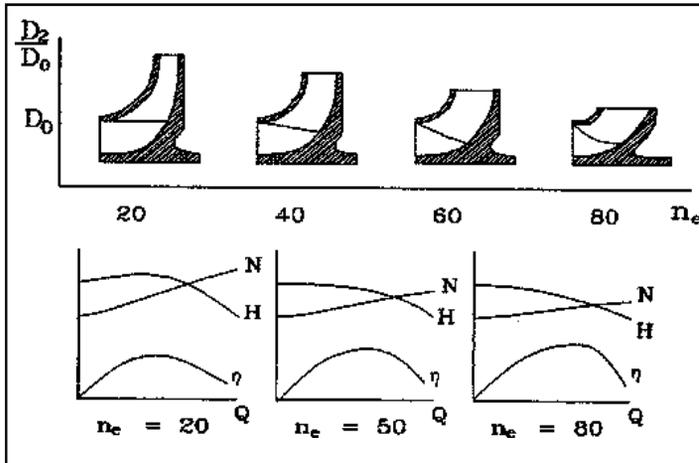


Figura 1. Forma constructiva de los impulsores en función de la velocidad específica y forma de las características de las bombas.

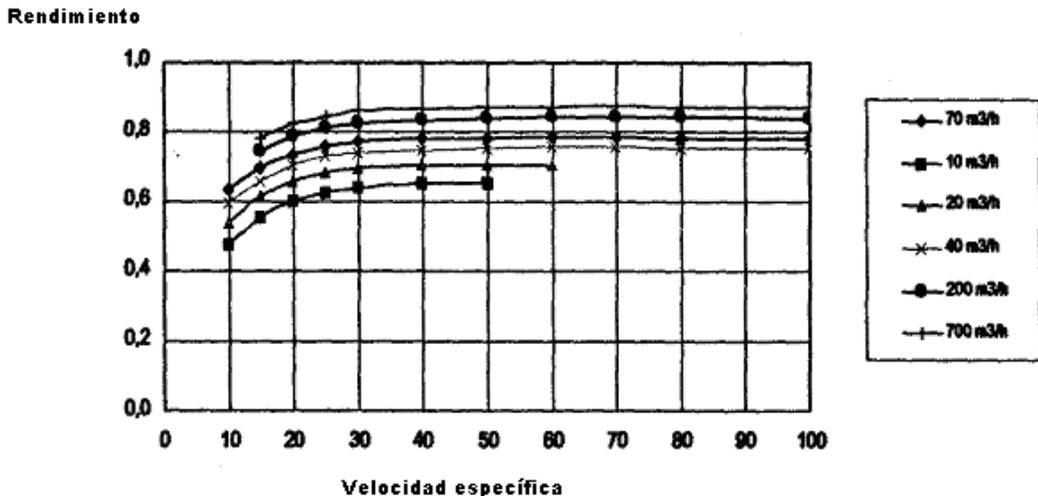


Figura 2. Rendimiento en función de la velocidad específica.