

CAVITACIÓN Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Cavitation and constructing materials in the centrifugal pumps

Rafael Pérez Barreto

E-mail: rperezb@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico

RESUMEN

Se propone, fundamenta y ejemplifica un procedimiento para determinar la carga neta de succión positiva con el fin de evaluar la calidad del proyecto de una bomba centrífuga, su fabricación y confiabilidad de los datos técnicos. Se muestran los gráficos para determinar el valor del coeficiente de velocidad específica de succión en dependencia de la velocidad específica para rodets en voladizo y entre apoyos, y sus correspondientes correlaciones analíticas. Se resume la situación actual de los materiales de fabricación de las bombas centrífugas y su relación con los costos y la corrosión, así como la durabilidad del equipamiento con el objetivo de orientar a usuarios y fabricantes, especialmente de la industria del níquel, en la elección para diferentes condiciones y evaluar la corrosión en ausencia de cavitación.

PALABRAS CLAVE: Bombas centrífugas, níquel, tecnología.

ABSTRACT

The author intends base and it exemplifies a procedure to determine the net positive suction head with the purpose of evaluating the quality of the project of a

centrifugal pump its, production or the reliability of the technical data. The graphics are shown to determine the value of the coefficient of specific speed of suction in dependence of the specific speed, for pumps with the consoles impellers and between supports and their corresponding analytic correlations. In the work it is summarized the current situation of the materials for production the centrifugal pumps and their relationship with the costs, the corrosion, and the durability of the equipment The objective is to guide to the users and makers, especially of the industry of the nickel, in the election for different conditions and to evaluate the corrosion in cavitación absence.

KEY WORDS: Centrifugal pumps, nickel, technology.

INTRODUCCIÓN

Las bombas centrífugas constituyen las máquinas más empleadas en la producción de níquel, tanto en el proceso carbonato-amoniaco (Caron), como en el de lixiviación ácida. Con un costo, en su conjunto, elevado, un tiempo de vida útil relativamente bajo y la peculiaridad de ser grandes consumidores de energía eléctrica, inciden con fuerza en el costo de producción, que suele ser incrementado con el objeto

de garantizar la fiabilidad de cada máquina en el proceso, y obliga a frecuentes renovaciones y a acortar los tiempos de reparaciones capitales.

Las peculiaridades de la economía nacional no permiten mantener un suministro estable y las empresas analizan, a menudo, las más variadas ofertas. Por otra parte, el volumen de equipos anualmente restituidos, los altos precios obligados a pagar, la inestabilidad del suministro de piezas de repuesto y las capacidades productivas creadas en el territorio minero-metalúrgico de Moa, contribuyen a madurar la idea de producir estos equipos en el país, y exigen la evaluación y selección adecuadas de las máquinas y el perfeccionamiento constante de los regímenes de trabajo.

Han sido analizados algunos procedimientos que permiten valorar y, consecuentemente, elegir las bombas centrífugas a partir de los datos técnicos aportados por el fabricante (Pérez Barreto, 2004). La cavitación es un fenómeno frecuente en el trabajo de estas máquinas en un sistema, influyen considerablemente en sus principales indicadores técnico-económicos y dependen no sólo del sistema, sino también de la calidad del diseño y construcción del equipo. No menos importancia tienen los materiales con los que se construyen estos equipos (Pérez Barreto, 2000).

En el presente trabajo se propone un procedimiento para valorar las bombas centrífugas a partir de su capacidad de aspiración y se resume la situación actual de los materiales empleados en su construcción.

Altura de aspiración-cavitación

Cuando en cualquier parte de un flujo la presión cae por debajo de la tensión de vapor del líquido, éste ebulle y se crean cavidades, ocupadas por el vapor o el gas disuelto, en forma de burbujas. Las burbujas se trasladan con la corriente hasta que la presión aumenta y sobrepase la tensión de vapor, lo que tiene lugar en las paletas del rodete de las turbomáquinas. En este momento el vapor se condensa, se incrementa considerablemente de presión, por encima de la presión de trabajo, lo que provoca fuertes golpes mecánicos (golpes de ariete) y se acrecienta la erosión y la corrosión. Estos fenómenos, en su conjunto, se conocen como cavitación, son capaces de dañar e incluso romper el impulsor y sacar de servicio la máquina en un tiempo relativamente corto. La cavitación es acompañada de un ruido peculiar y de la disminución del caudal, la carga y el rendimiento. En la práctica, la presencia de cavitación es detectada por el ruido característico y la disminución del

caudal en más de un 1 %. Con el desarrollo de la cavitación el ruido aumenta, la carga y el caudal caen aún más y llegan a alcanzar valores nulos.

El trabajo de las bombas en regímenes de cavitación no debe permitirse, porque afecta los parámetros de trabajo, daña el equipo y termina por destruirlo, disminuye el rendimiento e incrementa el consumo energético. Al acceso de una bomba debe garantizarse una cantidad de energía crítica (carga efectiva, Δh_s , por encima de la tensión de vapor), para vencer las resistencias hidráulicas en el tramo hasta los alabes del rodete, y garantizar la velocidad y aceleración suficientes a la entrada del impulsor. En la literatura y documentación técnicas estadounidenses, en especial en la industria química, esta reserva de energía es conocida como carga neta positiva de succión, $NPSH_r$, por sus siglas en inglés (Net Positive Suction Head). El subíndice r indica que es requerida por la máquina. Esta denominación se generalizó posteriormente a otras ramas y países,

El $NPSH_r$ es una peculiaridad de la bomba, que depende de las especificaciones constructivas (es mayor para bombas con el rodete en voladizo, que para las que tienen el rodete entre apoyos), de la calidad del proyecto o de su fabricación, y constituye un elemento de especial importancia en la evaluación de una máquina o en la comparación con otras similares. La carga de succión está también determinada por la dinámica del flujo y se subordina a las leyes de semejanza, de la misma manera que sucede con la de impulsión.

Velocidad específica de aspiración-carga neta positiva de succión

Si se fija el régimen de trabajo en la succión de una máquina modelo con un caudal $Q_{m,s} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ y una carga $H_{m,s} = \Delta h_m = 10 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$, se obtiene:

$$n_{s(s)} = \frac{n\sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta h_s}{10}\right)^{3/4}}; \quad \text{r/min}$$

El término $n_{s(s)}$ es conocido como velocidad específica de succión (aspiración). Como esta magnitud no corresponde a una carga unitaria, muchos autores la denominan: coeficiente de velocidad específica en la succión y la simbolizan con la letra C, cuyo valor representa el número de revoluciones de una máquina modelo que se obtiene con un caudal $Q_m = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ y una carga de succión $\Delta h_{s,m} = 10 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$ (metros de la columna de agua). Este parámetro define

peculiaridades constructivas en la aspiración de la bomba y, como en el caso de la velocidad y el diámetro específicos, su valor depende de las unidades empleadas.

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación de Δh_s , o sea, el NPSH_r, que será:

$$\text{NPSH}_r = \Delta h_s = 10 \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} \quad (1)$$

En el diseño de nuevas máquinas el valor de C se determina mediante cálculo y posteriormente se comprueba con ensayos correspondientes. En la práctica, el coeficiente puede ser afectado por deficiencias del proyecto o de su ejecución. Para la realización de un análisis que permita una evaluación práctica y rápida de una bomba, en la Figura 1 se muestra el valor del coeficiente C en función de la velocidad específica, ($C = f(n_e)$), obtenida para bombas con el rodete en voladizo o situado entre apoyos. Este gráfico fue obtenido por medio de la generalización de las mejores construcciones existentes actualmente en el mercado y corresponde a las correlaciones empíricas siguientes:

1. Bombas con el rodete en voladizo: $C = 880 \log n_s^{3/4}$
2. Bombas con el rodete entre apoyos: $C = 800 \log n_s^{3/4}$

Procedimiento de análisis. Ejemplo

El procedimiento de análisis de una máquina dada consiste en determinar el NPSH_r por la expresión (1) tomando el valor de C del gráfico de la Figura 1 y comparándolo con los del fabricante.

Ejemplo de cálculo

Una bomba con el rotor en voladizo, cuyos parámetros sean:

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0278 \text{ m}^3/\text{s}; H = 38 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ y } n = 3\,540 \text{ r/min.}$$

La revolución específica será:

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{3540\sqrt{0,0278}}{38^{3/4}} = 38,56, \text{ r/min.}$$

En la Figura 1, a esta velocidad específica corresponde $C = 1\,047$. Conforme a la expresión (1) se tiene:

$$\text{NPSH}_r = 10 \left(\frac{3540\sqrt{0,0278}}{1047} \right)^{4/3} = 4,66, \text{ m}$$

Las conclusiones son similares a las utilizadas en el análisis del rendimiento o del tamaño de la bomba: si el NPSH_r es elevado con respecto al calculado, probablemente hay dificultades en el diseño o en la construcción de la bomba; si es mucho menor, debe considerarse la posibilidad de error en los datos técnicos o en las medidas tomadas y su influencia en el costo de la máquina.

Materiales anticavitantes

Los metales conocidos no resisten la acción de la cavitación. Todos, de una manera más o menos rápida, resultan dañados. Son más resistentes aquellos metales que, además de tener una alta resistencia mecánica poseen una mayor estabilidad química; por ejemplo, el bronce con respecto a los aceros corrientes o al hierro fundido. El hierro fundido y los aceros al carbono son especialmente sensibles a la acción destructora de la cavitación. El empleo de materiales más estables en la construcción de la máquina puede aumentar el tiempo de trabajo en condiciones de cavitación moderada, sin daños apreciables. Sin embargo, el estimable aumento del costo justifica su uso para casos específicos: sobrecargas cortas en la aspiración, aumento temporal del caudal o de la altura de succión. En cualquier otro caso, rara vez resulta una buena solución.

Materiales de fabricación-corrosión

Los materiales con que se fabrican las bombas centrífugas inciden considerablemente en su costo. La resistencia a la corrosión constituye la principal propiedad para elegir entre distintos materiales de similares características mecánicas a fin de trabajar en diferentes condiciones de explotación.

El hierro fundido es el material más barato empleado en estas máquinas. Los aceros al carbono tienen mejores propiedades mecánicas, resisten tensiones mayores y son ampliamente usados, en especial para la construcción de impulsores. Su costo es un 30 % o 40 % mayor que el del hierro fundido. Los bronces que sustituyen a los aceros en medios ácidos son aún más caros.

Los aceros inoxidable, en general aleaciones con níquel o con cromo, trabajan confiablemente en medios ácidos y son 1,4-1,5 veces más caros que los aceros comunes y hasta dos veces más caros que el hierro fundido. El níquel es 1,5-1,8 más caro. Su aleación, el monel (níquel-bronce), es un poco más barata. Los Hastelloys: aleación de níquel con molibdeno y otros componentes, son 20-40 % más baratos. El titanio, altamente resistente a la corrosión, es hasta 7

veces más caro que los aceros comunes y por lo menos dos veces más que el níquel.

La elección de los materiales para los diferentes elementos de las bombas centrífugas se efectúa a partir de sus propiedades mecánicas, aunque las condiciones específicas de temperatura, sobrecarga, abrasividad, etc., pueden influir en la misma.

Para los rodets sometidos a las condiciones agresivas del líquido tiene importancia la resistencia a la corrosión, lo que, en última instancia, define la vida útil de la máquina en ausencia de cavitación. La corrosión es un fenómeno electroquímico y tiene lugar en presencia de diferentes potenciales eléctricos, o sea, un par galvánico. Este par se origina al introducir diferentes metales en electrolitos (macropares) o en presencia de una estructura no homogénea (micropares). Por ejemplo: los elementos fabricados con acero y bronce forman un macropar, y los elementos estructurales de la fundición: hierro (Fe) y carburo de hierro (FeC), un micropar.

La diferencia de potencial provoca una corriente eléctrica que va desde el metal más electronegativo: ánodo, hasta el más electropositivo: cátodo. Por ejemplo, en el caso del par acero-bronce, el primero es el ánodo, donde tiene lugar la destrucción del material por la acción oxidante del oxígeno disuelto en el líquido. La intensidad de la corrosión depende de la cantidad de oxígeno presente en el flujo y de la velocidad local de éste. Con el aumento de la velocidad se incrementa la corrosión.

La cantidad de iones hidrógeno determina, también, la corrosión. Su contenido se caracteriza por el pH, y depende de las propiedades de las sustancias disueltas en el líquido y de sus temperaturas. El pH es definido como el logaritmo negativo de la concentración de hidrógeno. Para el agua a 25 °C esta concentración alcanza 1×10^{-14} ; de tal forma que la escala para el pH varía de 0 hasta 14. De hecho:

$$-\log 1 \times 10^0 = 0 \quad \text{y} \quad -\log 1 \times 10^{-14} = 14$$

El agua con una misma concentración de iones hidrógeno, H^+ e hidroxilo, OH^- —ambos, producto de la disociación del agua— es considerada neutra. En este caso la concentración de los dos iones es 1×10^{-7} y el pH es 7. Cuando el pH es < 7 la concentración de iones hidrógeno es mayor que la de iones hidroxilo, y constituye una solución ácida. En caso contrario, $pH > 7$, es básica.

Para gran acidez $pH < 3,5$, se recomienda emplear aceros inoxidables. Entre 3,5 y 6, bronce, y entre 6 y 8, hierros fundidos para el cuerpo, y bronce para los impulsores. Para $pH > 8$ se utilizan aceros al car-

bono y hierro fundido. La elección inadecuada de los materiales de fabricación incrementa innecesariamente los costos.

La temperatura tiene especial importancia en la intensidad de la corrosión: el agua a 250 °C aumenta la concentración de iones hidrógeno en 25,8 veces con relación al agua a 25 °C, y el pH baja de 7 a 5,6. De esta manera, con el aumento de la temperatura aumenta la acidez del agua y con ella su capacidad corrosiva. En ocasiones, algunos procesos secundarios pueden provocar la formación de capas protectoras. Este fenómeno ocurre en regiones donde la velocidad no es muy alta. En caso contrario, el agua arrastra constantemente la capa, dejando el metal expuesto a una corrosión más intensa. Por esta causa se suelen utilizar materiales diferentes en las zonas de alta velocidad del flujo.

La presencia de sales aumenta la conductividad eléctrica de la solución y, con ella, la intensidad de la corriente, lo que influye considerablemente en la destrucción de la capa protectora e intensifica la corrosión. En estos casos, diferentes tipos de bronce pueden ser empleados, los mejores encarecen la máquina. Por último, la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S) en el agua, por lo general producto de la descomposición de materias orgánicas, aumenta la velocidad de la corrosión.

Desde los años cincuenta transcurre la introducción de los plásticos en la fabricación de diferentes elementos de las bombas centrífugas. Este proceso ha avanzado de forma relativamente lenta, debido a que las propiedades mecánicas y físicas de estos materiales no siempre responden a las exigencias de distintos elementos de máquinas y, en gran medida, dependen del tiempo de acción de las cargas. Por otro lado, estos materiales están limitados a temperaturas relativamente bajas y, además, la tecnología de fabricación tiene sus propias exigencias que, en ocasiones, obliga a cambiar las formas más adecuadas. Las máquinas con velocidades de rotación más bajas y, en consecuencia menores velocidades específicas, se ven compensadas en parte, por mejores condiciones de aspiración.

En la actualidad son ampliamente utilizados, entre otros, el PVC, PVC clorado y, últimamente, el fluoruro de polivinilideno (PVF_2). También se emplean el polipropileno y el etileno. Existen en el mercado marcas registradas de estos materiales: Teflón, Kynar y otros, cuya presencia no altera la esencia de lo analizado y sus costos suelen ser más altos. En la práctica, las limitaciones debidas a la temperatura se mantienen: el PVC puede ser utilizado para temperaturas de hasta 60 °C; el PVC clorado, 90 °C, y el

PVF₂ y el polipropileno hasta 120 °C. Debe señalarse que las temperaturas antes mencionadas pueden variar por las propiedades de los diversos líquidos que se transportan: diferentes plásticos a una misma temperatura pueden comportarse de manera bien distintas para varios productos químicos. En la práctica actual, los plásticos no han sustituido a los metales como materiales para la fabricación de bombas centrífugas, pero alcanzan un papel de importancia en disímiles aplicaciones específicas.

CONCLUSIONES

1. El $NPSH_r$ de una bomba centrífuga depende no sólo del caudal y de la velocidad específica, sino también del coeficiente de velocidad específica en la succión C , determinado para un caudal y una carga en el modelo de 1 m³/s y 10 metros de la columna de agua, respectivamente.
2. Es posible obtener el gráfico del valor del coeficiente de velocidad específica de succión en fun-

ción de la velocidad específica n_s , mediante la generalización de los datos de las mejores construcciones actuales, y se obtienen las correlaciones entre estos parámetros para rodetes en voladizo y entre apoyos.

3. Todos los metales, en mayor o menor medida, son sensibles a la cavitación. El uso de materiales más resistentes encarece el costo de la máquina y se recomienda sólo en casos específicos caracterizados por sobrecargas cortas en la línea de succión y aumentos temporales del caudal o de la altura de aspiración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- PÉREZ BARRETO, R. (2004): "Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas", *Minería y Geología*, XIX (1-2).
- (2000): *Caracterização de ensaios de máquinas de fluxo no laboratório de vazão do IPT*, Informe Proyecto CAPES-MES, San Pablo.

Coefficiente C, r/min

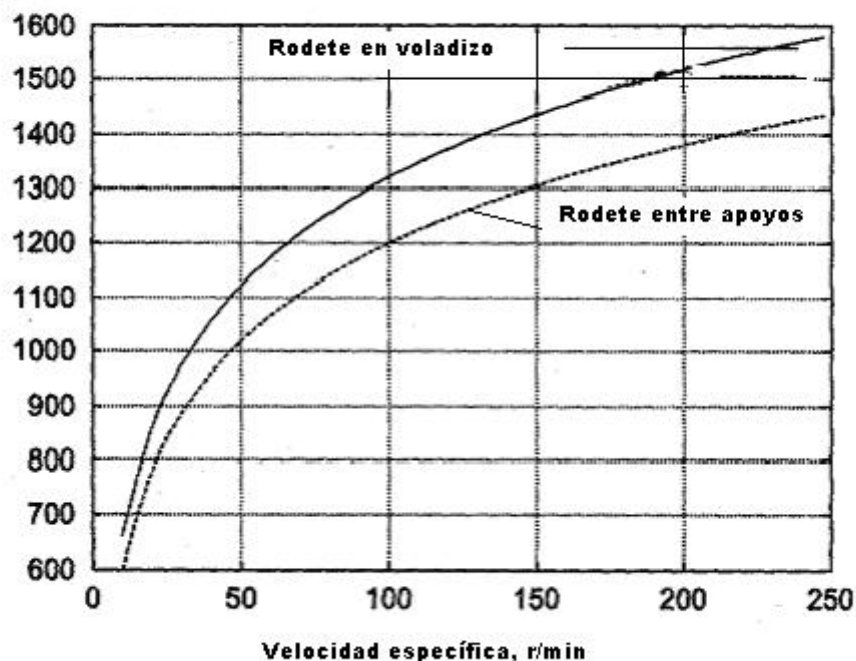


Figura. 1. Coeficiente de velocidad específica de aspiración en función de la velocidad específica.