

EQUIPOS HIDRÁULICOS

I.- GENERALIDADES Y CLASIFICACIÓN DE BOMBAS.

I.1.- Definiciones.

En general una bomba es una máquina capaz de **transmitir energía** a un fluido o capaz de convertir energía mecánica en energía hidráulica. Por ir centrado la cuestión la energía que acciona la bomba, en nuestro caso, será siempre energía mecánica rotativa proveniente de un motor eléctrico y el fluido será siempre agua. En lo sucesivo nos referiremos exclusivamente, por ser las de uso común, a las bombas **roto cinéticas** y, en especial a las **centrifugas** que se caracterizan por el movimiento giratorio de un elemento formado por "palas" o "alabes", llamado **rodete** o **impulsor**, en el interior del cuerpo de bomba o estator.

La energía hidráulica de una masa líquida viene dada por la ecuación de Bernouille:

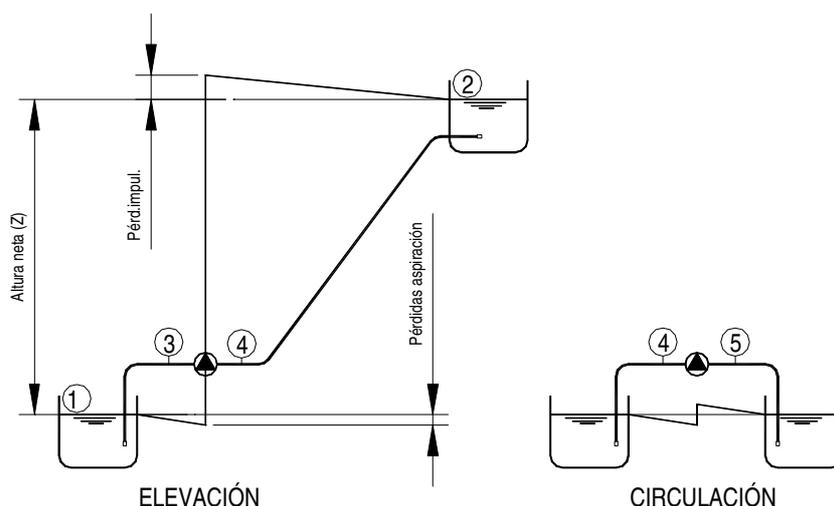
$$H = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Una bomba por tanto, al aumentar el contenido de energía de una masa líquida, aumentará alguno de los tres factores, o los tres a la vez, de la ecuación de Bernouille. La diferencia de energía entre la suministrada al eje de la bomba y la energía hidráulica que adquiere la masa líquida representa el rendimiento de la bomba, que es una cantidad de energía que se pierde en forma de calor, sea aumentando la temperatura de la masa líquida o la del cuerpo de la bomba.

En efecto, si consideramos una bomba que eleve agua de un depósito a otro, ambos suficientemente grandes y conectados con la atmósfera, de la comparación de la energía total (puntos 1 y 2) se deduce, puesto que la presión y la velocidad son nulas, que el término incrementado es la altura geométrica Z -naturalmente, habrá que incrementar este balance en la pérdidas por rozamiento que tienen lugar en el sistema aspiración / bomba / impulsión-. Si se observa la diferencia de presiones entre la aspiración e impulsión de la bomba, entre los puntos 3 y 4, se encontrará un valor próximo, despreciando las variaciones de velocidad, a la variación de la altura geométrica más las pérdidas por rozamiento del sistema.

Del mismo modo pueden describirse casos -bombas de circulación, agitadores, etc.-, como el de la bomba de trasiego ilustrado en la figura, en los que el único parámetro que varía en la ecuación de Bernouille es la velocidad del fluido,

correspondiendo la energía aportada por la bomba a las pérdidas por rozamiento del sistema. Entre los puntos 4 y 5 se constata el valor de dichas pérdidas en forma de diferencia de presión, puesto que la altura y la velocidad entre dichos puntos es prácticamente constante.



I.2.- Velocidad específica

Un parámetro adimensional importante para la clasificación de bombas por las características hidráulicas de un impulsor es la **velocidad específica** que viene dada por la expresión:

$$n_q = N(\text{rpm}) \frac{Q^{1/2} (\text{m}^3 / \text{s})}{H^{3/4} (\text{mca})}$$

de la que se deduce que velocidades específicas bajas corresponden a bombas de presión -radiales-, aptas para elevar caudales pequeños a grandes alturas, y que las velocidades específicas altas corresponden a bombas de caudal -axiales-, es decir, bombas para elevar grandes caudales a alturas relativamente pequeñas.

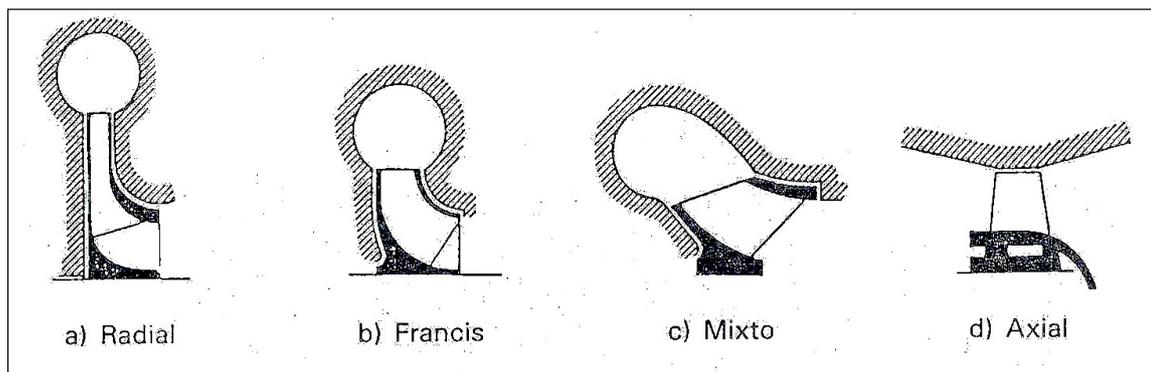
Tipo de rodete	Vel.especif.	H(Q=100 l/s,1000 rpm)
Radial	10 < n _q < 60	100 > H > 42,6
Francis	30 < n _q < 90	23,1 > H > 5,3
Mixto	90 < n _q < 160	5,3 > H > 2,5
Axial	160 < n _q	2,5 > H

La velocidad específica conduce a una primera clasificación que, tomando en cuenta otro tipo de características, sin perder de vista la generalidad de nuestras aplicaciones, puede contener los aspectos que se desarrollan a continuación.

I.3.- Clasificación de bombas

Según el tipo de flujo o rodete:

- Bomba radial o centrífuga pura: la velocidad del agua a la salida del impulsor está en un plano perpendicular al eje de giro, de modo que el agua describe un ángulo de 90° en el interior de la bomba.
- Bomba de flujo mixto: la velocidad del agua a la salida del rodete forma un cierto ángulo con el eje de giro.
- Bomba axial o de hélice: la velocidad del agua es paralela al eje de accionamiento de modo que la vena líquida no experimenta ningún cambio de trayectoria. Así como en las anteriores no cambia la disposición geométrica del rodete, y por tanto sus características hidráulicas, en las bombas axiales es posible variar la inclinación de las palas.



Según la disposición del eje:

- Bombas de eje vertical: el eje tiene una disposición vertical y, normalmente, el cuerpo de bomba está sumergido en el agua. Esta definición es importante pues una bomba horizontal típica puede instalarse con el eje vertical sin entrar en esta denominación.
- Bombas de eje horizontal: normalmente trabajan con el cuerpo en seco y el acoplamiento entre el motor y la bomba es directo.

Según el tipo de motor:

- Bombas de motor seco: el motor trabaja fuera del agua.
- Bombas de motor sumergido: el motor está dentro del agua cerrado de modo estanco o haciendo circular el agua por su interior para su refrigeración.

Según el número de impulsores:

- Bombas monocelulares: la bomba dispone de un solo impulsor que realiza todo el trabajo hidráulico.
- Bombas multicelulares o multietapa: la bomba dispone de varios "cuerpos de bomba", es decir varios impulsores con sus correspondientes cuerpos, dispuestos en serie. Pueden ser **compuestas** cuando una serie de conductos en el cuerpo realiza la circulación en serie o propiamente **multicelulares** cuando se forman por cuerpos iguales, especialmente diseñados para el acoplamiento en serie, que pueden acoplarse en el número deseado.

Según el tipo de aspiración:

- Bombas de simple aspiración: la entrada del agua en el impulsor se realiza por el centro de uno de los lados del rodete.
- Bombas de doble aspiración: el impulsor tiene una forma simétrica respecto a un plano perpendicular al eje de giro permitiendo la entrada del agua por ambos lados. De este modo se equilibran los empujes del agua sobre el eje lo cual representa una gran ventaja, sobre todo en bombas grandes.

En la práctica se pueden encontrar bombas con combinación de todas la características expuestas, aptas para cualquier tipo de servicio y cualquier diseño constructivo de la estación de bombeo. En las figuras siguientes se muestran algunas de las bombas más utilizadas, si bien los catálogos de los distintos fabricantes son amplísimos.

Las partes fundamentales de la bomba, por lo que se ha visto hasta ahora, son el impulsor o rodete, responsable en gran medida de las características hidráulicas de la misma, el cuerpo de bomba, elemento de conducción y sustento que tiene también responsabilidad hidráulica en su geometría, el eje que transmite la energía mecánica al impulsor. Son también importantes los cojinetes que permiten el apoyo y giro del eje y los elementos de estanqueidad de la bomba entre los que cabe distinguir los estáticos que se disponen en el ensamble de los elementos de la bomba que no tienen movimiento relativo, y los dinámicos que cierra el paso del agua alrededor del eje en su entrada al interior del cuerpo de bomba. Entre estos últimos, es muy común el cierre mediante "prensa-estopa", aunque últimamente se está sustituyendo mucho, dado el abaratamiento de estos, por cierres mecánicos.

I.4.- Bomba horizontal de voluta

Se trata de una bomba normalizada según la norma DIN 24255, cuya denominación más exacta sería la de bomba horizontal de carcasa tipo voluta y rodete de simple aspiración. Es una bomba de concepción netamente radial en la que la aspiración es axial y la impulsión es radial. El agua impulsada por el rodete recorre la espiral o caracol formado por el cuerpo de la bomba (voluta) y sale en una dirección perpendicular (normalmente superior) al eje de giro de la bomba.

Aunque se fabrican con diámetros de impulsor superiores a los 600 mm, son normalmente utilizadas en gamas más reducidas. Puede considerarse normal su utilización

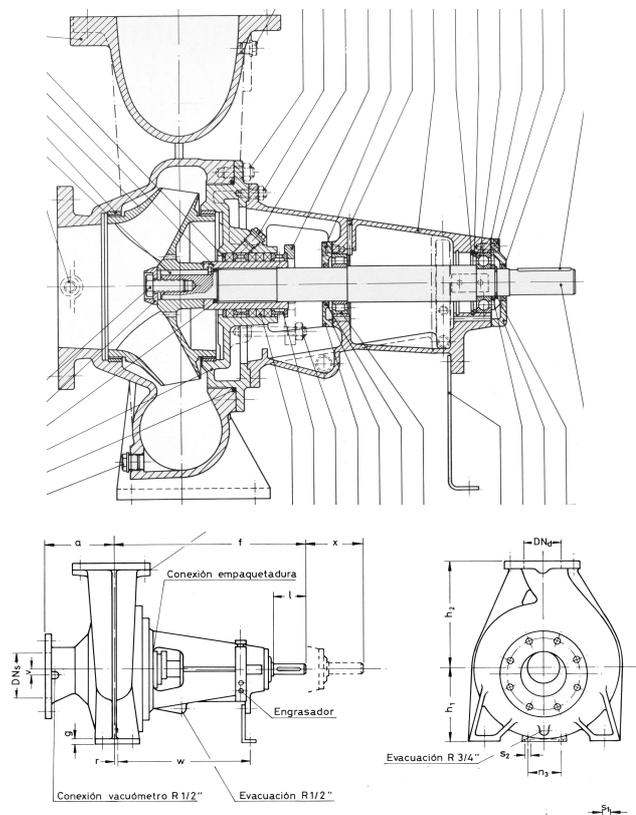


Fig 0.- Bomba horizontal de carcasa tipo voluta y rodete de simple aspiración

todas las partes internas, en particular del impulsor, sin necesidad de desconectar el cuerpo de bomba de las tuberías de aspiración e impulsión, toda vez que el impulsor está insertado en el eje alojado en el soporte de cojinete.

Se trata de una bomba muy versátil y económica en las tallas inferiores, que tiene una gran robustez y fiabilidad, si bien resulta más complicada la disposición de colectores debido a su disposición radial.

I.5.- Bomba horizontal de cámara partida

Su denominación más completa puede ser la de bomba horizontal de cámara partida con rodete de doble aspiración. Precisamente su característica más definitoria es la de disponer de un rodete de doble aspiración, es decir, un rodete de concepción radial o semi axial pero diseñado como la unión de dos rodetes sencillos, de modo que las correspondientes aspiraciones quedan enfrentadas, compensándose, por tanto, los esfuerzos sobre el eje en sentido axial. Esta característica conduce a una mejora de las condiciones de trabajo de la bomba y a una relativa simplificación de su diseño pues el esfuerzo en sentido axial en el eje no ha de ser soportado en el cuerpo de la bomba ni transmitido a la bancada.

con caudales de hasta 60 l/s y alturas de elevación que pueden alcanzar los 80 mca, funcionando normalmente a 2.900 rpm, con diámetros de impulsión y aspiración de 100-125 mm, e impulsores de hasta 280 mm de diámetro.

Se distinguen por la disposición de un soporte especial para el cojinete del eje de la bomba, independiente del cuerpo de la misma, del que se prescinde en ocasiones en tamaños pequeños de bomba, siendo soportado en este caso el impulsor por el propio eje del motor de accionamiento.

Aunque se fabrican en la actualidad con cierres mecánicos, tradicionalmente han dispuesto de empaquetadura con cordones de estopa montada en el elemento de soporte del cojinete.

Su diseño posibilita la revisión y mantenimiento de

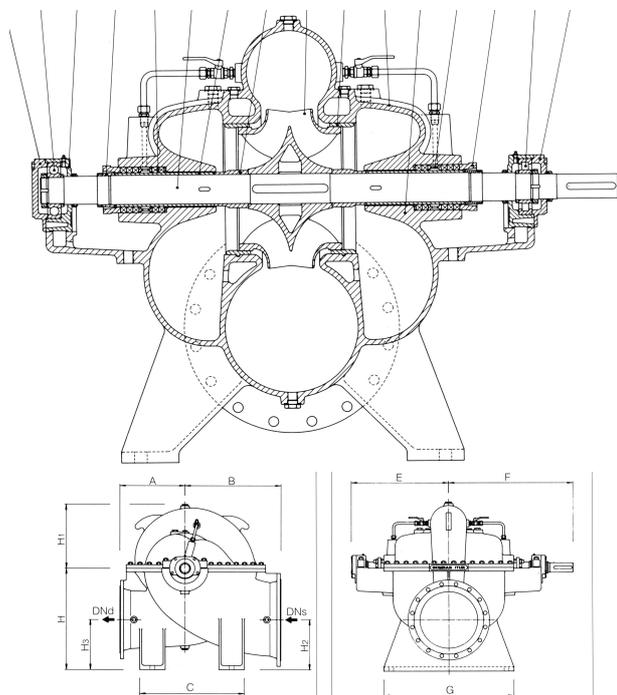


Fig 0.- Bomba horizontal de cámara partida con rodete de doble aspiración

Son normalmente bombas grandes cuyo rango de utilización se sitúa muy por encima de las anteriores y entran con mayor facilidad en los rangos normalmente utilizados en instalaciones de riego colectivo. Las gamas normales de fabricación llegan y superan caudales de 1.000 l/s con alturas de elevación de hasta 200 mca o superiores, trabajando normalmente a 1.450 rpm, con potencias superiores a 500 Kw y diámetros de aspiración e impulsión de hasta 600 mm. En instalaciones de riego colectivo, en las que se dispone normalmente de varios grupos en paralelo, son frecuentes las bombas con potencias de 100-200 Kw con caudales de entre 100 y 180 l/s, alturas de 60-80 mca con diámetros de aspiración e impulsión entre 150 y 200 mm.

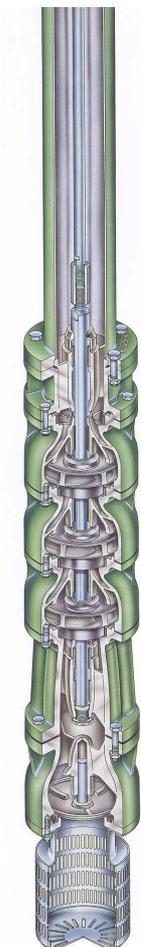
Aún cuando en la actualidad este tipo de bombas se construye con bancadas especiales que permiten el apoyo de la bomba con el eje invertido, soportando el cuerpo de la bomba el peso del motor de accionamiento, que queda encima del mismo, con el eje del conjunto en posición vertical, conservan el adjetivo tradicional de "horizontal".

El cuerpo de bomba, de doble voluta, está partido por un plano horizontal de modo que las bridas de conexión de la aspiración y la impulsión, junto a los elementos de apoyo del cuerpo, quedan en la parte inferior, posibilitando una inspección rápida y un fácil mantenimiento, por la parte superior del cuerpo, sin necesidad de desconectar las tuberías de aspiración e impulsión y sin desplazar la bomba de su bancada.

El diseño constructivo del cuerpo de bomba, complicado desde el punto de vista mecánico, permite una gran simplicidad en el diseño de la estación elevadora por cuanto, al contrario que las anteriores, el eje de aspiración y el de impulsión coinciden. Aunque en la actualidad se fabrican con cierres mecánicos, tradicionalmente la estanqueidad del eje se consigue mediante sendas empaquetaduras de cordones de estopa, puesto que el eje atraviesa el cuerpo en dos puntos para posibilitar que los cojinetes queden fuera del cuerpo.

I.6.- Bomba vertical

La bomba tradicionalmente conocida como bomba vertical fue diseñada para el bombeo de agua a gran profundidad –pozos, sondeos, ríos o embalses– y, en general,



para entornos donde la explotación hidráulica no permitía la colocación del motor de accionamiento, antes de que se desarrollasen los motores sumergidos. No obstante, en la actualidad, algunas de sus características hidráulicas y constructivas hacen interesante su uso, aún cuando la condición original de profundidad pierda prevalencia. Así, es frecuente la utilización de este tipo de bombas en estaciones diseñadas al efecto – depósitos o cántaras de aspiración –, ofreciendo ciertas ventajas respecto a las bombas de eje horizontal vistas con anterioridad.

En éstas, la parte hidráulica se sumerge total o parcialmente en el agua de modo que la bomba no necesita ser cebada para su funcionamiento. El accionamiento, en cambio, se encuentra situado al nivel del suelo, perfectamente accesible y en un ambiente más favorable a su funcionamiento.

La bomba vertical se compone básicamente de cuatro elementos: la parte hidráulica o bomba, propiamente dicha; la columna de accionamiento, que aloja la transmisión mecánica, sirve de conducción al agua impulsada, y soporta el peso y empujes de la bomba; el cabezal de descarga, que, además de conectar la hidráulica de la bomba a la tubería de impulsión, cambiando el flujo de agua de la vertical a la horizontal, soporta el peso del motor, aloja el acoplamiento bomba-motor y el elemento de estanqueidad del eje; y el motor.

Una de las características más relevantes del diseño de este tipo de bomba es su predisposición, forzada precisamente por la necesidad de explorar aguas a gran profundidad a un montaje multicelular, de modo que varios cuerpos de bomba pueden ser acoplados en paralelo, accionados por un único eje común. De este modo se consiguen alturas de elevación muy grandes con diámetros de impulsor reducidos, pues la limitación del diámetro del pozo o sondeo no permite otra solución.

Aunque el entorno de utilización de este tipo de bomba en el ámbito del riego colectivo es parecido al expresado para las bombas de cámara partida, siendo más fácil utilizar configuraciones más pequeñas, se fabrican para caudales de hasta 600 l/s y alturas de elevación de hasta 400 mca, con diámetros de columna de 600-700 mm.

Para aplicaciones singulares y en bombas de cierta envergadura, se utiliza un

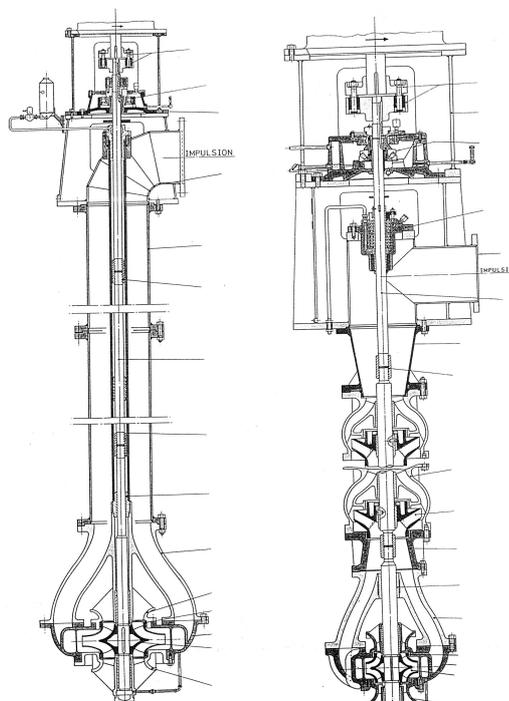
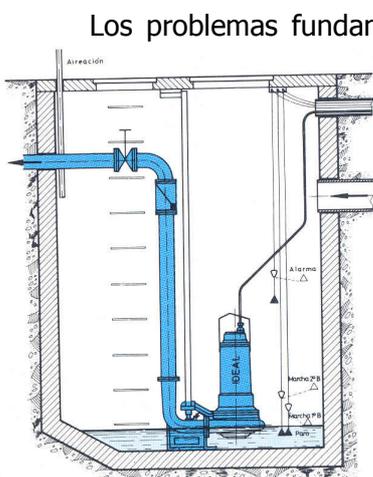


Fig 0.- Bomba vertical, simple y multicelular, con impulsor de doble aspiración.

cuerpo de bomba que posibilita la instalación de un impulsor de doble aspiración, como los vistos en las bombas de cámara partida. En ocasiones, cuando puede disponerse de un diámetro suficiente, puede ser suficiente dicho impulsor de doble aspiración. En caso contrario pueden disponerse además impulsores de simple aspiración en serie.

I.7.- Bomba de motor sumergido

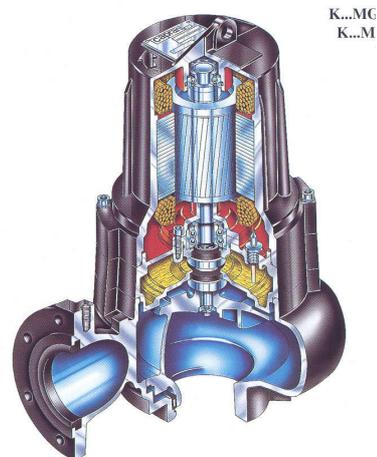
Si tradicionalmente el diseño de estaciones elevadoras ha estado condicionado por la necesidad de situar el motor de accionamiento, sea eléctrico o de combustión, en un ambiente seco alejado de la fuente de agua de la que se aspira, el desarrollo del motor sumergido ha cambiado profundamente dicho diseño. No obstante, dados los condicionantes constructivos de dicho motor sumergido, que determinan algunas limitaciones que finalmente inciden en su rendimiento y precio, este no se ha generalizado salvo en aplicaciones concretas.



Los problemas fundamentales de la construcción de un motor sumergido son la **estanqueidad** necesaria en el interior del mismo, concretamente en el retén o la junta mecánica que ha de permitir el giro del eje y el paso y embornado de cables de alimentación, y la **refrigeración**, toda vez que no puede circular aire o agua por los devanados del motor. En algunas ejecuciones, particularmente en las bombas de pozo profundo, donde este problema se acrecienta por lo reducido del diámetro del pozo y del motor, suelen disponerse conductos interiores por los que circula parte del agua impulsada, mejorando la refrigeración.

La construcción de bombas con motor sumergido se ha generalizado en los siguientes casos:

- ❑ **Bombas de pozo profundo.** El desarrollo de este tipo de motores supone como principal ventaja la eliminación del largo eje de accionamiento en las bombas verticales clásicas, lo cual aumenta el rendimiento por la desaparición de las pérdidas del propio eje, reduce considerablemente el precio por la misma razón, y evita no pocos problemas de funcionamiento y conservación. Normalmente, se sitúa el motor bajo la bomba, quedando la aspiración entre ambos, de suerte que la salida superior del agua impulsada de la bomba se conecta directamente a la tubería de impulsión, de la que cuelga el conjunto.
- ❑ **Bombas para aguas residuales.** Normalmente el bombeo de aguas residuales no requiere grandes alturas de elevación, limitándose su utilización al trasiego de las mismas entre los elementos de las depuradoras o a vencer pequeñas dificultades topográficas. Como tampoco se suelen manejar



grandes caudales, las necesidades de potencia suelen ser bajas, de suerte que el motor sumergido representa una magnífica solución cuando, además, las necesidades de elevación suelen estar en espacios urbanos con grandes limitaciones de espacio: arquetas subterráneas, pozos de registro, etc. De ahí que este tipo de bombas, poco utilizadas en regadío, haya proliferado hasta el extremo de que en la actualidad es poco concebible una instalación de bombeo de aguas residuales sin este tipo de bombas.

- ❑ **Bombas de drenaje.** Al igual que en el caso anterior, las alturas de elevación manejadas en drenaje no suelen ser muy altas, de modo que las necesidades de potencia son reducidas en relación al tamaño de la bomba. En instalaciones de drenaje provisionales (achique de aguas para emplazamiento de obras o inundaciones) la sencillez del bombeo con equipos de motor sumergido es tal que se ha desplazado absolutamente cualquier otra posibilidad, al margen de la aspiración con bombas de vacío, muy utilizada también mediante equipos móviles en el drenaje de aguas residuales.

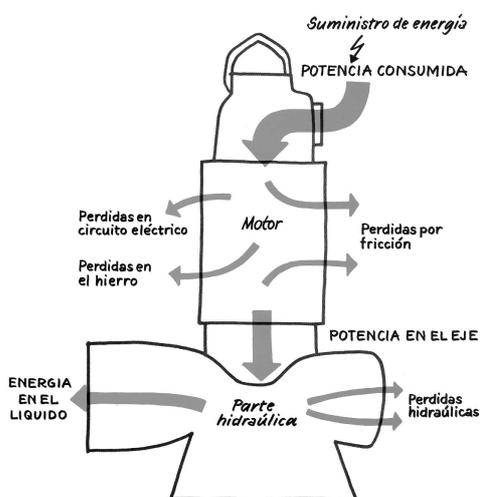
II.- CONCEPTOS BÁSICOS DE BOMBAS

II.1.- Determinación de la potencia absorbida.

La potencia absorbida por una bomba centrífuga (P_b) es la requerida por ésta en su acoplamiento o en el eje de la máquina de accionamiento y viene dada por la expresión:

$$P_b (\text{Kw}) = \frac{Q(\text{l/s}) \cdot H(\text{mca})}{102 \cdot \mu_b}$$

donde Q es el caudal servido, H es la altura total de elevación que efectúa la bomba, es decir la altura geométrica de la impulsión más las pérdidas de carga en la aspiración y en la impulsión, y μ_b es el rendimiento de la bomba expresado en tanto por uno. La altura total de elevación de la bomba



$$H = H_g + \frac{p_i - p_a}{\gamma} + \frac{v_i^2 - v_a^2}{2g} + \sum h_v$$

viene dada por la expresión:

donde H_g es la altura geométrica, p la presión, v la velocidad y h_v la suma de pérdidas de carga del sistema (los subíndices a y i corresponden a la aspiración e impulsión respectivamente). Si se desprecia la velocidad, cuya variación en la mayor parte de los casos es insignificante, resulta:

$$H = H_g + \frac{p_i - p_a}{\gamma} + \sum h_v \quad \text{si} \quad v_i = v_a$$

En el caso de bombeo entre depósitos $p_a=p_i=0$ resulta:

$$H = H_g + \sum h_v \quad \text{si } v_i = v_a \text{ y } p_i = p_a$$

La potencia total puesta en juego, normalmente eléctrica, ha de considerar además las pérdidas producidas en el motor de accionamiento, representadas por el rendimiento del motor μ_m expresado en tanto por uno, de modo que la potencia total eléctrica es obtenida por la expresión:

$$P_m(\text{Kw}) = \frac{P_b}{\mu_m} = \frac{Q(\text{l/s}) \cdot H(\text{mca})}{102 \cdot \mu_b \cdot \mu_m}$$

Por último, conviene conocer como parámetro de referencia la intensidad de la corriente eléctrica absorbida por el motor, para lo cual se ha de introducir el valor de la tensión en kilovoltios y el coseno de ϕ en la siguiente expresión:

$$P_m(\text{Kw}) = \sqrt{3} \cdot U(\text{KV}) \cdot I(\text{A}) \cdot \cos \phi \Rightarrow I(\text{A}) = \frac{Q(\text{l/s}) \cdot H(\text{mca})}{102 \cdot \sqrt{3} \cdot \mu_b \cdot \mu_m \cdot U(\text{KV}) \cdot \cos \phi}$$

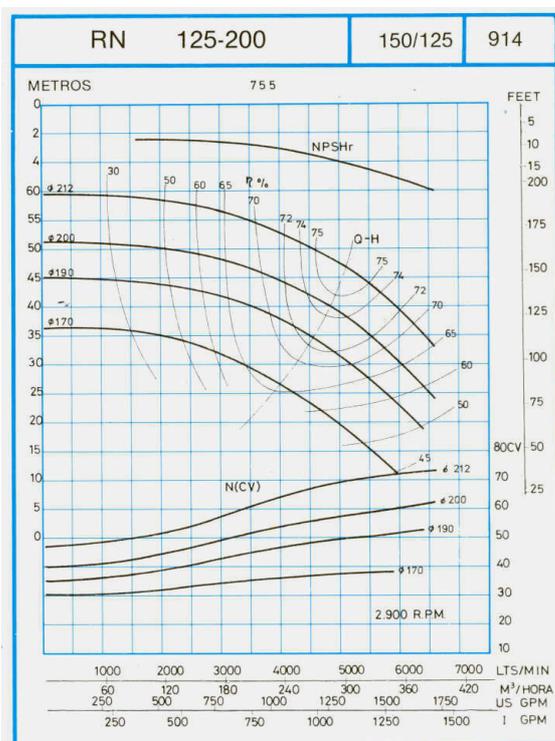
II.2.- Determinación de la potencia del motor.

El cálculo anterior ha de realizarse para las peores condiciones que puedan darse en la instalación, en cuyo caso estas deben garantizarse, o para la máxima potencia que pueda demandar la bomba.

Ocurre con relativa frecuencia que por ser pesimista en los cálculos de la pérdida de carga o en la altura geométrica, a la hora de la puesta en marcha de la instalación se comprueba que, al ser la altura requerida menor que la demandada, se desplaza el punto de funcionamiento a la derecha de la curva característica, dando lugar a un mayor caudal y a una mayor demanda de potencia con un rendimiento peor.

En ocasiones este problema es tan grave que se detecta inmediatamente y ha de solucionarse mediante el cambio de motor o el recorte del rodete, que se verá más adelante. Pese al perjuicio que supone la detección del problema, suele ser peor la situación en que no se detecta pues el motor es sometido a una sobrecarga permanente que reduce su vida útil, y el menor rendimiento se acusa en la factura eléctrica. Aparte el aumento de caudal significa un aumento de velocidad en la impulsión que puede ponerla en peligro.

En la práctica al seleccionar la potencia nominal del motor, es decir la que este entrega en su eje, suele preverse un 10 % de incremento de potencia en motores grandes y un 15 % en motores pequeños ($P_n < 100 \text{ Kw}$). Como norma, conviene generalizar que la disposición de un motor de potencia holgadamente superior a la calculada es un parámetro de seguridad importante que, siendo sólo ligeramente más caro en su



adquisición, no consume más energía por el hecho de ser más grande, pues la potencia consumida realmente por el sistema hidráulico corresponde a la aportada y facturada en el sistema eléctrico.

II.3.- Curva característica de la bomba.

El caudal Q que suministra una bomba centrífuga a velocidad constante normalmente aumenta cuando disminuye la altura de impulsión, es decir, tiene capacidad de autorregulación. Asimismo de la altura de elevación depende la potencia absorbida, el rendimiento y el NPSHr, que se verá más adelante. El desarrollo conjunto de estos parámetros queda representado en la curva característica de la bomba, el cual caracteriza el comportamiento de la misma.

La curva característica facilitada por el fabricante suele corresponder a valores

deducidos de ensayos sobre modelos o sobre bombas iguales ya fabricadas. En cualquier caso, sobre todo en máquinas grandes o de gran responsabilidad, estas curvas han de contrastarse con las pruebas de la bomba antes de su instalación.

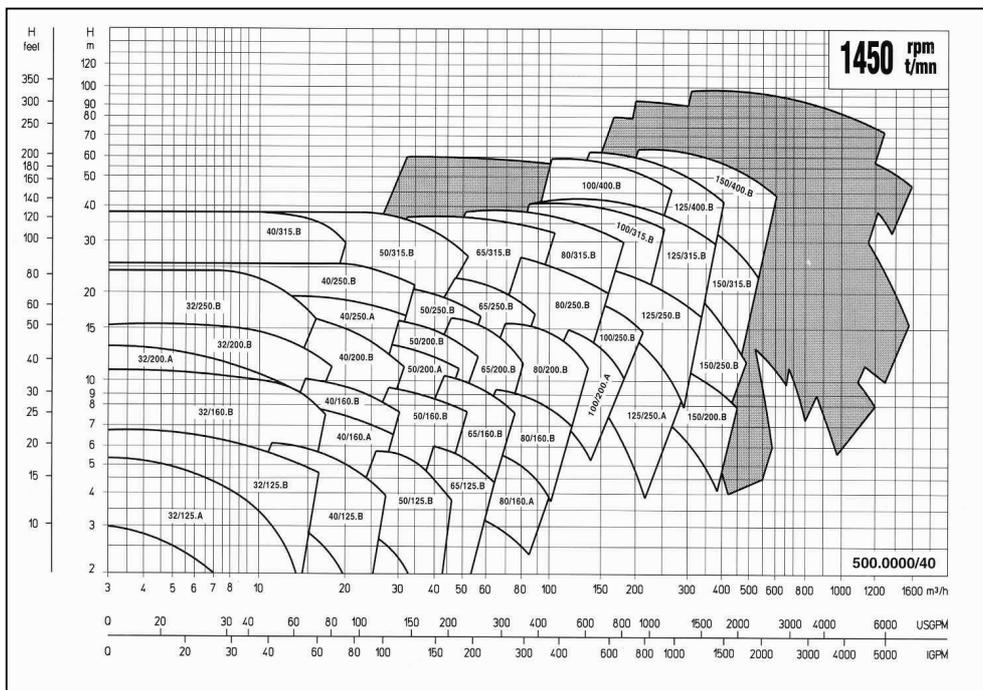
Si bien las curvas Q-H muestran muchas formas y tendencias es interesante destacar el desarrollo plano o pendiente de la misma. El primero interesará cuando la bomba vaya a trabajar en una gran gama de caudales y el segundo cuando lo vaya a hacer en un punto fijo, por ejemplo en el bombeo entre depósitos.

Lo normal en las curvas características es que tanto la potencia como el NPSHr aumenten con el caudal servido por la bomba. Precisamente estos dos factores suelen limitar el uso de la bomba por la parte derecha de la curva cuyo extremo, que no se suele representar, correspondería con la intersección de la curva con el eje de $H=0$, es decir funcionando a "chorro libre".

Por la parte izquierda la curva llega a interceptar el eje vertical que corresponde al funcionamiento con $Q=0$ de "válvula estrangulada" en el cual la bomba funciona como agitador dando la máxima presión. Este punto de funcionamiento es posible, y en la práctica se usa mucho el arranque de la bomba a válvula cerrada, pero debe limitarse a cortos espacios de tiempo pues puede resultar pernicioso.

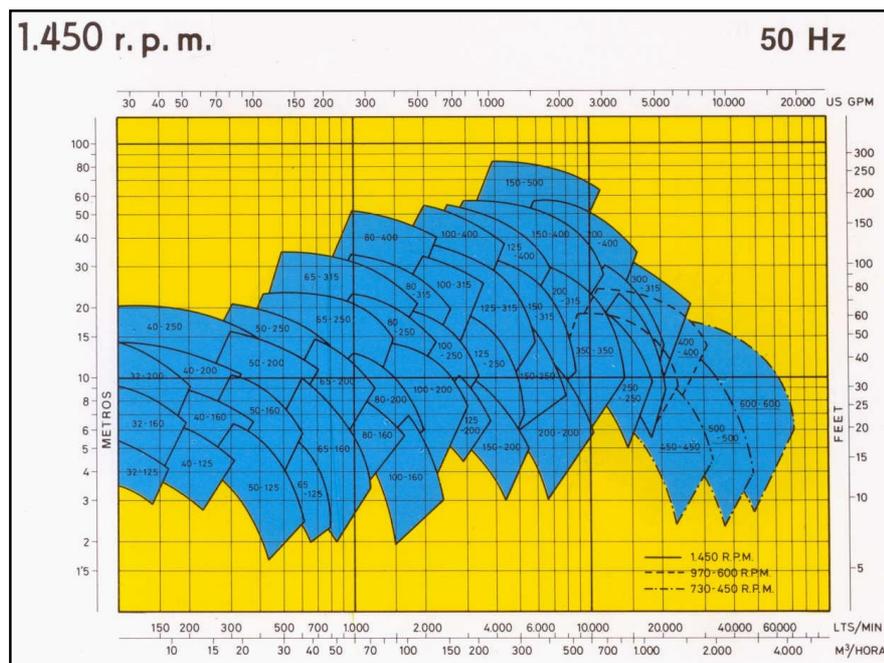
II.4.- Diagramas de selección de bombas.

Como se verá más adelante una misma bomba, disponiendo rodets de distinto diámetro, puede abastecer todo un sector del espacio Q-H. Normalmente los fabricantes ofrecen un diagrama en el que se solapan todos los sectores de todos los tamaños de



bomba construidos para un modelo determinado. Estos diagramas, semejantes al de las figuras adjuntas, son muy útiles para hacer una primera selección o tanteo de la bomba si bien habrá que acudir después a la curva característica para hacer una selección más fina y elegir el diámetro del impulsor.

Dichos diagramas de selección de bombas corresponden siempre a una frecuencia del sistema de alimentación eléctrica, de la que depende la velocidad de giro del motor, –



en España está normalizada la frecuencia de 50 Hz en todo el sistema eléctrico-, y para una velocidad de giro del motor. Suelen estar juntos en el mismo catálogo diagramas muy similares con las velocidades más comunes de 1.450 rpm y 2.900 rpm.

Lo ideal es que el punto de funcionamiento exigido se encuentre en el centro de uno de los sectores representados. Si el punto está en el límite de dos sectores suele tener mala solución y suele ser necesario sacrificar el rendimiento de la bomba. En estos casos es preferible buscar otro fabricante u otro tipo de bomba, o cambiar, en la medida de lo posible el punto de funcionamiento. Siempre que se pueda debe tratarse que el punto de funcionamiento normal de la instalación se encuentre en el óptimo rendimiento y para un rodete medio dentro de la serie, pues los extremos suelen ir muy apurados.

II.5.- Ajuste de curvas características

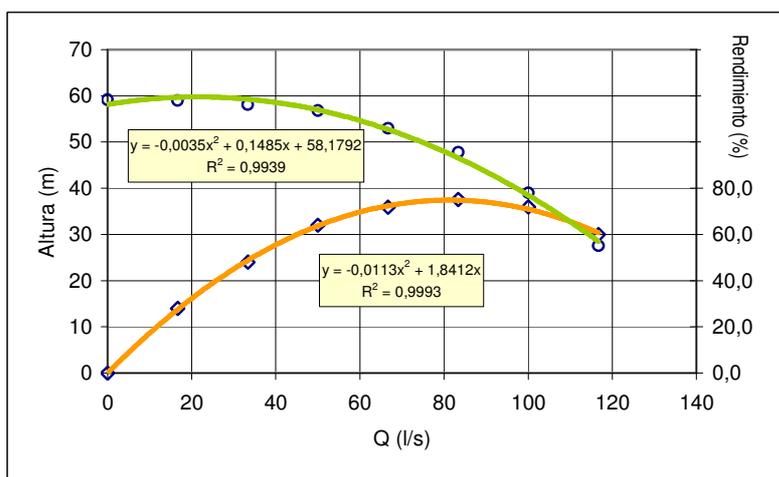
Las curvas características de una bomba determinada se ajustan con gran precisión a parábolas de segundo grado, de acuerdo a las expresiones:

$$H = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2$$

$$\eta = d \cdot Q + e \cdot Q^2$$

Asimismo la potencia absorbida, como producto del caudal por la altura dividido por el rendimiento, tiene una fácil modelización algebraica. No así el NPSH que responde a un proceso empírico de estimación.

En el trabajo e selección de bombas y proyecto e estaciones elevadoras, resulta



FN 125-200 2,900 rpm 212 mm			
l/min	l/s	H (m)	Rend (%)
0	0.00	59.2	0.0
1000	16.67	59.0	28.0
2000	33.33	58.1	48.0
3000	50.00	56.8	64.0
4000	66.67	53.0	71.8
5000	83.33	47.8	75.2
6000	100.00	39.0	72.0
7000	116.67	27.6	60.0

una buena práctica la interpolación de puntos de la curva característica suministrada por el fabricante y el ajuste de parábolas de segundo grado según las expresiones anteriores. Dicho ajuste se puede realizar por el método de los mínimos cuadrados pero, en la

actualidad, las hojas de cálculo de los programas ofimáticos, por ejemplo la Excel de Microsoft, permite el ajuste con gran precisión y comodidad.

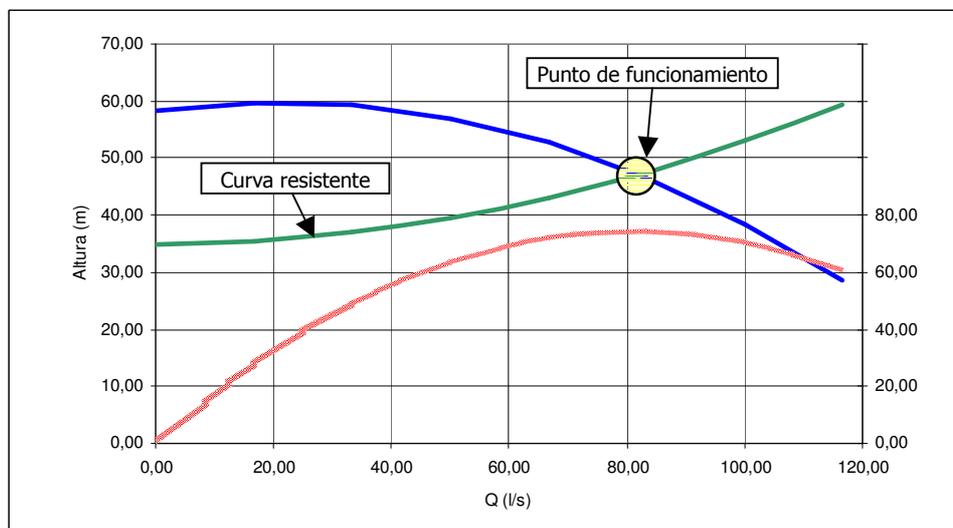
La obtención de los parámetros de dichas parábolas $-a$, b , c , d y e de las expresiones anteriores, su representación gráfica, y la correlación obtenida en el ajuste, tal como se representa en la figura adjunta, permite la obtención con facilidad de las correspondientes curvas características de una determinada bomba para diferentes diámetros del impulsor y para distintas velocidades de giro del motor, según la sistemática que se verá más adelante. De este modo, pueden ensayarse varios diámetros de impulsor y distintas velocidades de giro, en función de las disponibilidades del accionamiento, para encajar con mayor precisión el punto o puntos de funcionamiento de la instalación.

II.6.- Punto de funcionamiento.

La intersección de la curva característica de la bomba con la curva característica de la instalación o curva "resistente" define el punto de funcionamiento de la primera.

La curva resistente se obtiene calculando la altura total de elevación necesaria para cada caudal. Normalmente la componente estática permanece constante mientras la componente dinámica -velocidad y pérdida de carga- crece exponencialmente con el caudal de modo que dicha curva resistente adquiere una forma parecida a la de la figura.

Ambas curvas, tanto la de la instalación como la de la bomba, pueden estar



sometidas a variaciones. La primera porque haya un elemento regulador como una válvula que pueda tomar distintas posiciones y la segunda porque varíe, por ejemplo, la velocidad del motor. Estas situaciones pueden llevar a la existencia de varios puntos de funcionamiento, unas veces porque se busque esta situación como sistema de regulación y otras porque aparezca, más o menos voluntariamente, de una forma espontánea.

II.7.- Variación de la capacidad de bombeo. Semejanza hidráulica.

Si entre dos bombas existe semejanza geométrica, es decir con dimensiones proporcionales y ángulos coincidentes, sus comportamientos cinemáticos y dinámicos coinciden y se dice que dichas bombas son **semejantes**. En este caso los datos de una bomba se pueden trasvasar a la otra a través de las leyes de semejanza que iremos viendo y que, fundamentalmente, al nivel de la selección de bombas para el diseño de la estación elevadora, afectan a:

- Diámetro del impulsor (D)
- Velocidad de giro (n)

Este fenómeno es muy importante para los fabricantes pues con una misma bomba pueden atender, con ciertas limitaciones, distintas condiciones de servicio a través del **recorte del rodete** -variación de D- o del cambio del motor por otro de **distinta velocidad** -variación de n-.

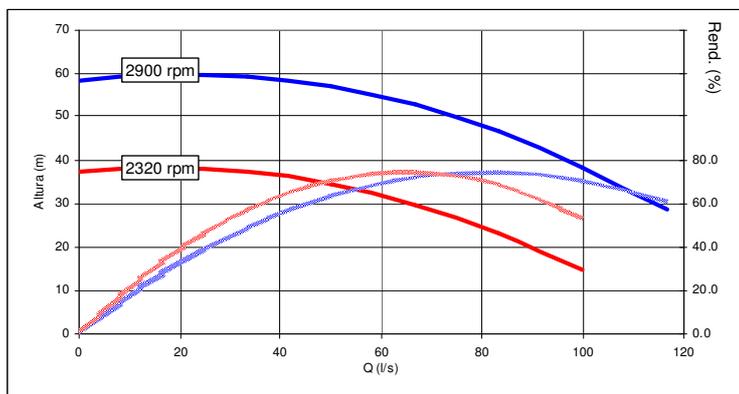
En la siguiente figura, obtenida de introducir la relación de velocidades α en las parábolas ajustadas anteriormente, se ilustra el funcionamiento de una bomba a distintas velocidades de giro. En este caso la bomba es semejante a sí misma y las ecuaciones de semejanza por la que pueden obtenerse todas las curvas a través de una de ellas son:

Variación de velocidad :

$$\frac{n}{n'} = \alpha ; \frac{H}{H'} = \alpha^2 ; \frac{Q}{Q'} = \alpha ; \eta = \eta'$$

$$H = a.\alpha^2 + b.Q.\alpha + c.Q^2$$

$$\eta = \frac{d}{\alpha}.Q + \frac{e}{\alpha^2}.Q^2$$



En estas ecuaciones se observa que trabajando la bomba en puntos homólogos, en puntos de igual rendimiento, al reducir la velocidad, por ejemplo a la mitad, el caudal se reduce a la mitad, la altura de elevación la cuarta parte, y la potencia absorbida, por tanto, se reduce a la octava parte.

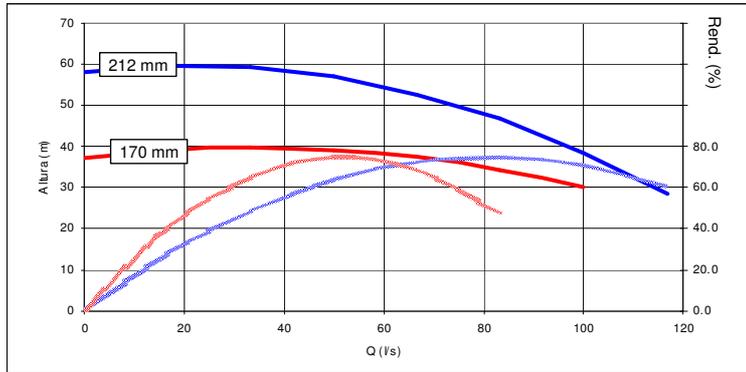
En la figura siguiente se muestran las curvas características de una bomba con varios diámetros de rodete, obtenidas asimismo de aplicar las leyes de semejanza a las parábolas ajustadas con anterioridad. De la ley de semejanza se deduce que la relación de caudales y alturas de elevación se mantiene constante e igual al cuadrado de la relación de los diámetros, mientras que la relación de potencias es igual a la cuarta potencia de dicha relación. Las ecuaciones que rigen este recorte son:

Recorte del impulsor :

$$\frac{r}{r'} = \lambda; \frac{H}{H'} = \lambda^2; \frac{Q}{Q'} = \lambda^2; \frac{P}{P'} = \lambda^4$$

$$H = a.\lambda^2 + b.Q + \frac{c}{\lambda^2}.Q^2$$

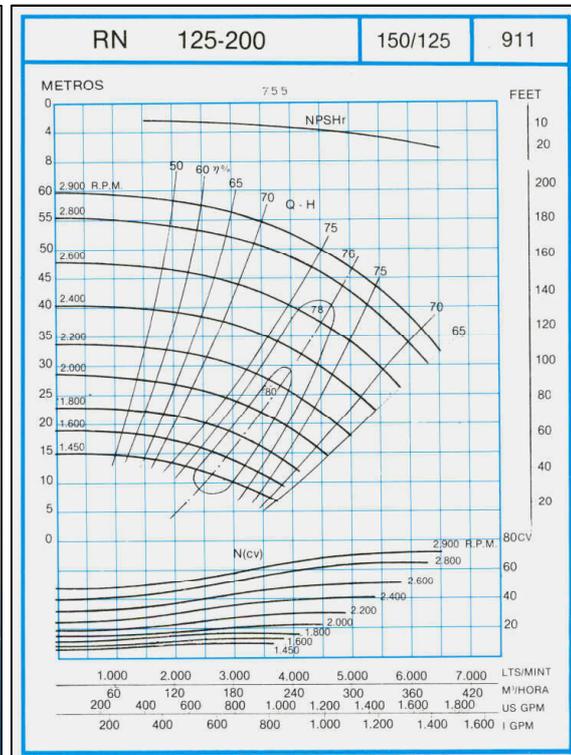
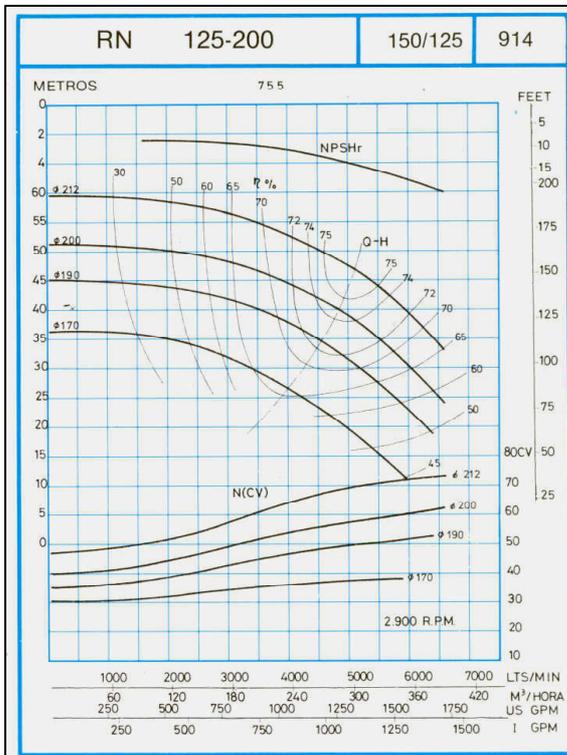
$$\eta = \frac{d}{\lambda^2}.Q + \frac{e}{\lambda^4}.Q^2$$



Para ver la importancia de esta cuestión, basta calcular que un recorte del 20 % del diámetro inicial del impulsor ($\lambda = 0,8$), por ejemplo, significa una reducción del caudal y de la altura de elevación en puntos semejantes del 36 % ($1 - 0,8^2 = 0,36$), y una reducción de la potencia consumida de un 59 % ($1 - 0,8^4 = 0,59$).

Aparte de la representación anterior, es frecuente encontrar una representación del rendimiento como las de las figuras siguientes, en las que el rendimiento se representa en forma curvas cerradas con tendencia a ser paralelas a parábolas de segundo grado que pasan por el origen. Estas parábolas se conocen por el nombre de **curvas de isorrendimiento**.

Como es natural, siempre que sea posible, habrá que elegir la velocidad y el



diámetro del rodete, para una bomba dada, de modo que la zona de funcionamiento este dentro de las parábolas de mejor rendimiento.

Tanto la variación de velocidad como el recorte del rodete, y sobre todo este último, tienen interés para resolver problemas en instalaciones en funcionamiento. En ocasiones, un error en el proyecto o un cambio de las condiciones de explotación conducen, cuando no a la inutilidad de la misma, a unos rendimientos muy bajos al desplazarse el punto de funcionamiento. Estos problemas pueden tener una solución sencilla mediante el cambio de los impulsores, o el recorte de los existentes, o mediante el cambio del motor.

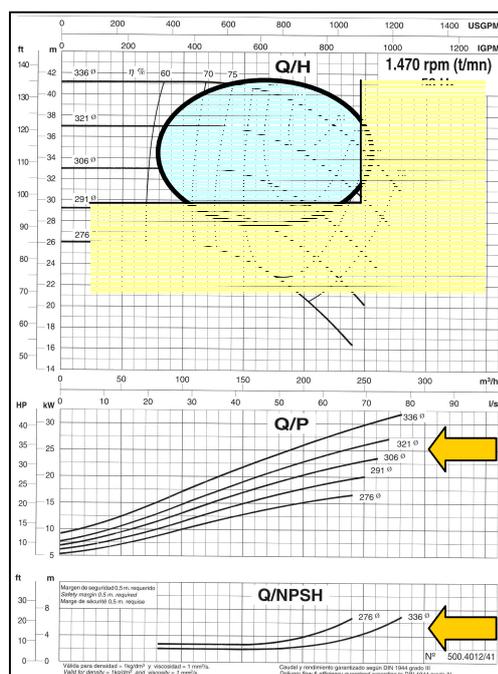
La **variación de velocidad** en las bombas centrífugas, aparte de resolver problemas específicos en situaciones anómalas, puede utilizarse, y de hecho se utiliza cada vez con más frecuencia, para regulación de estaciones de bombeo que se ven sometidas a una demanda variable.

El desarrollo de la electrónica de potencia, en particular la aparición en el mercado de los modernos **convertidores de frecuencia**, posibilita el accionamiento con variación de velocidad de motores eléctricos asíncronos de un modo fácilmente "automatizable".

III.- NOCIONES DE DISEÑO DE INSTALACIONES CON BOMBAS

Si hasta aquí el planteamiento ha sido de orden teórico, en lo que se refiere al funcionamiento hidráulico de las bombas en el diseño de una instalación, y a los aspectos prácticos, conviene hacer énfasis en los siguientes matices:

- ❑ **Recirculación.** Aunque el fenómeno es más amplio y tiene gran relación con el diseño hidráulico y la calidad final de un modelo, conviene precisar que el recorte de rodetes tiene un límite inferior al que los fabricantes suelen acercarse, cuando las condiciones de la oferta son apuradas, hasta situaciones de riesgo. Dicho riesgo se deriva de que, al conservarse la carcasa y la geometría de la estructura difusora, puede existir un espacio demasiado grande en la carcasa no ocupado por el rodete de suerte que la componente de velocidad en algún punto pueda anularse, formando **remansos**, o incluso invertirse, dando lugar al fenómeno de la **recirculación**.
- ❑ **Aspiración: cavitación y NPSH.** Por su importancia, se dedica un apartado especial a describir y analizar el fenómeno de la cavitación y las necesidades de energía en la aspiración de las bombas (NPSH).
- ❑ **Variación del punto de trabajo.** La variación del punto en el que debe trabajar la bomba puede producirse por variación



de las condiciones iniciales respecto a lo proyectado, por variación de la característica hidráulica el circuito alimentado, o de la aspiración, o por deterioro de los elementos internos de la bomba. Para evitar que dichas variaciones afecten a la vida útil de la bomba y a su rendimiento, es fundamental que éstas sean previstas inicialmente con la disposición de equipos de funcionamiento elástico e inicialmente holgado.

- ❑ **Potencia demandada.** Problemas iniciales de diseño, o variaciones desatendidas de las condiciones de trabajo de la bomba, suelen llevar a situaciones en las que se apura en exceso la potencia servida por el motor, en ocasiones también los circuitos eléctricos de alimentación, protección o maniobra.

Algunos de estos conceptos pueden visualizarse en el gráfico adjunto en el que se ha limitado mediante una elipse el campo de trabajo en el que debe proyectarse una bomba. En general debe huirse de la parte derecha de la curva característica, donde se dispara la potencia absorbida y el NPSH_r, además de ser más probables los fenómenos de recirculación por la mayor velocidad del agua, y mayor turbulencia, en el cuerpo de la bomba. También han de evitarse los recortes excesivos del impulsor, la parte inferior del gráfico, por los problemas expuestos de posible recirculación. Asimismo, en el caso de velocidad variable, las velocidades bajas conducen a problemas hidráulicos semejantes a los del recorte excesivo, además de problemas de calentamiento del motor por razón de la menor velocidad de giro y menor corriente de aire de refrigeración. En general, no es conveniente que la velocidad de la bomba sea inferior al 75 % de la nominal.

En cuanto a los aspectos mecánicos del proyecto de estaciones elevadoras, cabe insistir en:

- ❑ **Empujes sobre la bomba.** Desatendida con cierta frecuencia esta cuestión, es importante calcular los empujes que pueden producirse en la bomba y diseñar adecuadamente las bancadas y elementos resistentes.
- ❑ **Componentes y materiales.** Aparte de la definida por el comportamiento hidráulico de la bomba, la calidad de estas máquinas se completa con la de los materiales elegidos para su fabricación.
- ❑ **Ensayo de bombas.** Es conveniente que las bombas, sobre todo las de cierta envergadura, sean probadas inicialmente para verificar que cumplen las condiciones especificadas, así como que puedan ser realizadas comprobaciones individualizadas de su comportamiento en la propia instalación.
- ❑ **Conservación y mantenimiento.** Pese a ser una máquina robusta y necesitada de poco mantenimiento, resulta necesario un mantenimiento preventivo y una revisión periódica de su estado general.

III.1.- Cavitación y NPSH.

Un fenómeno asociado normalmente a todos los sistemas hidráulicos pero, en especial a las bombas, es la **cavitación**. Los términos de la ecuación de la energía de Bernouille, vista al principio, son intercambiables entre sí permaneciendo constante la energía total. Si una masa líquida se ve obligada a aumentar su velocidad, este aumento de energía dinámica implica necesariamente una disminución de las componentes

estáticas, cota o presión. Si suponemos la cota constante, es claro que cualquier aumento de velocidad lleva aparejado una disminución de presión.

La disminución de presión tiene su límite en la presión de vapor del agua, es decir, en la presión a la cual el agua se evapora a la temperatura del proceso. Las bombas son muy propicias a estar en las proximidades de la presión de vapor del fluido porque se generan grandes velocidades en su interior, primero, y porque la energía disponible en la aspiración es muy baja.

Si se llegan a producir las burbujas de vapor se crea un flujo bifásico - líquido/vapor- que bloquea el funcionamiento de la bomba y cambia la curva característica al disminuir la sección de paso por el vapor. Las burbujas se mueven a las zonas donde aumenta la presión y colapsan pasando a la fase líquido. Tanto la formación de burbujas como su colapso llevan asociadas grandes cantidades de energía que conducen a la destrucción progresiva del rodete. Normalmente se aprecia un típico "bombeo de grava" y una merma de las prestaciones de la bomba agravada con el tiempo por la destrucción del rodete.

El término NPSH disponible ($NPSH_d$) es la cuantificación de la energía hidráulica absoluta -referido al cero absoluto de presión- que se dispone en la aspiración de una bomba, a la altura de su eje, para una instalación concreta. Es decir, es una característica de la instalación que se refiere a la energía total puesta a disposición de la bomba y que puede ser transformada en velocidad hasta el límite de la cavitación. Viene dada por la expresión:

$$NPSH_d = \frac{1}{\gamma} (p_d + p_a - p_v) - \frac{v^2}{2g} - H_{v,a} \pm H_{g,a}$$

donde p_d es la presión en el depósito de aspiración, p_a la presión atmosférica -aproximadamente 10 mca-, p_v la presión de vapor -para el agua a 20°C es de 0,2 m.-, $H_{v,a}$ la pérdida de carga en el conjunto de la aspiración y $H_{g,a}$ la altura de la lámina del depósito de aspiración respecto al eje de la bomba que irá con signo positivo cuando la lámina del depósito esté sobre la bomba.

Si el depósito es abierto $p_d=0$ y se desprecia el efecto de la velocidad, la ecuación anterior se redondea al valor más habitual de:

$$NPSH_d = 10 - H_{v,a} \pm H_{g,a}$$

El $NPSH_r$ es un valor experimental que representa la energía mínima que ha de disponer una determinada bomba para que funcione libre de cavitación. Es, por tanto, una característica de la bomba necesaria para su selección y que por sí misma se convierte en un parámetro de calidad importante. Naturalmente habrá de cumplirse la relación:

donde el margen de seguridad normalmente adoptado es de 1,0 m.

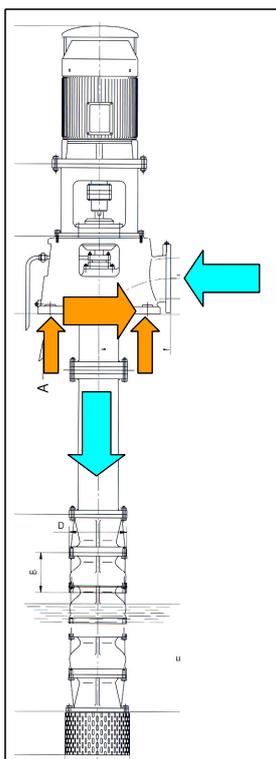
$$NPSH_d(m) \geq NPSH_r(m) + 1$$

Cuando la bomba, no el motor, trabaja sumergida como en el caso de las bombas verticales, suele expresarse el término **sumergencia** en lugar del $NPSH_r$, que tiene un sentido análogo, pues es la altura mínima de agua sobre el impulsor más bajo que permite el funcionamiento correcto de la bomba.

Otro fenómeno que se verá más adelante, asociado de algún modo al $NPSH_r$, es el de la **formación de vórtices** por el cual, aun habiendo suficiente $NPSH_d$, pueden formarse burbujas y cavitación por la creación de caminos preferenciales -de más velocidad- en las venas de aproximación a la aspiración. Este fenómeno está asociado a la geometría de la aspiración y conduce en ocasiones a la formación de "tubos de aire" en el interior de la masa líquida que suponen una entrada directa, permanente o intermitente, de aire atmosférico a la bomba.

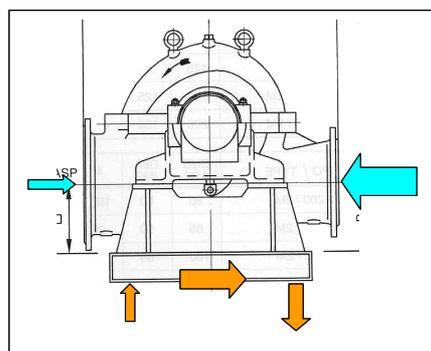
III.2.- Empujes producidos en las bombas

De modo intuitivo, debe verse la bomba como un tapón situado en un punto de un sistema a presión, siendo el empuje producido en la misma el producto de la presión interior por la superficie sobre la que se aplica. Si la determinación de dicha superficie de aplicación puede resultar incierta puede tomarse como mínimo la de la brida de impulsión, o mejor la de la tubería de impulsión, de modo que se tome en consideración el empuje del cono de reducción que normalmente se dispone en la salida de la bomba.



Es asimismo necesario considerar la dirección y el eje en el que se produce dicho empuje. En las bombas verticales, por ejemplo, que se apoyan en la obra civil a través del cabezal de descarga, se produce una tracción vertical por parte de la columna de la bomba y un empuje horizontal de la tubería de impulsión, normalmente horizontal. En la figura adjunta se representan estos empujes y las reacciones que se producen sobre los anclajes. Si la tubería de impulsión esta anclada por un extremo a la obra civil, y esta es rígida (sin elementos elásticos o libres) y capaz de resistir a tracción dicho empuje horizontal, como suele ser habitual, dicho empuje es soportado por el mencionado anclaje y no se transmite a la bomba. Si hubiese un elemento elástico interpuesto, tales como los manguitos de desmontaje o antivibratorios que normalmente se disponen, se verificaría el empuje en ambos extremos: la bomba y el colector, debiendo ser resistido en los dos.

En el caso de las bombas horizontales de cámara partida, como se vio al describir éstas, el empuje axial producido en el impulsor se ve compensado por razón de la simetría del mismo. El empuje radial tiene una resultante nula al ejercerse por igual en todas las direcciones del círculo. Queda, por tanto, el empuje



transmitido por la tubería de impulsión que, como en el caso de las bombas verticales, puede absorberse por el colector de impulsión si éste está anclado en un extremo y es capaz de resistir la tracción.

Cada modelo y tipo de bomba, en cada tipo de instalación, sufre y transmite unos determinados esfuerzos que es necesario analizar en cada caso. El cuerpo de la bomba, y todos los elementos que la componen, debe estar diseñado para absorber y transmitir los esfuerzos propios de su funcionamiento y la presión interna, pero no siempre dichos esfuerzos se transmiten y soportan únicamente a través de la bancada. En ocasiones, las tuberías de impulsión y aspiración tienen cierta responsabilidad que debe conocerse y calcularse.

III.3.- Componentes y materiales

La bomba centrífuga es una máquina en la que tanto el diseño mecánico, geometría de los componentes, ajustes y acabados, como la calidad de los materiales empleados en la fabricación de los mismos, intervienen de forma decisiva en su rendimiento, eficacia y durabilidad.

El cuerpo de la bomba y el impulsor son los elementos decisivos en el comportamiento hidráulico de ésta y, dada su forma, de geometría compleja, sólo es posible su fabricación mediante la fundición de diferentes metales en moldes que se construyen a partir de modelos, normalmente de madera o resinas. Dichos modelos, que normalmente son desarrollados y perfeccionados a lo largo de un proceso de años, constituyen la propiedad más valiosa de cada fabricante, y el gran activo hidráulico de cada marca o firma comercial, que conforma su catálogo en función de los modelos disponibles, tratando de cubrir todas las posibilidades de bombeo.

Después, los procedimientos de fabricación, los mecanizados, ajustes y ensamblajes, y la calidad metalúrgica de los materiales empleados en fundiciones y mecanizados, conforman el resultado final de la bomba, frecuentemente auditados por procedimientos de calidad cada día más complejos.

Se detallan a continuación, con algunas ideas generales en torno a los mismos, los componentes principales de la bomba centrífuga:

- **Cuerpo de bomba.** Tiene una importantísima función hidráulica, por cuanto conduce el fluido impulsado por el rodete a la tubería de impulsión, y una función mecánica, por cuanto soporta y transmite todos los esfuerzos que se producen en su funcionamiento. En bombas de una cierta envergadura, en el cuerpo de bomba hay un elemento llamado **difusor**, formado por álabes fijos en el interior del cuerpo de bomba que tienen la función hidráulica de servir de transición de la velocidad del fluido entre la salida del impulsor y su recorrido por el caracol hasta la salida.

Naturalmente el cuerpo de bomba ha de resistir, aparte las sollicitaciones mecánicas, la presión interior de funcionamiento, del mismo modo que cualquier equipo hidráulico, y debe tener sus bridas de conexión a las tuberías de aspiración e impulsión normalizadas según la presión nominal de fabricación.

Los cuerpos de bomba, normalmente de diseño muy robusto, suelen

fabricarse con fundición, gris o nodular, siendo muy excepcionales las fundiciones inoxidable, y muy raras las fundiciones de bronce. En tallas pequeñas se emplean materiales plásticos como el polietileno.

Sobre la fundición bruta se realizan diversos mecanizados –alojamiento de aros de desgaste, alojamiento de cojinetes, bridas de conexión, tapones, etc.– y diversos tratamientos superficiales y acabados en la parte hidráulica al objeto de eliminar pérdidas de rendimiento.

Salvo casos de cavitación severa, esfuerzos externos anormales, o agresiones de tipo químico o de abrasión mecánica por la calidad de las aguas servidas, normalmente el cuerpo de bomba sufre poco desgaste y resiste con facilidad durante toda la vida útil de la bomba.

- ❑ **Impulsor.** Recibe la potencia del eje, al que va solidariamente acoplado, y la transforma en energía hidráulica que adquiere el fluido en forma de velocidad, la transferida por la velocidad de rotación del impulsor. Su característica resistente viene marcada por el par de rotación generado entre el acoplamiento del eje y la resistencia del agua en la periferia. Su geometría define en gran medida el rendimiento y comportamiento de la bomba.

Como se ha visto, un parámetro de diseño para cada aplicación de bombeo específica es el diámetro final del impulsor, que se consigue recortando el impulsor original de mayor diámetro, mediante torneado, antes de su ensamblaje en la bomba. Se suele mecanizar asimismo el acoplamiento con el eje que presenta varias modalidades, siendo la más común la chaveta.

Los impulsores más corrientes se fabrican normalmente con fundición nodular, también con materiales plásticos en bombas pequeñas, pero en bombas de cierta envergadura y calidad está generalizada la utilización del bronce. Es más rara la utilización de fundiciones inoxidable puesto que la resistencia frente a la agresión de tipo químico y la oxidación está suficientemente asegurada por el bronce.

Al contrario que el cuerpo de bomba, el impulsor, además de poder sufrir los efectos de la cavitación, la abrasión o el ataque químico, sufre un desgaste consecuencia de su uso normal, que puede conducir a pérdidas de rendimiento importantes y a modificaciones severas de su punto de funcionamiento hidráulico.

- ❑ **Eje.** El eje de la bomba transmite al impulsor la potencia de rotación suministrada por el motor, y transmite al cuerpo de la bomba, a través de los rodamientos, los esfuerzos y las cargas que se producen en el impulsor. Cuenta con dos elementos de acoplamiento –el del impulsor y el del motor– e inciden en el mismo los elementos de estanqueidad, pues el eje es la única componente móvil que ha de atravesar el cuerpo de la bomba.

Se fabrican, de un modo casi generalizado, mediante el mecanizado de precisión de barras de acero inoxidable de alta calidad, y sufren con frecuencia tratamientos superficiales que aumentan su dureza.

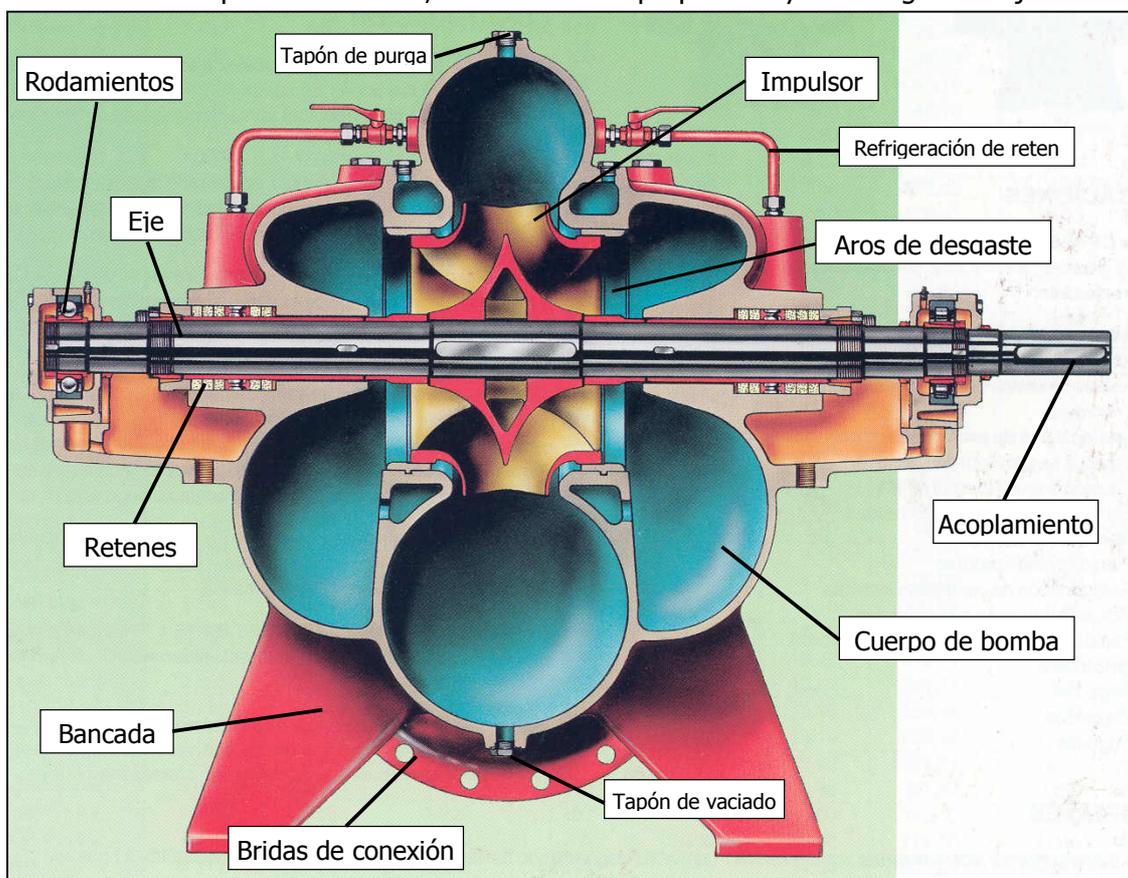
Después de acoplado el impulsor, y previamente a su ensamblaje en el cuerpo de bomba, es necesario realizar un equilibrado dinámico del conjunto, al

objeto de evitar vibraciones y un funcionamiento anormal. Asimismo, después de montada la bomba completa en su bancada, el motor de accionamiento y su acoplamiento, ha de procederse a la alineación de ambos ejes de modo que se eviten, aún cuando los acoplamientos suelen ser elásticos, traspasos de esfuerzos innecesarios en los dos sentidos.

- ❑ **Rodamientos.** Salvo las bombas muy pequeñas, en las que se confía la sujeción del eje de la bomba a los rodamientos del motor de accionamiento, todas las bombas tienen varios rodamientos que permiten el apoyo del eje en el cuerpo y el giro libre del mismo.

Aparte de los esfuerzos propios de la rotación, el eje tiene otras solicitaciones que han de ser soportadas por los rodamientos. En las bombas de voluta el eje trabaja como una ménsula empotrada en un gran rodamiento que tiene en un extremo la carga radial del impulsor. Además el rodamiento tiene que absorber el esfuerzo de tracción de la componente axial del impulsor. En las bombas verticales todo el esfuerzo es de tracción y el eje se comporta como un tirante anclado al rodamiento con la carga hidráulica del impulsor en una punta. En las bombas de cámara partida los rodamientos, situados a ambos extremos del eje, se simplifican mucho pues los esfuerzos axiales se anulan prácticamente, de modo que el eje trabaja como una viga apoyada en los extremos con la carga central del impulsor.

Aunque se utilizan, en bombas pequeñas y en algunas ejecuciones



especiales, los cojinetes de fricción contruidos en bronce o en materiales plásticos como el teflón, lo más frecuente es disponer robustos rodamientos de bolas. Éstos han de funcionar convenientemente lubricados y engrasados, y normalmente están en cámaras estancas bañadas de aceite, cuya vigilancia y conservación es fundamental.

- ❑ **Retenes.** En el punto o puntos en que el eje que acciona el impulsor atraviesa el cuerpo de la bomba (en las bombas de cámara partida lo hace en dos puntos) ha de preverse un mecanismo que permita el giro libre del eje sin que la presión interior del cuerpo de la bomba, cuando está ésta en funcionamiento, no produzca grandes fugas de agua al exterior. Es éste un aspecto muy importante del diseño de bombas pues un diseño defectuoso o una conservación inadecuada conduce a daños irreparables en la bomba.

En los motores de las bombas de motor sumergido este aspecto reviste especial importancia, pues no puede permitirse que entre agua en el motor. Además su mantenimiento suele ser complicado dado que la bomba suele instalarse en sondeos o pozos donde su extracción es muy complicada.

Tradicionalmente el problema se ha resuelto mediante cordones trenzados de una fibra vegetal o mineral con amianto y con grafito para facilitar el deslizamiento del eje. Dichos cordones, en número variable, se disponen rodeando al eje en una cámara especialmente diseñada para su alojamiento en la que, en uno de sus extremos, puede deslizarse un anillo metálico empujado por tornillos para impedir que los cordones se salgan de su alojamiento, y para producir en estos cierta presión que aumenta el ajuste de los mismos al eje. Estos, conocidos como "prensa-estopa", han de perder algo de agua para asegurar su lubricación y refrigeración, y suelen tener un desgaste que aumenta la pérdida de agua y obliga a su apriete periódico. Si se aprietan mucho pueden rozar en exceso en el eje, y producir un desgaste irreparable en el mismo, además de consumir parte de la energía suministrada por el motor.

En la actualidad se han perfeccionado mucho, y se han abaratado sensiblemente, los cierres mecánicos, de suerte que en bombas relativamente grandes, y en particular en las de motor sumergido, se han generalizado. Éstos están formados por unos platos, unos fijos al cuerpo de la bomba y otros que giran con el eje, contruidos en materiales muy duros y con gran precisión, que rozan entre sí no dejando hueco para la salida del agua, pero de modo que su fricción no produce desgaste ni calentamiento.

- ❑ **Aros de desgaste.** La diferencia de presiones a ambos lados del impulsor, la aspiración y la impulsión, exige que se garantice la estanqueidad en ambas cámaras del cuerpo impidiendo, o minimizando, el retorno de agua desde la cámara de impulsión a la de aspiración.

Dicha estanqueidad se consigue mediante el ajuste, lo más preciso posible pero permitiendo el giro libre del impulsor, entre el cuerpo de bomba y el impulsor. Para impedir que el desgaste del ajuste descrito inutilice el cuerpo de la bomba y el impulsor, se disponen unos aros que posibilitan su sustitución en operaciones de mantenimiento de la bomba, llamados aros de desgaste. Normalmente dicho aros se

fijan al cuerpo de bomba, sufren un mecanizado muy preciso ajustado al impulsor, y se construyen con un material más blando que el del impulsor para impedir el deterioro del segundo. Este aspecto tiene mucho que ver con el rendimiento de la bomba, no tanto cuando la misma es nueva en el momento de su prueba en fábrica, como en la condiciones de explotación, cuando un excesivo desgaste facilita que una parte del agua impulsada retorne a la zona de aspiración.

III.4.- Ensayo y prueba de bombas

Probablemente la normativa más completa en el campo de las bombas centrífugas sea la del Hydraulic Institute de ANSI (American National Standard Institute). En particular la norma ANSI/HI 1.4 (M104) desarrolla ampliamente los aspectos de ensayos y bancos de ensayo de bombas centrífugas. También es muy utilizada en este sentido la norma DIN 1944.

Normalmente se realizan los siguientes ensayos:

- ❑ **Rendimiento.** Consiste en determinar el rendimiento, junto a los valores de caudal y altura, en varios puntos del funcionamiento de la bomba. Se empieza a válvula cerrada, se recorren los puntos de funcionamiento habitual de la bomba, terminando lo más a la derecha posible de la curva garantizada. Normalmente la potencia consumida se mide por la intensidad de la corriente absorbida por el motor, lo cual introduce la incertidumbre, no despreciable, del rendimiento del motor en cada régimen de giro. Puede validarse en su totalidad sólo cuando se esté considerando, al nivel del pliego de condiciones, el rendimiento conjunto del grupo motor-bomba.
- ❑ **Presión hidrostática.** Siendo extraordinariamente raras las pruebas de rotura del cuerpo, suelen hacerse pruebas a presión hidrostática para comprobar la estanqueidad de juntas y retenes. La presión de prueba puede representar un conflicto si no está previamente definida en el pliego. Conviene introducir una presión al menos 1,5-2 veces la presión máxima de la bomba aunque.
- ❑ **NPSH.** Aunque suele obviarse, resulta fundamental en las instalaciones en las que la aspiración puede estar comprometida, por lo que se ha dicho con anterioridad, la comprobación del valor real de funcionamiento. Para realizar esta prueba se introducen pérdidas de carga en la aspiración de la bomba, mediante el estrangulamiento de una válvula, hasta que se producen ruidos de cavitación en la bomba y una inflexión en las curvas características y de potencia consumida. Debe hacerse para los caudales más elevados de trabajo de la bomba, y suele presentar dificultades para la apreciación del momento en el que se produce la cavitación.
- ❑ **Ruidos y vibraciones.** Se comprueba fundamentalmente con esta prueba el equilibrado del grupo de impulsión y la ausencia de defectos de fabricación. Deben fijarse previamente la el nivel sonoro, la frecuencia y amplitud permisible de las vibraciones. La de ruido suele ser de difícil aplicación, pues hace necesaria una cámara insonorizada, y de escasa utilidad en bombas grandes. Se usa solamente en bombas pequeñas de uso doméstico.

Para las bombas de cierta envergadura, como las habitualmente utilizadas en instalaciones de riego colectivo a partir de 100 Kw, uno de los problemas del ensayo de

bombas es que no existen laboratorios oficiales capaces de realizar las pruebas de rendimiento. Es necesario, por tanto, realizar dichos ensayos en las instalaciones el propio fabricante y no siempre los fabricantes disponen de adecuados bancos de ensayo en España a partir de determinados calibres. Esta dificultad puede superarse convirtiendo en banco de ensayos la propia instalación de bombeo, pero, en caso de que el ensayo sea determinante para la recepción de la bomba, dicha particularidad ha de ser bien recogida en el pliego de condiciones o en el contrato de compra.

En efecto, en instalaciones de cierta envergadura es aconsejable disponer una tubería de "by-pass" entre la impulsión general y la toma, en un punto alejado de la propia aspiración de la bomba creando, de este modo, un circuito cerrado que permite la prueba individualizada de cada bomba. Estrangulada dicha tubería, en el funcionamiento normal de la estación elevadora, mediante una válvula, ésta última puede servir para introducir pérdidas de carga en el circuito para medir aproximadamente diferentes condiciones de funcionamiento de cada bomba.

Si este tipo de instalación, muy sencilla y barata, puede servir para la comprobación rutinaria del rendimiento de la bomba durante su vida útil, puede resultar también muy adecuada para la aceptación inicial del producto. En este caso, muy poco utilizado en la práctica, debe realizarse un protocolo de prueba, en la propia fase de proyecto y en el pliego de condiciones de la adquisición, que deberá acordarse en todos sus términos con el fabricante final, que a su vez deberá responsabilizarse de los parámetros del motor de accionamiento. Por este procedimiento se evita la frecuente dificultad de encontrar un banco de pruebas apropiado, o la de producir desplazamientos innecesarios y costosos de los equipos y el personal que asiste a la prueba, además de que se consigue la prueba verdadera de la bomba instalada en su entorno de trabajo.

Otras comprobaciones, como los diferentes ajustes mecánicos o la calidad metalúrgica de los componentes empleados, suelen confiarse al propio control de calidad del proceso de fabricación, reservándose su verificación concreta a situaciones muy especiales.

III.5.- Conservación de bombas

Con un diseño cuidadoso de la estación elevadora, evitando la cavitación e imposibilitando las entradas de aire en el sistema de impulsión, cuando el agua impulsada no es mecánicamente abrasiva ni químicamente agresiva, en general, puede afirmarse que la bomba centrífuga es una máquina muy robusta y fiable que tiene pocas necesidades de atención y conservación. De hecho, las bombas verticales de pozo profundo pasan varios años en el interior del pozo sin que sea posible su mantenimiento, pues la extracción es muy costosa, bastando la observación de su comportamiento hidráulico para la comprobación del estado de la misma.

No obstante, necesitando poca vigilancia durante su funcionamiento, es necesario realizar un pequeño mantenimiento preventivo antes de comenzar la campaña de riego, y supervisar periódicamente su funcionamiento al objeto de detectar posibles anomalías (ruidos, vibraciones, cavitaciones, pérdidas de agua o aceite, calentamiento de rodamientos, etc).

Si se dispone de la posibilidad de comprobar el rendimiento de cada bomba, debe realizarse dicha comprobación, una vez al año a la finalización de la campaña de riego, anotándose el resultado cada año, para proceder a su desmontaje y reparación en el caso de observarse una significativa pérdida de rendimiento. En caso de no disponer de dicha posibilidad, debe contarse al menos con una medida de presión en el colector de impulsión y una medida de la corriente consumida por el motor para comprobar que las mismas están en límites admisibles, durante el funcionamiento normal de la bomba.

La mejor y más inequívoca prueba del correcto funcionamiento de una bomba es su rendimiento hidráulico, para lo cual basta tener una medida de la presión en el colector de impulsión, una medida del caudal impulsado y una medida de la corriente eléctrica consumida por el motor, es decir, basta disponer de un manómetro, un caudalímetro u otro sistema de aforo, y un amperímetro.

Muy comúnmente olvidada, la aspiración de las bombas es una fuente de conflictos y pérdidas de rendimiento. Conviene comprobar con frecuencia, al menos una vez al año, la presión o depresión existente en la aspiración de las bombas, al objeto de detectar posibles disfunciones en el colector de aspiración –pérdida de sección por aterramientos, incrustaciones, o entrada de elementos voluminosos; atasco de elementos de desbaste; atoramientos en la estructura de toma; bolsas de aire; etc– que pueden afectar al funcionamiento de la bomba.

En función de la responsabilidad de cada bomba, y de su edad y estado general, es conveniente realizar su desmontaje completo al menos cada cinco años para verificar el estado de sus elementos internos, fundamentalmente impulsor, aros de desgaste, eje y rozamientos, y para limpiar el cuerpo de posibles incrustaciones o depósitos. Normalmente estos elementos delatan, llegado el caso, su funcionamiento anormal durante el funcionamiento de la bomba pero, no obstante, conviene su inspección al objeto de avanzar problemas que podrían verificarse en plena campaña de riego. En algunas estaciones elevadoras para riego se desmontan las bombas cada año, y se reponen con cierta frecuencia los elementos de desgaste y los impulsores.