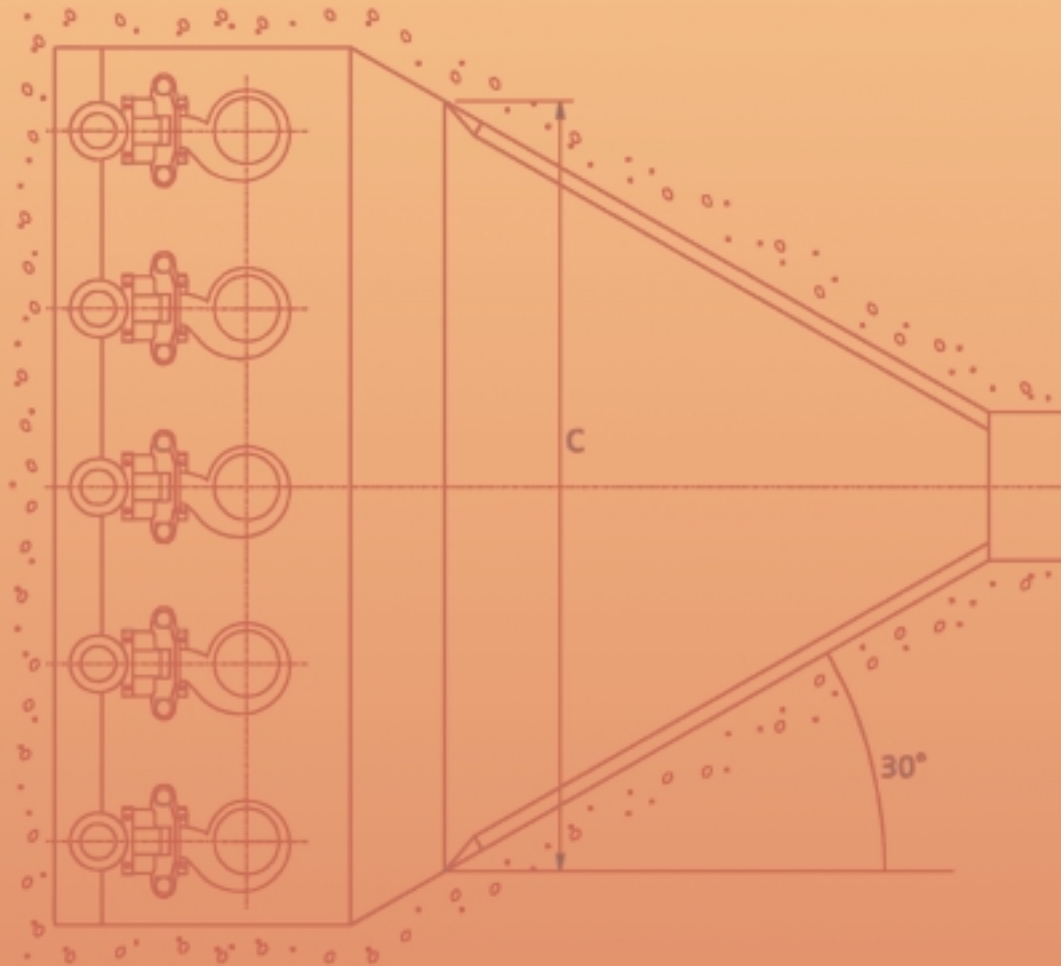


GRUNDFOS AGUAS RESIDUALES



MANUAL DE BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES

**MANUAL DE
BOMBEO DE
AGUAS RESIDUALES**

Introducción

La utilización de bombas sumergibles para aplicaciones de bombeo de aguas residuales y de drenaje ha aumentado considerablemente en las últimas décadas después de su aparición en el mercado. La introducción de bombas sumergibles para servicio pesado con motores de más de 500 kW significa que son también adecuadas para servicios municipales de bombeo centralizados. Su gran calidad y los buenos resultados conseguidos han eliminado prácticamente la utilización de bombas convencionales en los servicios municipales.

Por la misma razón, debido a las características especiales de las bombas sumergibles, ha sido necesario desarrollar nuevos conocimientos respecto a su implementación, tal como el diseño de estaciones de bombeo. Esta labor ha sido desarrollada tanto por fabricantes de bombas como por ingenieros municipales.

La finalidad de este libro es ofrecer de forma concisa la información más reciente, tanto de bombas sumergibles como de estaciones de bombeo, para provecho de todos los profesionales que quieren estar al día. El libro está dividido en secciones según los temas tratados.

La sección 1 describe la teoría básica de bombeo, proporcionando información básica de referencias para evaluar el rendimiento de las bombas. El diseño y la construcción de las bombas sumergibles están descritos en la sección 2. La sección 3

trata sobre el funcionamiento de las bombas, ofreciendo métodos para calcular su funcionamiento en distintas instalaciones. Se comentan también factores que influyen en la selección de bombas. La sección 4 ofrece información de pruebas de bombas. Se describe el diseño básico de estaciones de bombeo en la sección 5, proporcionando información del diseño, tanto para aplicaciones grandes como pequeñas. La sección 6 describe la regulación continua del funcionamiento de las bombas sumergibles mediante control de frecuencia. El concepto del coste del ciclo vital de bombas y estaciones de bombeo está presentado en la sección 7. La sección 8 trata sobre temas relacionados con la puesta en marcha de las bombas, mientras que su funcionamiento y mantenimiento están descritos en la sección 9. La sección 10 trata sobre el control y la regulación de estaciones de bombeo. El apéndice A proporciona información de las características hidráulicas de los componentes comunes de tuberías para calcular las pérdidas en las mismas. El apéndice B presenta un método para determinar la capacidad de una estación de bombeo de aguas residuales y la frecuencia de arranques de las bombas.

Nuestro objetivo es que este libro resulte fácil de leer y comprender. Por lo tanto, la presentación está acompañada de muchas ilustraciones que ofrecen ejemplos e información complementaria de cada tema.

Índice

1 Teoría de bombeo	7	3.3.2 Pérdidas locales	43
1.1 Ecuación de altura	7	3.3.3 Curva característica de la tubería de impulsión	43
1.1.1 Caudal con pérdidas o aumento de energía	7	3.4 Tamaño de la tubería de impulsión	44
1.1.2 Líquido que fluye de un depósito	8	3.4.1 Economía	44
1.2 Ecuación básica de bombas	8	3.4.2 Paso libre de sólidos	45
1.3 Curva y pérdidas de bombas	10	3.4.3 Prevención de depósitos de sólidos y lodos	45
1.3.1 Efecto del número finito de álabes	10	3.4.4 Golpes de ariete	45
1.3.2 Pérdidas por fricción H_f	10	3.4.5 Prevención de golpes de ariete	47
1.3.3 Pérdidas por discontinuidad H_s	10	3.5 Punto de trabajo de la bomba	48
1.3.4 Pérdidas por fugas H_v	10	3.5.1 Funcionamiento con una bomba	48
1.3.5 Otras pérdidas	11	3.5.2 Funcionamiento en paralelo, bombas idénticas	48
1.4 Cavitación y NPSH	11	3.5.3 Funcionamiento en paralelo, bombas diferentes	48
1.4.1 Definición de NPSH	12	3.5.4 Funcionamiento en serie	49
1.4.2 Plano de referencia	12	3.5.5 Punto de trabajo real	49
1.4.3 NPSH necesario	12	3.6 Bombeo de lodos	50
1.4.4 NPSH disponible	14	3.7 Tuberías de impulsión complejas	50
1.4.5 Margen de seguridad de NPSH	15	3.7.1 ¿Qué ocurre en una tubería de impulsión compleja?	51
1.4.6 Remanso de pozos de aspiración	15	3.7.2 Determinación de altura	51
2 Construcción de bombas	16	3.7.3 Tamaño de la tubería y velocidad del caudal	51
2.1 General	16	3.7.4 Elección de bomba	51
2.2 Bomba	18	3.7.5 Medidas de ratificación	52
2.2.1 Impulsores	18	3.8 Evaluación del punto de trabajo de estaciones de bombeo paralelas	52
2.3 Motores	27	4 Pruebas de bombas	54
2.3.1 General	27	4.1 Dispositivos de pruebas	54
2.3.2 Motores antideflagrantes	27	4.1.1 Pruebas de producción	54
2.3.3 Refrigeración del motor	27	4.1.2 Pruebas in situ, punto de trabajo	55
2.3.4 Estanqueidad del motor	29	4.2 Pruebas de aceptación	56
2.3.5 Cojinetes del motor	31	4.2.1 Normativas de pruebas	56
2.3.6 Dispositivos de protección de motor	32	5 Estaciones de bombeo	59
2.4 Conexión de la bomba	34	5.1 Diseño básico de estaciones de bombeo ..	59
2.5 Materiales de construcción, corrosión y desgaste	36	5.1.1 Volumen y área de la superficie de la fosa húmeda	59
2.5.1 Resistencia a la corrosión	36	5.1.2 Tubería de entrada de la estación de bombeo	60
2.5.2 Resistencia al desgaste	37	5.1.3 Forma del suelo de la fosa húmeda	60
2.5.3 Líquidos abrasivos	37	5.1.4 Niveles de parada	61
3 Funcionamiento de la bomba	38	5.1.5 Niveles de arranque	62
3.1 Altura de bomba	38	5.1.6 Dimensión y diseño de la tubería de aspiración	62
3.1.1 Bomba sumergibles	38	5.1.7 Tubería interior de estaciones de bombeo	63
3.1.2 Bombas instaladas en seco	39	5.1.8 Dispositivos de agitado	64
3.2 Curvas características de la bomba	39	5.1.9 Problemas de malos olores en estaciones de bombeo	64
3.2.1 Curva H	39		
3.2.2 Curvas de rendimiento	40		
3.2.3 Curvas de potencia	40		
3.2.4 Curva NPSH	40		
3.3 Pérdidas en tuberías y curvas características de la tubería de impulsión	41		
3.3.1 Pérdidas por fricción	41		

5.1.10	Ejemplos de diseño de estaciones de bombeo	64	7.3	Costes de inversión	83
5.1.11	Posiciones de bombas instaladas en seco.....	67	7.4	Costes de energía	84
5.2	Estaciones de bombeo prefabricadas.....	68	7.4.1	Rendimiento a lo largo del tiempo	84
5.2.1	Estaciones de bombeo para instalación en el exterior.....	68	7.4.2	Cálculos de utilización de energía	85
5.2.2	Estaciones de bombeo para instalación en el interior.....	70	7.5	Costes de mantenimiento	85
5.3	Estaciones de bombeo con bombas instaladas en columna.....	70	7.6	Cooperación con proveedores de bombas	86
5.4	Selección de dimensiones de estaciones de bombeo	72	7.7	Publicación del coste del ciclo vital	86
5.4.1	Estaciones de bombeo de aguas residuales normales	72	8	Puesta en marcha	87
5.4.2	Estaciones de bombeo de aguas pluviales.....	72	9	Funcionamiento y servicio	88
5.4.3	Estaciones de bombeo combinadas de aguas residuales y tanques de retención.....	73	9.1	Seguridad	88
5.5	Selección de bomba	74	10	Control y comprobación del estado de estaciones de bombeo	89
5.5.1	Selección de bomba basada en las curvas de bomba.....	74	10.1	Métodos de control local	89
5.5.2	Comprobación del rendimiento de la bomba	74	10.1.1	Unidades de control manual	89
5.5.3	Número de bombas	75	10.1.2	Unidades de control basadas en relés	89
5.6	Condiciones especiales.....	76	10.1.3	Controladores lógicos programables	89
5.6.1	Vibraciones de la bomba	76	10.2	Sensores para control y comprobación del estado de la bomba	90
5.6.2	Ruido de la bomba	77	10.2.1	Sensores del nivel de agua en fosas húmedas	90
6	Bombas de aguas residuales con control de frecuencia	78	10.2.2	Sensor de corriente	91
6.1	General	78	10.2.3	Medidor de kWh	91
6.1.1	Selección del motor de bomba	78	10.2.4	Relé de fallo de fases	91
6.1.2	Frecuencia máxima	78	10.2.5	Dispositivo de comprobación SARI 2	91
6.1.3	Frecuencia y funcionamiento mínimos ...	79	10.2.6	Módulo de estado de alarma ASM 3	92
6.1.4	Curvas de frecuencias de la bomba	79	10.3	Unidades de control de bombas	92
6.1.5	Atascos de las bombas	80	10.3.1	Características de control	92
6.1.6	Requisito de cable EMC	81	10.3.2	Características de la comprobación del estado	94
6.1.7	Corrientes en los cojinetes	81	10.3.3	Parámetros y señales	94
6.1.8	Alta tensión	81	10.3.4	Registro y análisis de datos	94
6.1.9	Motores antideflagrantes	81	10.3.5	Interfase del usuario	95
6.1.10	Valores garantizados	81	10.4	Sistema de control y comprobación a distancia	95
6.1.11	Pruebas con variador de frecuencia (pruebas simultáneas)	81	10.4.1	Diferentes niveles de control remoto	95
6.1.12	Colaboración con el fabricante de bombas	82	10.4.2	Software y hardware	96
7	Evaluación del coste del ciclo vital de la bomba	83	10.4.3	Transmisión de datos	96
7.1	General	83	10.4.4	Transferencia de alarma	97
7.2	Periodo de cálculo	83	10.4.5	Integración de sistemas	97
			10.5	Control y comprobación a distancia, basados en Internet y WAP	97
			Símbolos	100	
			Apéndice A	103	
			Apéndice B	111	

1 Teoría de bombeo

Esta sección es un resumen de la teoría de bombeo de líquidos y proporciona al lector los conocimientos teóricos básicos que son fundamentales para una mayor comprensión del proceso de bombeo.

1.1 Ecuación de altura

La figura 1 muestra parte de un caudal continuo de líquido en un conducto. Entre las dos secciones de observación 1 y 2 ninguna energía es transferida al/del líquido y se supone que el caudal no tiene fricción. Por lo tanto, la energía total del líquido de un plano de referencia horizontal T tiene que ser igual en las dos secciones. La energía total incluye componentes de energía potencial, energía de presión y energía cinética, y para una partícula de líquido con una masa m , la energía en las secciones de observación es como sigue:

Sección	1	2
Energía potencial	mgh_1	mgh_2
Energía de presión	$mg \frac{p_1}{\rho g}$	$mg \frac{p_2}{\rho g}$
Energía cinética	$\frac{1}{2}mv_1^2$	$\frac{1}{2}mv_2^2$

donde ρ es la densidad del líquido y g es la aceleración por gravedad.

Para un caudal sin pérdidas, la energía total en las secciones 1 y 2 será igual, por lo tanto

$$mgh_1 + mg \frac{p_1}{\rho g} + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + mg \frac{p_2}{\rho g} + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad .$$

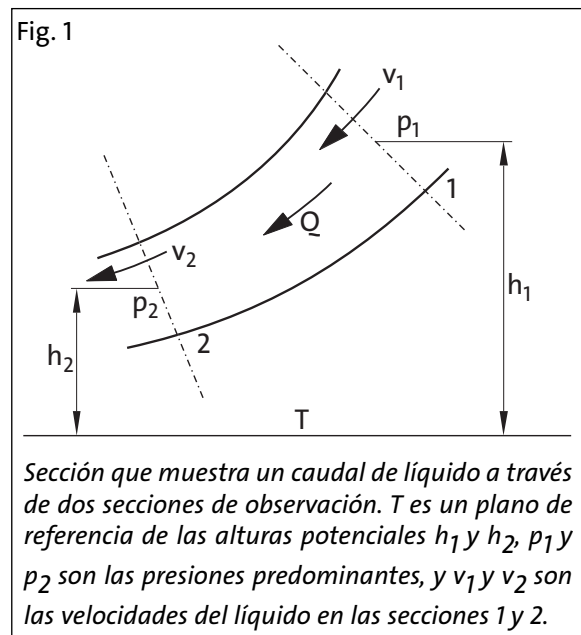
Al dividir ambos lados de la ecuación con el término mg se obtiene

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Esta ecuación se llama ecuación de Bernoulli, en referencia al ingeniero que fue el primero en desarrollarla. Los términos de la ecuación son expresados como alturas, por lo que se denominan altura estática, altura de presión y altura cinética

respectivamente.

La ecuación es esencial para mecánicas de fluidos y puede utilizarse para explicar muchos fenómenos hidrodinámicos, tales como la caída de presión que acompaña una reducción en un área transversal del caudal. En este caso la velocidad del líquido aumenta, y para que la altura total se mantenga constante y suponiendo que la altura potencial no cambia, la presión o altura estática debe disminuir.



1.1.1 Caudal con pérdidas o aumento de energía

Si hay pérdidas en el caudal entre las secciones 1 y 2 de la figura 1, la ecuación de altura 1 puede escribirse

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + H_r \quad (2)$$

donde H_r es la pérdida de carga.

Si se añade energía al caudal, colocando una bomba entre las secciones 1 y 2 de la figura 1, la ecuación 2 puede escribirse

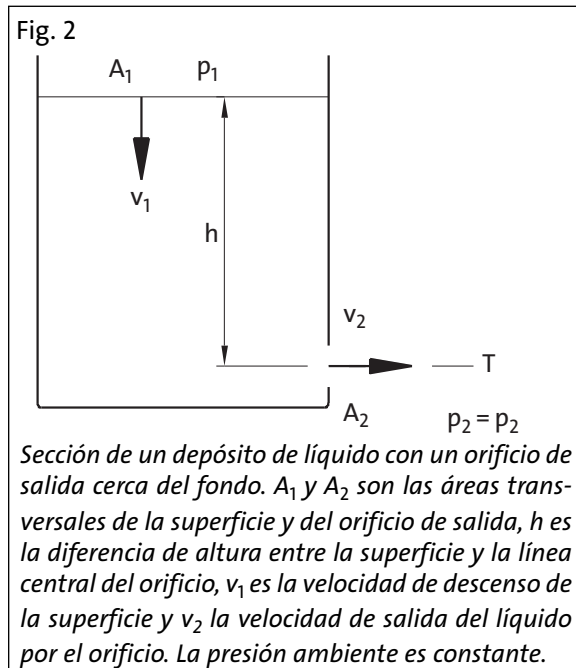
$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + H_r \quad (3)$$

donde H es la altura total de bombeo.

1.1.2 Líquido que fluye de un depósito

Un ejemplo de aplicación de la ecuación de Bernoulli es el cálculo del caudal de un líquido que fluye libremente de un depósito abierto.

La figura 2 muestra un depósito abierto con un orificio de salida cerca del fondo. Con fines prácticos se supone que el área A_2 es mucho mayor que el área del orificio A_2 , y que la presión atmosférica p_1 del depósito es igual a la presión por fuera del orificio, p_2 .



Si elegimos la línea central del orificio como plano de referencia T, el término h_2 es igual a cero y h_1 es igual a h . A_1 es mucho mayor que A_2 , por lo que podemos suponer que la altura cinética $\frac{v_1^2}{2g}$ es cero. Por lo tanto, la ecuación de altura 1 puede escribirse

$$h = \frac{v_2^2}{2g} \quad (4)$$

por lo tanto

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Para el caudal en volumen sin pérdidas se obtiene

$$q_1 = A_2 \sqrt{2gh} \quad (6)$$

Para compensar las pérdidas presentes se ha añadido un coeficiente de caudal μ a la ecuación 6, por lo tanto

$$q_1 = \mu A_2 \sqrt{2gh} \quad (7)$$

El coeficiente de caudal μ depende de la forma del orificio y puede conseguirse en libros de texto sobre la materia. Si se deja descender el nivel del líquido del depósito, la altura de nivel h cambiará, lo que debe tenerse en cuenta en los cálculos.

1.2 Ecuación básica de bombas

Se utiliza la ecuación básica de bombas para calcular y diseñar formas geométricas y dimensiones de bombas centrífugas, así como para calcular la curva Q/H de la bomba.

La figura 3 muestra un álabe de impulsor y sus vectores de velocidad asociados.

- v = velocidad absoluta del líquido
- w = velocidad relativa hacia el álabe
- u = velocidad perimetral
- v_u = componente tangencial de la velocidad absoluta
- v_m = componente radial de la velocidad absoluta

La velocidad relativa es paralela al álabe en cualquier punto dado.

$$\text{También } v_{u1} = v_1 \cdot \cos \alpha_1 \text{ y } v_{u2} = v_2 \cdot \cos \alpha_2$$

Si suponemos que el caudal no tiene pérdidas y el número de álabes es infinito (∞), podemos desarrollar la conocida ecuación básica de la teoría de bombeo, utilizando las leyes de la mecánica. Esta relación se conoce como la ecuación de Euler y se expresa como:

$$H_{t\infty} = \frac{1}{g}(u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}) \quad (8)$$

donde el índice t se refiere a un caudal sin pérdidas y ∞ se refiere a la hipótesis de un número infinito de álabes que garantizan un sentido completo del líquido.

En una bomba real no puede garantizarse ninguna de estas hipótesis, ya que siempre hay pérdidas por fricción y el número infinito de álabes no llegará el caudal totalmente en el sentido del álabe.

El rendimiento hidráulico η_h tiene en cuenta la reducción de altura ocasionada por pérdidas en el caudal, y la reducción debida a la desviación del caudal desde el óptimo ángulo β_2 se compensa mediante un coeficiente de álabe k . Con estas modificaciones, la ecuación de Euler de una bomba real queda con sigue:

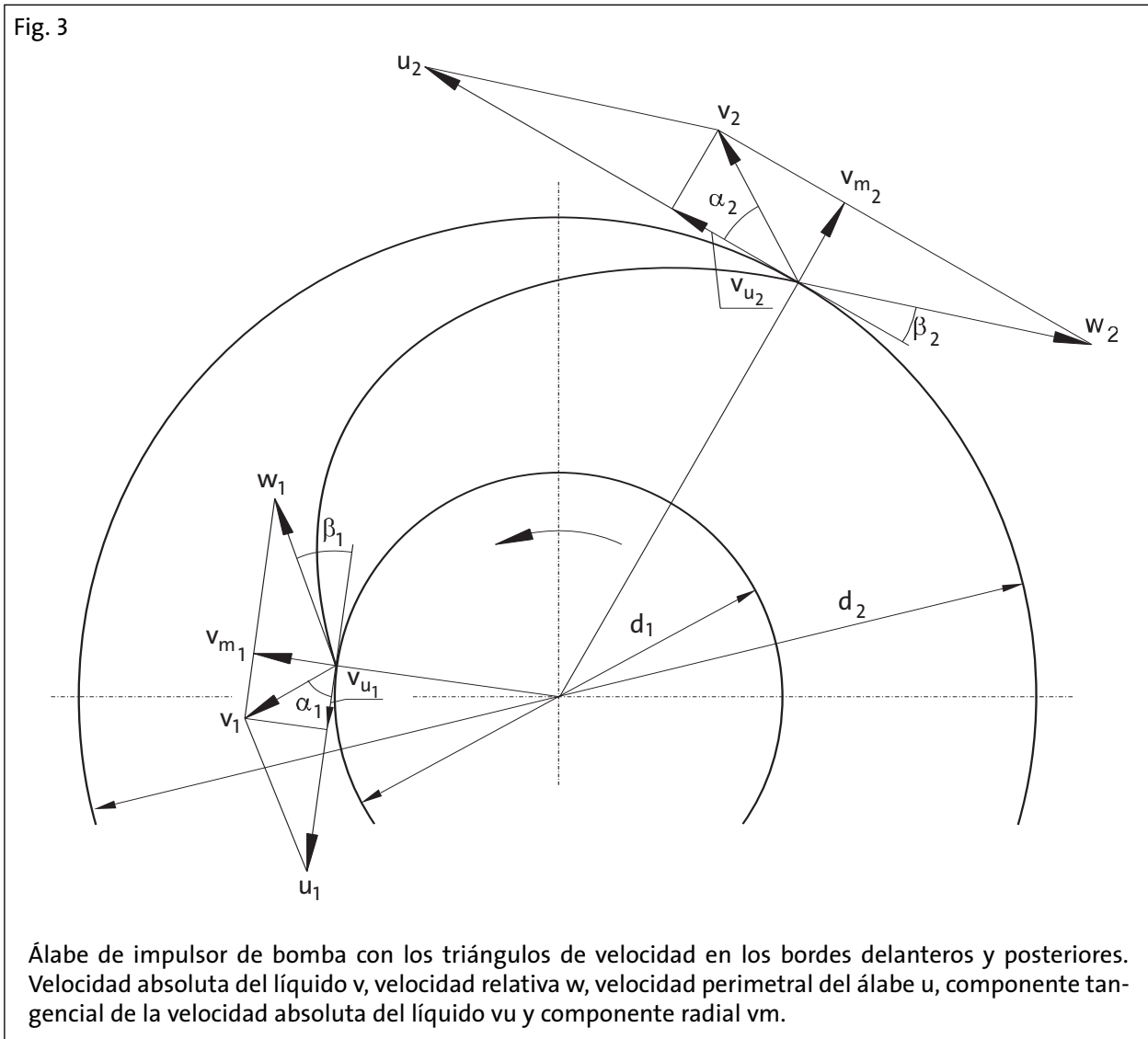
$$H = \frac{\eta_h}{g}(ku_2v_{u2} - u_1v_{u1}) \quad (9)$$

Puede mostrarse que tanto X como k son menores que la unidad. Aquí no se comentarán más a fondo.

Las bombas centrífugas están normalmente diseñadas con $\alpha_1 = 90^\circ$, por lo tanto $v_{u1} = 0$.

Por consiguiente la ecuación básica de bombeo se simplifica a

$$H = k\eta_h \frac{u_2v_{u2}}{g} \quad (10)$$



1.3 Curva y pérdidas de bombas

La altura óptima obtenida con la ecuación de Euler es independiente del volumen de caudal Q . Si se traza la curva $Q/H_{t\infty}$, $H_{t\infty}$ se indica con una línea recta. Se obtiene la curva Q/H real, restando los efectos del número finito de álabes y otras pérdidas que se producen dentro de la bomba. Ver la figura 4.

1.3.1 Efecto del número finito de álabes

Como ya se ha observado, un número finito de álabes disminuye la altura con el factor de álabes k . Teniendo esto en cuenta, se obtiene la altura teórica H_t . Esto puede expresarse:

$$H_t = kH_{t\infty} \quad (11)$$

H_t no es del todo lineal, ya que el coeficiente del álabes depende ligeramente del volumen del caudal Q . La reducción de altura de $H_{t\infty}$ a H_t no se debe a pérdidas de caudal, sino a la desviación del líquido de los ángulos de caudal óptimos debido al número finito de álabes.

1.3.2 Pérdidas por fricción H_f

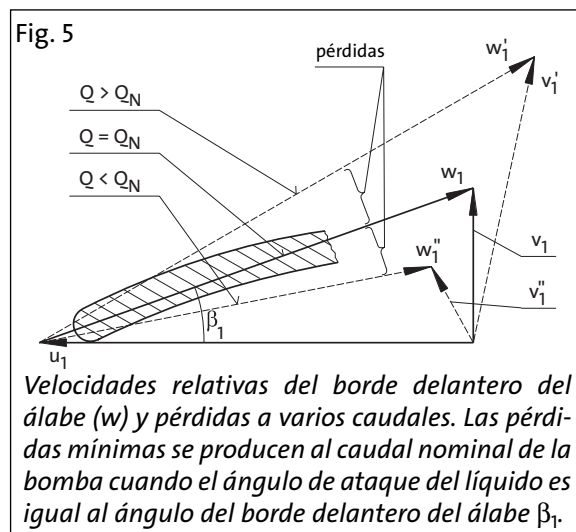
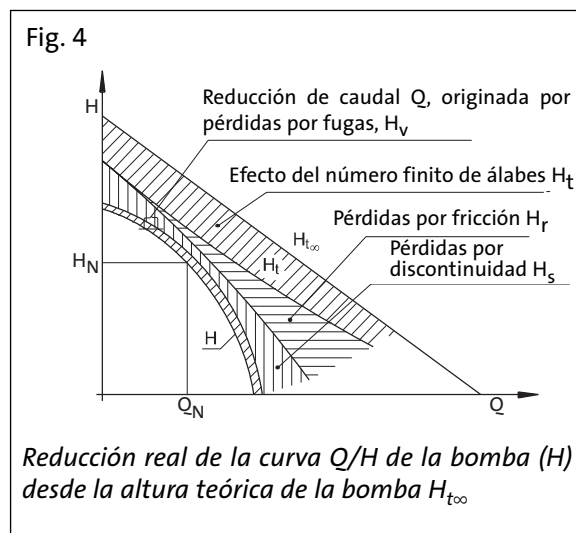
Las pérdidas por fricción se producen cuando el líquido fluye a través de los conductos del impulsor y la voluta de la bomba. Aumentan aproximadamente con el cuadrado del caudal Q .

1.3.3 Pérdidas por discontinuidad H_s

Las pérdidas por discontinuidad se generan en las siguientes áreas:

- En el borde delantero del álabes donde el líquido golpea la punta del álabes. La pérdida es más pequeña en el punto característico de la bomba, cuando el líquido llega en contacto con el álabes en su ángulo β_1 . Las pérdidas aumentan al aumentar la desviación del ángulo de contacto al ángulo β_1 del álabes, ver la figura 5.
- Las pérdidas en el borde posterior del álabes se producen debido a remolinos formados por el álabes. Éstos aumentan aproximadamente con el cuadrado del caudal.
- En la voluta de la bomba a caudales distintos al valor proyectado, cuando la velocidad del caudal en la voluta es distinta a aquella en el perímetro del impulsor. La figura 6 muestra el efecto. Las diferencias de velocidad crean turbulencias que originan pérdidas. Éstas crecen al aumentar la diferencia entre el caudal actual y el caudal proyectado.

Los efectos de las pérdidas por discontinuidad están indicados en la figura 4.



1.3.4 Pérdidas por fugas H_v

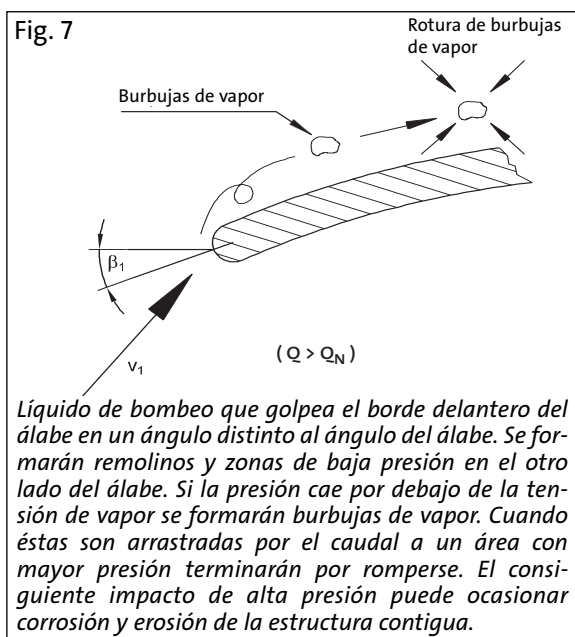
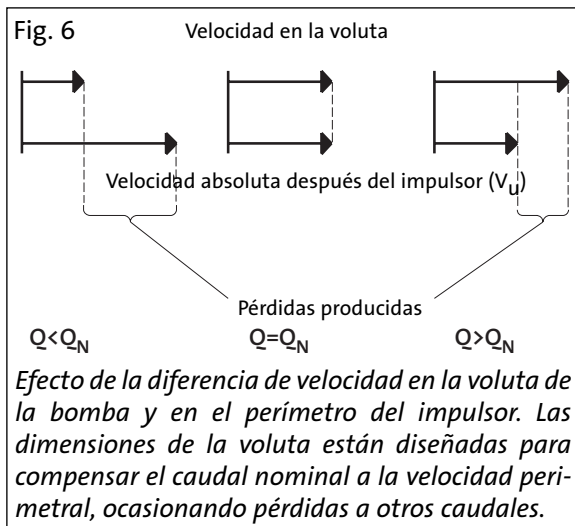
Las pérdidas por fugas se producen en la holgura entre impulsor y voluta. Aunque la holgura se mantenga lo más pequeña posible, un pequeño reflujos pasa desde el área de alta presión en el borde del impulsor hasta el área de baja presión del impulsor. Por lo tanto, el caudal a través del impulsor es algo mayor que el caudal por fuera de la voluta de la bomba y se alcanza la altura de la bomba con caudal reducido, siendo la pérdida por fugas H_v la diferencia. El efecto de la pérdida por fugas está indicado en la figura 4. Esta pérdida aumentará con el desgaste progresivo de la bomba.

1.3.5 Otras pérdidas

Una bomba centrífuga tiene pérdidas adicionales que no afectan la curva Q/H , pero que aumentarán las demandas de energía del eje de motor. Estas incluyen:

Para bombas sumergibles, las dos últimas están incluidas en las pérdidas del motor.

- pérdidas por fricción en las caras exteriores del impulsor
- pérdidas por fricción del cierre
- pérdidas por fricción de los rodamientos



1.4 Cavitación y NPSH

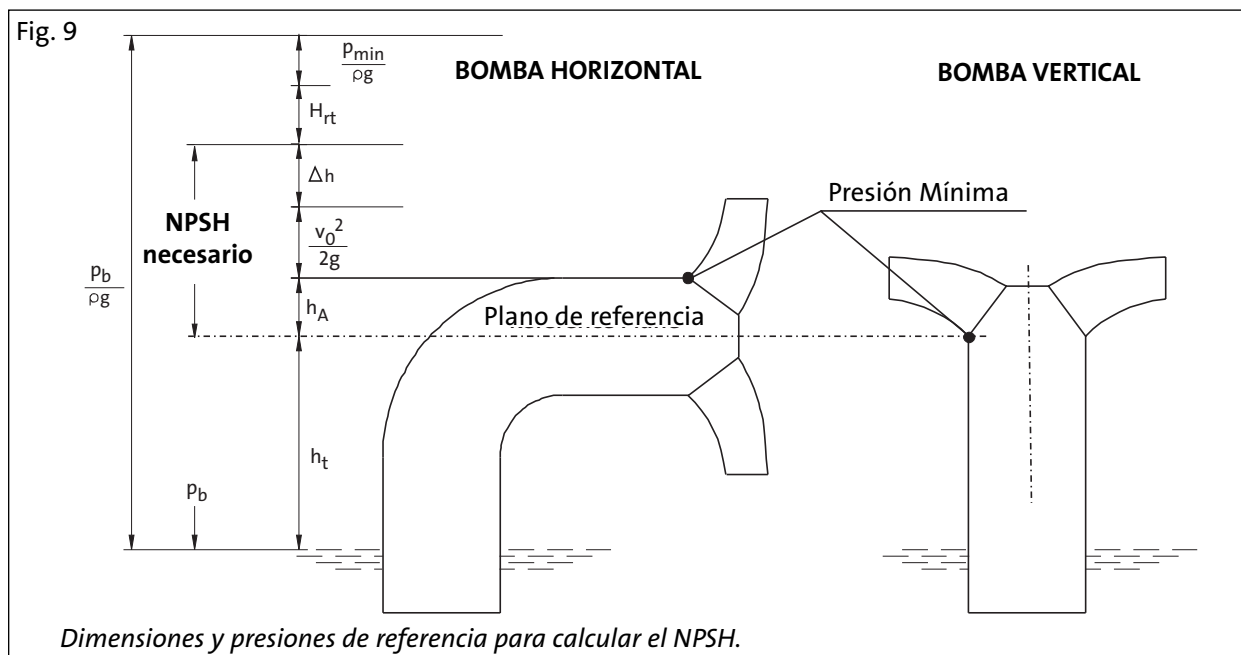
La cavitación se produce por la formación y rotura de las burbujas de vapor en un líquido. Se forman cuando la presión estática local de un fluido baja hasta o por debajo de la tensión de vapor del líquido a temperatura ambiente. Al moverse la burbuja con el caudal a un área de más presión se romperá rápidamente, lo que origina una ola de choque local transitoria muy alta en el líquido. Si tiene lugar cerca de una superficie y ocurre varias veces, el choque de presión erosionará finalmente el material de la superficie.

El fenómeno de cavitación ocurre típicamente en las bombas centrífugas cerca del borde delantero del álabe del impulsor, ver la figura 7. La cavitación puede también reducir la curva Q/H y el rendimiento de la bomba. Una bomba que cavita hace un ruido típico, como si se bombeara arena a través de la misma. Ningún material de bomba soportará la cavitación completamente, por lo que hay que tener cuidado si las condiciones de funcionamiento de la bomba suponen riesgo de cavitación.

Las marcas de desgaste producidas por la cavitación aparecen localmente y constan de picaduras profundas con bordes afilados. La profundidad de las picaduras puede ser de varios milímetros, ver la figura 8.

Las curvas publicadas de bombas sumergibles están normalmente dibujadas de forma que una bomba en una instalación sumergida normal no cavitará, siempre que el punto de trabajo esté en la sección permitida de la curva Q/H .





Si la bomba sumergible está instalada en seco con una tubería de aspiración hay que verificar si la instalación tiene cavitación. En estos casos se utiliza el concepto de NPSH.

1.4.1 Definición de NPSH

NPSH es la sigla de Net Positive Suction Head (Altura de aspiración neta positiva). Se utilizan las siguientes alturas de presión para calcular el NPSH.

- h_t = altura geodésica de entrada
- h_A = diferencia de altura entre el plano de referencia y la punta del borde delantero del álabe.
- H_{rt} = pérdidas de carga en la tubería de aspiración
- $\frac{v_0^2}{2g}$ = caída de presión producida por la velocidad de aspiración
- Δh = caída local de presión en el borde delantero del álabe
- p_b = temperatura ambiente en el nivel del líquido
- p_{min} = presión estática mínima en la bomba
- p_v = tensión de vapor del líquido a la temperatura predominante

Las alturas de presión están indicadas en la figura 9.

Para evitar cavitación, la presión estática mínima en la bomba (p_{min}) debe ser mayor que la tensión de vapor del líquido, o
 La figura 10 muestra el principio de distribución de
 $p_{min} > p_v$

la presión estática del líquido en la tubería de aspiración, bomba y tubería de impulsión de una instalación en seco.

1.4.2 Plano de referencia

El plano de referencia es el plano en el que se realizan los cálculos de NPSH. Es el plano horizontal a través del punto central del círculo descrito por la punta del borde delantero del álabe. Para bombas horizontales, el plano de referencia coincide con la línea central del eje. Para bombas verticales, el sitio del plano de referencia está indicado por el fabricante.

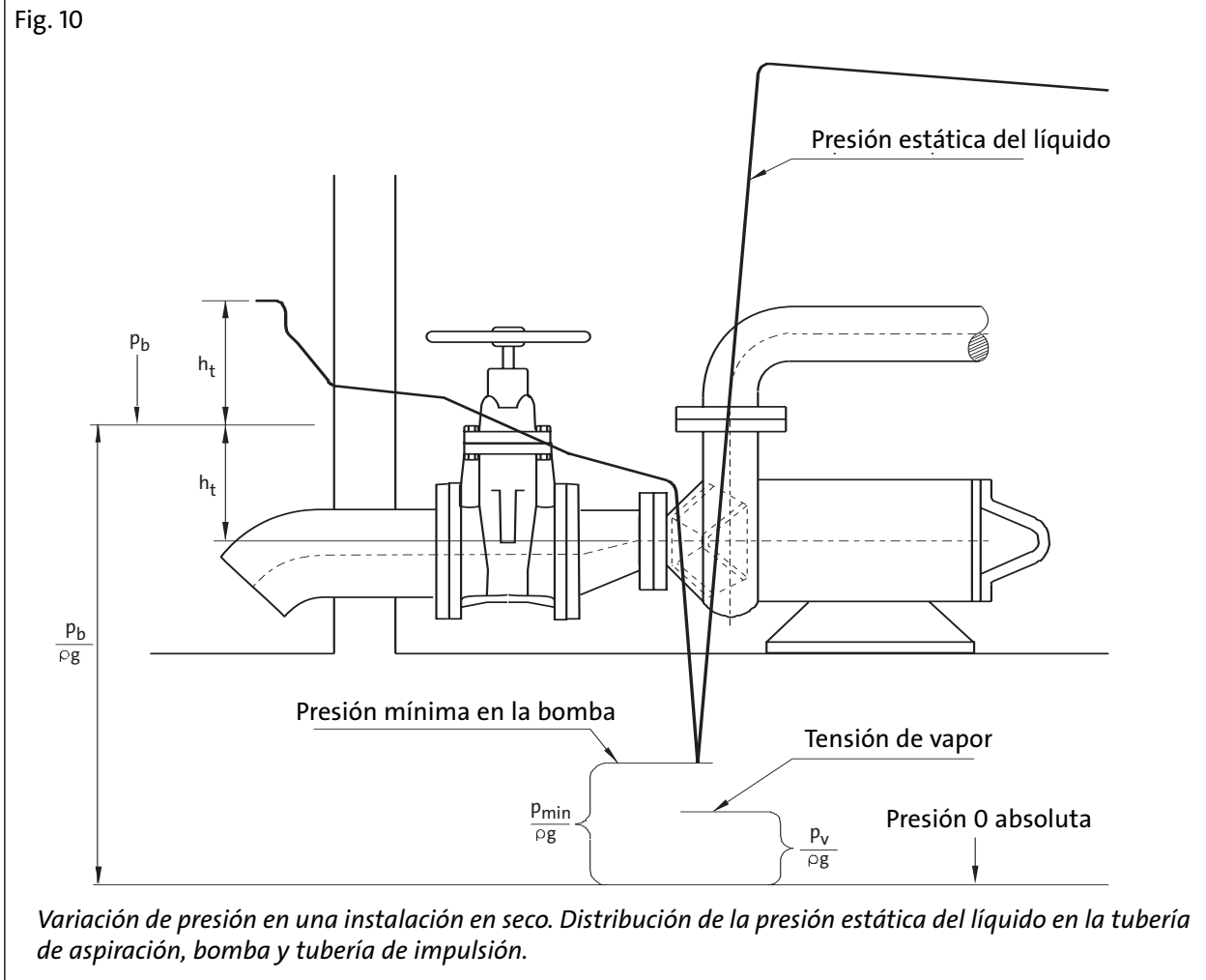
1.4.3 NPSH necesario

Se obtiene el NPSH necesario mediante la siguiente ecuación:

$$\text{NPSH}_{\text{necesario}} = h_A + \frac{v_0^2}{2g} + \Delta h \quad (12)$$

Esto se llama también el valor NPSH de la bomba. Puede presentarse en función del caudal como muestra la figura 11. Es independiente de la temperatura y del tipo de líquido bombeado. El fabricante debe indicar el NPSH como un valor numérico o una curva.

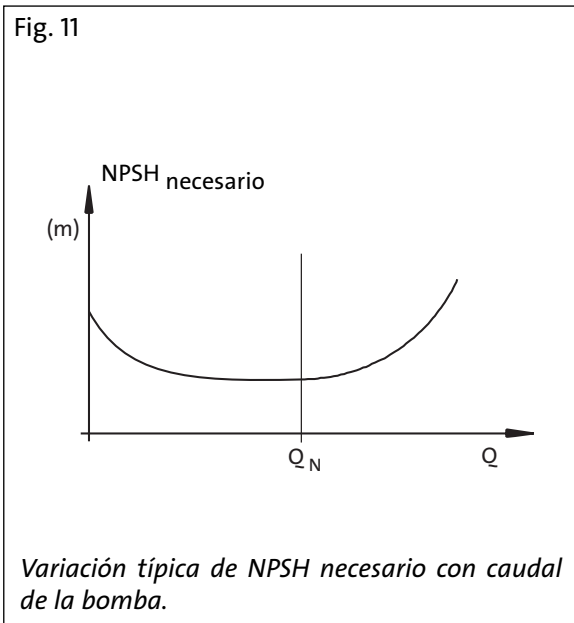
De hecho, cualquier bomba tendrá varios valores NPSH, dependiendo de la definición del caso, ver



la figura 12. Según las normativas de pruebas utilizadas por los fabricantes de bombas, el $NPSH_r$ se define como la situación en la que la altura de la bomba disminuye un 3 % debido a cavitación. Este valor se define como $NPSH_3$.

Es posible que una ligera cavitación no dañe la bomba si las burbujas de vapor no se rompen cerca de las partes estructurales de la bomba, tal como el álabe del impulsor.

La diferencia entre los distintos valores NPSH es mayor en bombas con impulsores de pocos álabes. Por lo tanto, los impulsores de un solo álabe tienen las mayores diferencias en los valores NPSH, produciéndose la diferencia por la caída de la curva $NPSH_3$, por lo que las pruebas dan unas lecturas demasiado favorables. Por lo tanto, una curva $NPSH_r$ basada en la regla del 3 % del estándar es una base deficiente para evaluar el riesgo



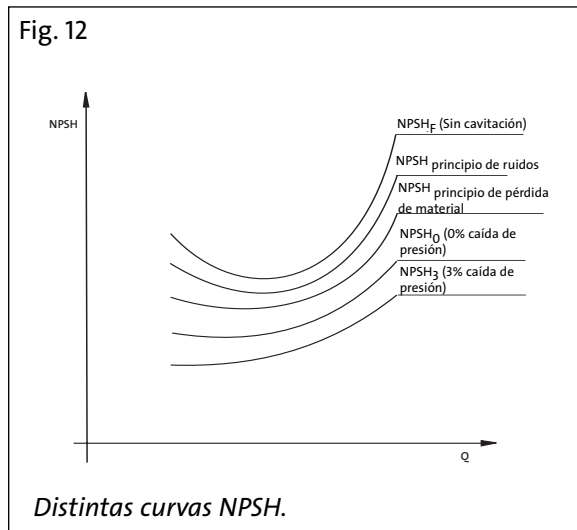
de cavitación en bombas con pocos álabes. La curva $NPSH_r$ publicada por el fabricante de bombas debe en principio garantizar que la bomba no se dañará si funciona por encima de dicha curva. Esto es especialmente el caso para bombas de aguas residuales que tienen pocos álabes de impulsor. El problema es que no existe ningún método exacto para probar y establecer tal valor $NPSH$.

1.4.4 NPSH disponible

El $NPSH$ disponible indica la presión disponible para la aspiración de la bomba durante las condiciones predominantes. Esto puede llamarse $NPSH$ de la estación de bombeo.

$$NPSH_{disponible} = \frac{p_b}{\rho g} - H_{rt} - h_t - \frac{p_v}{\rho g} \quad (13)$$

El término h_t es positivo cuando el plano de referencia está por encima de la superficie del líquido y negativo si está por debajo. El proyectista de la estación de bombeo determina el $NPSH$ disponible.



La figura 13 muestra la tensión de vapor para agua en función de la temperatura del agua.

La figura 14 muestra la presión atmosférica en función de la altura sobre el nivel de mar.

Fig. 13

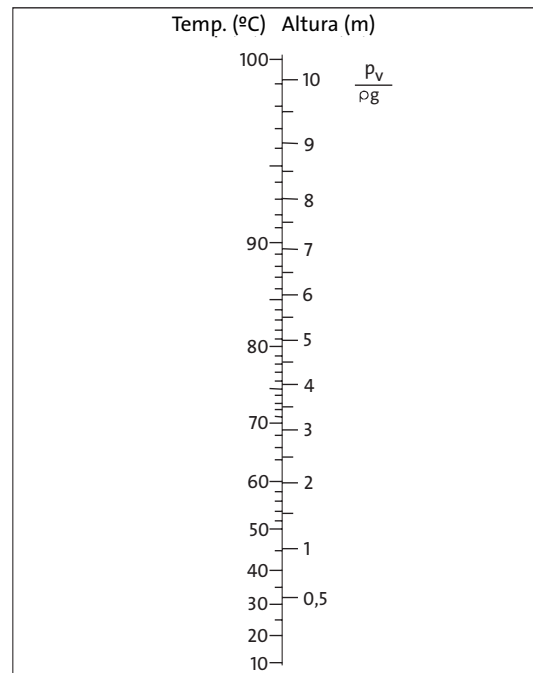
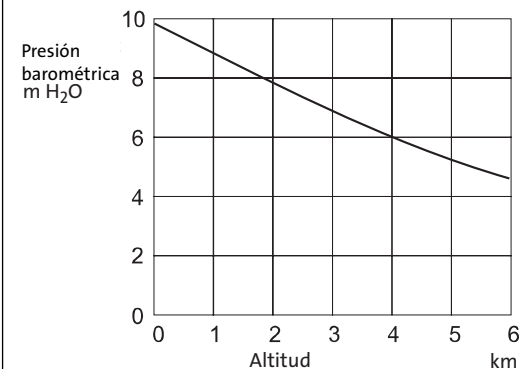


Fig. 14



Presión atmosférica en función de la altura sobre el nivel de mar.

1.4.5 Margen de seguridad de NPSH

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} \geq \text{NPSH}_{\text{necesario}} + \text{Margen de seguridad}$$

El margen de NPSH debe ser suficiente para que pueda haber variaciones en una situación donde las condiciones reales pueden diferir de aquellas calculadas teóricamente. Las pérdidas de caudal en la tubería de aspiración pueden estimarse incorrectamente y el punto de trabajo real de la bomba puede ser distinto al teórico debido a variaciones de la curva Q/H y cálculos incorrectos de la resistencia de la tubería de impulsión. Puede producirse cavitación dañina antes de lo esperado, o a valores NPSH superiores al NPSH_3 (figura 12). Variaciones técnicas de fabricación de la forma del borde delantero del álabe pueden influir en el comportamiento de la cavitación. La forma de la tubería de aspiración puede también afectar el NPSH necesario.

Un margen de seguridad de 1 a 1,5 m es adecuado para bombas instaladas en posición horizontal con tuberías de aspiración rectas.

Hay que fijar el margen de seguridad en 2 a 2,5 m para bombas instaladas en posición vertical, siempre que se utilice un codo reductor antes de la aspiración de la bomba. El radio de la curvatura longitudinal del codo debe ser por lo menos $D_1 + 100$ mm, donde D_1 es el diámetro del orificio más grande.

En la publicación de EUROPUMP "NPSH PARA BOMBAS ROTODINÁMICAS, GUÍA DE REFERENCIAS" (1977) se comentan en detalle el NPSH, márgenes de seguridad y métodos de medición del NPSH.

1.4.6 Remanso de pozos de aspiración

Pueden surgir situaciones en instalaciones reales donde el nivel del líquido en la aspiración sube y la altura de la bomba disminuye de modo que el punto de trabajo de la bomba se mueve a un sector donde $\text{NPSH}_r > 10$ mm. No obstante, no se producirá cavitación, ya que el $\text{NPSH}_{\text{disponible}}$ subirá también y estará todavía superior al $\text{NPSH}_{\text{necesario}}$. Instalaciones típicas donde se produce esta situación son el bombeo de drenaje de diques secos, situaciones de obstrucción de alcantarillas y bombeo de drenaje con niveles de aspiración variables del líquido.

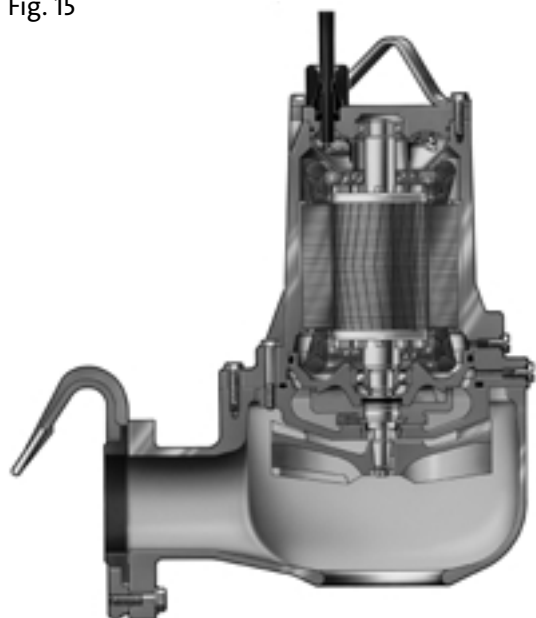
2 Construcción de bombas

Esta sección describe la construcción de las bombas sumergibles eléctricas modernas. Se comentan distintos diseños y los componentes principales de las mismas, así como temas relacionados con su funcionamiento y mantenimiento. El estudio se limita a bombas de aguas residuales municipales, drenaje y aguas brutas.

2.1 General

La bomba sumergible consta de una bomba y un motor eléctrico que forman una unidad cerrada, adecuada para instalación sumergida en una fosa húmeda que contiene el líquido de bombeo. La bomba sumergible puede conectarse a la tubería de impulsión con una conexión de descarga especial en el fondo de la fosa húmeda para facilitar su instalación y desmontaje, o puede instalarse conectada mediante una manguera flexible u otros dispositivos a las tuberías de impulsión. La unidad recibe corriente mediante uno o más cables flexibles, suministrados con la bomba en longitudes adecuadas para la instalación.

Fig. 15



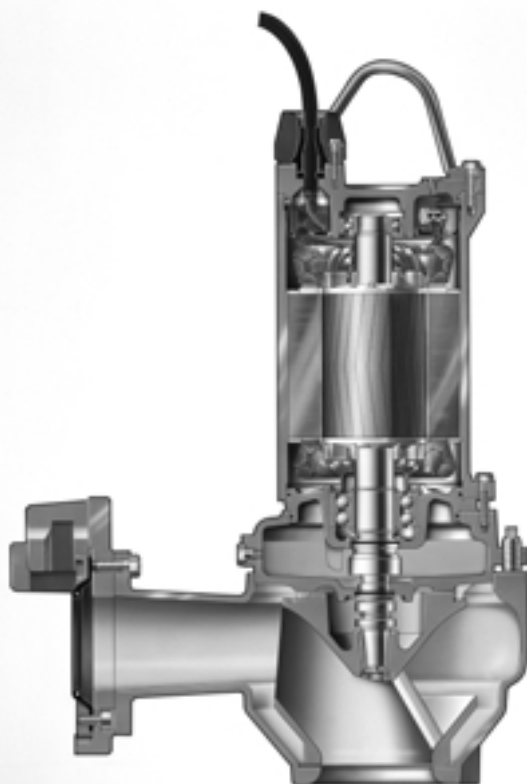
Sección de una bomba sumergible de 2,4 kW GRUNDFOS que muestra detalles de motor y bomba. La bomba lleva una uñeta guía para utilización con una conexión de descarga sumergida en la fosa húmeda, facilitando su instalación y desmontaje.

Muchas bombas sumergibles pueden también instalarse en seco, al igual que las bombas convencionales. Este tipo de instalación garantiza el funcionamiento ininterrumpido de la instalación en el caso de inundación de la fosa seca.

Las bombas sumergibles están disponibles para numerosas aplicaciones con requisitos diferentes y se han desarrollado distintos diseños para numerosas aplicaciones especiales.

Una bomba sumergible consta de un motor estanco y los componentes de bomba adecuados, que son el impulsor, la voluta de bomba y las piezas de conexión necesarias para diferentes alternativas de instalación, incluyendo una uñeta guía

Fig. 16



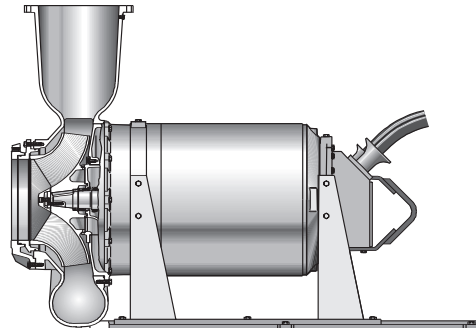
Sección de una bomba sumergible de 17 kW GRUNDFOS que muestra detalles de motor y bomba. La bomba lleva una uñeta guía para utilización con una conexión de descarga en la fosa húmeda, facilitando su instalación y desmontaje. La voluta de bomba es ajustable con tornillos de ajuste para mantener la holgura de la aspiración del impulsor.

para instalación sumergida en una adecuada conexión de descarga, un soporte para bombas portátiles y las bridas de conexión necesarias, un soporte para bombas de instalación en seco y anillos de asiento para bombas instaladas en columna.

El motor es un motor eléctrico seco, tipo jaula de ardilla, adecuado para una serie de componentes de bomba para distintos trabajos. El motor y la bomba tienen un eje común, con los cojinetes y cierres alojados en el motor. El motor lleva también entradas de cable estancas y un asa para levantar la unidad.

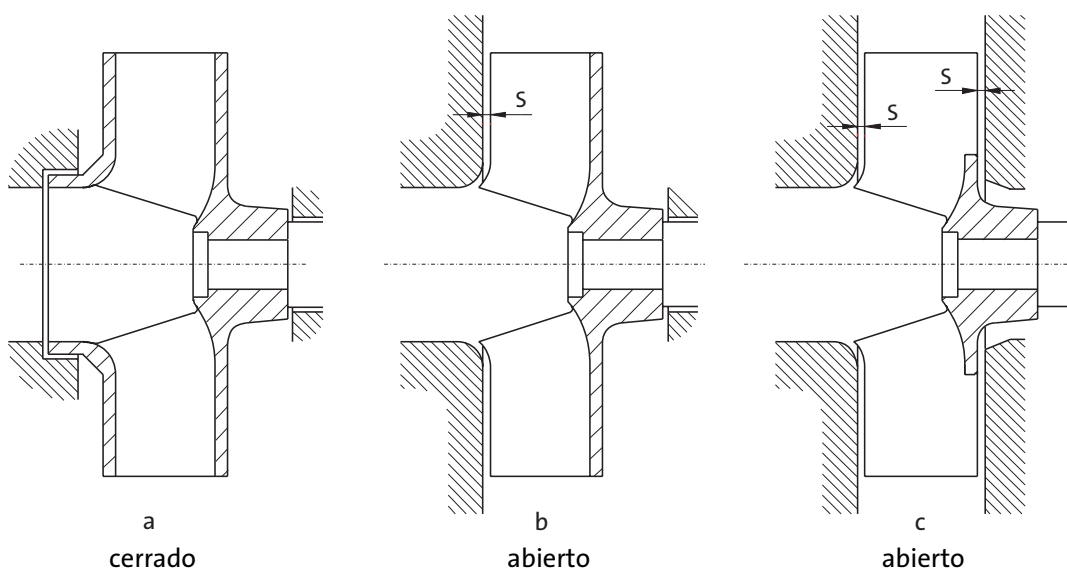
La figura 15 muestra una pequeña y moderna bomba sumergible de aguas residuales y la figura 16 una bomba sumergible de aguas residuales de tamaño medio. Las bombas sumergibles de aguas fecales están disponibles con motores desde menos de 1 hasta 500 kW para trabajos que van desde uso portátil hasta instalaciones de bombeo principales de sistemas de alcantarillado de grandes ciudades. La figura 17 muestra una bomba sumergible para instalación en seco.

Fig. 17



Sección y dibujo de una bomba sumergible de 160 kW. Está prevista para instalación horizontal en seco y se conecta con juntas de bridas integradas, tanto a la tubería de aspiración como a la de impulsión. Gracias al diseño sumergible no hay riesgo de daños de la bomba en el caso de inundación de la instalación.

Fig. 18



Diferentes diseños de impulsor. El impulsor cerrado tiene paredes integrada a ambos lados de los álabes, mientras que el impulsor semiabierto sólo incorpora una pared en la parte trasera. Un impulsor abierto sólo consta de un eje central y álabes, y depende de las holguras estrechas (s) a la voluta de la bomba para su función.

2.2 Bomba

La bomba consta de impulsor y voluta, así como equipo auxiliar y accesorios.

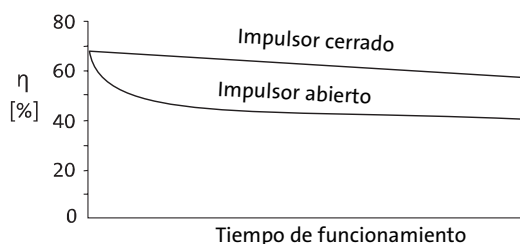
2.2.1 Impulsores

Las bombas sumergibles tienen varios diseños de impulsor, dependiendo del uso previsto. Los impulsores pueden clasificarse como

- impulsores para bombas de aguas residuales
- impulsores para bombas trituradoras
- hélices para bombas axiales

Pueden también clasificarse según su construcción como impulsores cerrados, semiabiertos o abiertos. Están ilustrados en la figura 18. Los impulsores semiabiertos y abiertos dependen de la holgura entre impulsor y voluta (aprox. 0,5 mm). Su rendimiento es muy sensible al desgaste y disminuye rápidamente al aumentar la holgura. La figura 19 muestra el efecto del desgaste en impulsores cerrados y abiertos sobre el rendimiento de la bomba. Los impulsores abiertos y semiabiertos son también susceptibles a atascos de impurezas entre el impulsor y la placa de aspiración, reduciendo la velocidad de la bomba o parándola.

Fig. 19



Resultados de prueba de una comparación del efecto del desgaste sobre el rendimiento de una bomba para distintos tipos de impulsor.

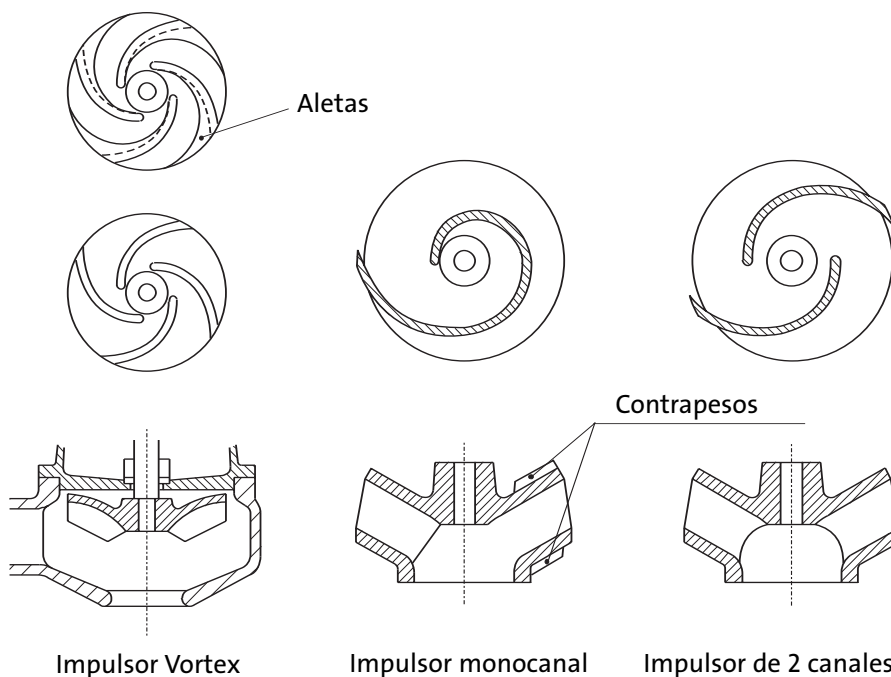
Impulsores para bombas de aguas residuales

Para evitar que se obstruya o atasque la bomba, se han desarrollado impulsores especiales para bombear aguas residuales. Constan de impulsores monocanal, de 2 canales y vortex. Los principios del diseño están ilustrados en la figura 20. Para bombas muy grandes de aguas residuales pueden también utilizarse impulsores con muchos álabes.

Paso libre

El concepto de paso libre es de especial relevancia para las bombas de aguas residuales. Se refiere a su capacidad de permitir el paso de sólidos a través del líquido bombeado, y por lo tanto a sus

Fig. 20



Tipos de impulsor para bombas de aguas residuales.

características contra atascos. La dimensión del paso libre se refiere normalmente al mayor objeto esférico que puede atravesar el impulsor y los orificios de la voluta. Si el paso libre está descrito con dos números se refiere al mayor objeto oblongo que puede atravesar la bomba.

La capacidad de funcionar sin atascos está muy relacionada con el paso libre, como puede verse el diagrama de la figura 21. Para bombas pequeñas y de tamaño medio, un paso libre de 80 mm es normalmente suficiente para aguas residuales brutas. En bombas mayores (caudal >100 l/s) el paso libre mínimo debe ser de 100 mm.

El paso libre en sí no garantiza que unas buenas características contra atascos. La geometría del impulsor y álabes debe también tener unas características que eviten obstrucciones. Bombas de diferentes fabricantes tienen calidades variables en este aspecto. En algunos casos se ha solucionado un problema de atascos, cambiando a otra marca de bomba, incluso con bombas que tengan los mismos pasos libres, el mismo número de álabes y la misma velocidad. La tendencia de las aguas residuales a obstruir las bombas puede variar de un lugar a otro, con estaciones de bombeo "fáciles" y "difíciles". El diseño de la canalización del alcantarillado que conduce a la estación de bombeo es importante para la función de las bombas, ya que éstas deben poder manejar cualquier aglomeración de sólidos que se genera allí. Las condiciones reales en sistemas de aguas residuales no pueden simularse en laboratorios y las buenas características de las bombas de aguas residuales GRUNDFOS contra atascos están basadas en una larga experiencia en este campo.

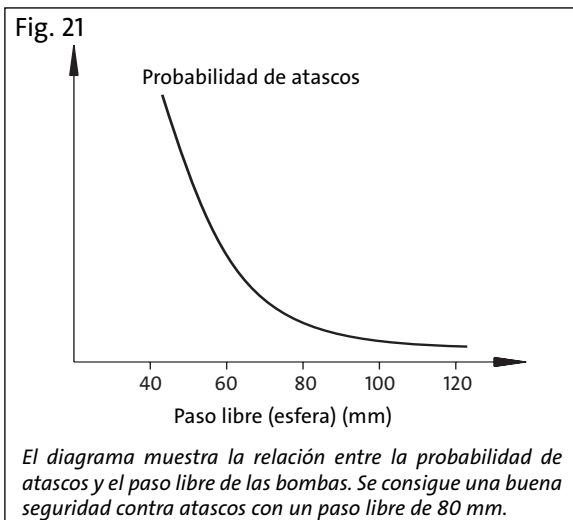
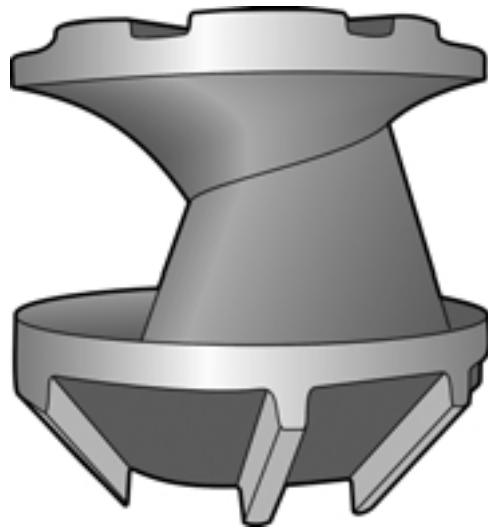


Fig. 22



Impulsor monocanal S-1 GRUNDFOS para aguas residuales. Tiene diseño semiaxial con un álabes continuo largo que garantiza unas buenas características contra atascos. El diseño asimétrico exige que el moldeado incluya contrapesos para facilitar el equilibrio estático y dinámico del impulsor.

Impulsores monocanal

La figura 22 muestra un impulsor monocanal. El álabes sencillo está diseñado lo más largo posible para conseguir el rendimiento óptimo dentro de los límites fijados por el requisito de paso libre. El impulsor que tiene un solo sitio de paso del líquido de bombeo, garantiza unas buenas características inherentes contra atascos. La forma asimétrica exige que el impulsor incluya contrapesos integrados para el equilibrio. El rendimiento máximo alcanzable es del 70 - 75 %.

Fig. 23



Impulsor de 2 canales S-2 GRUNDFOS. Se consiguen unas buenas características contra atascos con bordes delanteros del álabe rebajados y diseño semiaxial. El diseño simétrico está inherentemente equilibrado.

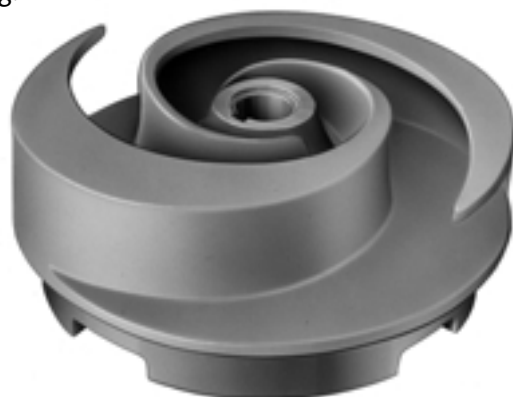
Impulsores de dos canales

La figura 23 muestra un impulsor de dos canales. La dificultad inherente con impulsores de dos canales es que impurezas fibrosas largas pueden entrar en ambos canales y quedar atrapadas por los bordes delanteros del álabe, atascando la bomba. Esta situación puede mitigarse con un buen diseño del borde delantero del álabe, lo que sólo puede conseguirse mediante un trabajo de desarrollo en condiciones reales en estaciones de bombeo difíciles. Con un diseño correcto y un paso libre de al menos 100 mm, los impulsores de dos canales pueden diseñarse para manejar aguas residuales brutas sin atascos. El rendimiento máx. alcanzable es del 80 - 85% para impulsores de 2 canales.

Impulsores de tres y cuatro canales

En bombas muy grandes pueden utilizarse impulsores de tres o cuatro canales y aún así tener un paso libre de al menos 100 mm y un impulsor con buenas características contra atascos. El diseño del borde delantero del álabe es también decisivo para estos impulsores. El rendimiento máx. alcanzable es del 82 - 86% para estos impulsores.

Fig. 24



Impulsor SuperVortex GRUNDFOS. El diseño incluye aletas de álabe patentadas. Las aletas impiden la formación de remolinos secundarios por encima de los bordes del álabe, mejorando considerablemente el rendimiento de bombeo.

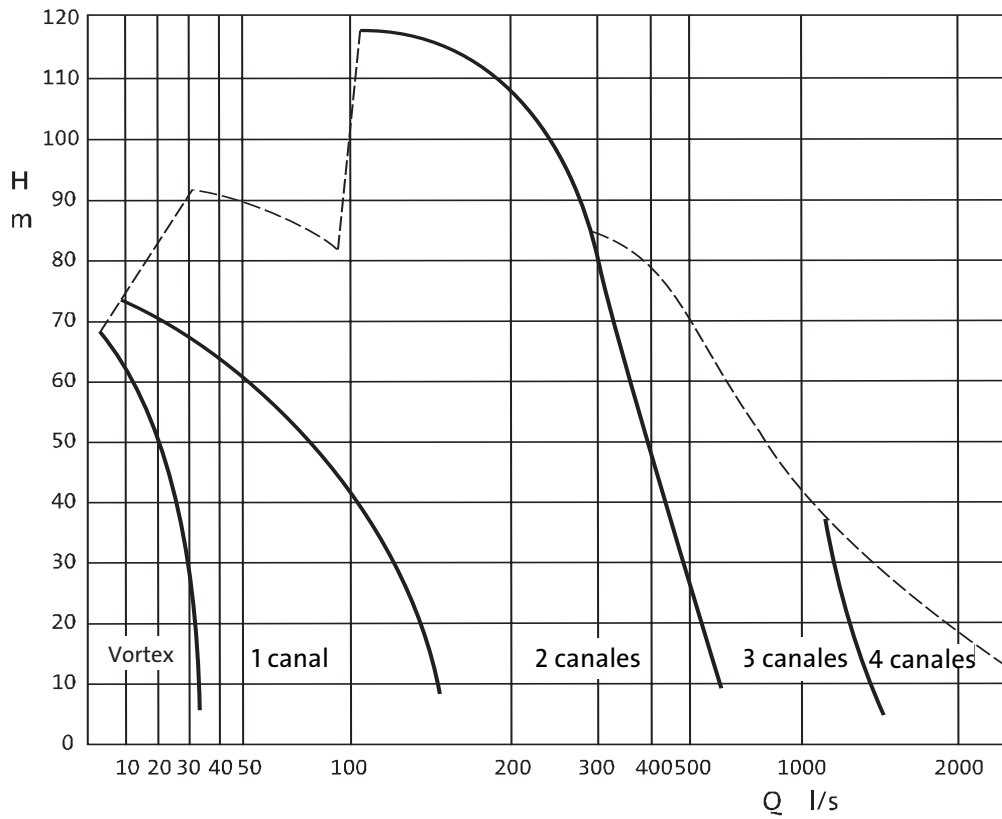
Impulsores Vortex

El principio del impulsor vortex es la formación de un fuerte remolino en la voluta abierta de la bomba. El bombeo de una bomba vortex es por lo tanto indirecto, estando el impulsor fuera del caudal principal del líquido. Las bombas de impulsor vortex tienen unas excelentes características inherentes contra atascos, y su funcionamiento es muy suave. La utilización de bombas pequeñas de impulsor vortex para aguas residuales está aumentando considerablemente durante los últimos años gracias al mejor diseño y rendimiento. Se utilizan también como bombas de separación de arena en plantas de tratamiento de aguas residuales. La figura 24 muestra un impulsor vortex. El rendimiento máx. alcanzable es de aprox. un 50% para impulsores vortex. Es importante recordar que el rendimiento de bombas vortex a caudales de 3 -15 l/s es casi igual al de bombas mono-canal.

Gamas de caudal y altura (Q/H) para diferentes tipos de impulsores y bombas sumergibles

La figura 25 muestra las áreas de aplicación típicas de diferentes tipos de bombas de aguas residuales e impulsores de la gama GRUNDFOS. Puede verse que al aumentar el caudal y el tamaño de bomba, el número de álabes del impulsor aumenta también. El diagrama muestra también el área Q/H, para el cual existen bombas sumergibles para aplicaciones de aguas residuales. La bomba más grande de la gama GRUNDFOS tiene un motor de 520 kW.

Fig. 25



Gamas de caudal y altura (Q/H) para diferentes tipos de impulsor.

Fig. 26



Bombas trituradoras GRUNDFOS. La unidad de corte es de acero inoxidable endurecido.

Impulsores para bombas trituradoras

Se han desarrollado bombas trituradoras para instalaciones con cantidades muy pequeñas de aguas residuales. Aplicaciones típicas son estaciones de bombeo para casas unifamiliares, pequeñas explotaciones o zonas de camping. El caudal necesario es muy pequeño, a veces menos de 1 l/s, pero la altura total puede ser grande debido a tuberías de impulsión largas y estrechas. El caudal de una bomba trituradora es típicamente de 1 - 5 l/s, con alturas hasta 50 m.

En las bombas trituradoras los sólidos son desmenuzados en pequeños trozos de unos 10 mm, lo que permite utilizar tuberías de impulsión de pequeñas dimensiones, normalmente DN 40 - DN 80. Para caudales muy pequeños de estaciones de bombeo individuales pueden utilizarse tuberías incluso más pequeñas, con el fin de conseguir una velocidad del caudal de al menos 0,5 m/s.

Las bombas trituradoras no deben utilizarse para aguas residuales que contengan arena, ya que la unidad de corte es muy sensible al desgaste. Cuando se plantea su utilización para instalaciones grandes con varios edificios, se recomienda hacer siempre una comparación técnica y económica con una solución basada en bombas convencionales.

La figura 26 muestra una bomba trituradora GRUNDFOS. Una unidad de corte con cuchillas afiladas está instalada por fuera del impulsor. La unidad de corte es de acero inoxidable endurecido.

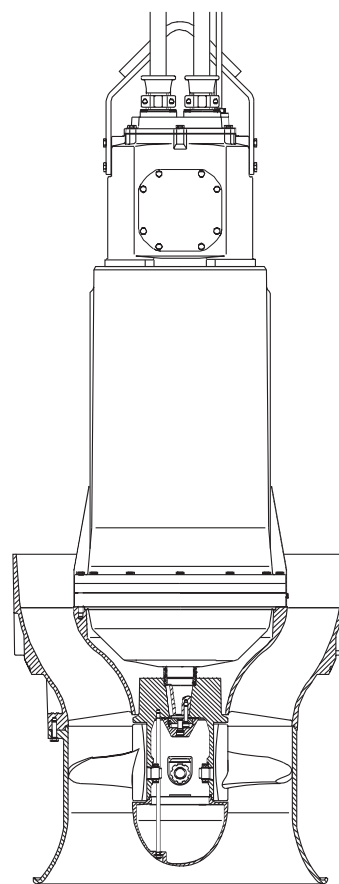
Hélices para bombas axiales

Muchos fabricantes de bombas han desarrollado bombas axiales que montan motores sumergibles de bombas de aguas residuales. La figura 27 muestra una bomba de caudal axial GRUNDFOS con hélice de paso regulable. El diseño incorpora álabes de bordes posteriores fijos que transforman el movimiento giratorio del agua en energía de presión, aumentando el rendimiento de la bomba. Las bombas de hélice se instalan normalmente en columna.

Se utilizan para aguas pluviales y bombeo de aguas de inundaciones, drenaje, riego y bombeo de aguas brutas, así como bombeo de efluentes en plantas de tratamiento de agua. No son ade-

cuadas para aguas residuales sin tratar debido al riesgo de atascos. Las bombas de hélice pequeñas y de tamaño medio no son adecuadas para el bombeo de circulación interna en plantas de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo refluo de lodos, ya que pueden atascarse y agarrotarse debido a las fibras que hay en estos líquidos. El rendimiento máx. alcanzable para bombas de hélice es del 75 - 85%.

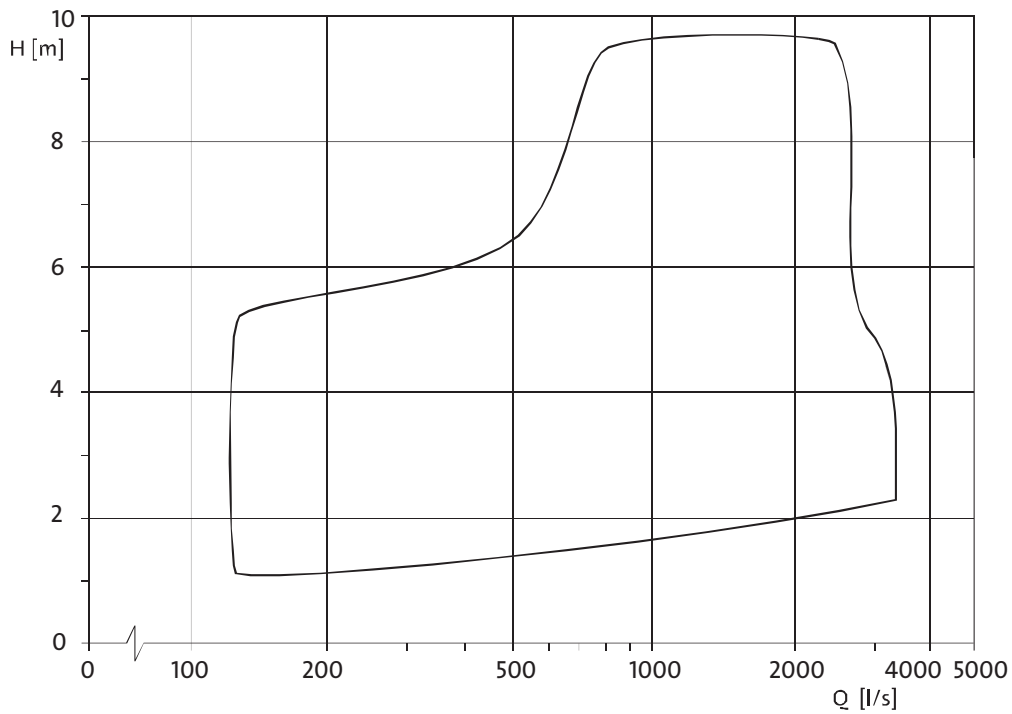
Fig. 27



Bomba de hélice GRUNDFOS. El ángulo de la pala es ajustable para conseguir el rendimiento óptimo.

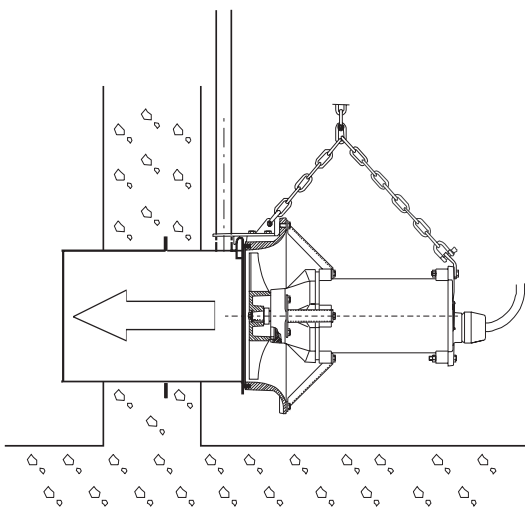
La gama de funcionamiento (área Q/H) de las bombas de hélice GRUNDFOS está indicada en la figura 28. Parte de la gama está también cubierta por bombas de impulsor de canal para instalación en columna, que pueden ser la elección más adecuada para muchas aplicaciones. La elección final entre las distintas bombas debe basarse en el punto de trabajo deseado y la aplicación. Cuando se trata de procesos de selección para proyectos difíciles debe consultarse con el fabricante de bombas.

Fig. 28



Gama de caudal y altura (Q/H) de bombas de hélice GRUNDFOS.

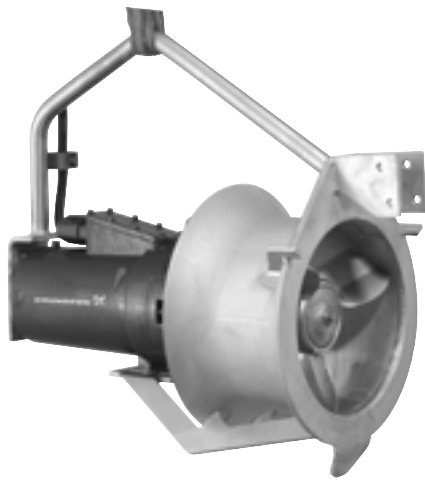
Fig. 29



Bomba sumergible de recirculación para una planta de tratamiento de aguas residuales. La bomba se baja a su sitio mediante barras guía.

Como muestra la figura 29, se han desarrollado bombas axiales especiales para el bombeo de recirculación en plantas de tratamiento de aguas residuales. Están previstas para funcionar a muy poca altura, sólo 0,3 -1,0 m, y gran caudal, hasta 2000 l/s. Gracias al diseño son inatascables, con las paletas inclinadas hacia atrás, gran holgura (10 mm) entre las puntas de las paletas y la voluta y sin álabes delanteros. El rendimiento máx. alcanzable para bombas circuladoras axiales es del 35 - 50%. La pérdida de caudal en la salida del manguito es significativa para la altura. Si se utiliza un manguito cónico pueden conseguirse más altura y reducirse las pérdidas.

Fig. 30



Bomba recirculadora GRUNDFOS

Álabes auxiliares del impulsor

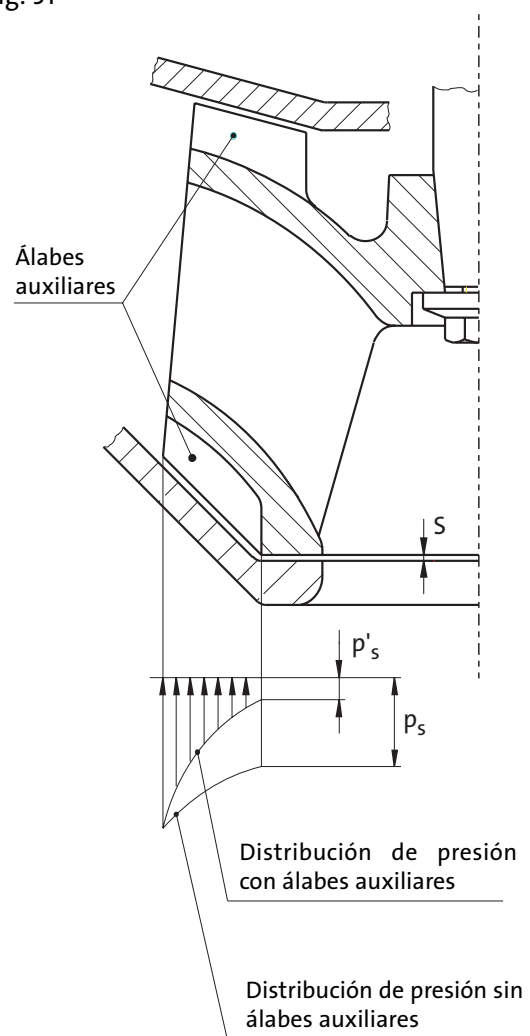
Los álabes auxiliares del impulsor en la parte exterior de las paredes son una característica importante de los impulsores de las bombas pequeñas de aguas residuales. Aumentan la velocidad del flujo del líquido en la holgura entre impulsor y voluta. La figura 31 muestra la ubicación de los álabes auxiliares en un impulsor monocanal.

Los álabes auxiliares participan en el funcionamiento de la bomba, realizando las siguientes funciones:

- Disminuyen las cargas axiales en los cojinetes, especialmente si se utilizan impulsores semiabiertos
- Reducen el desgaste del impulsor y voluta en la holgura de la aspiración
- Impide la acumulación de fibras en la holgura de la aspiración
- Impiden que fibras y jirones se enrollen alrededor del eje de la bomba por detrás del impulsor.

En impulsores grandes no pueden utilizarse álabes auxiliares que lleguen hasta el perímetro de la pared, ya que a grandes caudales causarían una caída de presión por debajo de la tensión de vapor del líquido, ocasionando cavitación. No obstante, las bombas grandes son menos propensas a atascarse debido al alto par motor. Por lo tanto, los impulsores grandes no llevan álabes auxiliares en la entrada.

Fig. 31

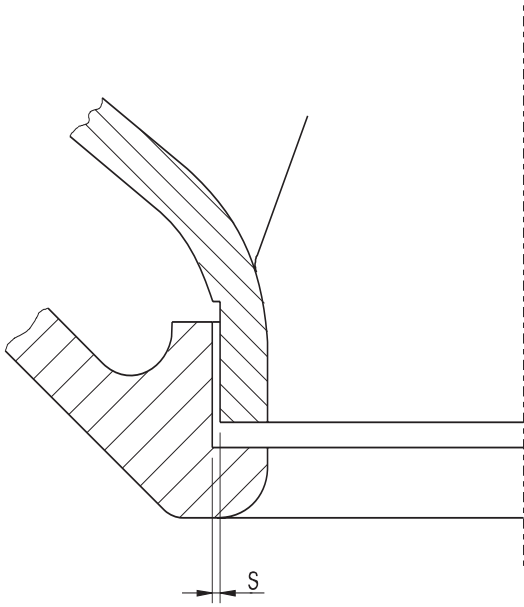


El efecto de los álabes auxiliares en la pared de la aspiración es una menor diferencia de presión p'_s en la holgura de la aspiración. Con menos refluo, la holgura de la aspiración durará más tiempo y se reduce el riesgo de atascos.

Holgura de la aspiración

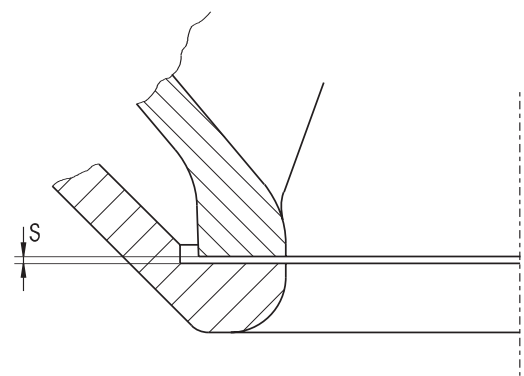
La holgura entre impulsor y voluta debe ser lo más pequeña posible, con el fin de reducir las pérdidas por fugas. Es del orden de 0,5 -1,0 mm para la mayoría de las bombas centrífugas. Su diseño puede ser cilíndrico o axial, tal como muestran las figuras 32 y 33.

Fig. 32



Holgura cilíndrica de la aspiración. El diseño es propenso a atascos, ya que las fibras que quedan atrapadas en la holgura entre impulsor y voluta pueden acumularse y retener la bomba. Si hay desgaste, el anillo de desgaste en la tapa de la aspiración y el impulsor deben cambiarse o remecanizarse.

Fig. 33



Holgura axial de la aspiración. El diseño es menos propenso a atascos, ya que fuerzas de arrastre moverán el material agarrotado hacia la aspiración de la bomba. La holgura puede hacerse ajustable para facilitar el mantenimiento y compensar el desgaste.

El funcionamiento y rendimiento de una bomba a lo largo del tiempo dependen del mantenimiento de la holgura de la aspiración dentro de los límites especificados. El efecto reductor de la holgura de la aspiración sobre el rendimiento y altura de la bomba puede calcularse mediante la siguiente ecuación empírica:

$$\Delta\eta = \Delta H = \sqrt{K^2 + K} - K \tag{14}$$

donde

$$K = 0,008 \cdot s^2 \cdot \frac{H}{Q}$$

Q = caudal (l/s)

H = altura (m)

s = holgura (mm)

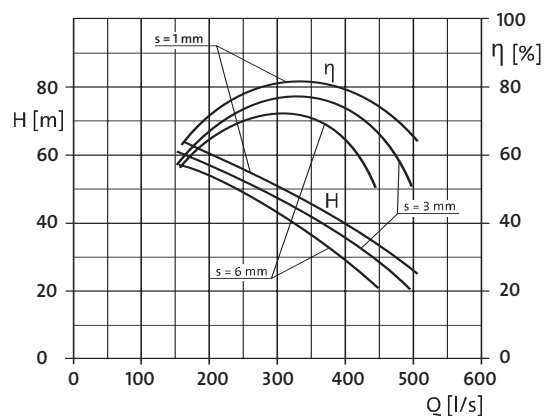
$\Delta\eta$ y ΔH son proporcionales.

Para impulsores semiabiertos el efecto aumenta con el factor 1,5.

La figura 34 muestra los resultados de una prueba donde la bomba funcionaba con holguras de la aspiración variables.

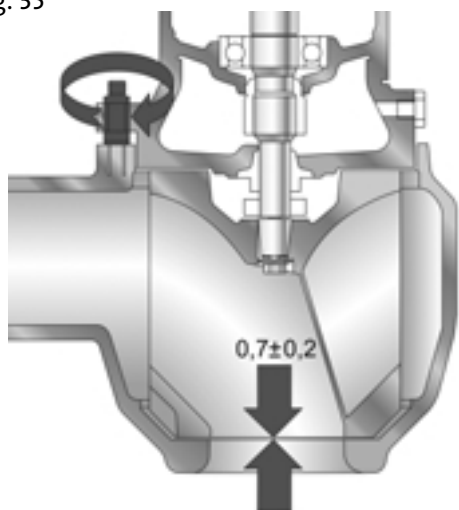
Si la holgura aumenta hasta 2 - 3 mm para impulsores sin álabes auxiliares y hasta 4 - 5 mm para impulsores con álabes auxiliares, hay que recuperarla para mantener el funcionamiento de la

Fig. 34



Efecto de diferentes dimensiones de la holgura de la aspiración sobre la curva y rendimiento de la bomba.

Fig. 35



Sistema de ajuste de la holgura de la aspiración con tres tornillos de ajuste.

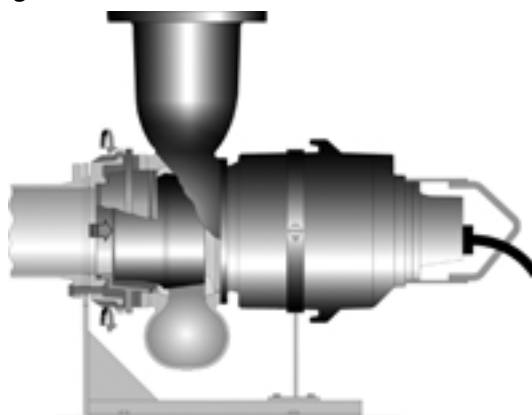
bomba. Si la holgura es ajustable, este procedimiento lo realizan fácilmente los técnicos in situ, mientras que una bomba con holgura fija de la aspiración del impulsor tendrá que ser revisada en el taller o, lo que es peor, desmontada con costes elevados de repuestos y mano de obra.

En bombas con holgura axial ajustable de la aspiración siempre puede garantizarse el funcionamiento, controlando y ajustando la holgura durante el mantenimiento rutinario. La figura 35 muestra el diseño de una bomba sumergible, donde la holgura de la aspiración está ajustada con ayuda de tres tornillos de ajuste.

Grundfos ha desarrollado un diseño patentado (SmartTrim) para bombas de instalación en seco, que permite ajustar y recuperar la holgura de la aspiración, sin necesidad de sacar la bomba o abrir las conexiones de las tuberías. El ajuste no afecta las conexiones de las tuberías y no es necesario realinearlas. La figura 36 muestra el principio. Para realizar el ajuste se cierra primero la holgura y a continuación se retroceden los tornillos de ajuste 1 mm. Después se aprieta la tapa de la aspiración contra los tornillos de ajuste con los pernos de fijación.

El margen de ajuste en las bombas Grundfos es de 10 - 15 mm, dependiendo del tamaño de bomba. El ajuste está dimensionado para durar mientras dure el impulsor.

Fig. 36



Sistema de ajuste externo de la holgura de la aspiración de bombas instaladas en seco.

Conexión del impulsor

La conexión del impulsor en el eje debe ser segura, así como fácil de desmontar. Hay que sacarla para el mantenimiento del cierre y para cambiar el impulsor si la bomba se utiliza para materiales de bombeo abrasivos. El impulsor puede tener una junta cilíndrica o cónica en el extremo del eje.

Una junta del eje reducida al ángulo correcto es fácil de desmontar. La junta cónica se aprieta adicionalmente con un tornillo, por lo que queda rígida e inmóvil.

La junta está enchavetada para transmisión del par. Un montaje sólido del impulsor es fundamental para la seguridad de funcionamiento de la bomba y hay que tener siempre mucho cuidado al desmontar el impulsor. Se recomienda utilizar siempre una llave torsiométrica para ajustar el tornillo del impulsor. El fabricante de bombas facilita información correcta respecto al par de apriete y posibles recomendaciones de lubricante para tornillos en cada caso.

2.3 Motores

2.3.1 General

Los motores de las bombas sumergibles son motores eléctricos del tipo de jaula de ardilla, bobinados para corriente normal alterna trifásica o monofásica. Los motores monofásicos sólo están disponibles para bombas pequeñas (2 kW o menores). Los motores están disponibles para 50 ó 60 Hz y varias tensiones. Están contruidos para funcionamiento sumergido, Clase IP 68 según IEC. Las características eléctricas de los motores sumergibles están descritas detalladamente más adelante en este libro.

La bomba sumergible es una combinación fija de un motor y una bomba con eje y cojinetes en común. El motor tiene una conexión directa a la bomba, y algunos de los componentes de la bomba, tales como la tapa de la voluta, pueden estar integrados con la brida de conexión del motor. Para conseguir unos resultados óptimos, la bomba y el motor están diseñados juntos por el mismo fabricante, siendo el tamaño del motor apto para una serie de componentes de bomba para diferentes trabajos y gamas de funcionamiento. Las secciones de motor y bomba han sido seleccionadas y diseñadas para eliminar sobrecargas en cualquier punto de trabajo en la curva de la bomba.

Los motores sumergibles están normalmente llenos de aire. Los motores pequeños (1,5 kW y menos) se hacen también llenos de aceite. El aceite, que se utiliza también en transformadores, es de baja viscosidad, con el fin de mantener las pérdidas por fricción del rotor lo más pequeñas posible. Los fabricantes no hacen motores más grandes llenos de aceite debido a las crecientes pérdidas y el menor rendimiento. Al tener menos piezas, motores llenos de aceite son más baratos que motores llenos de aire.

2.3.2 Motores antideflagrantes

Las bombas sumergibles están disponibles en versiones antideflagrantes para utilización en entornos donde el líquido de bombeo o la atmósfera del entorno puede contener gases explosivos. Esta circunstancia puede darse por ejemplo en empresas petroquímicas o cerca de ellas, pero otros lugares puede también definirse como explosivos, si así se considera necesario por motivos de seguridad.

El principio de los motores antideflagrantes es su seguridad contra la ignición de atmósferas potencialmente explosivas. Las dos siguientes soluciones técnicas alternativas están disponibles para cubrir el requisito:

- El motor está diseñado para que la protección pueda soportar cualquier llama explosiva interna e impedir su propagación a los alrededores explosivos. Esto se llama Clase D.
- El motor está diseñado para que no puedan aparecer chispas o temperaturas altas dentro del motor. Esto se llama Clase E.

Un motor antideflagrante está diseñado y contruido según las normativas fijadas por organismos reguladores internacionales (por ejemplo Euronorm 50014 y 50019). Los requisitos para motores de la clase D están detallados, incluyendo entre otros la selección y dimensionamiento de materiales de construcción, tolerancias de diseño y fabricación de la junta de voluta, utilización del volumen interior del motor, así como la resistencia de la estructura y remaches. El requisito esencial de las juntas es que las superficies de contacto tienen que ser más largas, ya que supuestamente sirven de aberturas de "extinción". La certificación y homologación de un diseño están siempre sujetas a extensas pruebas, donde se determina la capacidad real de soportar explosiones internas.

Los motores antideflagrantes de la clase E no necesitan grandes modificaciones estructurales, pero se prueba la subida de la temperatura interior a ciertas cargas. También deben impedirse chispas interiores mediante distancias adecuadas entre las partes giratorias y las estacionarias.

Los motores antideflagrantes están habitualmente basados en los diseños estándar del fabricante y son un complemento de éstos. Normalmente no se cambian las características de potencia y las partes de bomba son comunes para ambos. Los requisitos estructurales de los motores antideflagrantes significan que son más caros que los motores normales.

2.3.3 Refrigeración del motor

Las pérdidas mecánicas y eléctricas en el motor se convierten en calor que debe disiparse. En un motor sumergible normal (ver figura 38) el calor se transfiere del alojamiento del estator al líquido por inmersión. Para la refrigeración es normalmente suficiente que el motor esté sumergido

hasta aproximadamente su mitad. El nivel del líquido puede mediante bombeo bajarse del todo durante periodos breves sin riesgo de sobrecalentar el motor.

De hecho, un motor que funciona en el agua de esta forma se enfría muy eficazmente, ya que la refrigeración continua después de la parada del motor. Por lo tanto los motores sumergibles pueden arrancar y parar con frecuencia, lo que favorece el diseño de las instalaciones de bombeo.

Temperatura permitida del agua

La refrigeración de los motores sumergibles depende del líquido bombeado, sea por inmersión u de otra forma. Por lo tanto, la temperatura del agua es esencial. Los motores están normalmente dimensionados para líquidos de +40°C. Pueden aceptarse temperaturas de líquido superiores, pero hay que consultar con el fabricante respecto a la selección de bomba. Para temperaturas superiores el riesgo de cavitación debe también evaluarse con un análisis del NPSH, debido al mayor tensión de vapor del líquido.

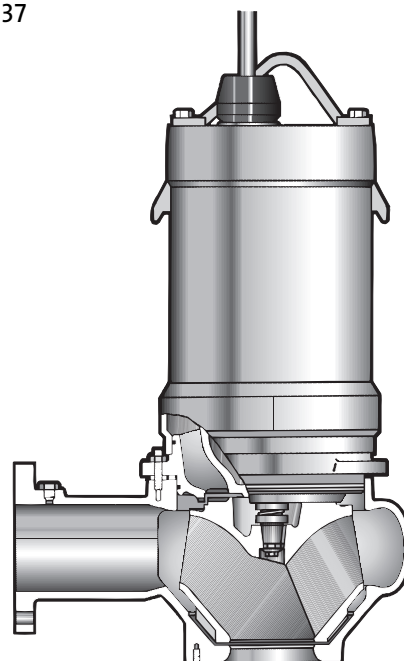
Refrigeración de motores sumergibles en instalaciones en seco

Muchos motores sumergibles se instalan en seco por varios motivos. Hay que garantizar una refrigeración adecuada de estos motores, lo que puede hacerse de varias formas:

Con una **camisa de refrigeración** que cubre el motor o partes del mismo. Parte del líquido bombeado es desviado a través de canales desde la voluta de bomba hasta la camisa de refrigeración donde recircula cuando la voluta esté llena. El agua entra en el espacio por detrás del impulsor a través de una holgura de filtración (aprox. 0,5 mm) y es circulada por los álabes auxiliares en la parte posterior de la pared alrededor del alojamiento del estator del motor dentro de la camisa. El exceso de calor pasa al agua mediante convección forzada, garantizando una eficiente refrigeración. La figura 37 muestra el principio. La utilización de una holgura de filtración y canales de refrigeración lo suficientemente anchos han garantizado que el sistema sea inatascable también en la práctica. La camisa de refrigeración es muchas veces opcional en bombas pequeñas y de tamaño medio para instalación en seco, mientras que las bombas muy grandes llevan con frecuencia una camisa de refrigeración como estándar, independientemente del método de instalación.

En algunos casos, cuando el líquido bombeado es inadecuado para circulación en la camisa de refrigeración, puede utilizarse refrigeración externa del agua. En dichos casos la bomba se modifica con conexiones externas de agua en la camisa, taponando los canales de entrada desde la voluta. Un circuito de seguridad es necesario para proteger la bomba contra sobrecalentamiento debido a la interrupción del suministro externo de agua refrigerante.

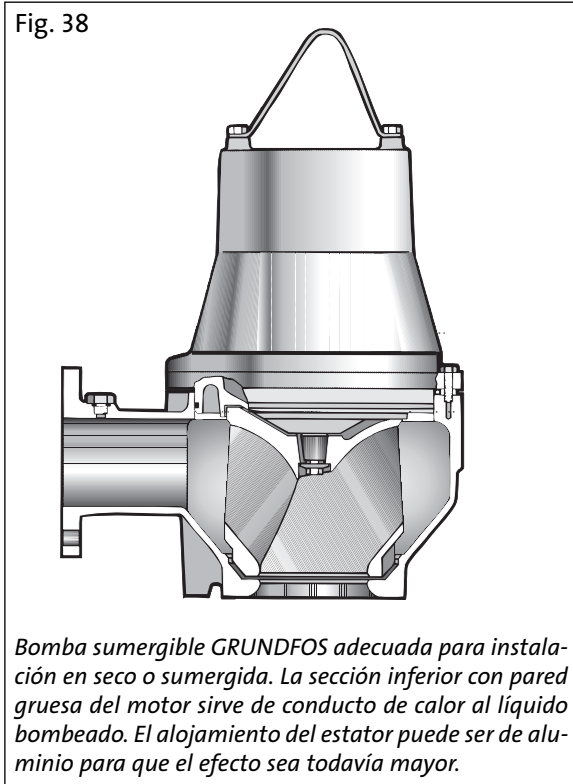
Fig. 37



Bomba sumergible GRUNDFOS instalada en seco con camisa de refrigeración del motor. Parte del líquido bombeado es filtrado a través de una holgura de aprox. 0,5 mm y sigue recirculando en la camisa de refrigeración, la cual circula por la acción de bombeo de los álabes auxiliares de la pared posterior del impulsor. Se proporciona una eficiente refrigeración mediante termodisipación desde el estator al líquido de bombeo.

Con **paredes gruesas del alojamiento del estator**. Este diseño, adecuado para bombas sumergibles pequeñas, utiliza un alojamiento ensanchado del estator que lleva el calor desde el estator hasta el líquido bombeado. En esta construcción la brida del alojamiento del estator puede llegar en contacto directo con el líquido o mediante la brida de la tapa de la cámara de aceite. La brida puede diseñarse con un rebajo o canal para lograr buen contacto con el líquido. El alojamiento del estator puede también ser de aluminio en bombas instaladas en seco para aumentar todavía más la termodisipación. La figura 38 muestra la construcción.

Cuando se trata de bombas instaladas en seco, sólo una camisa de refrigeración ofrece una refrigeración del motor igual o incluso superior a la inmersión. Puede ser necesario disminuir la potencia de otros motores para instalaciones en seco, limitando la selección de componentes de bomba de la correspondiente gama.



Con un **circuito interno de refrigeración**, donde un líquido refrigerante, por ejemplo glicol, es circulada por un impulsor pequeño separado en el eje del motor de la bomba. La bomba incorpora un intercambiador de calor entre el cuerpo de bomba y el motor, donde el líquido refrigerante libera calor al líquido bombeado. La complejidad del sistema puede plantear problemas.

2.3.4 Estanqueidad del motor

La entrada de agua en el motor ocasiona continuamente daños o, si se detecta con dispositivos de seguridad, por lo menos la parada de la bomba. Por consiguiente, el requisito principal y un aspecto del diseño de los motores sumergibles es la integridad completa contra fugas. Se garantiza la estanqueidad del motor mediante un buen diseño y control constante de la calidad, incluyendo pruebas durante la fabricación.

Todas las juntas de los motores sumergibles están mecanizadas para ajustarse y se utilizan juntas tóricas en todas partes. Para garantizar la estanqueidad se cambian cada vez que se abre una junta para el mantenimiento.

La entrada del cable eléctrico al motor debe ser totalmente hermética. Un buen diseño utiliza arandelas de goma comprimible, que se adaptan tanto al cable como al rebaje de entrada. Al montar la arandela, la forma de las piezas de adaptación la comprime a la estanqueidad preestablecida. Una abrazadera de cable por fuera del sellado soporta todas las cargas de tensión exteriores del cable, evitando tirantez en el cierre.

La posibilidad de entrada de agua a través del cable es una realidad. Si puede sumergirse el extremo libre del cable, el agua puede moverse mediante acción capilar entre los hilos de cobre de los avances al motor. Esta acción incrementa cuando la temperatura del motor cambia y el agua puede así entrar en un motor que por lo demás está intacto. Esta situación puede producirse en bombas nuevas que han estado almacenadas en la intemperie antes de la instalación, con el extremo de cable libre sin protección.

La mayoría de los fabricantes suministran sus bombas con protección en los extremos de cable libres. Llevan etiquetas que advierten a los almaceneros e instaladores del peligro de sumergir el extremo de cable libre.

Se necesitan conocimientos y herramientas especiales para garantizar la estanqueidad de un motor sumergible, por lo que se recomienda enviar la bomba a un taller autorizado cuando haya que repararla. Los fabricantes de bombas proporcionan información y herramientas especiales a sus clientes. Para propietarios de muchas bombas sumergibles puede garantizarse un taller oficial propio.

Cierres del eje

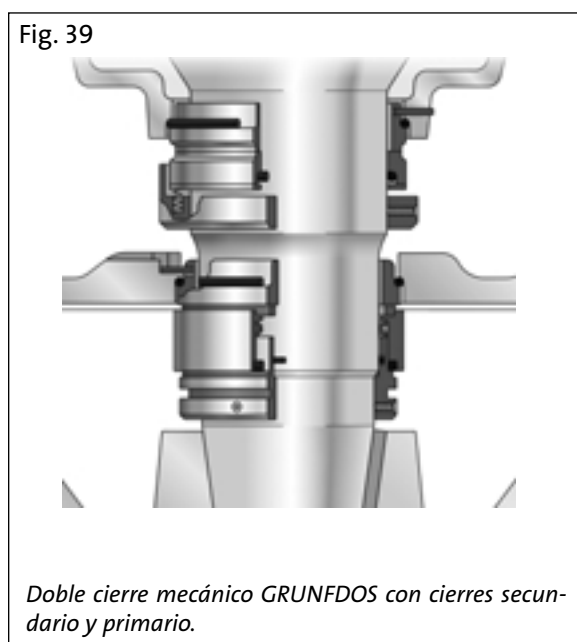
El cierre, que proporciona seguridad contra fugas del líquido bombeado al motor, es uno de los componentes más importantes de una bomba sumergible.

Las bombas sumergibles modernas utilizan casi exclusivamente un sellado del eje con dobles cierres mecánicos, separados por una cámara rellena

2 Construcción de bombas

de aceite. Este arreglo, desarrollado y perfeccionado a lo largo de los años, proporciona una protección adecuada contra fugas y daños del motor en la mayoría de los casos.

La figura 39 muestra un arreglo de cierre mecánico utilizado en bombas sumergibles. Hay un cierre inferior o primario, y un cierre superior o secundario.



Los cierres, que están separados por un baño de aceite, funcionan en diferentes condiciones. Esto se refleja en su construcción con materiales diferentes. Ambos cierres tienen dos anillos de contacto deslizantes, un estacionario y uno que gira con el eje. Los anillos son presionados el uno contra el otro por la fuerza elástica y los anillos del cierre primario además por la presión de la bomba.

El sellado entre los anillos deslizantes está basado en sus superficies de contacto extremadamente lisas y planas. Las superficies tienen un contacto tan estrecho que ninguna fuga, o sólo una fuga muy pequeña puede pasar entre ellas. La planeidad y homogeneidad de los anillos están en la magnitud de 0,0005 mm y las caras están acabadas mediante lapeado. Los anillos deslizantes cierran contra el asiento estacionario o eje con juntas tóricas. El material de las juntas tóricas ha sido elegido para soportar temperaturas altas y la acción corrosiva y disolvente del aceite del cie-

rre, así como las impurezas en el líquido bombeado.

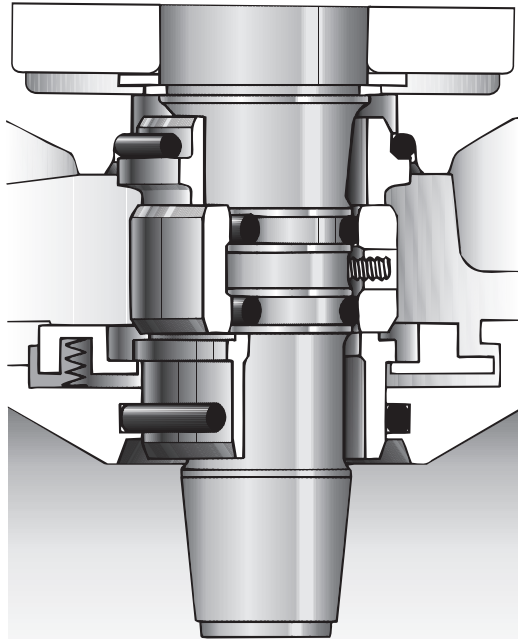
Ranuras en los anillos deslizantes estacionarios del cierre primario evitan que giren en el asiento. Los anillos giratorios están inmovilizados de forma similar con uñas de arrastre. Clips de muelle o arandelas mantienen los anillos estacionarios en sus asientos durante situaciones anómalas de presión.

El material de las caras del cierre primario es normalmente duro, debido a la acción abrasiva del líquido bombeado. El material utilizado hoy en día es carburo de silicio (SiC), que tiene una dureza cerca de 2000 en la escala de Vicker, casi igual que el diamante. Los anillos de carburo de silicio pueden ser sólidos o convertidos. Los anillos de carburo convertidos están sinterizados a SiC a una profundidad de aprox. 1 mm, dejando el anillo interior intacto. SiC tiene también muy buena resistencia contra la corrosión y puede utilizarse en todas las aplicaciones de aguas residuales y drenajes.

Si el cierre secundario es lubricado con aceite puede utilizarse una combinación de materiales. Un anillo estacionario de un material más blando con buenas características de fricción, combinado con un anillo giratorio duro, proporciona poca resistencia de giro del cierre. La lubricación con aceite protege el cierre contra el desgaste. Los modernos cierres secundarios tienen normalmente caras de carburo de silicio y carbono.

Las modernas bombas sumergibles utilizan cierres mecánicos, diseñados para un fin determinado. Casi la mayoría de los fabricantes han desarrollado buenos diseños. La figura 40 muestra un diseño patentado que combina un cierre primario y uno secundario.

Fig. 40



Doble cierre mecánico integrado GRUNDFOS.

Todos los cierres mecánicos utilizados en bombas sumergibles deben permitir el giro en ambos sentidos, ya que las bombas arrancan a menudo en sentido contrario o pueden volverse hacia atrás por el reflujó del agua en instalaciones sin válvulas de retención.

Todas las bombas sumergibles con dobles cierres mecánicos tienen una cámara con aceite entre los cierres. El aceite realiza las siguientes funciones vitales para los cierres y la bomba:

- Lubricación de los cierres, especialmente el secundario
- Refrigeración de los cierres
- Emulsionamiento de posibles fugas de agua, por lo que resultan menos dañinos
- Control del estado del cierre. Al controlar el aceite del cierre durante el mantenimiento se puede estimar el estado del cierre y número de fugas.

Hay que evitar de sobrellenar la cámara de aceite del cierre para que el aceite pueda absorber el agua de fugas por emulsionamiento e impedir una posible sobrepresión debida a termodilatación del aceite. El fabricante proporciona información de la cantidad de aceite y métodos de llenado y control.

En aplicaciones especiales, donde el líquido bombeado contiene materiales muy finos, el cierre primario puede abrirse a consecuencia de material acumulado en las caras del anillo deslizante. En dichos casos puede ser necesario hacer arreglos para lavar el cierre externamente de forma continua. El fabricante y el cliente consideran siempre estas instalaciones por separado para cada caso.

La esperanza de vida de un cierre mecánico no puede determinarse teóricamente, ni siquiera mediante pruebas de laboratorio. Es también difícil predecir el funcionamiento con el paso del tiempo. La vida de los cierres varía mucho de un caso a otro, de unos pocos años a más de 15.

2.3.5 Cojinetes del motor

Cargas de los cojinetes

Los cojinetes de las bombas sumergibles llevan la carga combinada de bomba y motor aplicada en el eje común. Las siguientes fuerzas actúan en los cojinetes, radial o axialmente:

- fuerza hidrodinámica radial
- fuerza hidrodinámica axial
- fuerza magnética radial
- peso de las partes giratorias

Las fuerzas significativas que actúan en los cojinetes son las hidrodinámicas.

La fuerza hidrodinámica radial es el resultado de la distribución de presión en el perímetro del impulsor en varias posiciones relativas a la voluta de bomba. La fuerza radial depende de varios factores de diseño, así como del punto de trabajo de la bomba.

La fuerza hidrodinámica axial es el resultado de las fuerzas inducidas por el impulsor que desvían el caudal de la aspiración axial a la descarga radial, así como de la diferencia de presión entre el lado de aspiración y el de presión del impulsor. La fuerza axial está muy relacionada con el caudal y punto de trabajo de la bomba.

Cojinetes

Se utilizan cojinetes de rodillos en todas partes de los motores de bombas sumergibles. Los cojinetes de bolas se utilizan debido a su capacidad de soportar tanto las cargas axiales como las radiales. En motores muy grandes se utiliza una combinación de cojinetes de bolas y de rodillos debido a

las grandes fuerzas sobre los componentes.

Para permitir termodilatación del eje y tolerancias de fabricación, el cojinete superior del eje puede tener movimiento axial, mientras que el eje inferior está inmovilizado axialmente.

La selección de cojinetes se rige por normativas internacionales respecto a su duración. Según la norma ISO 5199, "Bearing rating life (B10)" deben durar al menos 17500 horas.

Los cojinetes de las bombas sumergibles se lubrican normalmente de por vida en la fábrica de bombas, utilizando una grasa especial, adecuada para las altas temperaturas de funcionamiento permitidas en motores sumergibles.

2.3.6 Dispositivos de protección de motor

Los motores sumergibles llevan varios dispositivos de protección para evitar daños ocasionados por los siguientes motivos:

- sobrecalentamiento
- entrada de agua
- fallo del cierre
- fallo del cojinete
- deterioro del aislamiento del bobinado

Algunos dispositivos de protección son estándar, mientras que otros sólo están disponibles como equipo adicional bajo pedido. Las bombas grandes necesitan mejores dispositivos de protección debido a su mayor valor económico.

Los dispositivos de protección pueden dividirse en dispositivos internos con sensores dentro del motor y dispositivos externos en el panel de control del motor.

Dispositivos de protección internos

Los siguientes dispositivos de protección se montan dentro del motor:

- **Térmicos en los bobinados del estator.** Son normalmente interruptores bimetálicos pequeños que abren a una temperatura fija preajustada, ver la figura 41. Se utilizan tres interruptores, uno en cada fase, en los motores trifásicos. Están conectados en serie en el circuito de control, que está cableado para parar el motor cuando se abre. Después de enfriarse, los interruptores se rearman y cierran el circuito, pudiendo rearrancarse la bomba. Los térmicos en los bobinados protegen el motor contra

Fig. 41



Térmico. La unidad consta de un interruptor bimetálico muy pequeño que se abre según la temperatura fijada en el interruptor. Puede conectarse en el panel de control para cortar la corriente si la temperatura del motor sube demasiado.

sobrecalentamiento ocasionado por una refrigeración insuficiente y son especialmente importantes en bombas que dependen de la inmersión para su refrigeración.

- La entrada de agua en el motor cerrado puede controlarse mediante un **interruptor de humedad** que reacciona al exceso de humedad. El interruptor de humedad se conecta normalmente en serie con los térmicos en un circuito que desconecta la bobina del disyuntor y para el motor al abrirse. La figura 42 muestra un interruptor de humedad que funciona cuando la humedad alcanza el 100 %. El interruptor de humedad es irreversible y no se rearma después de dispararse. En un circuito común con interruptor de humedad y térmico puede determinarse el dispositivo que se ha abierto, ya que sólo los térmicos se vuelven a cerrar después de enfriarse. Hay que abrir y secar el motor antes de intentar de rearrancarlo después de dispararse el interruptor de humedad.
- La entrada de agua en el motor cerrado por detrás de los cierres mecánicos puede controlarse mediante un sensor **detector de fugas** en la cámara de aceite del cierre. Los aceites de motor normales utilizados como aceite de cierre en bombas sumergibles pueden formar una emulsión con hasta un 30 % de contenido de agua. El detector de fugas reacciona cuando el contenido de agua supera el 30 % (detectores conductivos) o controla el contenido de agua continuamente (detectores capacitivos). Los últimos pueden calibrarse para que se disparen a cualquier contenido de agua y utilizarse para controlar indirectamente el estado del cierre primario, verificando la entrada de agua a lo

Fig. 42



Interrupción de humedad GRUNFDOS. La unidad consta de varios discos sensibles a la humedad, apilados en una varilla de mando, y un microinterruptor. Los discos higroscópicos se dilatan en contacto con demasiada humedad, y tiran de la varilla de mando. Una leva en el extremo de la varilla dispara el microinterruptor y corta el circuito. La unidad es irreversible y hay que cambiarla después de su utilización.

largo del tiempo (fugas). Los detectores de fugas normalmente no son estándar, sino están disponibles como equipo adicional.

- La entrada de agua en el motor cerrado mediante flujo capilar por el cable eléctrico antes de instalar la bomba puede evitarse, montando en fábrica una funda **protectora hermética** en el extremo de cable libre. No debe quitarse hasta que se conecte el cable al panel de control.
- El estado de los cojinetes y/o grasa de los cojinetes puede controlarse mediante **sensores térmicos** en el soporte de cojinetes. Se instalan cerca del anillo guía exterior del cojinete, y se calibran para registrar la temperatura del cojinete. Los sensores térmicos están disponibles como equipo adicional.

Dispositivos de protección externos

Los siguientes dispositivos de protección están montados en el panel de control del motor:

- **La protección contra cortocircuito** se realiza mediante fusibles, disyuntores o protecciones electrónicas de motor. Los fusibles y disyuntores deben dimensionarse para soportar la intensidad de arranque del motor, pero el valor no debe ser superior al del cable eléctrico o conmutador. Cuando se utilicen fusibles, éstos deben ser del tipo de acción retardada.
- Se necesita protección contra sobrecarga en una situación repentina de sobrecarga, tal como cuando el impulsor empieza a tener problemas de funcionar o se agarrota, cuando la bomba se atasca o durante la pérdida de fase

Fig. 43



Relé de sobrecarga térmica. El relé conecta con el contactor del motor y corta el corriente si la carga eléctrica supera el valor ajustado.

del suministro eléctrico. La protección contra sobrecarga la proporciona a menudo relés de sobrecarga, acoplados a los contactores del motor. Constan de elementos bimetálicos con compensación de temperatura ambiente que desconectan la corriente a los serpentines del contactor si la corriente supera el valor especificado ajustado. Los **relés de sobrecarga** proporcionan buena protección contra la pérdida de fase del suministro. Deben ajustarse de acuerdo con la intensidad nominal del motor. Cuando se utiliza arranque estrella triángulo, la corriente a través del relé de sobrecarga se reduce con el factor 0,58 ($1/\sqrt{3}$), lo que hay que tener en cuenta al ajustarlo. La figura 43 muestra un relé de sobrecarga.

- El aislamiento del bobinado del estator se controla mediante un dispositivo **automático de medición de la resistencia** que mide la resistencia entre las fases y entre las fases y tierra cada vez que la bomba para. Pueden ajustarse niveles de alarma de la resistencia, evitando cortocircuitos y daños de los bobinados.

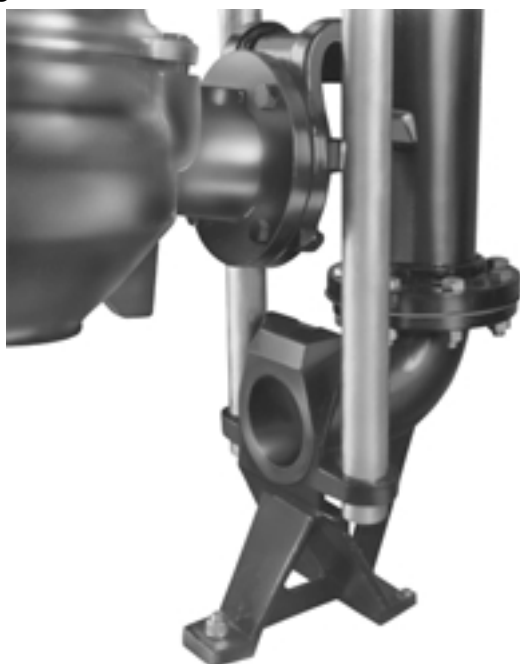
2.4 Conexión de la bomba

Al instalar una bomba sumergible en instalación sumergida sólo se conecta a la tubería de descarga. Para instalaciones fijas se utiliza normalmente una base de autoacoplamiento.

Base sumergible

El concepto de base sumergible ha sido desarrollado a lo largo de los años para utilización con bombas sumergibles. Permite bajar la bomba a la fosa y conectarla firmemente a la tubería de descarga sin que ningún operario tenga que entrar en la fosa. De la misma manera, la bomba puede extraerse sin peligro de la fosa para mantenimiento. El sistema incluye barras o tubos que guían la bomba hacia abajo hasta la base. Una brida especial, o uñeta de guía, en la descarga de la bomba encaja en las superficies de unión de la base para una firme conexión. Los sistemas para fosas están diseñados con precisión y tienen superficies mecanizadas y anillos de cierre de

Fig. 44



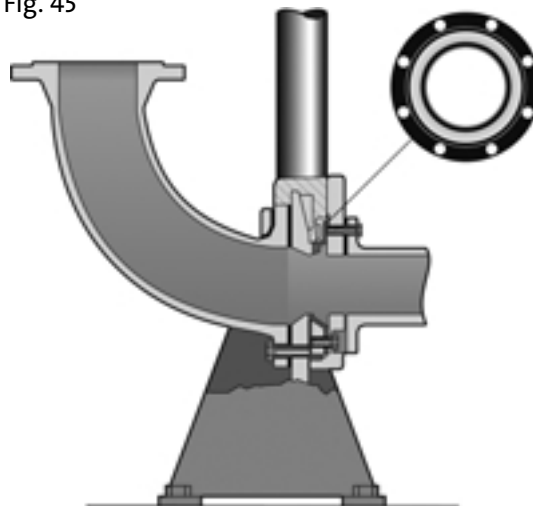
Base sumergible GRUNDFOS. Cuando la bomba está colocada, su peso la mantiene firmemente en sitio. Superficies de conexión mecanizadas con precisión y un cierre de disco de goma garantizan la estanqueidad. Una holgura entre la uñeta de guía y las barras garantizan una extracción sin dificultades, incluso en condiciones contrarias.

goma para una conexión fuerte y hermética. La bomba se mantiene en sitio por su propio peso. La figura 44 muestra la base y las barras guía de una bomba sumergible.

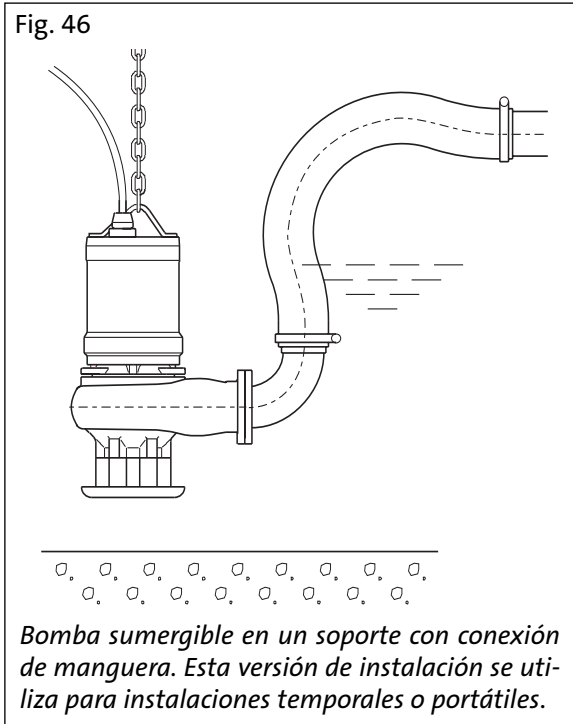
La figura 45 muestra un cierre flexible, diseñado de forma que la acción de cierre aumenta todavía más por la presión de la bomba, garantizando una conexión hermética en todo momento.

Algunos fabricantes de bombas ofrecen kits de conversión para la conexión de bombas a viejas bancadas o como bombas de sustitución para la base de otro fabricante. Por lo tanto, la mejora o conversión de estaciones de bombeo existentes puede hacerse con un trabajo y costes mínimos.

Fig. 45



Cierre flexible entre la brida de presión de la bomba y el conector. El cierre está diseñado de forma que la acción de cierre aumenta todavía más por la presión de la bomba, garantizando una conexión hermética en todo momento.

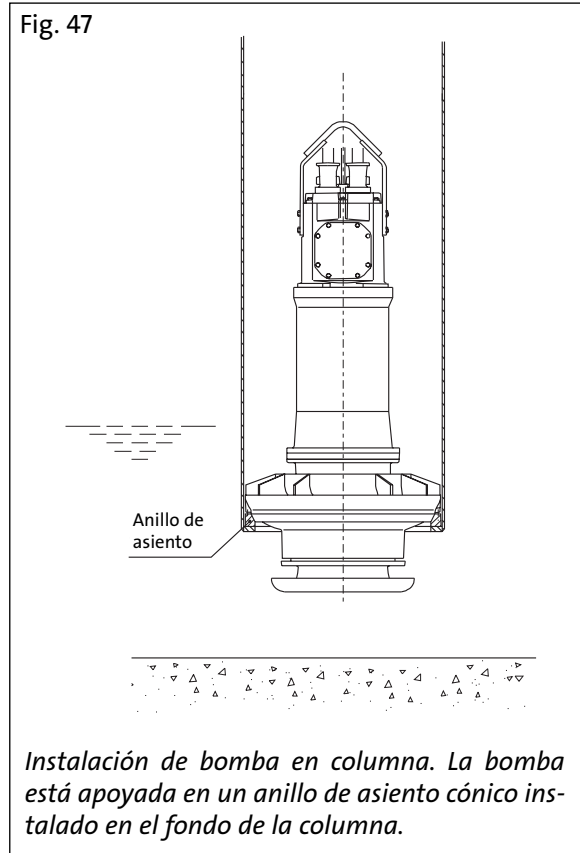


Conexión de manguera

La figura 46 muestra una instalación sumergible con conexión de manguera. Puede utilizarse para instalaciones temporales o para aplicaciones en las que se desplaza la bomba dentro de la fosa húmeda para bombear lodos.

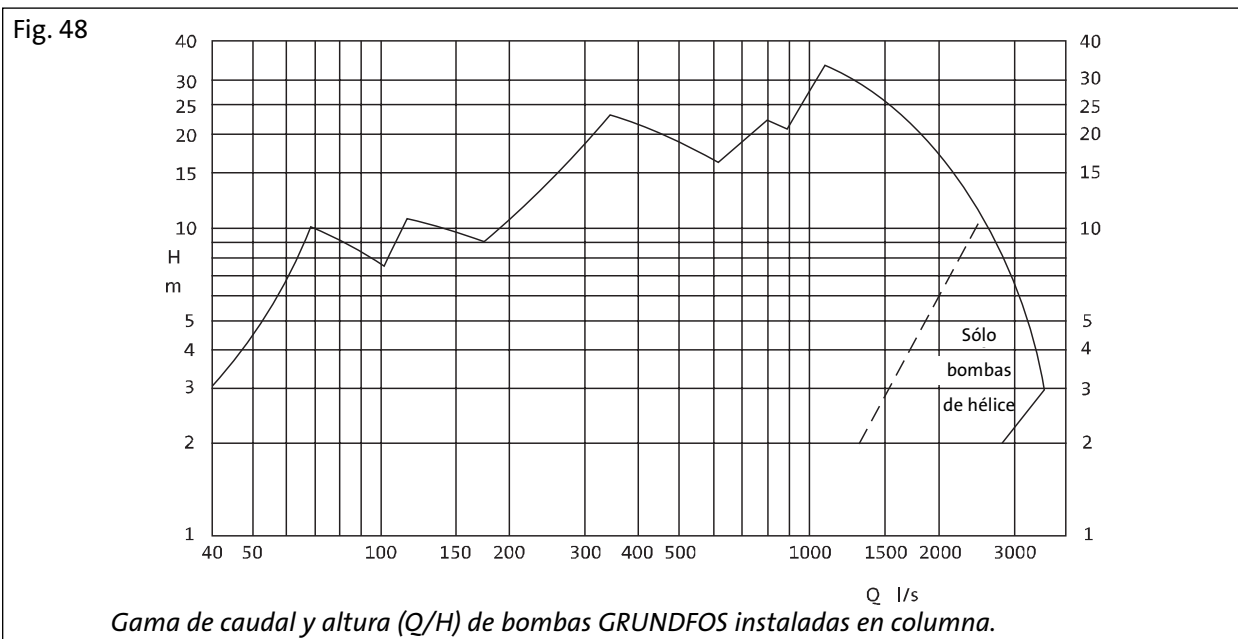
Instalación en columna

El concepto de instalación de bombas sumergibles en columna ha sido desarrollado durante los últimos años. Se baja la bomba a un tubo vertical o columna, donde la voluta circular de la bomba se ajusta en un anillo de asiento instalado en el extremo inferior de la columna, ver la figura 47. La bomba permanece en sitio por su propio peso y por la fuerza de presión de la acción de bombeo. La voluta está diseñada específicamente para la instalación y lleva álabes posteriores. El anillo de asiento es cónico, lo que garantiza una conexión hermética entre bomba y columna. La conexión hermética y uñetas impiden que la bomba patine al arrancar.



La instalación en columna es idónea para bombas sumergibles de hélice, pero también para bombas de aguas residuales para grandes caudales y alturas pequeñas a medianas. La figura 48 muestra el área Q/H en la que las bombas de instalación en columna GRUNDFOS están disponibles. Para esta gama la instalación en columna supone probablemente unos menores costes de inversión, pero cada proyecto debe evaluarse por separado. Las bombas instaladas en columna tienen el mismo rendimiento que bombas previstas para otros tipos de instalación, pero las curvas de las bombas son ligeramente diferentes debido a la voluta abierta. La instalación en columna es muy adecuada para el bombeo de lodos de retorno en plantas de tratamiento de aguas residuales. El tubo de columna puede ser de acero inoxidable o acero galvanizado en baño caliente.

En instalaciones con agua de mar, una columna de acero inoxidable puede crear un fuerte elemento galvánico que ocasiona corrosión de la bomba. Especialmente piezas de bomba galvanizadas se corroerán rápidamente debido a la acción galvánica del gran área catódica de la



columna alrededor de la bomba. Por ejemplo, una cadena de elevación que quedará en su sitio debe ser de acero inoxidable. La bomba de fundición debe estar protegida por ánodos fungibles que se cambian a intervalos regulares. Si se aplica una capa de pintura de por lo menos 200 μ m de grosor a la columna, se evita la formación de la superficie catódica y por lo tanto corrosión de la bomba.

2.5 Materiales de construcción, corrosión y desgaste

2.5.1 Resistencia a la corrosión

La fundición es el material principal de construcción en las bombas sumergibles de aguas residuales, con tornillos y accesorios en acero inoxidable. El eje de la bomba es totalmente de acero inoxidable o está protegido contra el contacto con los líquidos de bombeo. Cuando la bomba o base incluye piezas de acero soldadas, éstas están galvanizadas en baño caliente. Dichos materiales durarán décadas en trabajos normales de aguas negras.

Cuando el líquido bombeado contiene efluentes industriales es posible que la resistencia a la corrosión de la fundición no sea suficiente, especialmente para partes que están expuestas a velocidades altas del caudal, tales como impulsores y volutas de bomba, que estarán expuestas a la corrosión por erosión. En estas aplicaciones, la capa natural de la corrosión que proporciona una

protección natural al material que está por debajo de esta capa desaparece debido al rozamiento, ocasionando rápidamente corrosión. Puede ser necesario utilizar materiales inoxidables para estas partes sensibles.

La corrosión en agua de mar depende de varios factores, tales como la salinidad, contenido de oxígeno, contaminación y temperaturas. Hay que pensar en la selección correcta de material para cada caso. Ánodos de zinc protectores fungibles pueden proteger contra la corrosión en algunos casos.

El material del forro del cable eléctrico debe soportar aceites y otros agentes contaminantes presentes en las aguas residuales. Otras piezas de goma, tales como juntas tóricas, son normalmente de nitrilo o neopreno para que sean resistentes contra aguas residuales, aceites y productos químicos.

Las bombas sumergibles están también disponibles totalmente en acero inoxidable para utilización en líquidos altamente corrosivos, tales como efluentes de industrias de procesos. Las bombas en acero inoxidable son 3 – 4 veces más caras que las bombas fabricadas en materiales ordinarios. Para aplicaciones difíciles es posible que el fabricante no pueda garantizar las características anticorrosivas para un caso específico, pero colaborará con el cliente con el fin de encontrar la solución acertada para el caso.

2.5.2 Resistencia al desgaste

El contenido de arena en aguas residuales es por término medio entre el 0,002 y 0,003 % (en volumen). Puede periódicamente ser mucho mayor en zonas con sistemas combinados de aguas residuales y drenaje de aguas de lluvia, por ejemplo durante fuertes lluvias y cuando se derrite la nieve. Una fundición normal durará años en la mayoría de las aplicaciones, pero puede ser necesario pensar en materiales especiales para efluentes muy abrasivos, tales como el bombeo desarenador en plantas de tratamiento de aguas residuales.

2.5.3 Líquidos abrasivos

El funcionamiento de una bomba en un líquido abrasivo depende en gran medida del contenido de abrasivos. El cuarzo normal o la arena de silicio es el abrasivo común, al que puede aplicarse lo siguiente directamente.

El contenido de arena se expresa como contenido en volumen o peso de la siguiente forma:

$$p_m = 3 \cdot p_v \quad (15)$$

donde p_m es el contenido en peso y p_v el contenido en volumen en %. Así $p_v = 5\%$ igual a $p_m = 15\%$.

La densidad de la mezcla de líquido/arena aumenta cuando el contenido de arena aumenta. La potencia necesaria de la bomba está relacionada directamente con la densidad del líquido de bombeo, por lo siempre que se bombeen líquidos con alto contenido de arena habrá que comprobar por separado la potencia necesaria en cada caso, para garantizar el funcionamiento de la bomba. Para bombas desarenadoras en plantas de tratamiento de aguas residuales una reserva de potencia del 30 % ha resultado adecuada.

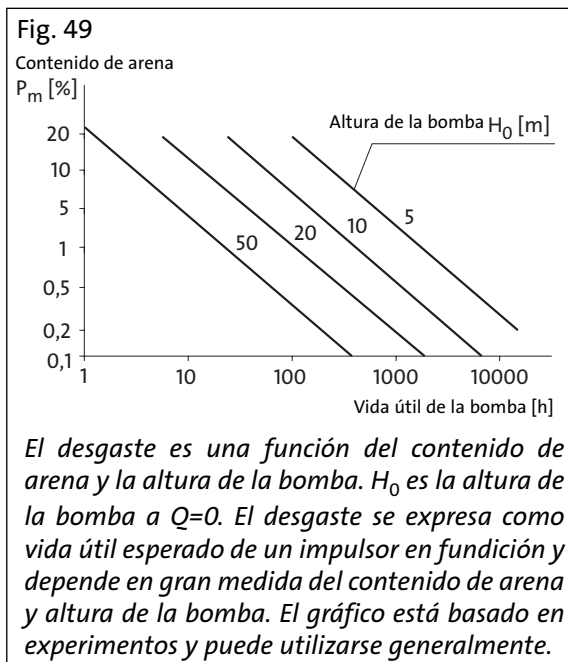
La densidad de una mezcla de agua y arena puede escribirse

$$\rho = 1 + 0,007 p_m \quad (16)$$

donde p_m se expresa en %.
Pues, si $p_m = 15\%$, $\rho = 1,1 \text{ kg/l}$.

Los siguientes factores influyen en el desgaste de una bomba:

- contenido de arena
- calidad de la arena
- material de bomba
- altura de bomba
- tipo de impulsor



La figura 49 es un diagrama que muestra las relaciones entre el desgaste de la bomba y el contenido de arena y la altura de la bomba. Un alto contenido de arena en el líquido tendrá un efecto dramático en la vida útil de la bomba. El efecto del contenido de arena se agrava con una gran altura de la bomba.

El desgaste de la bomba puede minimizarse utilizando materiales resistentes al desgaste y con un diseño adecuado. Para conseguir resultados mejores deben utilizarse materiales con una dureza superior a 500 HB. La mecanización difícil de materiales duros, tales como Nihard y algunos hierros aleados, puede necesitar diseños especiales de impulsor y voluta donde se minimiza la mecanización.

La utilización de bombas sumergibles en entornos abrasivos debe considerarse por separado en cada caso, utilizando criterios técnicos correctos.

3 Funcionamiento de la bomba

El funcionamiento de la bomba es el resultado de la interacción entre la bomba y la tubería de impulsión o de presión. Hacemos una introducción a la selección de bombas, así como el cálculo de las características de resistencia de la tubería de impulsión.

3.1 Altura de bomba

3.1.1 Bombas sumergibles

El concepto de altura se refiere en lo siguiente a bombas sumergibles. Con fines prácticos se supone que la presión en la fosa de bomba, o fosa inferior, es igual a la presión predominante en el depósito receptor o superior. Si estos depósitos tuviesen presiones diferentes, habría que tener en cuenta la diferencia de presión. Tampoco hace falta tener en cuenta la diferencia de la presión atmosférica en todas las instalaciones reales, ya que la diferencia de la presión atmosférica entre un depósito receptor colocado por ejemplo 100 m por encima de la fosa de la bomba es sólo 0,001 bar ó 0,01 m.c.a.

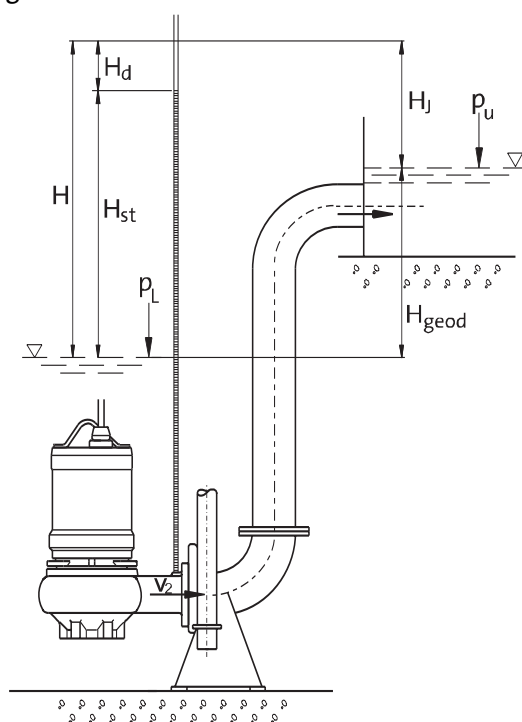
La figura 50 muestra como se define la altura en una instalación de bombas sumergibles. Se utilizan las siguientes unidades:

- H = altura total de la bomba (m)
- H_{st} = altura estática de la bomba (m)
- H_d = altura dinámica de la bomba (m)
- H_{geod} = altura geodésica (m)
- H_j = pérdida en las tuberías (m)
- P_L = presión atmosférica en la fosa de bomba
- P_U = presiones atmosféricas en el depósito superior
- V_2 = velocidad del caudal en la salida (m/s)
- g = aceleración por gravedad (9,81 m/s²)

Si un tubo de observación está instalado en la brida de descarga de la bomba, el líquido bombeado subirá en la brida hasta una altura H_{st} desde el nivel de la fosa. Esta altura representa la altura estática de la bomba. Además, el líquido tiene una velocidad V_2 en la descarga de la bomba, que puede convertirse en presión o altura dinámica H_d con la siguiente ecuación:

$$H_d = \frac{v_2^2}{2g} \quad (17)$$

Fig. 50



Componentes de altura en instalaciones de bombas sumergibles.

La suma de la altura estática y la dinámica es la altura total de la bomba, por lo tanto

$$H = H_{st} + H_d \quad (18)$$

Según acuerdo internacional (Norma ISO 2548), se utiliza la altura total H conforme a la ecuación 18 para diseñar curvas características de bombas sumergibles.

Por lo tanto, la altura total H está disponible para bombear el líquido a través de la tubería de impulsión. La presión o altura necesaria para bombear un caudal específico a través de una tubería se compone de la altura geodésica y las pérdidas de carga. Por lo tanto puede escribirse:

$$H = H_{geod} + H_j \quad (19)$$

La altura geodésica H_{geod} es la diferencia física real de altura entre los niveles de líquido de la fosa y del contenedor receptor. Las pérdidas de caudal en la tubería constan de pérdidas por fricción en la tubería, pérdidas locales desde varias conexiones en la tubería (codos, válvulas, etc.) y la pérdida de salida en el punto de descarga.

Las pérdidas ocasionadas por el caudal del líquido en la fosa hasta la bomba se consideran como pérdidas de bomba en instalaciones de bombas sumergibles. Si la tubería de aspiración está instalada antes de la bomba hay que tenerlo en cuenta a la hora de calcular las pérdidas en las tuberías.

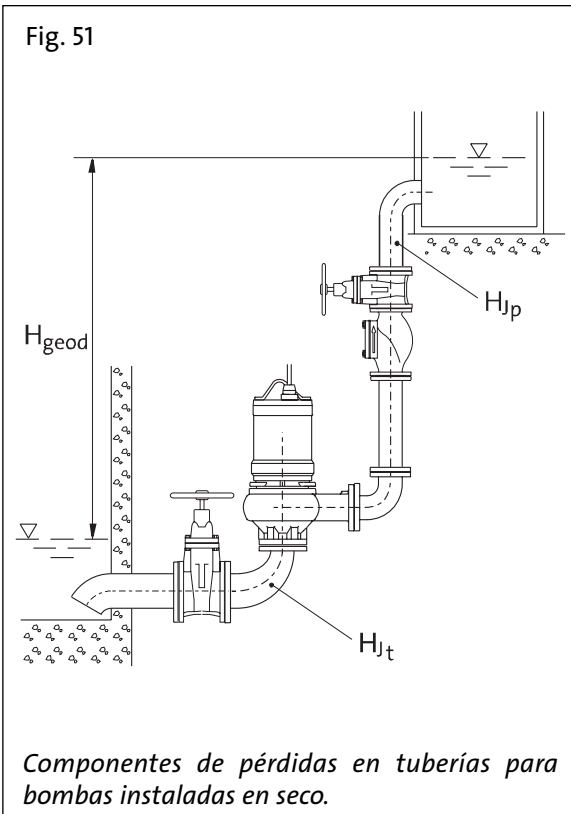
3.1.2 Bombas instaladas en seco

Al calcular las alturas de bombas instaladas en seco deben también tenerse en cuenta las condiciones delante de la bomba. La figura 51 muestra la situación.

En este caso se supone que la fosa de aspiración y el depósito receptor están abiertos a la atmósfera y que la presión en las superficies del líquido es constante. Por lo tanto, la altura de la bomba es la suma de la altura geodésica y las pérdidas de caudal en las tuberías de aspiración e impulsión. Entonces

$$H = H_{geod} + H_{jt} + H_{jp} \quad (20)$$

donde H_{jt} representa las pérdidas de caudal en la tubería de aspiración y H_{jp} las pérdidas de caudal en la tubería de impulsión.

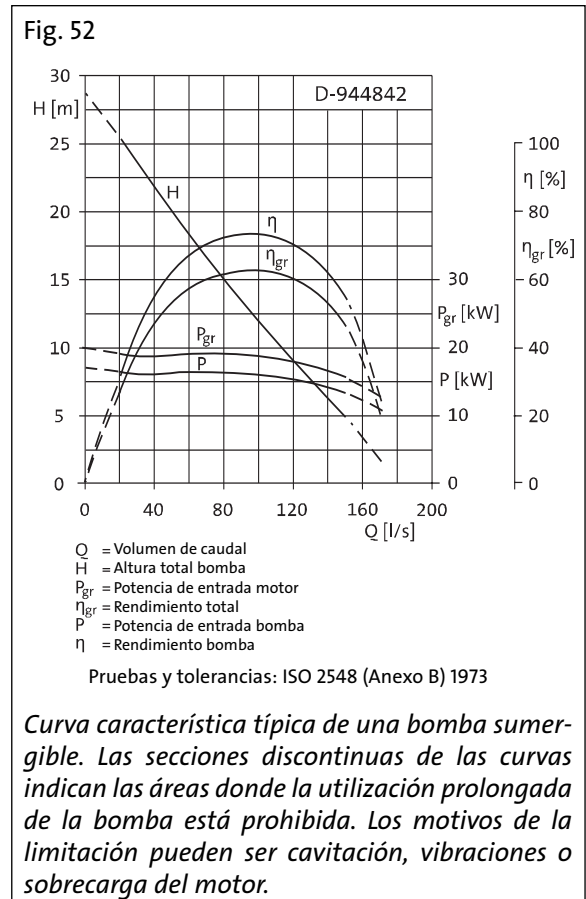


3.2 Curvas características de la bomba

Las características de las bombas centrífugas se presentan normalmente como una serie de curvas, donde los datos han sido establecidos mediante pruebas de las bombas o evaluados por el fabricante, por ejemplo para un diámetro especial de impulsor. Para bombas sumergibles la siguiente información importante está normalmente representada como curvas contra el caudal Q:

- H curva de altura
- η curva(s) de rendimiento
- p curvas de potencia

La figura 52 muestra una típica curva característica con información importante para el usuario.



3.2.1 Curva H

La altura o curva H da la altura total de la bomba en función del caudal Q. La curva puede contener información adicional respecto a la utilización de la bomba, tal como limitaciones debidas a cavitación, vibraciones o sobrecarga del motor.

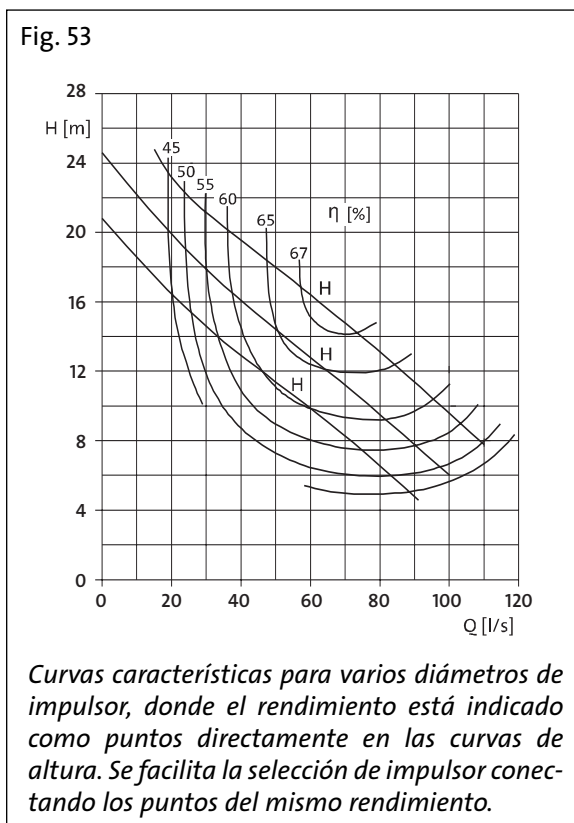
3.2.2 Curvas de rendimiento

El rendimiento η de la bomba es también una función del caudal Q . El rendimiento puede indicarse como un ratio o porcentaje. Para bombas sumergibles se definen tanto el rendimiento η de la bomba como el rendimiento total η_{gr} , donde η_{gr} incluye las pérdidas en el motor. Es importante diferenciar entre estas definiciones del rendimiento, especialmente cuando se compara el funcionamiento de la bomba. Las pérdidas que influyen en el rendimiento de la bomba están comentadas en la sección 1 de este libro. Por lo tanto puede escribirse:

$$\eta_{gr} = \eta_{mot} \cdot \eta \quad (21)$$

donde η_{mot} es el rendimiento del motor.

El rendimiento puede también estar marcado en la curva de altura, con números que indican varios valores de rendimiento. Si varias curvas de altura para varios diámetros de impulsor están trazadas en el mismo gráfico, estos puntos pueden conectarse para formar isogramas, o áreas de funcionamiento del mismo rendimiento. La curva característica de la bomba tendrá entonces el aspecto típico que muestra la figura 53.



3.2.3 Curvas de potencia

La potencia necesaria de la bomba es también una función del caudal Q . La figura 52 contiene la curva de potencia tanto de la bomba como del motor. La potencia del motor es la potencia eléctrica utilizada por el motor, medida en la caja de conexión de cable en el motor. Según normativas internacionales respecto a pruebas de bombas, la potencia de la bomba se denomina P y la potencia absorbida por el motor P_{gr} . La potencia necesaria puede también calcularse mediante la ecuación

$$P = \frac{\rho Q g H}{\eta} \quad (22)$$

donde

P = potencia (W)

ρ = densidad del líquido (kg/m^3)

Q = caudal en volumen (m^3/s)

g = aceleración por gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H = altura de bomba (m)

η = rendimiento

3.2.4 Curva NPSH

Los cálculos de NPSH sólo se realizan para bombas instaladas en seco, por lo que la curva normalmente no está incluida en las hojas de datos de bombas sumergibles. El fabricante la proporciona a petición, si se teme cavitación en una instalación en seco, o si el cliente la necesita por otro motivo.

Los resultados de pruebas realizadas con agua limpia son válidos para aguas residuales municipales normales y la mayoría de efluentes industriales, ya que el bajo contenido de sólidos en las aguas residuales (menos del 0,05 %) no influye significativamente en el funcionamiento de la bomba.

3.3 Pérdidas en tuberías y curvas características de la tubería de impulsión

A continuación se presenta la teoría de cálculo de pérdidas de caudal en tuberías. Se han hecho cálculos prácticos con ayuda de las instrucciones detalladas, con diagramas de cálculo y nomograma, presentadas en el Apéndice A, o con un programa informático.

Las velocidades de caudal utilizadas para el bombeo de aguas residuales son lo suficientemente altas como para garantizar un caudal turbulento uniforme en la tubería. Por lo tanto, las pérdidas de caudal aumentan con el cuadrado de su velocidad. La pérdida de caudal de una tubería de impulsión es la suma de la pérdida por fricción de los componentes de la tubería y las pérdidas locales de varios componentes y conexiones.

3.3.1 Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción en las tuberías dependen de los siguientes factores:

- longitud de la tubería
- diámetro interior de la tubería
- velocidad del flujo
- rugosidad relativa de la pared de la tubería
- viscosidad cinemática del líquido

Una relación adimensional, se introduce el número de Reynold:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (23)$$

donde

Re = número de Reynold

v = velocidad del caudal (m/s)

D = diámetro interior de la tubería (m)

ν = viscosidad cinemática (m²/s)

La viscosidad cinemática para agua depende de la temperatura:

t°C	0	20	40	60	100
ν 10 ⁻⁶ m ² /s	1,78	1,00	0,66	0,48	0,30

La ecuación para pérdidas en tuberías puede escribirse:

$$H_{jp} = \lambda \frac{lv^2}{D2g} \quad (24)$$

donde

H_{jp} = pérdida en la tubería (m)

λ = factor de fricción

l = longitud de la tubería (m)

v = velocidad del caudal (m/s)

g = aceleración por gravedad (9,81 m/s²)

D = diámetro interior de la tubería (m)

Al obtener el factor de fricción λ del diagrama de la figura 54, puede solucionarse la ecuación 24. Pueden usarse los valores de rugosidad superficial (mm) de la siguiente tabla:

Material de tubería	k nuevo	k viejo
Plástico	0,01	0,25
Acero estirado	0,05	1,0
Acero soldado	0,10	1,0
Acero inox. estirado	0,05	0,25
Acero inox. soldado	0,1	0,25
Fundición	0,25	1,0
Fundición bituminada	0,12	
Cemento de amianto	0,025	0,25
Hormigón	0,3...2,0	

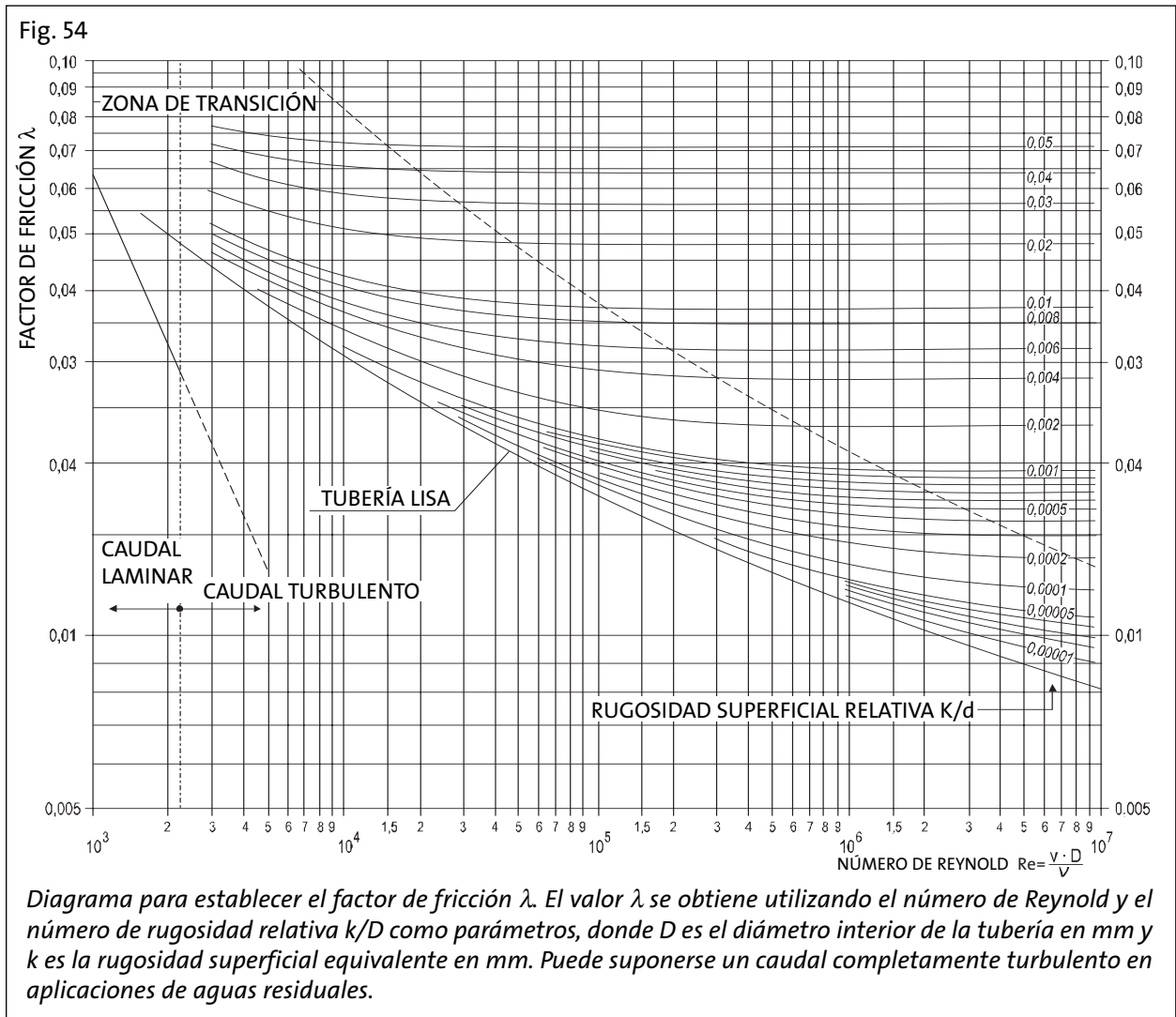
La superficie de un material viejo de tubería se vuelve más rugosa por la erosión. La corrosión y las capas de sedimentos que se forman en la superficie de la tubería pueden reducir el diámetro de la misma, ocasionando también grandes pérdidas de caudal.

El efecto del cambio del diámetro de la tubería puede calcularse con la siguiente relación:

$$H'_{jp} = H_{jp} \left(\frac{D}{D'} \right)^5 \quad (25)$$

Por lo tanto, un aumento del diámetro de la tubería, por ejemplo de 100 a 108 mm reduce la pérdida de caudal en un 30 %.

La ecuación 25 es lo suficientemente exacta con fines prácticos cuando se comparan pérdidas de caudal en tuberías de impulsión de diámetro diferente, especialmente porque se disponen pocas veces de valores exactos de la rugosidad superficial.



Las pérdidas de caudal en la tubería de impulsión se calculan frecuentemente con ayuda de programas informáticos para uso interno, también disponibles de algunos fabricantes de bombas. Estos programas pueden también recomendar algunas selecciones de bombas de la gama del fabricante que sean más adecuadas para la finalidad. Se recomienda examinar en detalle la selección de bomba propuesta sólo por un programa, y siempre contactar con el fabricante en casos dudosos.

La tubería de impulsión está a veces dividida en dos tuberías paralelas separadas. Tienen la misma longitud pero pueden tener diámetros diferentes o ser de materiales diferentes. La distribución del caudal entre las dos tuberías y las pérdidas resultantes en las mismas pueden ser difíciles de determinar. GRUNDFOS ha desarrollado un mé-

do para esto. donde se sustituyen las dos tuberías por una sola tubería virtual de impulsión. Se determina un diámetro equivalente para esta tubería, para que las pérdidas de caudal producidas sean iguales a las pérdidas de las dos tuberías de impulsión reales.

Se calcula el diámetro equivalente mediante las siguientes ecuaciones:

A. Ambas tuberías de impulsión tienen el mismo diámetro

$$D_e = 1,3 \cdot D \tag{26}$$

donde D = diámetro de las dos tuberías de impulsión paralelas

B. Las tuberías de impulsión tienen diámetros diferentes

$$D = (D_1^{2,65} + D_2^{2,65})^{0,3774} \quad (27)$$

donde D_1 y D_2 son los diámetros diferentes de las tuberías de impulsión paralelas.

Se calculan los volúmenes de caudal de las dos tuberías de impulsión mediante las siguientes ecuaciones:

A. Ambas tuberías de impulsión tienen el mismo diámetro

$$Q_1 = \frac{Q}{2} \quad (28)$$

B. Las tuberías de impulsión tienen diámetros diferentes

$$Q_1 = \left(\frac{D_1}{D_e}\right)^{2,65} \cdot Q \quad (29)$$

$$Q_2 = Q - Q_1 \quad (30)$$

Estas ecuaciones son válidas para caudales turbulentos, que son normales al bombear agua. Las ecuaciones requieren la rugosidad superficial sea igual en ambas tuberías.

3.3.2 Pérdidas locales

Cambios del diámetro interior de la tubería y de su forma, codos, válvulas, uniones, etc. incluidos en la tubería de impulsión pueden originar pérdidas adicionales que incluyen un componente de fricción y uno de turbulencia. Se utiliza la siguiente ecuación para calcular las pérdidas:

$$H_{JN} = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (31)$$

donde

H_{JN} = pérdida local (m)

ζ = factor de resistencia local

v = velocidad del flujo (m/s)

g = aceleración por gravedad (9,81 m/s²)

Los factores de la resistencia local de varios elementos de tuberías y conexiones están presentados en el Apéndice A. La pérdida por fricción de los mismos no está incluida en el factor de resistencia local, sino se calcula como parte de la pérdida por fricción en la tubería de impulsión, incluyendo su longitud y diámetro interior al calcular la longitud de la tubería.

La pérdida por discontinuidad de dilatación de la tubería puede calcularse mediante la ecuación de Borda

$$H_{JN} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (32)$$

donde

H_{JN} = pérdida local (m)

v_1 = velocidad de caudal 1 (m/s)

v_2 = velocidad de caudal 2 (m/s)

g = aceleración por gravedad (9,81 m/s²)

Si la dilatación de la tubería está diseñada con una sección cónica con un ángulo de dilatación de 10°, la pérdida se reduce al 40 % del valor calculado con la ecuación 32. Este hecho es importante cuando la sección de la tubería se dilata inmediatamente después de la brida de presión de la bomba, donde la velocidad del caudal puede ser bastante alta. Puede ahorrarse energía si la transición se diseña con una junta de dilatación gradual de 10°. Las pérdidas en una sección contráctil de la tubería son mucho menores y la sección cónica puede hacerse mucho más corta.

Las pérdidas en una sección con reducción de velocidad son generalmente mucho mayores que en una sección con velocidad creciente.

El componente final de las pérdidas en las tuberías es la pérdida de salida al final de la tubería de impulsión. Si no se ha previsto ninguna dilatación, la pérdida es igual a la presión de velocidad o $v^2/2g$.

Los fabricantes proporcionan los coeficientes de pérdida para las distintas válvulas. El Apéndice A contiene valores de referencia para las válvulas más comunes utilizadas en instalaciones de aguas fecales.

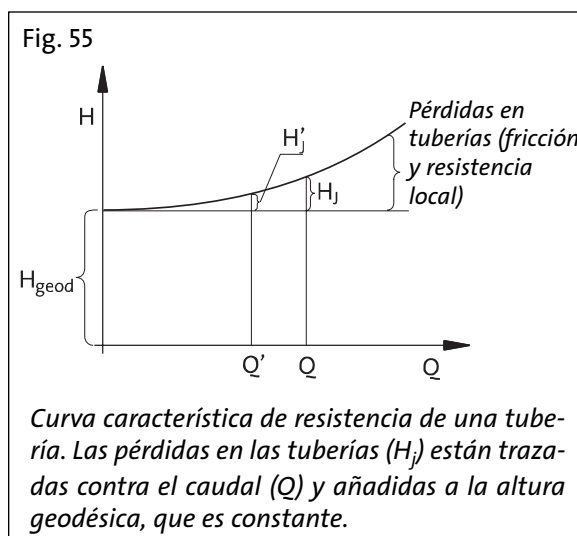
3.3.3 Curva característica de la tubería de impulsión

En instalaciones de aguas residuales, la fosa de bomba y el pozo de suministro están abiertos a la atmósfera y la curva característica de la tubería de impulsión sólo incluye la altura geodésica y las pérdidas de caudal. La figura 55 muestra el aspecto general de la curva característica de resistencia de una tubería. El caudal es turbulento a las velocidades de caudal consideradas, por lo que puede suponerse que la pérdida de caudal varía en pro-

3 Funcionamiento de la bomba

porción al cuadrado del caudal. Entonces, si la pérdida de caudal a un caudal se calcula mediante el método anterior, se obtienen los otros puntos de la curva con suficiente exactitud utilizando la siguiente ecuación:

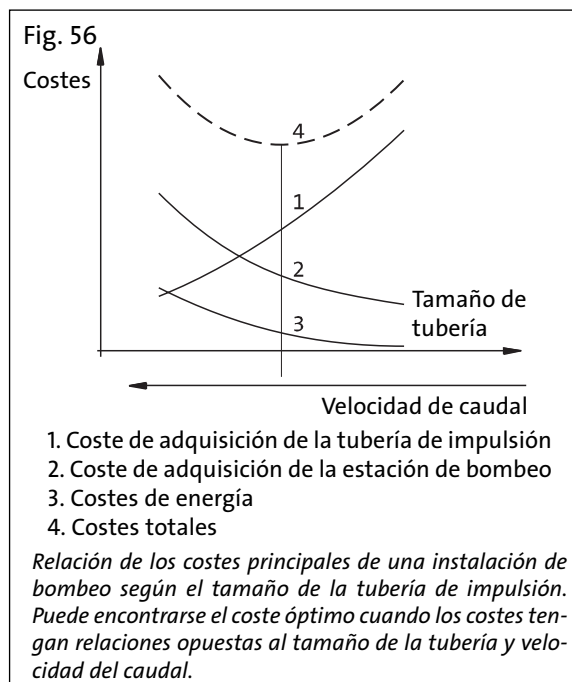
$$H'_j = H_j \left(\frac{Q'}{Q} \right)^2 \quad (33)$$



3.4 Tamaño de la tubería de impulsión

Se selecciona el tamaño de la tubería de impulsión en base a los siguientes factores:

- economía
- diámetro interior necesario para la aplicación
- velocidad mínima de caudal necesaria para la aplicación



3.4.1 Economía

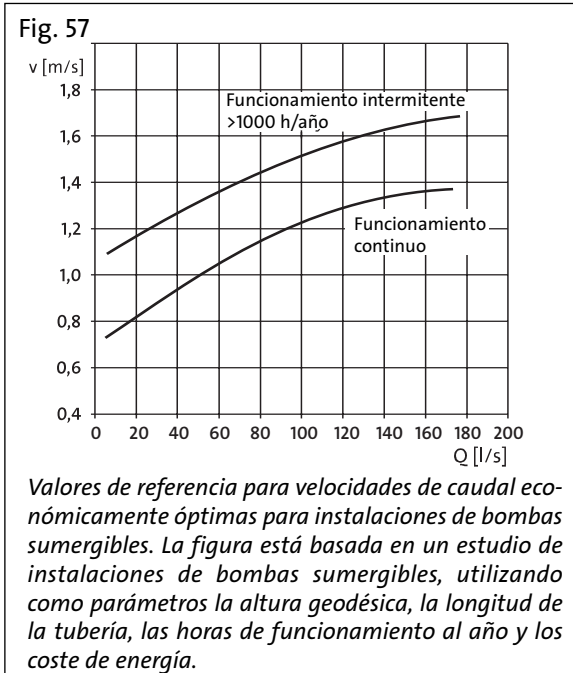
La economía de una instalación se compone de los costes de adquisición, así como los costes de funcionamiento durante toda su vida útil. Varios costes de instalación y funcionamiento dependen directamente del tamaño de la tubería de impulsión, y reaccionarán a cambios del tamaño de la tubería como sigue:

Con diámetro reducido de la tubería

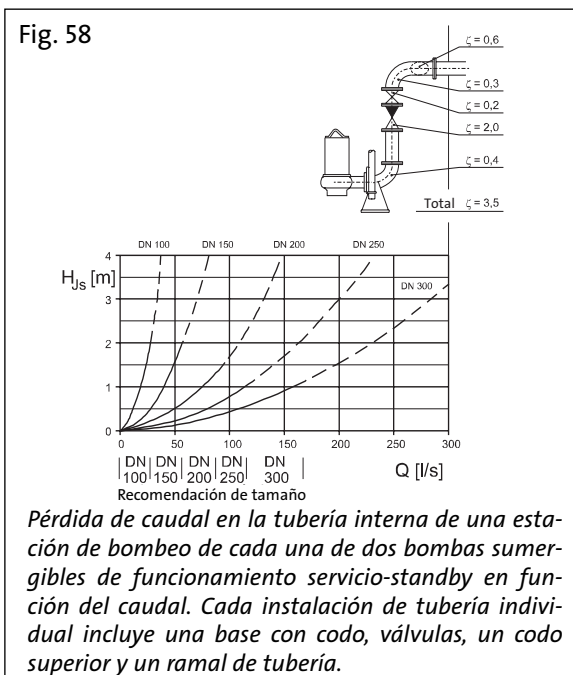
- Los precios de adquisición de las tuberías y componentes de fontanería bajan.
- El coste de adquisición de una estación de bombeo aumenta debido a las mayores pérdidas de caudal con la necesidad consiguiente de bombas más grandes y equipo de control. Los costes de sistemas de suministro eléctrico más grandes, tales como subestaciones, pueden aumentar notablemente.
- Los costes de funcionamiento aumentan debido a costes de energía más altos, ocasionados por pérdidas en las tuberías.

Puede encontrarse un tamaño óptimo de tubería cuando los diferentes costes tengan relaciones opuestas al tamaño de la tubería de impulsión. La figura 56 muestra la relación. La selección del diámetro óptimo de la tubería de impulsión puede basarse en la figura 57, que muestra la velocidad óptima del caudal para diferentes instalaciones, y está basada en varios estudios.

Siempre que sea posible debe hacerse un estudio más detallado.



La tubería interna de la estación de bombeo debe seleccionarse de forma que minimice los costes de los componentes, sin que las pérdidas de caudal en la estación aumenten excesivamente. La figura 58 muestra la pérdida de caudal en una tubería interna de una estación de bombeo con dos bombas para funcionamiento servicio-standby, así como las dimensiones económicas de la tubería, basada en varios estudios.



3.4.2 Paso libre de sólidos

Para aguas residuales municipales sin tratar el paso libre mínimo permitido de la tubería de impulsión es normalmente de 100 mm, para que los sólidos puedan pasar sin atascarse. La tubería interna en estaciones de bombeo de poco caudal puede tener un paso libre de 80 mm, especialmente cuando el paso libre de la bomba es también de 80 mm.

3.4.3 Prevención de depósitos de sólidos y lodos

Si la velocidad del caudal de la tubería de impulsión es demasiado baja, la arena y los lodos tienen tiempo de depositarse, lo que aumenta el riesgo de atascos. Los lodos depositados pueden endurecer y formar una costra en la pared de la tubería que constantemente aumenta su diámetro, produciendo mayores pérdidas de caudal. Grumos grandes de fango que se mueven con el caudal pueden bloquear codos u otras conexiones de la tubería de impulsión.

Para aguas residuales municipales se recomienda una velocidad del caudal de mín. 0,7 m/s. Cuando sólo se bombean aguas residuales domésticas, la velocidad mínima del caudal puede ser tan baja como 0,5 m/s, pero si las aguas contienen arena no se garantiza este valor. En instalaciones con caudal variable, por ejemplo donde se utilizan variadores de frecuencia, la velocidad del caudal puede momentáneamente ser inferior.

En sitios donde suelen aparecer depósitos, se recomienda lavar periódicamente todo el sistema con todas las bombas funcionando simultáneamente. La forma de la tubería es también importante y la sedimentación suele aparecer en tuberías de impulsión que tengan un punto bajo pronunciado, tales como tuberías instaladas por debajo de conductos de agua, por ejemplo un río. En estos casos se recomienda seleccionar mayor velocidad de caudal.

3.4.4 Golpes de ariete

Se generan ondas de presión oscilantes en un líquido que se bombea a través de una tubería durante el arranque y parada de las bombas. Este fenómeno se llama golpes de ariete que, en el caso de ser fuertes, pueden dañar la tubería y el equipo. La gravedad del fenómeno depende del número de variables, tales como el cambio de

3 Funcionamiento de la bomba

velocidad durante el ciclo de reflexión, las características del material de la tubería, así como del líquido.

Cuando el líquido acelera o decelera, una onda transitoria de presión fluctúa de un lado a otro hasta que se reduce. La frecuencia de la oscilación puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$= \pm \frac{2L}{a} \quad (34)$$

donde

- = duración del ciclo de reflexión, en que la onda de presión oscila de un lado a otro una vez (s)
- L = longitud de tubería (m)
- a = velocidad de la onda de presión (m/s)

Las velocidades de las ondas de presión en agua limpia en tuberías de varios materiales pueden obtenerse de la siguiente tabla:

Material de la tubería	Velocidad (m/s)
Acero	900 ...1300
Fundición	1000...1200
Hormigón armado	1000...1200
Plástico	300...500

Aguas residuales y lodos contienen a menudo aire o gas insoluble, que tiene un efecto considerable sobre la velocidad de la onda de presión, tal como puede verse en la siguiente tabla, donde la velocidad de la onda de presión se expresa en función de la cantidad de aire insoluble en el líquido:

Altura = 15 m	
Cantidad de aire insoluble como ratio volumétrico	Ratio de velocidad de la onda de presión
0	1,0
10 ⁻⁶	1,0
10 ⁻⁵	0,96
10 ⁻⁴	0,73
10 ⁻³	0,32
10 ⁻²	0,11

El aire disuelto no tiene efecto práctico sobre la velocidad de la onda de presión.

La oscilación de presión producida por un cambio de velocidad del caudal dentro de un ciclo de reflexión puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \pm \frac{a \cdot \Delta v}{g} \quad (35)$$

donde

- Δh = cambio de presión (m)
- a = velocidad de la onda de presión (m/s)
- Δv = cambio de velocidad del caudal (m/s) durante un ciclo de reflexión
- g = aceleración por gravedad (9,81 m/s²)

Es difícil establecer el cambio de velocidad del caudal cuando la bomba arranca o para, por lo que no resulta fácil calcular las oscilaciones de presión. El cambio de presión sólo puede calcularse con exactitud si, por ejemplo, una válvula se cierra dentro del ciclo de reflexión, y el cambio de velocidad del caudal Δv es igual a la velocidad del caudal v. La presión oscila simétricamente, por lo que puede caer por debajo de la tensión de vapor, ocasionando cavitación que produce grandes oscilaciones de presión y ruido. Los sitios potenciales son la bomba, válvula y punto alto de la tubería. Un alto nivel de vacío puede también estropear la tubería.

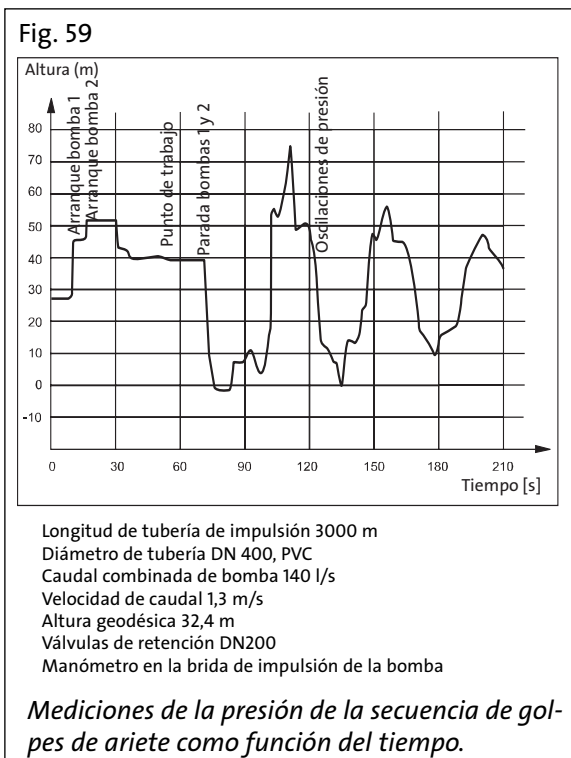
Al bombear aguas residuales, las presiones de los golpes de ariete producidas durante la parada de la bomba son mayores que aquellas producidas durante el arranque. En estimaciones teóricas el objetivo es calcular el retardo del agua inmediatamente después de la parada de la bomba y la oscilación de presión producida en aquel momento. Los factores más dudosos y significantes que deben averiguarse son la resistencia del caudal de la bomba y la presión mínima generada en la bomba después de la desconexión de la corriente. Esta información no se consigue fácilmente de los fabricantes de bombas.

Otro factor dudoso es el contenido de aire o gas en el agua o la tubería. En este caso la solución es ensayar con distintas concentraciones para encontrar el efecto del contenido de gas.

La figura 59 muestra las consecuencias del fenómeno de golpes de ariete en una instalación con una bomba doble. Se observa lo siguiente:

- La duración medida del ciclo de reflexión es de 45 segundos. Los cálculos teóricos para un líquido sin gas o aire indicaron una duración de sólo 12 – 20 segundos. La diferencia entre los dos valores muestra que el agua contiene gas.
- La presión de la tubería baja al vacío inmediatamente después de la parada de la bomba. Se midió la presión en la brida de descarga, por lo que la presión dentro de la bomba debe haber sido incluso más baja. La presión dentro de la bomba cayó posiblemente por debajo de la presión de cavitación (-10 m).

Un rasgo significativo del fenómeno de golpes de ariete es que no se oye ya que el aumento de la presión es bastante lento, pero puede observarse con un manómetro. Sólo hará ruido en el caso de cavitación o si una válvula cierra rápidamente.



Los golpes de ariete no son un problema común en instalaciones de aguas residuales. La descripción teórica del problema es difícil, ya que se desconocen muchas entidades.

3.4.5 Prevención de golpes de ariete

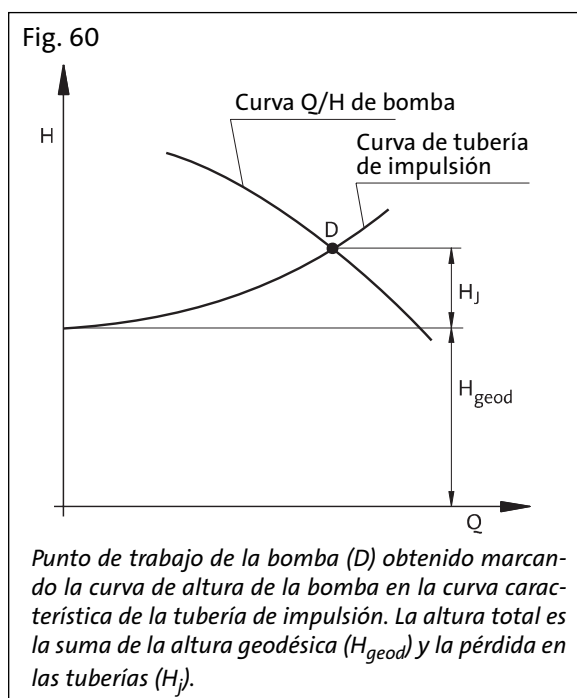
Si se producen golpes de ariete en instalaciones de aguas residuales, se puede aliviar la situación, tomando una o varias de las siguientes medidas:

- Evitar la parada simultánea de dos o más bombas.
- Instalar válvulas automáticas con duración de cierre de 20-30 segundos, en vez de válvulas de retención normales. La bomba para después de cerrarse la válvula.
- Parar las bombas lentamente con control de frecuencia.
- Utilizar un equipo de arranque suave también para parar las bombas. El control completo de la secuencia de parada no es siempre factible.
- Instalar válvulas de aire automáticas en los puntos donde aparecen presiones negativas.
- Si la bomba cavita durante el ciclo de parada, la instalación de una tubería de aspiración by-pass con válvula de retención desde la fosa húmeda hasta la tubería de impulsión evitará que la presión baja dentro de la bomba. La dimensión de la tubería by-pass debe seleccionarse un tamaño menor que la brida de presión de la bomba.
- Utilizar componentes de tubería más pesados que soportarán la presión de los golpes de ariete. Las oscilaciones del vacío pueden ser más dañinas para la tubería y el equipo que las de presión.

3.5 Punto de trabajo de la bomba

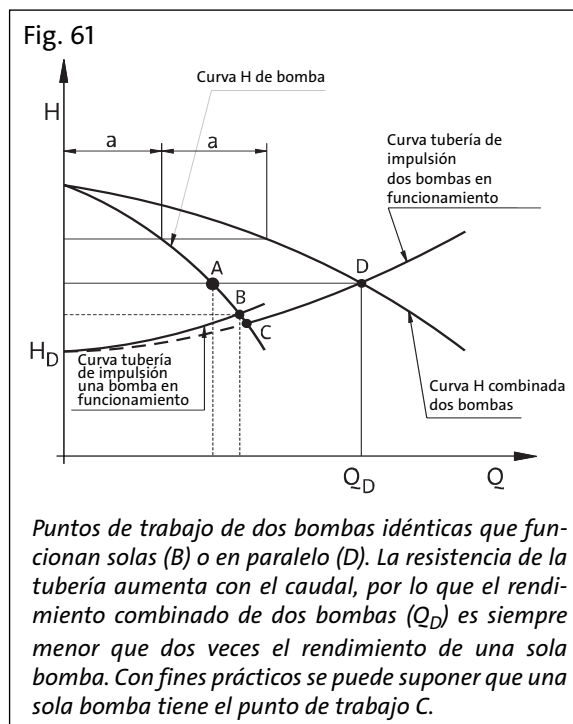
3.5.1 Funcionamiento con una bomba

La altura de la tubería de impulsión se obtiene añadiendo la altura geodésica (H_{geod}) y la pérdida en la tubería. La altura geodésica es un constante que no depende del caudal, mientras que las pérdidas aumentan con aproximadamente el cuadrado del caudal Q (ver la figura 55). Si una curva de altura en la misma escala se pone encima de, o se marca en la curva característica de la tubería de impulsión, el punto de trabajo estará en la intersección de las curvas. En este punto la altura de la bomba es igual a la altura necesaria en la tubería de impulsión. El caudal Q de la bomba puede entonces leerse directamente en el diagrama, ver la figura 60.



3.5.2 Funcionamiento en paralelo, bombas idénticas

El funcionamiento en paralelo es la situación en que el caudal combinado de dos o más bombas fluye a la misma tubería de impulsión. La forma de la curva característica de la tubería de impulsión cambiará ligeramente dependiendo del número de bombas en funcionamiento, ya que cada bomba tiene su propia tubería de descarga hasta el punto común, por lo que la constitución de la tubería de impulsión cambiará.

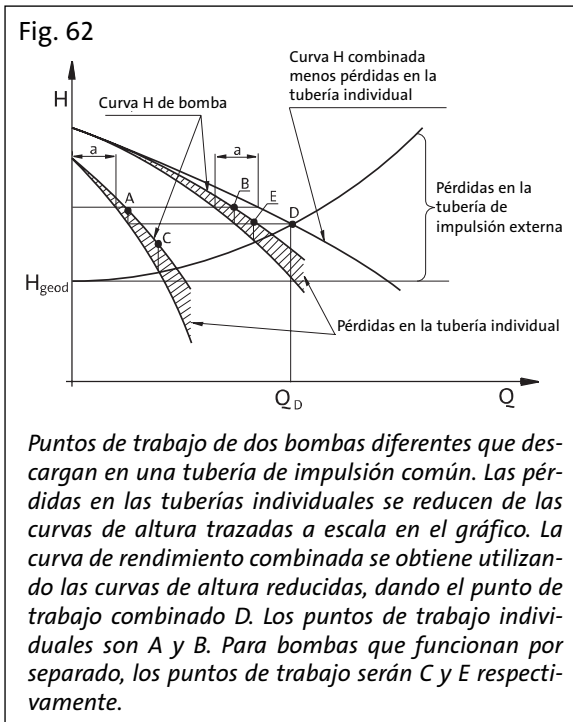


Si suponemos que dos bombas idénticas, con tuberías separadas idénticas unidas mediante un ramal o colector a la tubería de impulsión, funcionan en paralelo obtenemos la curva característica de la tubería de impulsión indicada en la figura 61. El punto de trabajo de ambas bombas se obtiene marcando la suma de dos curvas de altura a altura constante en la curva característica de la tubería de impulsión de dos bombas.

3.5.3 Funcionamiento en paralelo, bombas diferentes

Al calcular el punto de trabajo de dos bombas diferentes que funcionan en paralelo debemos suponer que las tuberías separadas hasta el colector tengan características diferentes. Puede utilizarse el siguiente método para obtener los puntos de trabajo.

Primero se comprueban las pérdidas de cada bomba en su propia tubería antes del colector común. Pueden marcarse en el gráfico como reducciones de alturas, que reducen las curvas de las bombas. La combinación de estas curvas reducidas a altura constante da la curva de altura combinada de las bombas. La intersección de esta curva y la curva característica de la tubería de impulsión es el punto de trabajo combinado. Si marcamos hacia atrás desde este punto a altura



constante hasta las curvas de bomba reducidas, pueden leerse los puntos de trabajo individuales en las curvas originales justo por encima de estas intersecciones. Del mismo modo, cuando las bombas funcionan por separado, se obtienen los puntos de trabajo individuales leyendo las curvas de altura encima de la intersección de la curva de la tubería de impulsión y las curvas de bomba reducidas. Este método está ilustrado en la figura 62.

3.5.4 Funcionamiento en serie

Pueden conectarse varias bombas en serie para aumentar la altura. Se obtiene la altura combinada añadiendo las alturas individuales a caudal constante. Debido a su complejidad sólo es necesario en casos excepcionales, y se recomienda utilizar casi siempre una bomba más grande de la gama del fabricante que sola pueda hacer el trabajo.

Las bombas sumergibles sólo pueden conectarse en serie si las bombas de reserva se instalan en seco, por lo que serán diferentes de la bomba principal.

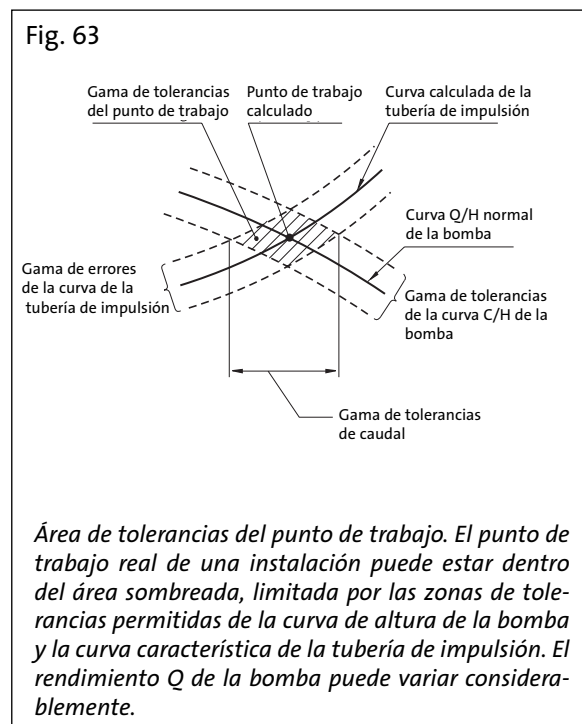
Otro riesgo que afecta las bombas conectadas en serie es el posible fallo de la bomba principal, lo que puede ocasionar cavitación de la bomba de reserva debido a pérdidas de aspiración mayores o

pérdida de altura de aspiración. El proyectista debe diseñar la planta de bombeo para que se pueda evitar la conexión en serie de bombas y comprobar que haya bombas disponibles para el punto de trabajo proyectado.

3.5.5 Punto de trabajo real

El punto de trabajo real de la bomba difiere casi siempre del calculado. Esto se debe a los errores de todos los métodos numéricos para calcular las pérdidas en tuberías de impulsión, así como las tolerancias permitidas en curvas características normales. Además, las características de la bomba cambiarán con el uso debido al desgaste, y la corrosión o sedimentación cambiará con el tiempo la tubería de impulsión. La figura 63 muestra la relación entre tolerancias de funcionamiento. Las tolerancias de funcionamiento inherentes de la bomba se comentan detalladamente en la sección 4 de este libro.

Si el punto de trabajo está en el segmento de poco caudal de la curva Q/H de la bomba y la curva característica de la tubería de impulsión es muy inclinada, la gama de tolerancias de caudal puede ser muy grande en proporción con el punto de trabajo diseñado. Este hecho debe tenerse en cuenta al seleccionar la bomba.

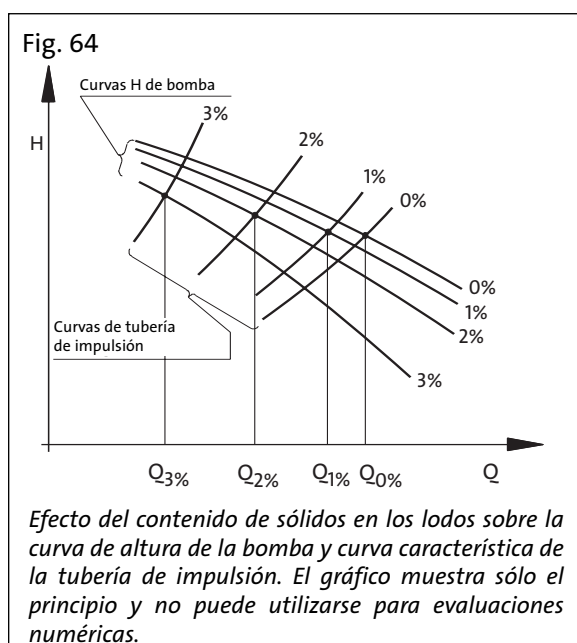


3.6 Bombeo de lodos

Las bombas sumergibles bombean con frecuencia lodos de consistencia variable en plantas de tratamiento de aguas residuales. Cuando el contenido de sólidos en el fango aumenta, las pérdidas de caudal en la tubería de impulsión aumentan a la vez que el funcionamiento de la bomba disminuye. Al seleccionar una bomba que se utilizará con lodos hay que considerar estos dos factores. La figura 64 muestra en principio el efecto.

La situación es compleja ya que todavía no se tienen conocimientos suficientes del comportamiento de lodos en bombas centrífugas. La planta de tratamiento de lodos puede contener mucho gas, disuelto o retenido, lo que tendrá un efecto profundo en las bombas centrífugas. Por regla general, lodos con gran contenido de sólidos contienen también mucho gas, lo que reducirá considerablemente el funcionamiento de la bomba. En casos extremos la bomba dejará de bombear cuando el gas separado se acumula en el oído del impulsor, impidiendo que éste desarrolle la fuerza centrífuga necesaria.

Al bombear lodos densos, como medida de precaución hay que colocar la bomba lo más bajo posible para garantizar una altura de aspiración positiva. La utilización de tuberías de aspiración largas debe también evitarse, ya que la caída de presión en éstas aumenta también debido al contenido de sólidos.



Cuando el contenido de sólidos en el lodo es inferior a 1%, se puede normalmente suponer con seguridad que la curva característica de la tubería de impulsión es la misma que para agua. Con mayor contenido de sólidos la curva característica será más alta, pero es difícil establecer una curva correcta debido a la falta de información sobre lodos. Otro problema práctico es que el contenido de sólidos del líquido en la bomba y tubería de impulsión puede momentáneamente superar el valor medio o diseñado. En lodos más espesos, la refrigeración del motor puede convertirse en un problema, dependiendo del método de refrigeración.

Las bombas sumergibles de aguas residuales son normalmente adecuadas para bombear lodos de plantas de tratamiento con un contenido de sólidos de máx. un 3 %. Estos lodos incluyen lodos primarios, lodos de retorno y exceso de lodos, mientras que para lodos más densos, tales como lodos espesados y lodos digeridos, se prefieren bombas volumétricas. Para estos líquidos más densos los volúmenes bombeados son relativamente pequeños.

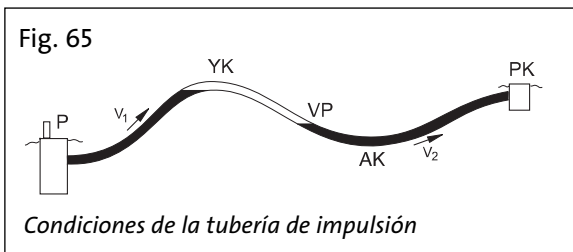
No se recomiendan bombas de hélice en plantas de tratamiento de aguas residuales debido al riesgo de atascos. Una bomba de tipo canal de instalación vertical en columna es una buena solución para bombear lodos de retorno.

3.7 Tuberías de impulsión complejas

Tuberías largas de alcantarillas tienen perfiles complejos con puntos de inflexión bajos y altos. El aire o gas ocluido en los puntos de inflexión altos aumenta la altura de la bomba, mientras que el punto de inflexión bajo aumenta el riesgo de sedimentación. En algunos casos la bomba seleccionada resultó ser inadecuada, y también se conocen casos de sedimentación. Es difícil predecir exactamente el funcionamiento de la tubería de la alcantarilla debido al bombeo intermitente de las bombas. El agua en la tubería se mueve quizás sólo 100 m durante un ciclo de bombeo, y el aire o gas en la tubería no saldrá y el caudal no se estabilizará durante ese periodo.

3.7.1 ¿Qué ocurre en una tubería de impulsión compleja?

En la figura 65 la sección YK-VP contiene aire. Cuando la bomba arranca el nivel del líquido VP empieza a subir lentamente y la presión de aire en la sección YK-VP aumenta y se desarrolla un caudal desde el punto VP hasta el punto PK (v_2). Cuando la bomba para, el caudal de VP a PK continúa durante algún tiempo y disminuye lentamente. La duración del caudal de VP a PK es más larga que la duración del funcionamiento de la bomba, por lo que la velocidad máx. del caudal v_2 es inferior a v_1 . El aire o gas en la sección YK-VP evita que se produzca el efecto de sifonamiento, que ocasiona mayor altura geodésica.



Es difícil estimar con precisión el sitio exacto del punto VP. Si la cantidad de aire fuera constante, podría calcularse el sitio del punto VP en función del tiempo. En la práctica la cantidad de aire en la tubería cambiará y no se puede calcular el sitio del punto VP. Si YK está situado más bajo que PK, el aire podría en teoría eliminarse con una válvula de aire automática. Si el punto YK está más alto que PK, el aire volverá en la tubería después de pararse la bomba. Válvulas de aire automáticas tienden a atascarse en aguas fecales. En base a información recogida a lo largo de los años respecto a la acumulación de aire o gas, una válvula de aire manual que se abre a ciertos intervalos podría ser una solución.

3.7.2 Determinación de altura

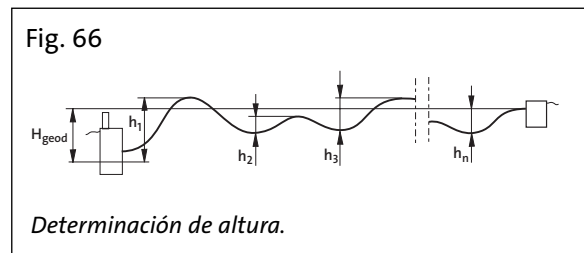
Para una tubería de impulsión con un perfil similar a la figura 66, es difícil estimar exactamente la altura total de la bomba. No obstante puede estimarse la magnitud. La altura mínima (H_{\min}) se determina con la tubería de impulsión completamente llena y la altura máxima (H_{\max}) como una situación con todas las secciones descendentes llenas de aire o gas. Por lo tanto

$$H_{\min} = H_{\text{geod}} + \text{pérdidas por fricción de caudal de la}$$

tubería para toda la longitud de la tubería de impulsión

$$H_{\max} = h_1 + h_2 + h_3 + h_n + \text{pérdidas por fricción de caudal de la tubería para toda la longitud de la tubería de impulsión}$$

La altura total real es un valor entre el valor máximo y mínimo. El valor medio de H_{\max} y H_{\min} puede ser una estimación útil.



3.7.3 Tamaño de la tubería y velocidad del caudal

Como se ha observado antes, el aire o gas presente en la tubería de impulsión igualará la velocidad del caudal en la sección siguiente, ocasionando menor velocidad de caudal en los puntos bajos de la tubería. Debido a esto debe elegirse una tubería de impulsión cuya dimensión sea tan pequeña que garantice que la velocidad del caudal no baje demasiado. No obstante, la dimensión mínima de la tubería es DN 100.

Una tubería más pequeña tiene también un volumen más pequeño, lo que significa que el agua se mueve una mayor distancia durante cada ciclo de bombeo, aumentando las velocidades del caudal en el punto bajo de la tubería. Una dimensión más pequeña de la tubería es mejor desde el punto de vista de los olores, ya que las aguas residuales permanecen menos tiempo en la tubería de impulsión. Una mayor velocidad del caudal puede también llevarse parte del aire en la tubería. En estos casos el dimensionamiento de la velocidad del caudal (v_1) debe ser de mín. 0,8 m/s, en casos más complejos incluso mayor.

3.7.4 Elección de bomba

La altura real de una tubería de impulsión compleja puede diferir considerablemente de la calculada. Si el punto de trabajo calculado está cerca de cualquier extremo de la sección permitida de la curva Q/H de la bomba, hay que descartarla. Debe considerarse también una bomba cuya curva Q/H

3 Funcionamiento de la bomba

pasa por encima del punto de trabajo calculado, ya que ofrece seguridad de elección y mayor velocidad de caudal.

3.7.5 Medidas de ratificación

El punto de trabajo real puede diferir considerablemente cuando la tubería de impulsión es compleja, por lo que puede ser útil medir el volumen del caudal algunas semanas después de la puesta en marcha de la estación de bombeo, utilizando el método volumétrico. La comparación de los resultados medidos con los calculados revelará desviaciones e indicará el estado real de la tubería de impulsión. Pueden repetirse las mediciones algunas veces durante el primer año de funcionamiento, ya que el contenido de gas o aire en la tubería de impulsión puede variar.

Deben realizarse mediciones de control después de la puesta en marcha. Todas las tuberías de impulsión colocadas en terrenos difíciles requieren una planificación cuidadosa, así como estudios del sitio específico y soluciones técnicas.

3.8 Evaluación del punto de trabajo de estaciones de bombeo paralelas

El rendimiento combinado de dos o más estaciones de bombeo que descargan en distintos puntos de la tubería de impulsión común puede determinarse utilizando un método gráfico, descrito a continuación.

La figura 67 presenta gráficamente la situación de dos estaciones de bombeo que funcionan en paralelo y descargan en una tubería de impulsión común. Cuando ambas estaciones de bombeo están funcionando, los puntos de trabajo de las bombas están regidos por la presión en el punto de unión 3, donde los caudales de las estaciones de bombeo se unen en la tubería de impulsión común. Las alturas totales de las estaciones de bombeo individuales pueden dividirse en componentes, tal como muestra la figura 68. Las alturas constan de los siguientes componentes.

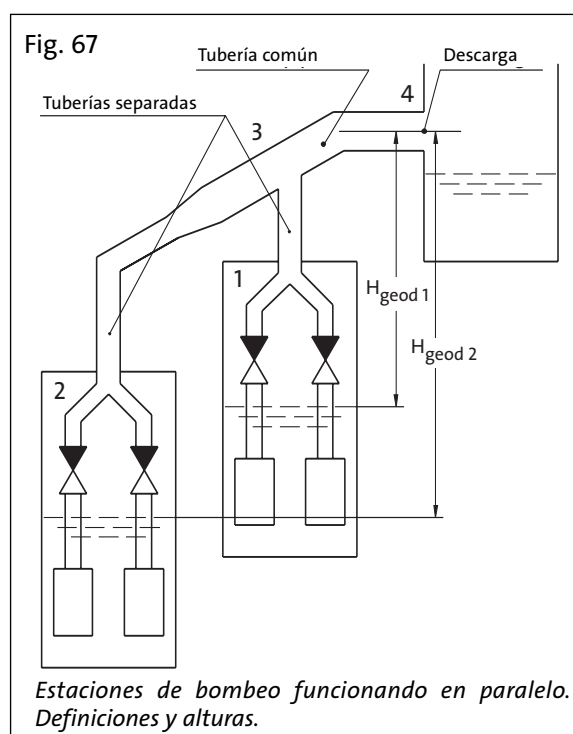
- H_{j3-4} = Pérdida de tubería en la tubería común entre secciones 3 y 4
- H_{geod1} = Altura geodésica de la estación de bombeo 1
- H_{geod2} = Altura geodésica de la estación de bombeo 2

- H_{j1-3} = Pérdida de tubería en la parte separada de la tubería de impulsión entre puntos 1 y 3
- H_{j2-3} = Pérdida en tubería en la parte separada de la tubería de impulsión entre puntos 1 y 3

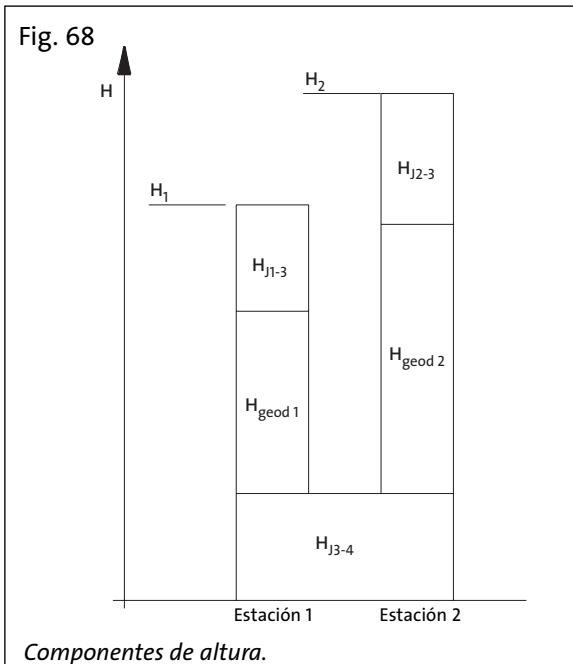
La pérdida en la tubería común H_{j3-4} es igual para ambas estaciones de bombeo.

El rendimiento combinado de las dos estaciones de bombeo se determina gráficamente mediante los siguientes pasos del procedimiento indicado en la figura 69:

1. Se resta la altura geodésica H_{geod} y la pérdida de tubería en la parte separada H_j de cada una de las curvas H de la estación de bombeo. Se toma la curva H de una o dos bombas en funcionamiento, según el caso. La pérdida de tubería H_j se determina también de la misma manera.
2. Se traza la curva de pérdida de carga H_{j3-4} para la tubería común.



3. Se trazan las curvas H_1 y H_2 obtenidas en el paso 1 en la curva de pérdida de carga, tanto combinadas como por separado (1+2).
4. El punto de intersección A entre la curva H_{1+2} combinada de las estaciones de bombeo y la curva de pérdida de carga H_{j3-4} representa el caudal combinado Q_{1+2} en el punto de descarga.

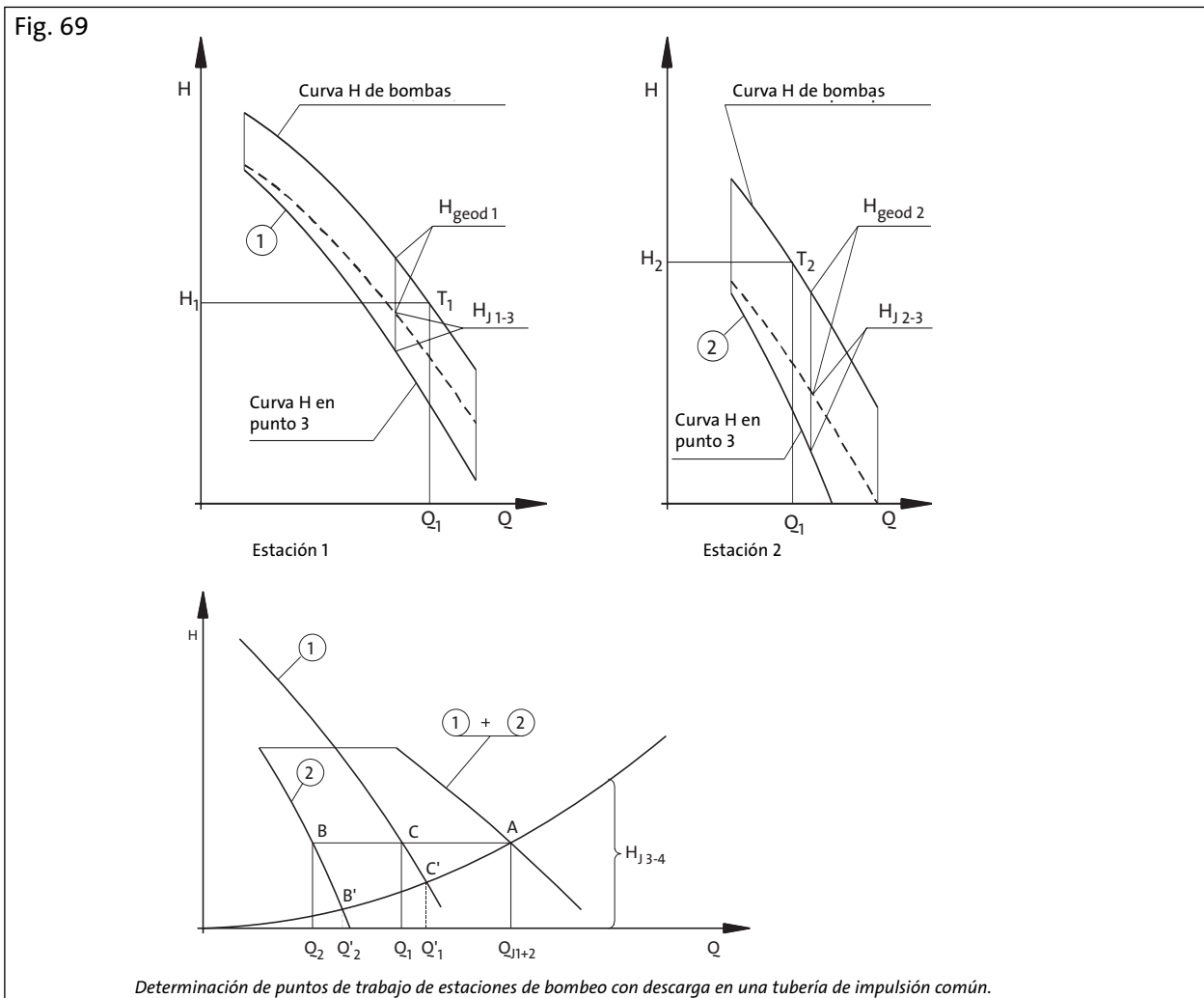


5. Una línea horizontal trazada a través del punto A, cruzando las curvas de altura individuales 1 y 2 en los puntos C y B respectivamente. Los caudales correspondientes en estos puntos, Q_1 y Q_2 , representan los caudales individuales de las estaciones de bombeo.

6. Al trazar los caudales individuales Q_1 y Q_2 en las curvas de altura individuales de cada estación de bombeo, se obtiene el punto de trabajo de cada bomba en los puntos de intersección T1 y T2.

Los puntos de trabajo de las estaciones de bombeo que funcionan por separado son los puntos de intersección C' y B' de las curvas de altura individuales reducidas 1 y 2 y la curva de pérdida de carga H_{j3-4} trazada en el paso 3 de arriba.

El procedimiento puede ampliarse para instalaciones con incluso más estaciones de bombeo en una tubería común. No obstante, resulta un trabajo duro encontrar los distintos puntos de trabajo. Sistemas grandes de aguas residuales incluyen pozos de captación y secciones de colectores por gravedad, que rompen la red en secciones presurizadas separadas, pudiendo cada una determinarse exactamente. Por eso posiblemente no serán necesarios unos cálculos combinados muy complejos.



4 Pruebas de bombas

El funcionamiento real de las bombas se establece o confirma mediante pruebas. Pueden realizarse pruebas por motivos diferentes y en varios sitios. Con el fin de conseguir unos resultados inequívocos, se han desarrollado y acordado normativas de pruebas. Las normativas requieren unas condiciones de pruebas controladas y contrastadas, por lo que normalmente no pueden utilizarse para pruebas in situ.

Los fabricantes prueban sus bombas en las instalaciones, tanto con fines de desarrollo de producción como control de calidad. Pueden necesitarse pruebas contrastadas para confirmar que el funcionamiento de la bomba cumple con las condiciones de compra o para solucionar desacuerdos respecto al funcionamiento.

Pruebas in situ de bombas en instalaciones reales no darán datos exactos de su funcionamiento, ya que la precisión de los medios utilizados para realizar las pruebas no puede alcanzar las condiciones de las normativas de pruebas. No obstante, estas pruebas proporcionan información útil de bombas y estaciones de bombeo y pueden utilizarse para controlar la estación de bombeo si se realizan periódicamente, o si están adecuadamente automatizadas.

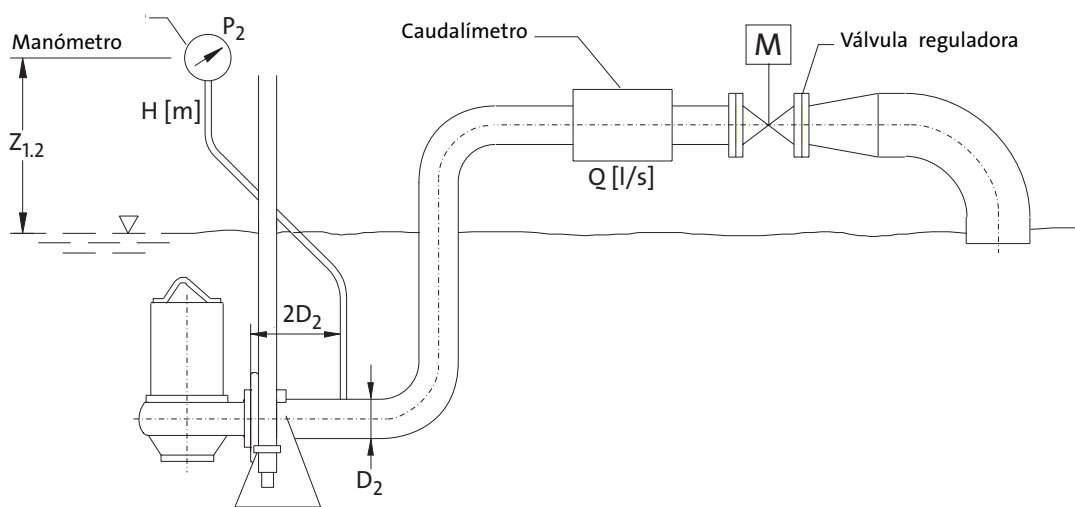
Las normativas de pruebas son acuerdos hechos para ser utilizados como modelo para la evaluación del funcionamiento de bombas. La siguiente presentación proporciona métodos para su interpretación. Es una presentación breve y clara, por lo que tanto puede como debe utilizarse con el texto estándar adecuado como referencia inmediata.

4.1 Dispositivos de pruebas.

4.1.1 Pruebas de producción

Las pruebas de bombas sumergibles en condiciones controladas requieren una instalación de pruebas construida y calibrada según las normativas de pruebas en vigor. Las instalaciones de pruebas en una cadena de producción deben también diseñarse para que la manipulación y conexión de las bombas sean eficientes y no entorpezcan el proceso de producción. La figura 70 muestra el principio de una instalación de pruebas de bombas sumergibles. Incluye las tuberías e instrumentos necesarios para medir la presión y el caudal. Puede también incluir varios registradores de mediciones, así como equipo informático para el procesamiento y presentación de los datos medidos. Para la altura de bomba se utiliza la altura total, incluyendo tanto el componente estático como el dinámico.

Fig. 70



Principio de una instalación de pruebas de producción de bombas sumergibles donde circula agua. Todas las tuberías están diseñadas para proporcionar unas condiciones de funcionamiento idóneas y conocidas para el manómetro y caudalímetro, para que las lecturas sean inequívocas. Los datos obtenidos son introducidos en el ordenador para obtener resultados rápidos y ayuda para la evaluación.

Se estableció la altura total de la bomba en la ecuación 18 y puede escribirse:

$$H = \frac{p_2}{\rho g} + Z_{1,2} + \frac{v_2^2}{2g} + H_j \quad (35)$$

donde

$\frac{p_2}{\rho g}$ = lectura del manómetro cambiada en altura

$Z_{1,2}$ = altura del manómetro por encima del nivel del agua

$\frac{v_2^2}{2g}$ = altura dinámica de la bomba en el punto de medición de la presión

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2}$$

H_j = Pérdidas de carga entre el punto de medición y la brida de la bomba (calculadas).

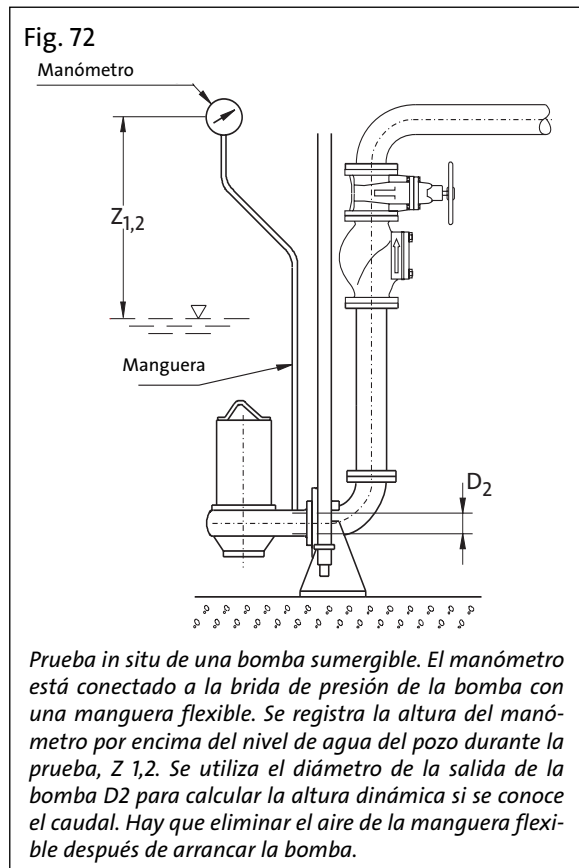
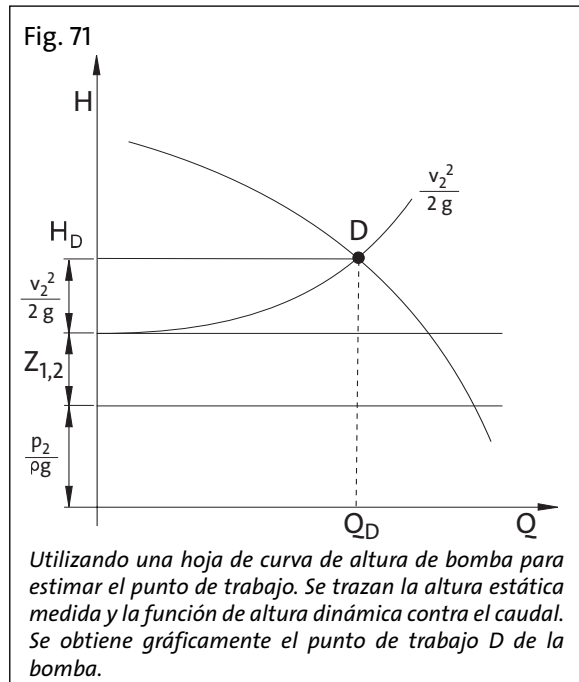
Según las normativas de pruebas, el punto de medición de la presión estará a una distancia de 2 x D_2 de la brida de presión de la bomba. La distancia comprenderá una sección de tubería recta.

4.1.2 Pruebas in situ, punto de trabajo

Las pruebas de bombas en instalaciones reales son útiles cuando se necesita información del funcionamiento de la bomba con razonable exactitud, o cuando se controla rápidamente el funcionamiento de la estación de bombeo. Si no puede detenerse la afluencia de caudal a la estación de bombeo durante la duración de las mediciones, hay que comprobar este efecto por separado con las bombas paradas. Después se podrá fácilmente calcular el caudal de la bomba.

La presión estática de la bomba se mide con un manómetro conectado a la bomba sumergible cerca de la brida de la salida. Después puede calcularse la altura total de la bomba utilizando la ecuación 35 ($H_j = 0$). La figura 72 muestra el dispositivo para la prueba.

Si una curva exacta de la altura de la bomba está disponible, puede determinarse su punto de trabajo sin estimar el caudal. Se mide la suma de la



altura estática y la altura manométrica $Z_{1,2}$ en el eje H de la hoja de curva de altura de la bomba. Después se traza en la hoja la función de la altura

dinámica contra varios caudales. El punto de trabajo de la bomba será la intersección de esta curva y la curva de altura de la bomba. La figura 71 muestra en principio.

Las condiciones in situ no cubren los requisitos de montaje de pruebas de las normativas de pruebas. Por lo tanto no pueden utilizarse los resultados para pruebas de aceptación de las bombas.

Un manómetro conectado a la tubería de una estación de bombeo puede utilizarse para tener una determinación aproximada del punto de trabajo de la bomba. La altura del manómetro por encima del nivel del agua en la fosa de aspiración, las pérdidas de presión calculadas entre la brida de la bomba y el punto de medición, así como la altura dinámica ($v^2/2g$) deben añadirse a la lectura. Para bombas instaladas en seco hay que deducir la tubería de aspiración. Estas pérdidas son normalmente mínimas.

4.2 Pruebas de aceptación

Las pruebas de aceptación de bombas son el procedimiento con el cual se confirma que una bomba tiene las características indicadas en la literatura de venta del fabricante o especificaciones del contrato. Pueden rutinariamente realizarse por el fabricante como parte del proceso de fabricación o en presencia del cliente o su representante.

Las normativas de pruebas contienen dos principios importantes:

- La bomba se prueba en un punto de trabajo acordado a la hora de la compra.
- La bomba se prueba en cualquier punto de la curva publicada de la misma. Esta práctica es para bombas fabricadas en serie, siendo las tolerancias permitidas mayores que para bombas hechas de encargo.

En el caso de bombas fabricadas en serie, los fabricantes realizan pruebas de producción de sus bombas en muchos puntos de la curva o en tres puntos diferentes seleccionados. Se eligen estos tres puntos en ambos extremos de la parte permitida de la curva de la bomba, y en un punto en el medio de la curva.

Lo primordial de las normativas de pruebas es controlar cómo se realizan las pruebas técnica-

mente y cuáles son las tolerancias de funcionamiento permitidas, a no ser haya otro acuerdo. Las normativas no regulan las medidas que deban tomarse si una bomba no funciona según las tolerancias, o las consecuencias de ello. Las partes deben por separado acordar estos puntos a la hora de la compra o más adelante.

4.2.1 Normativas de pruebas

La finalidad de las normativas de pruebas es definir en detalle cómo realizar las pruebas y cómo comparar técnicamente los resultados de las mismas con los valores garantizados. El contenido de las normativas es principalmente como sigue:

- términos, definiciones y símbolos
- organización de las pruebas
- dispositivos para las pruebas
- incertidumbres de mediciones
- verificación de garantías

Si no se acordado lo contrario, las normativas de pruebas estipulan la comparación de los siguientes valores garantizados:

Normativas de pruebas ISO 9906 (Grado 1 y 2)

Bombas de más de 10 kW:

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η o η_{gr}

Bombas de menos de 10 kW

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η
- Potencia de entrada del motor P_{gr} (en toda la gama de funcionamiento)

Bombas fabricadas en serie con selección hecha de curvas características típicas (Anexo A):

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η
- Potencia de entrada de la bomba P
- Potencia de entrada del motor P_{gr}

Normativa de pruebas ISO 2548 (Clase C)

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η o η_{gr}

Bombas fabricadas en serie con selección hecha de curvas características típicas (Anexo B):

- Punto de trabajo Q/H
- Potencia de entrada del motor P_{gr}

Normativa de pruebas ISO 3555 (Clase B)

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η o η_{gr}

Estas normativas contienen valores funcionamiento para las tolerancias de los variables medidos.

Si se requieren valores garantizados en las especificaciones o contratos de venta, los siguientes variables de acuerdo con las normativas de pruebas son adecuados:

- Punto de trabajo Q/H
- Rendimiento η o η_{gr}

El punto de trabajo deseado y la normativa de pruebas a utilizar deben también especificarse.

Las normativas de pruebas no exigen probar el valor NPSH, de la bomba, a no ser que se requiera expresamente. Las pruebas del NPSH son difíciles, llevan mucho tiempo y no proporcionan información completa de las posibilidades de cavitación, ver la sección 1.4.3. Por lo tanto, las ventajas del NPSH son discutibles. La normativa ISO 9906 proporciona factores de tolerancias para el valor NPSH_r. Las normativas ISO 2548 e ISO 3555 no proporcionan factores de tolerancias del NPSH_r.

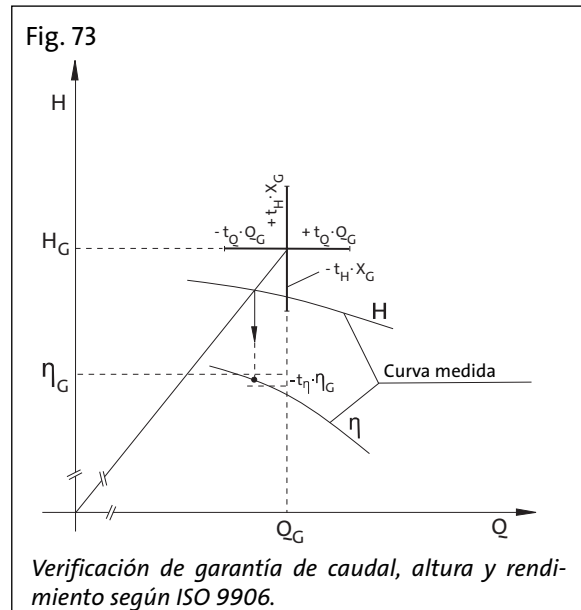
Normativa de pruebas ISO 9906 grado 1 y 2

La nueva normativa de pruebas ISO 9906 se publicó en 2000 y está previsto que sustituya las normativas anteriores ISO 2548 e ISO 3555.

El grado 1 requiere mayor exactitud, mientras que el grado 2 permite mayores tolerancias. Las bombas de aguas residuales funcionan normalmente en servicio intermitente, por lo que el grado 2 es adecuado para estas bombas. El grado 1 está pensado para pruebas de bombas de procesos de alta precisión en servicio continuo. Se utiliza un método muy minucioso (crosshair) para verificar los valores garantizados. La figura 73 muestra el principio.

El principio de verificación mostrado en la figura 73 funciona como sigue:

Se traza una cruz de tolerancia con la línea horizontal $\pm t_Q \cdot Q_G$ y la línea vertical $\pm t_H \cdot H_G$ a través del punto de garantía Q_G, H_G .



La garantía de altura y caudal está cubierta, si la curva Q/H medida corta o al menos toca la línea vertical y/u horizontal.

El rendimiento debe establecerse de la curva Q/H medida donde le cruza la línea recta que pasa a través del punto de trabajo especificado Q_G, H_G y el cero de los ejes Q, H y desde donde una línea vertical cruza la curva η .

La condición de garantía respecto al rendimiento está dentro de la tolerancia si el valor de rendimiento en este punto de la intersección es superior o al menos igual a $\eta_G (1 - t_\eta)$.

Normativas de pruebas ISO 2548 (Clase C) e ISO 3555 (Clase B)

ISO 2548 (Clase C) corresponde normalmente a la normativa ISO 9906 Grado 2 e ISO 3555 (Clase B) a ISO 9906 Grado 1. La normativa ISO 2548 es adecuada para bombas de aguas residuales.

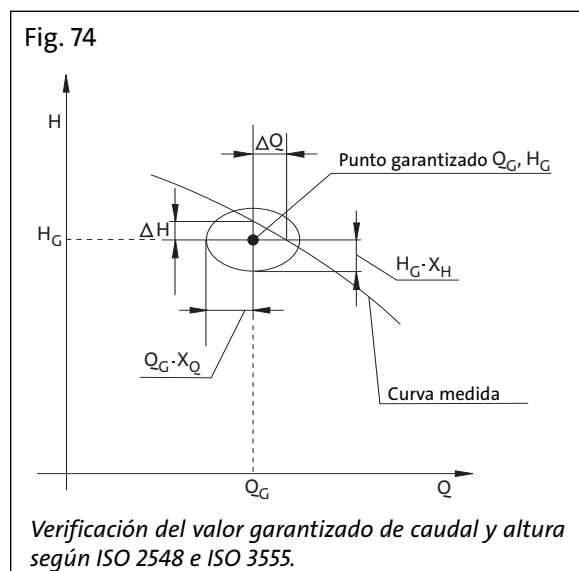
En estas normativas se utiliza un método gráfico elíptico para verificar los valores garantizados. La figura 74 muestra el principio. La verificación del rendimiento se realiza de la misma forma que en la normativa ISO 9906.

El principio de verificación, mostrada en la figura 74, funciona de la siguiente manera:

Se traza una zona elíptica de tolerancias con los

semiejes $Q_G X_G$ y $H_G X_H$, siendo el punto de trabajo garantizado $Q_G H_G$ el punto central.

La garantía de altura y caudal está cubierta si la curva Q/H medida corta o al menos toca la elipse.



El rendimiento debe establecerse de la curva Q/H medida donde le cruza la línea recta que pasa a través del punto de trabajo especificado Q_G, H_G y el cero de los ejes Q, H y desde donde una línea vertical cruza la curva η .

La condición de garantía respecto al rendimiento está dentro de la tolerancia si el valor de rendimiento en este punto de la intersección es superior o al menos igual a $\eta_G (1-t_\eta)$.

GRUNDFOS ha desarrollado un método de aplicación de zonas de tolerancia elípticas de la normativa ISO 2548, facilitando su utilización en cálculos numéricos. El método utiliza la inclinación de la tangente a la curva Q/H en el punto de verificación y permite determinar numéricamente H_{\min} y H_{\max} al caudal garantizado, de modo que se cumple con la condición de la elipse.

Otras normativas de pruebas

Muchos países han publicado normativas nacionales equivalentes a las normativas ISO. En EE.UU. se utiliza con frecuencia una normativa de pruebas nacional, publicada por el Instituto Hidráulico. Esta normativa difiere de las normativas ISO respecto al sistema de tolerancias.

Desviaciones permitidas del funcionamiento real

La desviación máxima posible del punto de trabajo garantizado se compone de inexactitudes de la tecnología de medición y las tolerancias permiti-

das. Las normativas de pruebas especifican las exigencias de exactitud de los instrumentos de medición y valores de referencia para las tolerancias permitidas.

La desviación real máxima posible del volumen de caudal deseado depende también de la forma de la curva característica de la tubería de impulsión y el sitio del punto de trabajo en la curva Q/H de la bomba. Según las normativas ISO 9906, Grado 2 e ISO 2548, la desviación cerca del punto óptimo puede ser de $\pm 3 \dots 10 \%$, dependiendo de la forma de la curva de la tubería. Para las normativas ISO 9906, Grado 1 e ISO 3555, la correspondiente desviación es de $\pm 2 \dots 6 \%$. Si el punto de trabajo está en la gama de poco caudal, y la curva característica de la tubería de impulsión es plana, las desviaciones pueden ser mucho mayores.

Las tolerancias normales del rendimiento de la bomba según las normativas de pruebas ISO son las siguientes:

- ISO 9906, Grado 2 -5%
- ISO 2548 -5%
- ISO 9906, Grado 1 -3%
- ISO 3555 -2,8%

Son valores proporcionales, no percentiles.

Para bombeo de aguas residuales, las tolerancias de las normativas ISO 9906, Grado 2 e ISO 2548 son bastante aceptables. Son también compatibles con variaciones de producción normales durante la fabricación. Exigencias más estrictas pueden suponer costes de fabricación adicionales y demoras en el suministro. Las curvas publicadas de bombas de aguas residuales están también basadas en estas normativas, lo que está indicado en dichas curvas.

Los clientes pueden a veces poner como una condición que no aceptarán tolerancias negativas. A consecuencia surgen problemas y malentendidos, con dificultades tanto para el fabricante como el cliente. Las normativas de pruebas ISO no reconocen sistemas de tolerancias asimétricas y las curvas publicadas de los fabricantes están basadas en sistemas de tolerancias simétricas de las normativas ISO. Si un cliente observa que un caudal real menor del indicado en la curva publicada es inaceptable, en vez de exigir tolerancias no negativas, la mejor solución sería aumentar el caudal en $3 - 10 \%$ y después seleccionar una bomba basada en este valor.

No tiene mucho sentido exigir tolerancias no negativas del rendimiento de la bomba, ya que los fabricantes se verían obligados a bajar los valores nominales publicados. Unos valores prudentes demasiado bajos no serían representativos de la mayoría de bombas y darían lugar a malentendidos.

5 Estaciones de bombeo

El entorno de trabajo de las bombas sumergibles, independientemente de su tamaño, es la estación de bombeo. El diseño y la construcción de la estación de bombeo son decisivos para el funcionamiento de las bombas, por lo que hay que ser cuidadoso y meticuloso siempre que se especifiquen. A continuación presentamos información elemental del diseño de estaciones de bombeo, que proporciona pistas y consejos al proyectista y operario de estaciones de bombeo. Se comentan también algunos aspectos del funcionamiento e interacción de las bombas con la tuberías de la estación de bombeo.

5.1 Diseño básico de estaciones de bombeo

El factor decisivo para el funcionamiento de las estaciones de bombeo es un buen diseño hidrodinámico. Un diseño incorrecto puede ocasionar un funcionamiento defectuoso de las bombas, bombeo no rentable y necesidades frecuentes de servicio y limpieza de la estación de bombeo.

Las estaciones modernas de bombeo están diseñadas para bombear aguas residuales sin tratar, y los criterios de diseño de las mismas difieren de aquellos para agua limpia. A continuación comentamos el diseño y requisitos especiales de las estaciones de bombeo de aguas residuales y pluviales.

5.1.1 Volumen y área de la superficie de la fosa húmeda

El volumen efectivo de la fosa húmeda debe ser del tamaño correcto. Un volumen demasiado grande puede ocasionar acumulación de lodos en la fosa, mientras que un volumen demasiado pequeño ocasiona arranques y paradas demasiado frecuentes de las bombas. La utilización de bombas sumergibles modernas, que toleran una alta frecuencia de arranques, permite diseños de estaciones de bombeo más pequeños y eficientes.

El volumen efectivo de la fosa es el volumen entre los niveles de arranque y parada de la bomba y puede determinarse mediante nomogramas en función de la frecuencia de arranques permitida. En el Apéndice B de este libro se presenta un método para calcular el volumen efectivo de la fosa.

En la realidad el volumen que entra en una estación de bombeo varía mucho en el tiempo, por lo que la frecuencia media de arranques será más baja que la teórica.

En un buen diseño, los niveles de arranque y parada deben estar relativamente cerca entre sí por los siguientes motivos:

- La frecuencia de arranques de la bomba llega a ser lo suficientemente alta para impedir que lodos e impurezas se depositen en el suelo de la fosa.
- La entrada de la estación de bombeo debe mantenerse baja comparada con la fosa húmeda.

Un valor de referencia máximo de la altura del volumen efectivo en estaciones de bombeo pequeñas es de aprox. 1 m, y de 2 m en estaciones de bombeo grandes.

Puede sustituirse el volumen efectivo con el área de la superficie de la fosa húmeda, utilizando la siguiente ecuación:

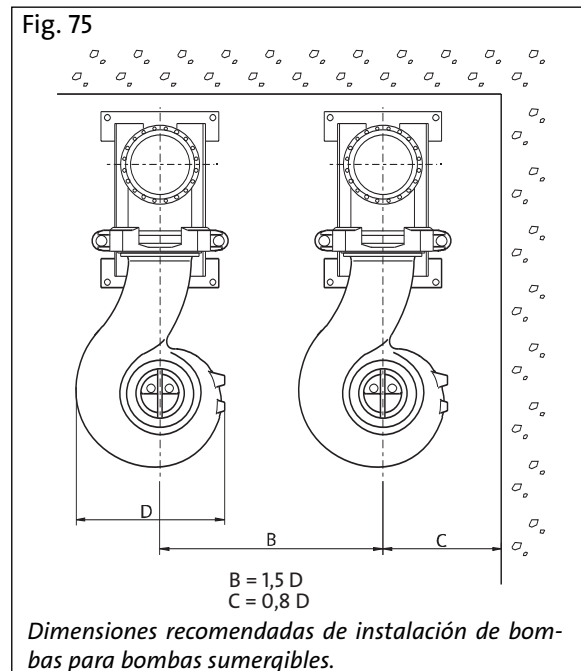
$$A_w = \frac{Q}{20} \quad (36)$$

donde

A_w = área de la superficie de la fosa húmeda en m²

Q = caudal total de la estación de bombeo, l/s

No obstante, para caudales de estaciones de bombeo pequeñas, el área de la superficie estará limi-



tada por las dimensiones físicas de las bombas donde se utilizan bombas sumergibles. El área de la superficie será entonces mayor del obtenido con la ecuación 36. La figura 75 muestra las dimensiones recomendadas de instalación de bombas.

Para caudales grandes el sentido de aproximación hacia las bombas debe ser de frente. Si el caudal viene de detrás, las bases sumergidas perturban el caudal, ocasionando la formación de remolinos. Éstos impiden el funcionamiento de la bomba, reduciendo su funcionamiento y rendimiento y aumentando el riesgo de cavitación y vibraciones de la bomba.

5.1.2 Tubería de entrada de la estación de bombeo

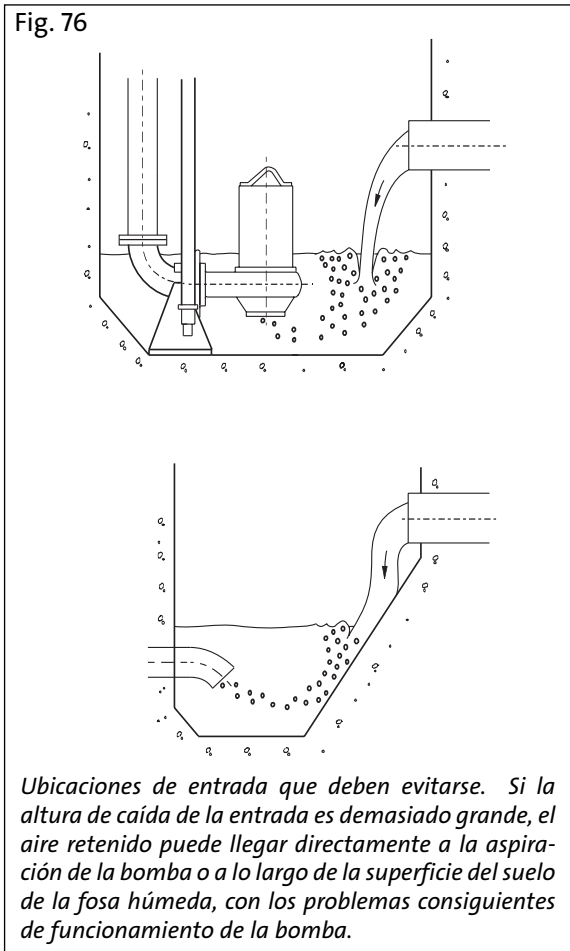
La ubicación y el tamaño de la tubería de entrada de la estación de bombeo es importante para su funcionamiento. Los problemas de funcionamiento de las bombas se deben con frecuencia a un diseño erróneo de la tubería de entrada.

Una tubería de entrada situada demasiado alta en relación a la superficie del líquido o con gran velocidad de caudal puede ocasionar la retención de aire y formación de remolinos en el agua cuando entra en la fosa. El aire mezclado en las aguas residuales tiende a quedarse, debido a la posible adhesión de burbujas de aire a las partículas sólidas presentes. Por lo tanto una cámara tranquilizante separada no paliará en absoluto la situación.

La altura de caída de la entrada debe siempre minimizarse y no ser de más de 1 m con bajo nivel del agua, independientemente de que si la estación de bombeo tenga cámara tranquilizante separada o no. El efecto de una gran altura de caída de la entrada no puede paliarse eficazmente con tabiques para controlar la dirección del caudal.

El aire retenido en el agua tiende a quedarse dentro del impulsor de la bomba donde, debido a las fuerzas centrífugas, se acumula alrededor de eje central del impulsor. Como consecuencia puede necesitarse más potencia y reducirse el funcionamiento y rendimiento. El riesgo de cavitación y vibraciones de la bomba aumenta también. Si la cantidad de aire en la bomba es muy grande, la misma puede dejar de funcionar.

El aire es con frecuencia un problema en bombas que aspiran directamente de tanques de aireación en plantas de tratamiento, debido al alto contenido de aire. Una bomba que se coloca en un tanque de aireación debe quedar lo más bajo posible, con la tubería de aspiración cerca del fondo.



La ubicación de la tubería de entrada debe estar lo más lejos posible de la aspiración de la bomba. La figura 76 muestra diseños que deben evitarse. La velocidad del caudal en la entrada no debe superar 1,2 m/s para que se evite la formación de remolinos en la fosa húmeda.

5.1.3 Forma del suelo de la fosa húmeda

La forma del suelo de la fosa húmeda es importante para el funcionamiento de una estación de bombeo de aguas residuales. Un buen diseño impide sedimentación en el fondo, pero puede también servir para evitar la formación de espuma y acumulación de restos flotantes en la superficie. Deben identificarse los siguientes principios

en un buen diseño del fondo:

Todas las esquinas deben estar terminadas en un ángulo de terminación mínimo de 45°. En estaciones de bombeo pequeñas, el ángulo puede ser de hasta 60°. Puede ser menor si la sección se auto-limpia con la fuerza de la corriente.

El área del fondo debe minimizarse y el volumen de líquido por debajo del nivel de parada de la bomba debe mantenerse al mínimo.

Al minimizar el área del fondo y el volumen residual, las velocidades del caudal cerca de las entradas aumentarán, y eliminarán los posibles depósitos de lodos. Un área de superficie que disminuye cuando el nivel del agua baja ocasiona menos acumulación de residuos en la superficie.

5.1.4 Niveles de parada

Se especifican los niveles de arranque y parada en la fase de diseño. Su función debe siempre comprobarse y, en caso necesario, cambiarse durante la puesta en marcha con el fin de garantizar un buen funcionamiento.

El nivel de parada debe estar lo más bajo posible para que la velocidad del caudal aumente hacia el final del ciclo de trabajo. Los límites de parada están fijados por la inmersión necesaria de refrigeración del motor o por el nivel cuando el aire es aspirado a la aspiración de la bomba. Este último nivel no puede siempre preverse, sino debe confirmarse mediante pruebas durante la puesta en marcha de la estación de bombeo.

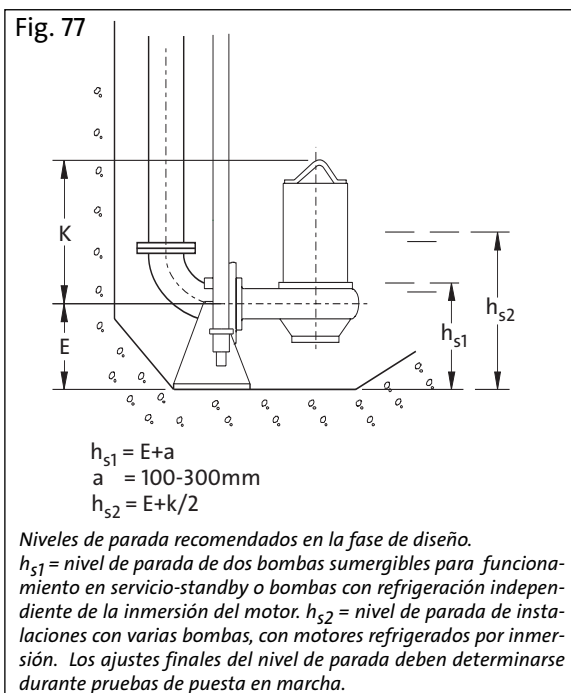
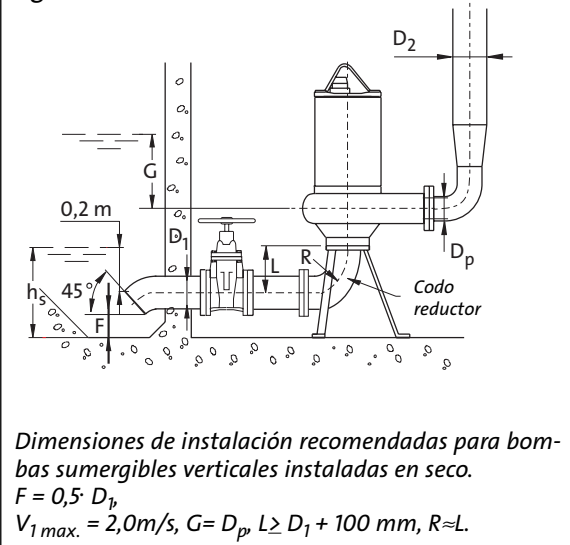


Fig. 78



En estaciones de bombeo con dos bombas sumergibles configuradas para funcionamiento en standby (una bomba en reserva), el nivel de parada puede normalmente ajustarse por debajo del motor, incluso si el motor está principalmente refrigerado por inmersión, ver la figura 77. Se seleccionan bombas idénticas para que puedan solas cubrir el caudal de la estación de bombeo, siendo el riesgo pequeño de que el nivel del líquido permanezca mucho tiempo cerca del nivel de parada. Las bombas sumergibles tienen también dispositivos de protección contra sobrecalentamiento que paran la bomba en caso de condiciones de refrigeración inadecuadas.

En estaciones de bombeo con muchas bombas sumergibles que funcionan en condiciones variables, el nivel de parada debe ajustarse de modo que los motores de las bombas estén siempre sumergidos lo suficientemente para que se consiga una refrigeración adecuada. En dichas instalaciones se prefieren bombas con camisas de refrigeración u otros medios de termodisipación independientes de la inmersión.

El ajuste del nivel de parada de bombas instaladas en seco depende de la altura de entrada de la tubería de aspiración, forma y velocidad del caudal, 200 mm por encima de la entrada de la tubería de aspiración es una buena regla práctica para esta altura y útil para el proyectista. La forma de la entrada de la tubería de aspiración es importante y las figuras 78 y 79 muestran unos buenos diseños. Para esta forma de entrada puede calcularse

una altura de nivel de parada provisional de la bomba mediante la siguiente ecuación:

$$h_s = 0,04 \sqrt{Q} + 0,2 \quad (37)$$

donde

h_s = altura del nivel de parada, m

Q = caudal de la bomba, l/s

En estaciones de bombeo con varios niveles de parada diferentes, por ejemplo en instalaciones con control de frecuencia, es importante programar la secuencia de control para que se bombee hasta el nivel de parada más bajo por lo menos una vez al día para limpiar el fondo.

5.1.5 Niveles de arranque

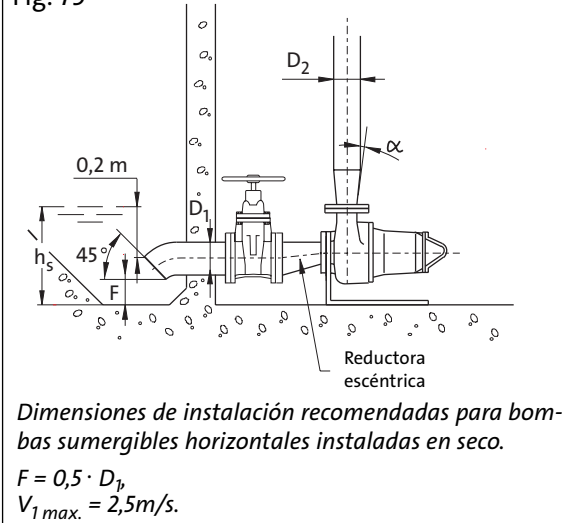
Si se dimensiona el área de superficie AW de una fosa húmeda utilizando la ecuación 36, el primer nivel de arranque de una estación de bombeo con dos bombas sumergibles configuradas para funcionamiento en servicio-standby puede ajustarse 1 m por encima del nivel de parada. El nivel de arranque puede ser inferior cuando las afluencias sean pequeñas. El segundo nivel de arranque puede ajustarse 0,2 ... 0,3 m por encima del primero.

En estaciones de bombeo con más de dos bombas, los niveles de arranque deben considerarse en cada caso. Si las bombas tienen un nivel de parada común, un diseño adecuado tendría el primer nivel de arranque 1 m por encima del nivel de parada y los siguientes niveles de arranque a intervalos de 0,3 m de éste. Si los niveles de parada de las bombas son escalonados, los niveles de arranque deben ajustarse a intervalos iguales o parecidos.

En estaciones de bombeo con bombas instaladas en seco, los niveles de arranque deben ajustarse por encima de la voluta de la bomba para garantizar que las volutas se llenen y las bombas empiecen a bombear. Para bombas verticales, esta altura puede ser considerable y debe ajustarse con un margen según la figura 78.

Bombas horizontales requieren normalmente consideraciones especiales respecto a los niveles de arranque, si la tubería de aspiración está diseñada para evitar la formación de bolsas de aire, ver la figura 79.

Fig. 79



5.1.6 Dimensión y diseño de la tubería de aspiración

El diseño y dimensionamiento de la tubería de aspiración son importantes. Unos diseños erróneos pueden ocasionar vibraciones, menor rendimiento de la bomba y riesgo de cavitación.

La tubería de aspiración debe dimensionarse de modo que la velocidad del caudal no supere 2,0 m/s para bombas verticales y 2,5 m/s para bombas horizontales. Puede ser necesario sobrepasar estos valores cuando se instalen bombas nuevas más grandes en estaciones de bombeo viejas. Debe considerarse la situación en cada caso. Pueden permitirse mayores márgenes de seguridad de NPSH.

Las figuras 78 y 79 muestran diseños de la entrada de la tubería de aspiración. La aspiración descendente ejerce un caudal limpiador en el suelo de la estación de bombeo y es menos propenso a aspirar aire de la superficie.

En bombas verticales, la tubería de aspiración debe girarse 90° para alcanzar la tapa de la aspiración de la bomba. El codo antes de la entrada de aspiración de la bomba es fundamental para su funcionamiento, ya que hace el caudal irregular. Un codo demasiado pronunciado puede ocasionar cavitación del impulsor, menor rendimiento de la bomba, así como vibraciones. Si la entrada de aspiración de la bomba es menor que la tubería de aspiración, debe utilizarse un codo reductor para minimizar la interferencia. La figura 78 muestra

dimensiones recomendadas de codos de aspiración.

La reducción de la tubería recta de entrada a una bomba horizontal debe ser excéntrica para evitar acumulación de aire y posible bloqueo del impulsor.

Un diseño de la entrada con características de caudal desfavorables puede ocasionar una caída de presión lo suficientemente grande como para agotar el NPSH disponible y causar cavitación de la bomba. Debe cumplirse con los márgenes de NPSH recomendados en instalaciones donde la geometría de la tubería de aspiración es preocupante. El concepto de cavitación, NPSH y recomendaciones de márgenes de NPSH están descritos en detalle en la sección 1 de este libro.

5.1.7 Tubería interior de estaciones de bombeo

La tubería interior de impulsión de una estación de bombeo debe seleccionarse para una velocidad del caudal de 2 ... 3 m/s. Debe ser de al menos 2 m/s especialmente si las aguas residuales contienen arena, para que ésta salga de la bomba con el caudal. Este requisito puede causar problemas a bajas frecuencias en instalaciones con control de frecuencia. La figura 58 de la sección 3 muestra recomendaciones de tamaño y pérdidas típicas para tuberías. La dimensión de la tubería debe ser de al menos 100 mm, pero puede ser de 80 mm en estaciones de bombeo pequeñas, siempre que el paso libre de la bomba sea de 80 mm.

No se recomienda utilizar juntas flexibles en la tubería interior, ya que la mayor parte de vibraciones de las tuberías son inducidas por la presión del líquido que fluye y no pueden evitarse mediante la utilización de juntas flexibles. Al instalar juntas flexibles se corta la tubería y la sección estará sujeta a una fuerza de separación con una magnitud de la presión de la bomba x el área. La presión cerca de la bomba pulsa a una frecuencia que está determinada por la velocidad de la bomba y el número de canales del impulsor, ocasionando vibraciones de la tubería y la junta. La vibración es más pronunciada cuando se instalan juntas flexibles. Las juntas flexibles son también propensas a dañarse.

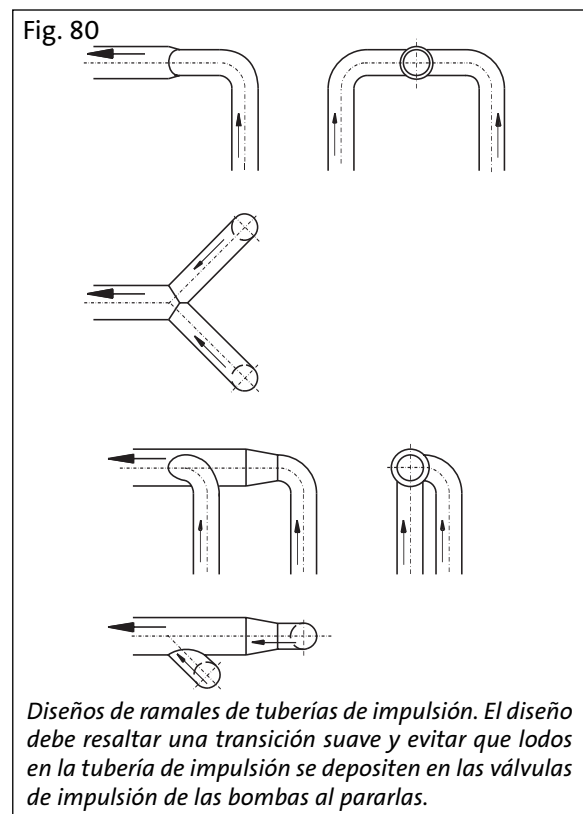
La tubería de impulsión está normalmente ensanchada después de la bomba y, con el fin de ahorrar

energía, estas piezas de transición deben tener forma cónica con un ángulo de desviación α máximo de 10°. Ver la figura 79.

Para bombas verticales instaladas en seco y bombas vortex sumergibles, la válvula de retención debe instalarse lo más lejos posible de la bomba para mitigar posibles problemas de aire en la bomba durante el arranque.

Para bombas grandes instaladas en posición horizontal, donde los cojinetes del eje incluyen cojinetes separados para fuerzas radiales y axiales, la válvula de retención no debe montarse directamente en la tubería vertical desde la brida de descarga de la bomba. Los posibles choques de una válvula que cierra rápidamente pueden golpear la bomba tan fuerte que los cojinetes radiales se dañen progresivamente.

En instalaciones con varias bombas, las tuberías de impulsión de las bombas deben unirse mediante un ramal, diseñada para evitar que, durante la parada de la bomba, se depositen sólidos en las tuberías individuales que pueden bloquear la válvula. La figura 80 muestra buenos diseños de ramales.



5.1.8 Dispositivos de agitado

Los dispositivos de agitado para estaciones de bombeo constan de una válvula by-pass de control remoto, montada en la bomba sumergible antes de la conexión a la tubería. Al abrirse la válvula, el caudal de la bomba es devuelto a la fosa húmeda, agitando el líquido y dispersando los depósitos de lodos y espuma. La material en suspensión saldrá con el líquido al cerrarse la válvula de agitado.

La válvula de agitado debe ser del tipo normalmente cerrado (por ejemplo un dispositivo neumático de resorte) para que el bombeo pueda continuar en el caso de funcionamiento defectuoso.

En una fosa húmeda de dimensiones y forma correctas no se necesitan normalmente dispositivos de agitado. Son útiles en fosas húmedas viejas y grandes y en situaciones especiales, cuando las aguas contienen grandes cantidades por ejemplo de grasa. Un dispositivo de agitado puede también modificarse sin cambiar la estructura de la fosa húmeda. Los dispositivos son según el diseño del fabricante y puede solicitarse información detallada al fabricante de bombas.

5.1.9 Problemas de malos olores en estaciones de bombeo

Una estación de bombeo de aguas residuales puede ocasionar problemas de malos olores en su entorno inmediato. Muchos factores influyen, tales como la ubicación de la estación de bombeo, la calidad de las aguas residuales, la situación antes de la estación de bombeo y las dimensiones y el diseño de la fosa húmeda. Si la estación de bombeo está alimentada de otra estación de bombeo lejana, el tiempo de trasiego de las aguas residuales entre las estaciones de bombeo puede ser tan largo que se tornan sépticas por la acción anaeróbica. Aguas fecales sépticas producen hidróxido de sulfuro (H_2S) que, además de ser tóxico, crea un olor pestilente típico.

Es prácticamente imposible predecir la aparición de problemas de malos olores. Si son graves, pueden tomarse las siguientes medidas para intentar subsanarlos:

- Bajar los niveles de arranque y parada para reducir el tiempo de retención en la fosa húmeda e impedir que se formen lodos.
- Instalar un codo de entrada sumergible en la

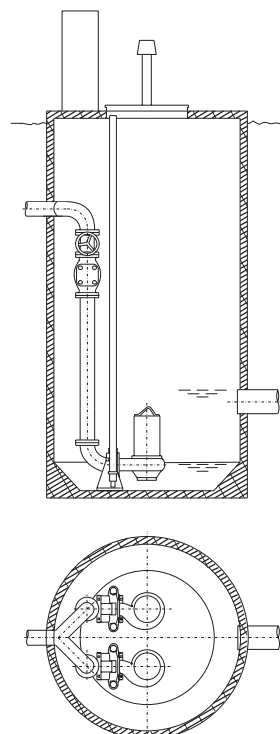
fosa húmeda para que lleve las aguas residuales entrantes por debajo de la superficie, evitando así la formación de aerosoles.

- Instalar filtros de aire en los ventiladores de la fosa húmeda.
- Añadir productos químicos desodorizantes en la alcantarilla aguas arriba desde la estación de bombeo.

5.1.10 Ejemplos de diseño de estaciones de bombeo

El diseño de la fosa húmeda depende del tamaño y caudal de la estación de bombeo. Las figuras 81... 84 muestran principios de diseño de fosas húmedas para varios casos y tamaños de estaciones de bombeo. Una estación de bombeo con bombas sumergibles para grandes caudales puede diseñarse según la figura 83. El nivel de parada puede ajustarse a la altura h_{s2} , si así lo requieren las bombas. La velocidad del caudal V_D en la sección expansiva de la fosa húmeda debe ser lo suficientemente alta como para evitar sedimentación de lodos. Un valor adecuado de V_D es de 0,1 ... 0,3 m/s cuando el líquido está en el nivel de parada. Puede calcularse la dimensión D utilizando la relación

Fig. 81



Diseño de una estación de bombeo para bombas sumergibles de caudales relativamente pequeños ($Q = 4 \dots 50 \text{ l/s}$). La sección transversal preferida en estaciones de bombeo pequeñas es circular, lo que minimiza el área de la superficie del líquido y evita esquinas donde podrían acumularse lodos. Diámetro mínimo de 1,5 ... 2 m para facilitar los trabajos de reacondicionamiento.

$$D = \frac{Q}{1000 \cdot V_D \cdot C} \quad (38)$$

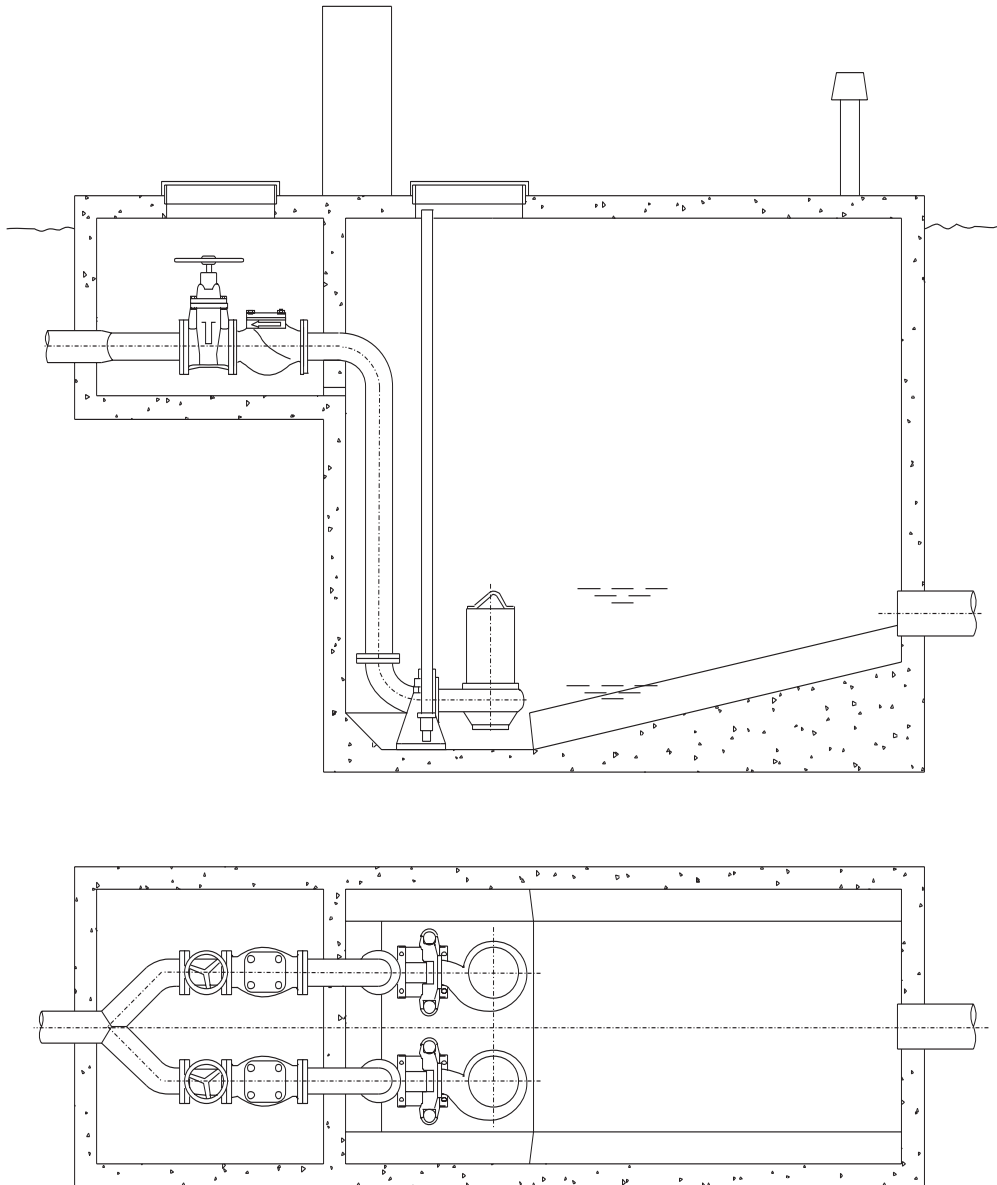
donde

Q = caudal de la estación de bombeo, l/s.

VD = velocidad del caudal en la sección expansiva,
0,1 ... 0,3 m/s

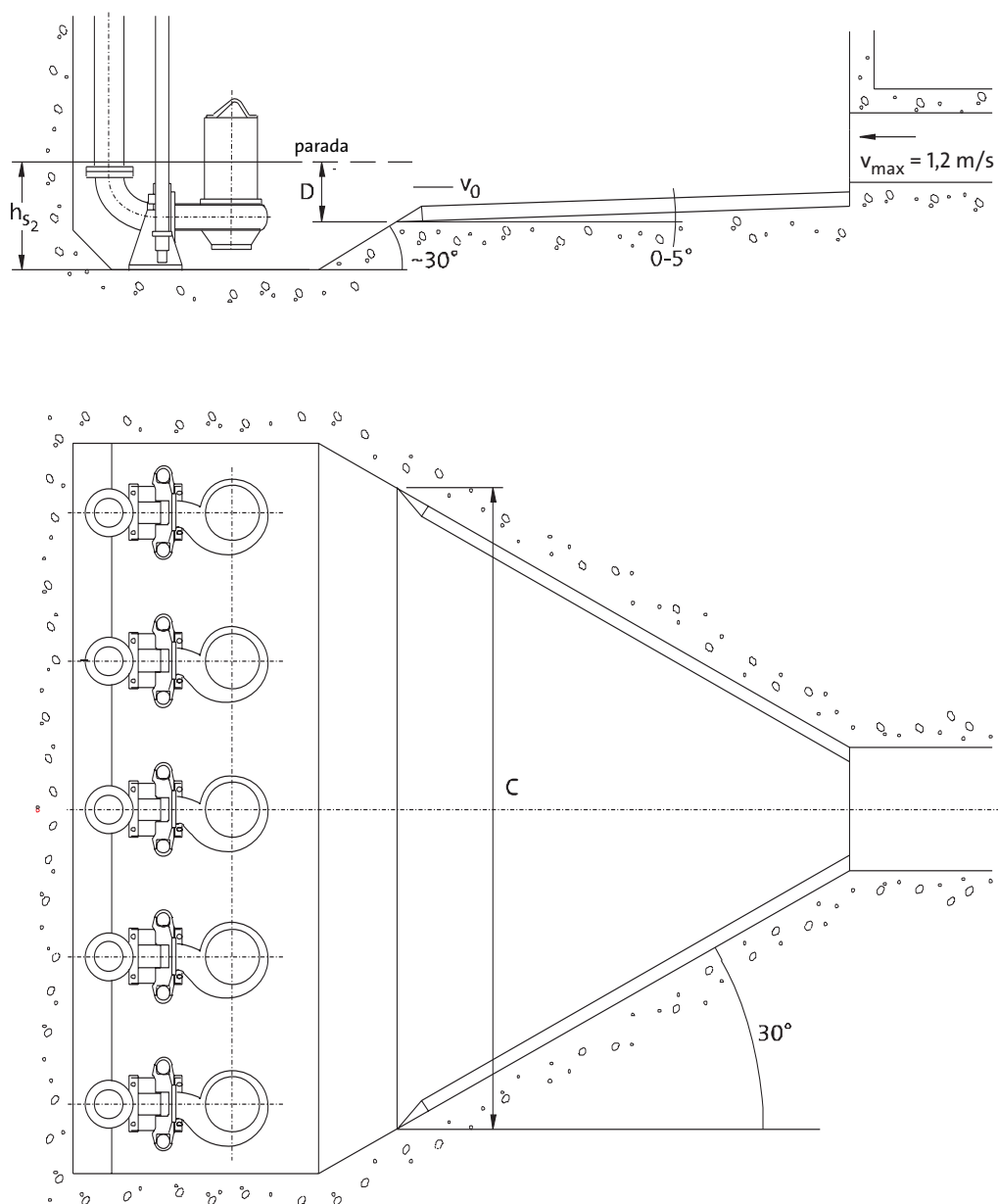
D, C = dimensiones de la estación de bombeo, m

Fig. 82



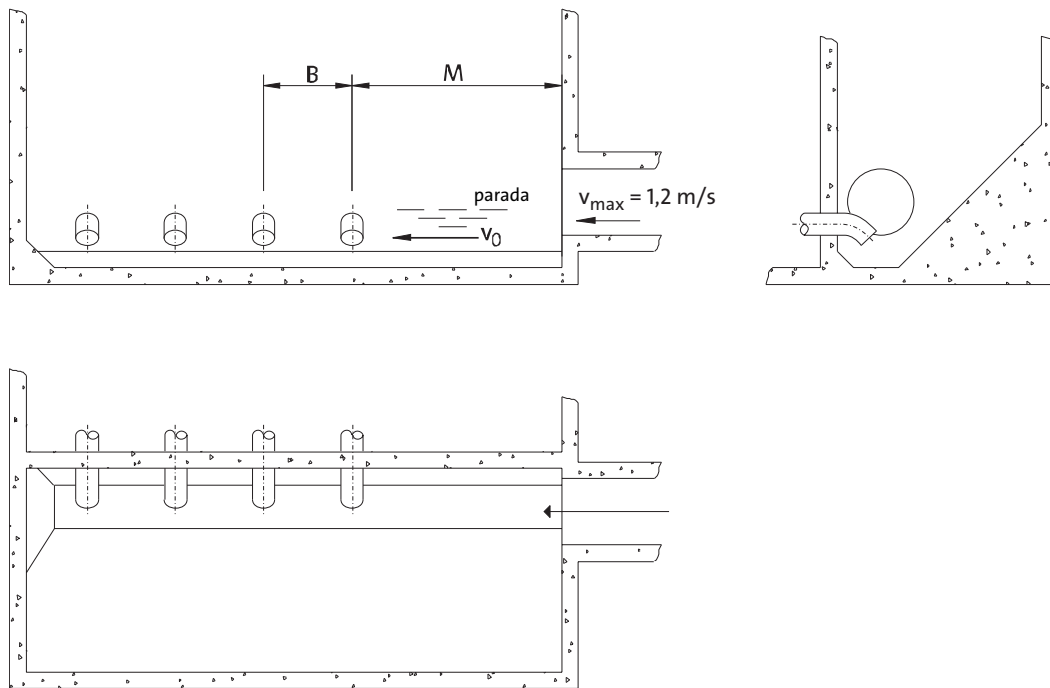
Diseño de una estación de bombeo para dos bombas sumergibles de caudales medios ($Q = 50 - 2000$ l/s). La forma alargada de la fosa húmeda es una característica importante que aleja la tubería de entrada de las bombas e impide la formación de lodos en el suelo de la fosa húmeda.

Fig. 83



Diseño de una estación de bombeo para varias bombas sumergibles de grandes caudales. Si las bombas dependen de la inmersión para su refrigeración hay que tenerlo en cuenta al elegir el nivel de parada h_{s2} .

Fig. 84



Diseño de la fosa húmeda de una estación de bombeo con varias bombas instaladas en seco. Velocidad del caudal a través de los codos de aspiración $V_0 = 0,3 \dots 0,4$ m/s, con el líquido en el nivel de parada. La distancia interna B entre las bombas puede seleccionarse para bombas sumergibles, mientras que la distancia M debe seleccionarse según la altura de caída de la entrada y debe asegurar un caudal uniforme en las entradas de aspiración.

5.1.11 Posiciones de bombas instaladas en seco

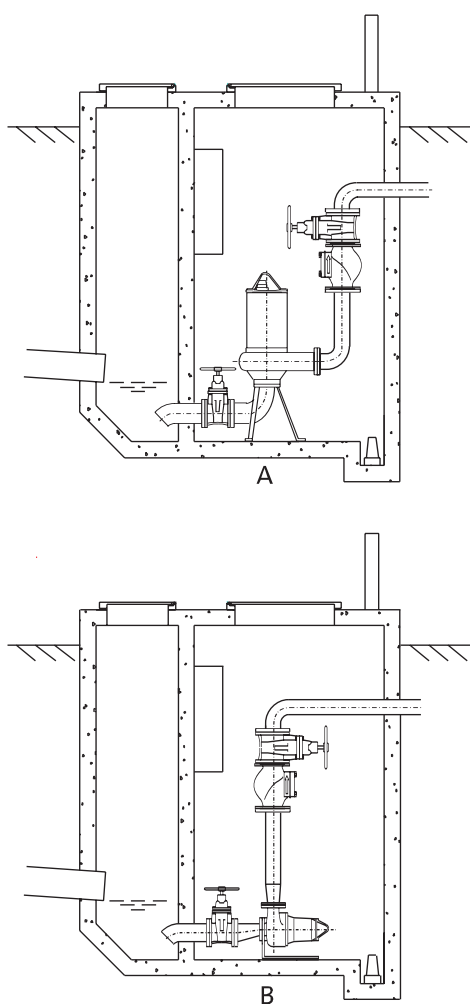
Para instalación en seco, la mayoría de fabricantes pueden ofrecer bombas tanto para instalación vertical como horizontal. Una bomba en posición horizontal ofrece normalmente ventajas, tales como:

- tubería más sencilla con menos codos
- el caudal de aspiración al impulsor es uniforme
- colocación inferior de la bomba.

Es posible que para bombas grandes en posición vertical no se cumplan con el requisito del margen de seguridad de NPSH, debido a la ubicación de la bomba y mayor requisito de margen, mientras que una bomba horizontal será aceptable. Hay que tener en cuenta todos los puntos de trabajo posibles de la bomba al calcular el NPSH para instalaciones donde más de una bomba funciona al mismo tiempo.

Bombas grandes para instalación horizontal llevan barras guía para facilitar el desmontaje del motor de la voluta de la bomba. Ver la figura 17 en sección 2.

Fig. 85



Dibujos de estaciones de bombeo de fosa húmeda-fosa seca. Las bombas pueden instalarse en posición vertical (A) u horizontal (B). La construcción de las bombas sumergible está protegida contra inundación accidental de la cámara seca. La fosa seca tiene una bomba de achique separada para vaciar el agua de filtraciones. El panel de control de la estación de bombeo puede instalarse en la parte superior o dentro de la fosa seca por encima del nivel de inundación.

5.2 Estaciones de bombeo prefabricadas

5.2.1 Estaciones de bombeo para instalación en el exterior

Las estaciones de bombeo prefabricadas se suministran de fábrica preparadas para instalación in situ. El material utilizado es plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP) o, para estaciones de bombeo pequeñas, polietileno (PE). Las estaciones son completas con todas las tuberías interiores y otros componentes en su sitio. Por lo tanto, la instalación se reduce a la excavación del sitio, cimentación y conexión de la estación a la alcantarilla y tubería de impulsión de llegada, así como la conexión del panel de control al suministro eléctrico y posibles conexiones telemétricas.

Debido a la posible flotación de la estación de bombeo al estar vacía hay que asegurarla a una cimentación o losa de hormigón, que también pueden ser prefabricadas y adaptadas a los pernos de cimentación de la estación de bombeo. La masa de la losa de hormigón puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$M_B = 2000 \cdot V_G \quad (39)$$

donde

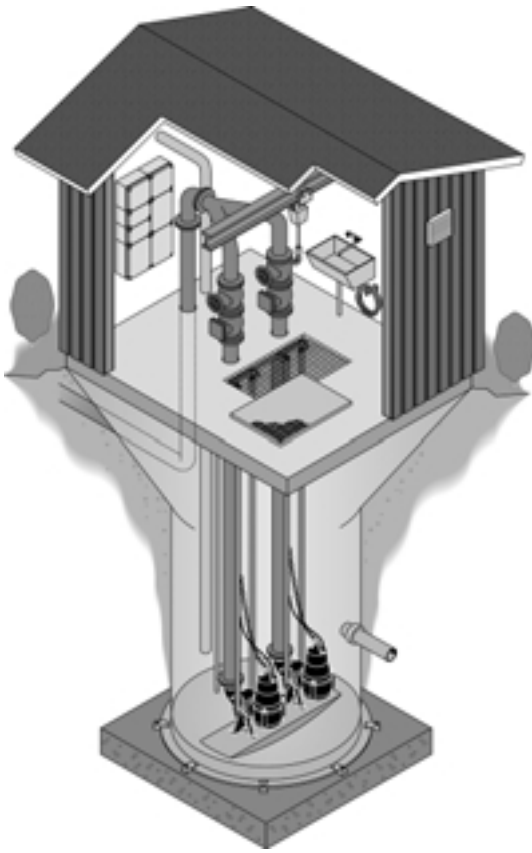
M_B = masa de hormigón (kg)

V_G = volumen de la estación de bombeo por debajo del nivel freático (m³)

Hay que purgar la estación de bombeo para impedir la formación de gases tóxicos o explosivos. Si hay riesgo de heladas, la parte superior de la estación de bombeo debe aislarse.

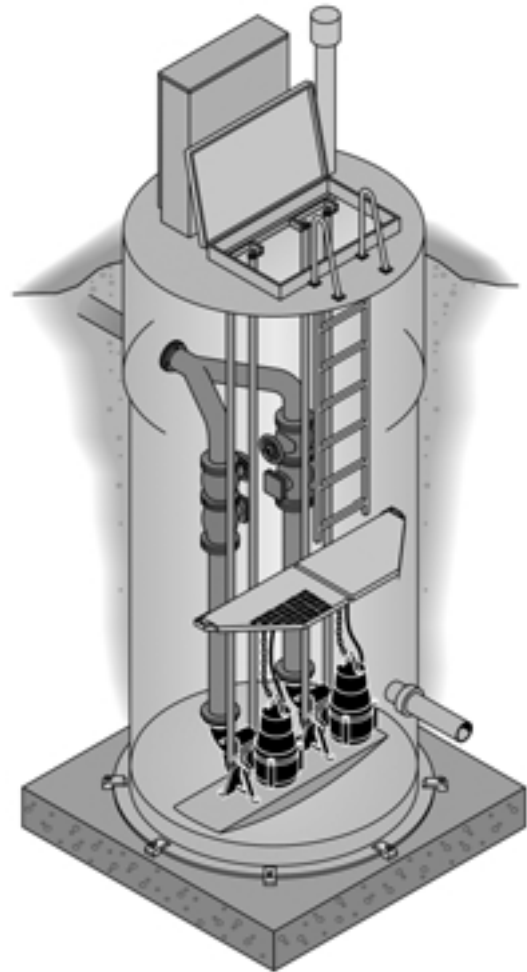
Las estaciones de bombeo prefabricadas llevan tapas de acceso, que pueden ser de aluminio o acero galvanizado y estar moldeadas en la estructura. La tubería interior puede ser de fundición o acero inoxidable de poco espesor, con codos y ramales soldados. Las válvulas deben ser de fundición, y ser adecuadas para utilización tanto en posición horizontal como vertical. Las figuras 86 ... 88 muestran típicas estaciones de bombeo prefabricadas.

Fig. 86



Estación de bombeo prefabricada con caseta de servicio en el exterior. El collar de la fosa húmeda sirve de cimentación para la caseta.

Fig. 87



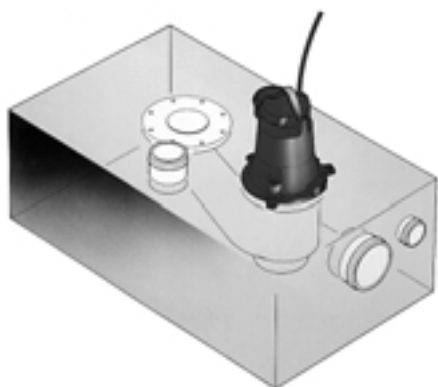
Típica estación de bombeo prefabricada. La fosa húmeda está completa con plataformas de trabajo plegables para acceso a válvulas y mantenimiento.

Fig. 88



Estación de bombeo prefabricada de fosa húmeda-fosa seca. La forma redonda de la fosa húmeda añade resistencia y facilita la fabricación. Bombas sumergibles instaladas en seco están a salvo de inundaciones y son fáciles y limpias de mantener. Una plataforma intermedia da acceso al panel de control, montado por encima del nivel de inundación.

Fig. 89



Estación de bombeo para caudales pequeños. La bomba puede estar integrada en la estructura del depósito y puede retirarse fácilmente. La construcción hermética al aire es adecuada para instalación en el interior, y la unidad puede instalarse cerca de la fuente del efluente.

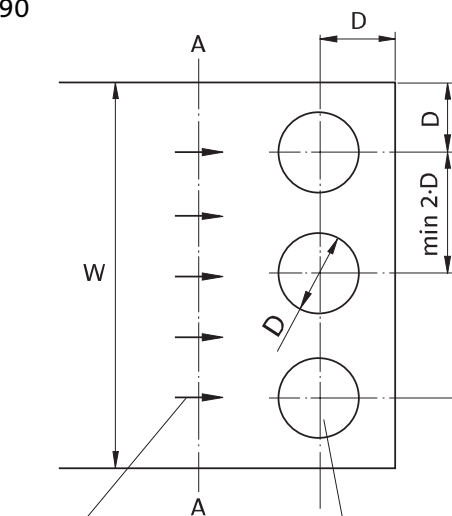
5.2.2 Estaciones de bombeo para instalación en el interior

Estaciones de bombeo para capacidades muy pequeñas pueden instalarse en el interior, por ejemplo en sótanos de edificios cerca del origen del efluente. Pueden estar diseñadas como depósitos con las bombas integradas o montadas por fuera. La figura 89 muestra unos dispositivos típicos.

5.3 Estaciones de bombeo con bombas instaladas en columna

Las estaciones de bombeo con bombas instaladas en columna tienen típicamente gran capacidad de bombeo y especialmente las bombas axiales son sensibles a las condiciones en la cámara de aspiración. La figura 90 muestra distancias recomendadas entre las bombas, así como entre las bombas y secciones de pared. Es de suma importancia que el caudal de alimentación de las bombas sea uniforme y que la velocidad del caudal en este punto no supere 0,5 m/s.

Fig. 90



$$v_a < 0,3-0,5 \text{ m/s}$$

$$W = \frac{n \cdot Q}{v_a \cdot X}$$

W = Ancho del tanque de aspiración (m)

n = Número de bombas

Q = caudal de bomba (m³/s)

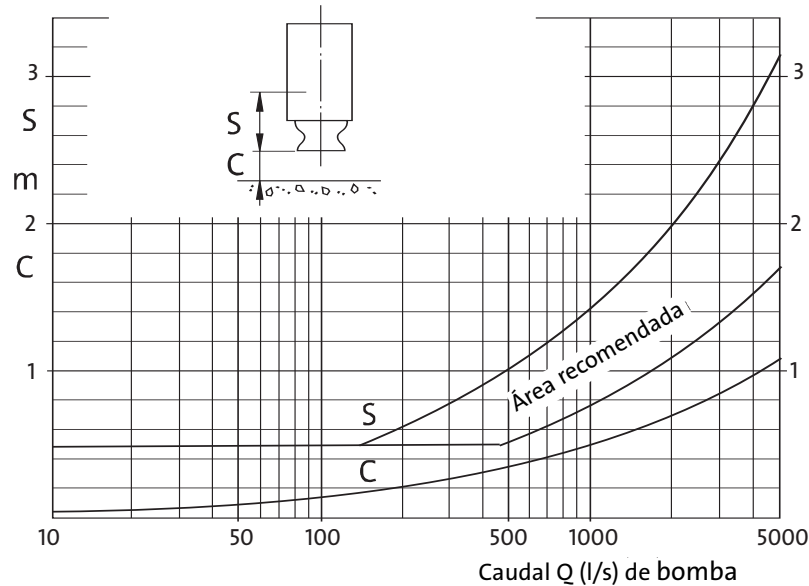
$v_a < 0,3-0,5 \text{ m/s}$

X = Profundidad del agua en la sección A-A (m); S+C

Bomba instalada en columna
D = Diámetro de la columna

Recomendaciones de distancia entre las bombas y velocidad del caudal de aspiración para bombas instaladas en columna.

Fig. 91

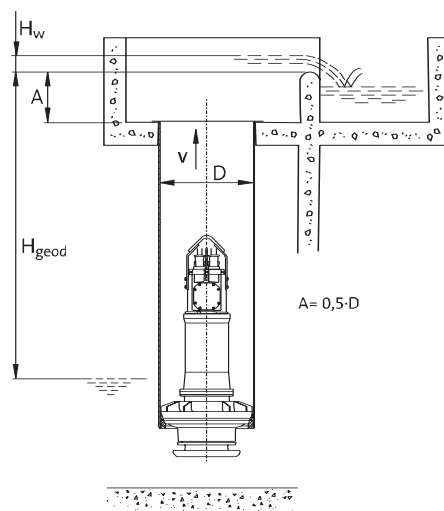


Recomendación de profundidad de inmersión de bombas según norma CEN propuesta (borrador).

La inmersión de la bomba debe ser suficiente para que se eviten remolinos de aspiración. La figura 91 muestra un diagrama de recomendaciones de dimensionamiento según la nueva norma CEN propuesta (borrador). Es todavía imposible predecir totalmente de antemano la aparición de remolinos de aspiración. Las características de la bomba y las condiciones del caudal en la cámara de aspiración influyen en el desarrollo de los remolinos de aspiración. La forma de la cámara de aspiración puede ocasionar la aparición inesperada de remolinos. Pueden evitarse colocando una boya por encima de la misma, si eso es posible.

Las bombas se instalan con frecuencia en columnas de forma que el agua sale directamente hacia arriba a través de la columna. El diseño de salida superior puede en estos casos cambiar la altura de la bomba y utilización de energía. La figura 92 muestra un buen diseño. La columna de la bomba está determinada bastante por debajo del rebosadero, por lo que el caudal se suaviza antes de fluir por encima del rebosadero. En este diseño puede calcularse la altura de la bomba con suficiente exactitud, utilizando las ecuaciones de la figura 92. Para evaluaciones prácticas no es necesario contar con las pérdidas en la columna.

Fig. 92



$$H \approx H_{\text{geod}} + \frac{v^2}{2g} + H_w$$

$$H_w = 0,6 \cdot (Q/b)^{0,7} \text{ rebosadero de cresta redonda}$$

$$H_w = 0,8 \cdot (Q/b)^{0,7} \text{ rebosadero de cresta afilada}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$v = \text{velocidad del caudal (m/s)}$$

$$Q = \text{caudal (m}^3/\text{s)}$$

$$b = \text{ancho del rebosadero [m]}$$

Diseño de salida superior y determinación de altura de bombas instaladas en columna.

5.4 Selección de dimensiones de estaciones de bombeo

El dimensionamiento de una estación de bombeo está basado en el caudal esperado de entrada, que normalmente debe estimarse. No pueden siempre utilizarse valores de referencia, ya que los caudales dependen de muchas variables. Pueden conseguirse información de proyectistas de sistemas de alcantarillado o, menos accesible, de literatura técnica sobre el tema. La posibilidad de ampliaciones futuras del sistema de alcantarillado debe también considerarse como capacidad de reserva o flexibilidad del tamaño de la instalación de bombeo. La afluencia a la estación de bombeo de aguas residuales varía también mucho con el tiempo, tanto en ciclo corto como largo.

La estimación del caudal de entrada empieza siempre con el análisis de las posibles partes constituyentes. Se clasifican normalmente como

- aguas residuales de zonas residenciales
- efluentes industriales
- aguas pluviales (lluvia y nieve derretida)
- aguas de filtraciones

El agua de filtración es el agua que entra en el sistema del alcantarillado de fugas del agua subterránea, tuberías de agua con fugas o aguas pluviales que entran inesperadamente en un sistema separado de aguas fecales a través de registros u otras entradas, tales como excavaciones de obras de construcción.

Hay que conocer el tipo de utilización para dimensionar correctamente una estación de bombeo. Los sistemas de alcantarillado se clasifican como

- alcantarillas de aguas residuales normales, sólo para efluentes domésticos y/o industriales
- alcantarillas de aguas pluviales, sólo para aguas pluviales
- alcantarillas combinadas, tanto para aguas residuales normales como aguas pluviales en varias proporciones.

5.4.1 Estaciones de bombeo de aguas residuales normales

La estimación del caudal de aguas residuales residenciales está normalmente basada en el número de habitantes. El caudal varía en ciclos diarios y semanales, siendo la variación de 0,5 ... 1,5 veces el caudal medio. Los efluentes industriales deben

estimarse en cada caso, dependiendo del tipo de planta en cuestión. La cantidad de aguas de filtraciones presentes depende de un número de variables, tales como el nivel del agua freática, lluvias locales y características del suelo, así como el estado general de las tuberías subterráneas. Puede estimarse como unidades por unidad de longitud de tubería, por ejemplo kilómetro, o como un ratio relacionado con la cantidad de aguas residuales.

Hay que tener en cuenta la posibilidad de inundación en la estación de bombeo con los consiguientes daños al entorno. Por este motivo, las estaciones de bombeo de aguas residuales tienen dos bombas configuradas para funcionamiento en servicio-standby (una de reserva), pudiendo cada bomba manejar el caudal máximo. Por lo tanto, no habrá inundación cuando una bomba está averiada o siendo reparada. Si la capacidad de la estación de bombeo está basada en dos bombas funcionando en paralelo, hay que tener una tercera como bomba en standby. Estaciones de bombeo de comunidades o privadas pueden llevar una sola bomba, ya que la afluencia de aguas residuales puede controlarse fácilmente, restringiendo la utilización de las instalaciones.

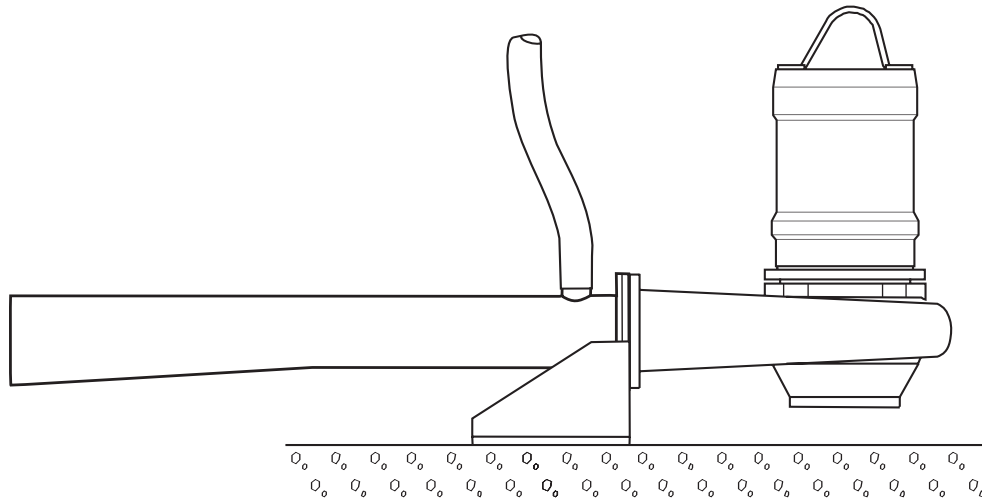
5.4.2 Estaciones de bombeo de aguas pluviales

Los caudales de las aguas de lluvia son considerablemente mayores que otras fuentes de aguas pluviales, por ejemplo nieve derretida. El dimensionamiento del sistema debe basarse en la mayor cantidad prevista que llegará a la estación de bombeo. Puede que esta cantidad de caudal no sea régimen torrencial, ya que está permitido que las alcantarillas de aguas pluviales se inunden en condiciones de fuertes lluvias debido a la relativa inocuidad de las aguas de lluvia. La tolerancia de inundaciones de la zona y el tipo de entorno urbano en cuestión influyen también en los valores del diseño. Además deben tenerse en cuenta las aguas de filtraciones.

Se controlan las inundaciones en la estación de bombeo mediante compuertas que descargan en un sentido adecuado, tal como una acequia o un canal.

Las estaciones de bombeo de aguas pluviales no requieren el mismo factor de seguridad que las estaciones de bombeo de aguas fecales y pueden diseñarse para manejar el caudal máximo con todas las bombas funcionando el paralelo.

Fig. 93



Eyector y bomba para tanques de retención

5.4.3 Estaciones de bombeo combinadas de aguas residuales y tanques de retención

El caudal de dimensionamiento de estaciones combinadas de bombeo de aguas residuales es la suma de los caudales estimados de aguas fecales, aguas pluviales y aguas de filtraciones. El requisito de seguridad es el mismo que para estaciones de bombeo de aguas residuales, por lo que deben dimensionarse con al menos una bomba en standby (reserva). Las estaciones de bombeo combinadas reúnen de forma desfavorable las características de las estaciones de bombeo de aguas residuales normales y aguas pluviales, por lo que se desaconseja su utilización.

En relación con estaciones de bombeo tanto de aguas pluviales como combinadas de aguas residuales pueden utilizarse tanques de retención para almacenar la afluencia de aguas residuales que supere la capacidad de bombeo instalada. Cuando el caudal baja (como después de una fuerte lluvia), se vacía el tanque mediante bombeo o por gravedad y puede reanudarse el funcionamiento normal de la estación de bombeo. Pueden también utilizarse tanques de retención para igualar variaciones de las aguas residuales afluentes a una planta de tratamiento. Es fundamental que el tanque de retención impida la sedimentación de sólidos en el suelo del tanque al vaciarse. Esto puede lograrse diseñando la forma

del tanque "autolimpiable" o agitando y mezclando el contenido del tanque. Los fabricantes de bombas han desarrollado agitadores eyectores especiales, que constan de un eyector que extrae aire de la superficie, en combinación con una bomba sumergible. La figura 93 muestra el diseño.

El aire proporcionado por el eyector hace que el mezclado sea más eficaz a poca profundidad del agua. La potencia de bombeo necesaria puede estimarse en aprox. 70 W por m² de la superficie del fondo del tanque. Los eyectores deben colocarse de modo que los chorros arrastren los sólidos hacia el desagüe del tanque.

5.5 Selección de bomba

5.5.1 Selección de bomba basada en las curvas de bomba

Las bombas para un proyecto de una estación de bombeo se seleccionan en primer lugar mediante los métodos descritos en el capítulo 3 de este libro. Un buen método es considerar algunas bombas de la gama del fabricante que tengan curvas cerca del punto de trabajo deseado.

Deben incluirse bombas que tengan curvas tanto por encima como por debajo de la necesidad inicial, ya que otras consideraciones, tales como el rendimiento y coste de la bomba, pueden ser factores económicamente decisivos.

La característica intermitente del funcionamiento de una estación de bombeo de aguas residuales permite un amplio margen de selección de bomba, por lo que el proyectista no está limitado a un punto de trabajo nominal determinado. Puntos de trabajo calculados teóricamente son de todas formas imprecisos, ya que la altura real puede variar debido a niveles de arranque y parada cambiantes producidos por un control de nivel programado, desgaste de la bomba y tolerancias en las tuberías y curvas características de la bomba.

Por ejemplo, una bomba cuya curva de altura es superior a la diseñada al principio puede ofrecer mejor rentabilidad total, especialmente si la curva característica de la tubería es plana o si las pérdidas dinámicas son pequeñas comparadas con la altura geodésica.

Por lo tanto, el proyectista de la estación de bombeo sabe muy bien que debe seleccionar una bomba de la gama estándar del fabricante y abstenerse de pedir bombas ajustadas exactamente. La utilización de bombas estándar facilitará también el uso de repuestos y posterior cambio de bomba, en caso necesario.

La selección de bomba debe comprobarse para asegurar que el punto de trabajo bajo ninguna circunstancia esté fuera de la gama permitida de la curva. La gama de funcionamiento puede limitarse debido a varios motivos, tales como riesgo de cavitación o vibraciones, o sobrecarga. Debe comprobarse lo siguiente:

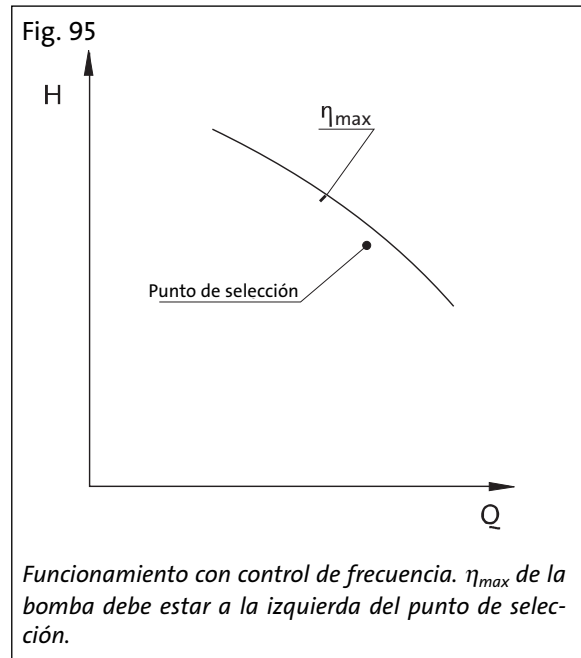
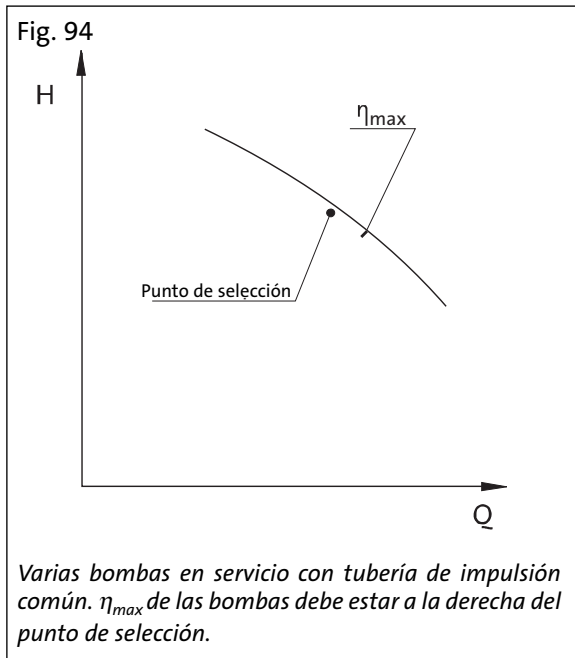
- Los puntos de trabajo de bombas sencillas en instalaciones con varias bombas que bombean en paralelo a una tubería de impulsión común. Los puntos de trabajo en situaciones cuando una, dos y hasta e inclusive todas las bombas funcionan en paralelo.
- El efecto de variaciones del nivel del líquido en el punto de trabajo de la bomba. El nivel del líquido puede variar en la fosa de aspiración, así como en el depósito de descarga. Si los puntos de trabajo de la bomba llegan al área de cavitación ($NPSH_r > 10$ m) debido a un nivel de aspiración creciente y por lo tanto una mayor altura de aspiración, la bomba puede normalmente utilizarse sin consecuencias, ya que el $NPSH_A$ aumentará del mismo modo. Por lo tanto se evitará la cavitación de la bomba y sólo deben confirmarse la potencia necesaria de la bomba y la potencia disponible del motor. Se recomienda consultar con el fabricante de bombas en casos dudosos. Es especialmente importante comprobar todas las combinaciones de nivel posibles para bombas de hélice, ya que éstas tienen unas bandas Q/H muy estrechas permitidas, debido a curvas de potencia muy variables.

5.5.2 Comprobación del rendimiento de la bomba

Cuanto más grandes sean las bombas, mayor importancia tiene su rendimiento para la selección de bomba. Cuando sea necesario deben calcularse los costes del ciclo vital de varias alternativas. Ver la sección 7. Deben tenerse en cuenta todos los puntos de trabajo en distintas situaciones de trabajo. Deben comprobarse por separado los cuatro siguientes casos distintos:

A. Dos bombas están instaladas con configuración para funcionamiento en servicio/standby, o todas las bombas tienen tuberías de impulsión separadas.

En estos casos las bombas sólo tienen un punto de trabajo (si no se tienen en cuenta las variaciones del nivel de aspiración del líquido) y la situación es relativamente fácil respecto al rendimiento. La selección de bomba no debe basarse en una curva Q/H cercana al punto de trabajo deseado, si el mejor punto de rendimiento de la bomba queda muy lejos. Puede encontrarse otra bomba con una curva Q/H por encima del punto de trabajo deseado, pero con un rendimiento mucho mayor a un precio parecido y será una elección mucho mejor.



B. Varias bombas en servicio con tubería de impulsión común. En este caso las bombas pueden tener varios puntos de trabajo, dependiendo del número de bombas en funcionamiento. El punto de trabajo se selecciona normalmente para la situación en la que todas las bombas en servicio funcionan al mismo tiempo. Para que el rendimiento de la bomba sea el mejor posible con menos bombas funcionando, debe elegirse una bomba que tenga su mejor punto de rendimiento a la derecha del punto de trabajo principal, ver la figura 94.

C. Bombas utilizadas con control de frecuencia. Para que el rendimiento sea aceptable también a bajas frecuencias, y para que Q_{min} sea lo suficientemente pequeño, el mejor punto de rendimiento debe estar a la izquierda del punto de trabajo principal. Ver la figura 95.

D. Varias bombas en servicio con tubería de impulsión común y control de frecuencia. Para este caso la mejor elección es probablemente una bomba, cuyo mejor punto de rendimiento coincida lo más posible con el punto de trabajo principal.

A menudo puede considerarse más de una bomba, incluso del mismo fabricante, para un punto de trabajo deseado. Una alternativa puede ofrecer unos menores costes pero tener menor rendimiento que otra. La decisión entre estas bombas debe en principio estar basada en un análisis del coste del ciclo vital. Esta evaluación deben

muchas veces hacerla el cliente o su asesor, ya que el fabricante de bombas no dispone normalmente de toda la información relevante. La postura del comprador puede también ser significativa, ya que un contratista puede dar más importancia al precio de adquisición que a los costes de funcionamiento, mientras que el propietario mirará los costes totales.

Lamentablemente el fabricante de bombas debe muchas veces seleccionar y ofrecer bombas sin tener información, o muy poca, del proyecto, por lo que la selección de bomba no será óptima o incluso incorrecta. Especialmente la información de lo siguiente es muy importante:

- ¿Utilizará más de una bomba una tubería de impulsión común? En este caso se necesitan la curva característica de la tubería de impulsión o el número de bombas en servicio y el valor de la altura geodésica.
- Información respecto a la utilización de control de frecuencia.
- Para bombas instaladas en columna se necesita información respecto a la naturaleza del líquido con el fin de averiguar la posibilidad de utilizar bombas axiales de hélice.

5.5.3 Número de bombas

Las bombas de una estación de bombeo de aguas residuales se seleccionan de modo que por lo menos una bomba esté siempre en standby.

Especialmente en grandes estaciones de bombeo, debe seleccionarse un número de bombas que permita optimizar su utilización y los costes de la inversión. El coste de la capacidad de bombeo, o la potencia de la bomba en KW, disminuye con mayor tamaño de bomba. Por otro lado, la necesidad de una bomba en standby aumentará el coste de redundancia, si se utilizan muy pocas unidades grandes. Los costes de instalación son por lo tanto casi constantes para cierta capacidad, independientemente del número de bombas utilizadas para cubrirla, al menos dentro de una gama razonable. Del mismo modo, los costes de energía se mantendrán casi constantes, si las bombas consideradas pueden funcionar cerca del punto de trabajo óptimo.

Otro factor que influye en la selección del número de bombas puede también ser la necesidad de una salida uniforme o continua que se consigue más fácilmente con muchas bombas.

El número óptimo de bombas para la mayoría de estaciones de bombeo pequeñas a medianas es de dos, a no ser que haya requisitos especiales.

En estaciones de bombeo con varias bombas suele ser buena costumbre seleccionar sólo bombas idénticas. En algunos casos especiales donde el caudal entrante oscila casualmente y en gran parte, por ejemplo a causa de lluvias torrenciales, puede ser prudente instalar bombas más grandes que sólo funcionan en condiciones extremas.

El efecto en el coste de inversión debido a variaciones del número de bombas instaladas para una demanda de bombeo específica puede variar de un fabricante a otro, ya que los aumentos del tamaño de las bombas son diferentes de diferentes fabricantes. Por lo tanto, al aumentar el número de bombas, la instalación puede resultar más económica con un fabricante y más cara con otro. Donde se requieren muchas bombas para el funcionamiento de una estación de bombeo, el número final debe dejarse abierto para que los fabricantes licitantes decidan dentro de ciertos límites. Por lo tanto, si hay muchos licitantes las ofertas serán probablemente más competitivas.

5.6 Condiciones especiales

5.6.1 Vibraciones de la bomba

La mayoría de las bombas de aguas residuales vibran, por lo menos hasta cierto punto. Las vibraciones se producen por el desequilibrio mecánico residual de las piezas giratorias, pulsaciones de presión causadas por los álabes del impulsor y la fuerza radial hidrodinámica ocasionada por la masa del fluido que gira con los impulsores de un solo álabe. Las bombas vortex vibran mucho menos, ya que no provocan presiones pulsantes. El desequilibrio residual es insignificante en bombas de voluta en comparación con otros factores de vibración. La mejora de procedimientos de equilibrio ya buenos del fabricante no tienen efecto apreciable en las vibraciones de la bomba.

Los impulsores de bombas de aguas residuales (excepto impulsores vortex) causan más vibraciones que los impulsores para agua limpia, debido al pequeño número de álabes y grandes canales. El método de instalación de la bomba tiene también un impacto importante en el nivel de vibraciones. Una bomba sumergible que está colocada en una base permanece en sitio sólo por su propio peso, lo que aumenta las vibraciones si comparamos con una instalación fija. Una bomba instalada en posición vertical puede vibrar más que una bomba en posición horizontal, debido a una estructura diferente del soporte. El codo de aspiración necesario puede también incrementar los niveles de vibraciones.

Pronósticos de vibraciones e información de cálculos de bombas de aguas residuales están disponibles en la publicación de EuroPump "Guide to Forecasting the Vibrations of Centrifugal Pumps", (Guía para pronosticar vibraciones de bombas centrífugas), 1992 EuroPump. Los valores presentados en este libro son recomendaciones y son válidos cuando se miden en el cojinete principal más cercano al impulsor de la bomba. Cualquier velocidad de vibraciones superior a 10 mm/s (RMS) medida en este punto indica un estado anómalo de la bomba. El motivo puede ser atascos de la bomba, funcionamiento fuera de la sección permitida de la curva Q/H de la bomba, fuerte cavitación y mucho aire en el líquido o impulsor dañado. Puede controlarse el posible desequilibrio mecánico, dejando que la bomba se quede sin agua cuando la lectura de vibraciones debería ser inferior a 2 mm/s (RMS).

La frecuencia de vibraciones de bombas con cuerpos de voluta es igual a la velocidad de rotaciones por el número de álabes del impulsor. Si la bomba o la tubería está sujeta de manera que la frecuencia natural de estos elementos está cerca de la frecuencia de resonancias de la bomba, la resonancia del sistema aumentará las vibraciones. Para una bomba con control de frecuencia el sistema puede vibrar más a alguna frecuencia debido a resonancias.

La pulsación de presión causada por la bomba avanza en la tubería de impulsión con el caudal del líquido durante varios metros, ocasionando vibraciones en la pared de la tubería. Los niveles normales de vibraciones en tuberías están por debajo de 10 mm/s (RMS). Si son mayores pueden dañar la tubería. El motivo puede ser un soporte inadecuado de la tubería o resonancias.

Bombas instaladas en columna tienen bajos niveles de vibraciones debido a los álabes posteriores de la voluta, que amortiguan eficazmente la pulsación de presión. No obstante, un impulsor de un solo álabe puede ocasionar pulsaciones de presión debido a las intensas fuerzas hidrodinámicas causadas.

5.6.2 Ruido de la bomba

Los siguientes factores influyen en el nivel de ruido de una estación de bombeo:

- ruido de vibraciones de la bomba
- ruido de vibraciones de la tubería causado por la pulsación de presión de la bomba u otras vibraciones
- caudal en la tubería. Codos de tubería, codos en T y válvulas originan perturbaciones en el caudal, haciendo ruido
- características acústicas de la estación de bombeo
- caudal entrante en la fosa húmeda
- cavitación de la bomba

El nivel de ruido en estaciones de bombeo, compuesto por todos los factores, anteriores no es muy útil y no puede medirse con exactitud in situ. El ruido de la tubería es normalmente decisivo, debido a la gran superficie que emite las vibraciones. Para hacer una medición correcta del nivel de ruido de la bomba, ésta debe estar colocada en un sitio protegido adecuadamente, con la tubería en el exterior. No existen normativas para niveles de ruido permitidos de bombas de aguas residuales.

Es difícil definir métodos de medición del nivel de ruido de bombas sumergibles debido a las dificultades prácticas que esto implica.

Los ruidos de una estación de bombeo no son un problema habitual. Una estación de bombeo, construida en conexión con un edificio de viviendas u oficinas, puede en algunos casos ocasionar problemas de ruido. Cuando éstos son graves, las tuberías y los motores de bombas instaladas en seco pueden revestirse con un aislante acústico.

6 Bombas de aguas residuales con control de frecuencia

6.1 General

Los motivos de utilizar control de frecuencia son en principio los siguientes:

- nivelación del caudal por motivos técnicos relacionados con los procesos
- ahorros de energía factibles debido a la curva característica favorable de la tubería de impulsión.

Se utiliza el control de frecuencia en las siguientes aplicaciones por motivos técnicos relacionados con procesos:

- aplicaciones de bombeo de lodos de retorno
- bombas recirculadoras en procesos de reducción de nitrógeno
- estaciones de bombeo de entrada a
- plantas de tratamiento

Como alternativa puede regularse el caudal entrante, incrementado el número de bombas de la última estación de bombeo. Al tener un control mejor de las bombas y mayor frecuencia de arranques puede nivelarse el rendimiento. Pueden también utilizarse un tanque de la planta de tratamiento y el diseño de canal para nivelar el caudal de la planta. En otras estaciones de bombeo sólo debe plantearse la utilización del control de frecuencia si pueden esperarse grandes ahorros de energía.

El control de frecuencia sólo ahorra energía si la tubería de impulsión es larga y la parte geodésica de la altura total es inferior al 40 %. En instalaciones con gran altura geodésica, el consumo de energía aumentará indudablemente con control de frecuencia, ya que el punto de trabajo de la bomba se moverá a una sección de su curva Q/H donde su rendimiento es menor. Se producen pérdidas en la unidad de control de frecuencia y se disminuye el rendimiento del motor de la bomba. Siempre que se considere un variador de frecuencia sólo con el fin de ahorrar energía, debe calcularse por separado el periodo de amortización de la inversión en el sistema de control. Para el cálculo deben conocerse las variaciones del caudal y el rendimiento de la bomba a diferentes frecuencias.

El rendimiento de la bomba depende también de la curva característica de la tubería de impulsión. Así mismo deben conocerse los rendimientos del variador de frecuencia y del motor de la bomba a varias frecuencias.

El control de frecuencia aumenta el riesgo de atascos de la bomba. Si se selecciona control de frecuencia deben considerarse varias condiciones y hechos a la hora de diseñar la estación de bombeo y elegir las bombas.

6.1.1 Selección del motor de bomba

La corriente de alimentación modulada por variadores de frecuencia no es del todo sinusoidal, lo que reduce ligeramente el rendimiento del motor. No obstante, teniendo en cuenta el punto de trabajo y las condiciones de funcionamiento, normalmente puede utilizarse el motor estándar de la bomba, siempre que no se supere la frecuencia nominal de suministro (50 ó 60 Hz). El fabricante de bombas debe confirmar la elección de motor, ya que dispone de información completa respecto a la potencia y características para soportar subidas de temperatura.

6.1.2 Frecuencia máxima

En instalaciones donde una bomba con control de frecuencia y una o más bombas sin control funcionan en paralelo, el control del rendimiento será irregular en el punto donde una bomba de velocidad fija se añada o se retire del funcionamiento, a no ser que se deja funcionar con control de frecuencia a una frecuencia mayor que la nominal en dicho punto. La sobrefrecuencia necesaria es típicamente de 53 Hz para bombas de 50 Hz. La figura 96 muestra la situación.

Si todas las bombas de una instalación en paralelo tienen control de frecuencia, no se producirá una situación con control irregular, por lo que una regulación por encima de la frecuencia nominal no será necesaria.

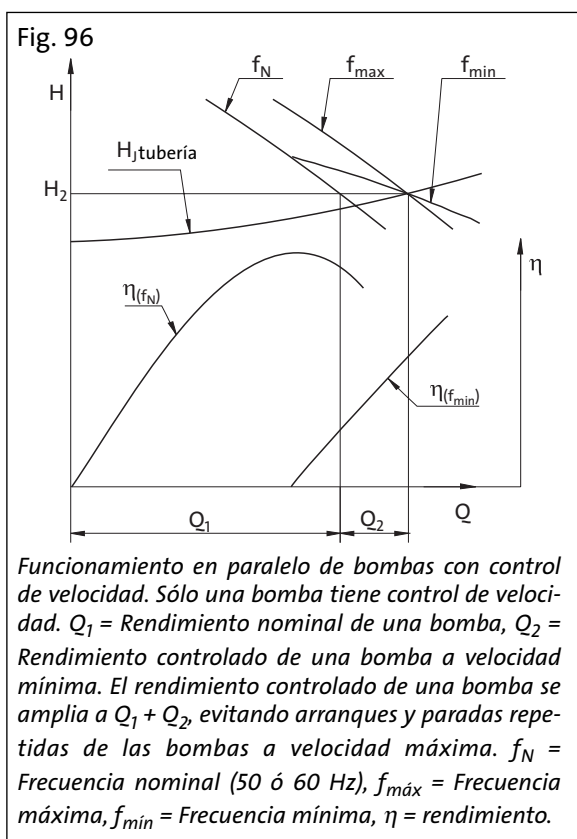
Si se necesita una regulación por encima de la nominal, esto debe indicarse en todas las peticiones, para que el fabricante pueda tenerlo en cuenta en el proceso de selección de bomba y motor. La utilización de una bomba estándar de 60 Hz para una instalación de 50 Hz con control de frecuencia es en algunos casos ventajosa, pero esta situación debe sopesarse contra los siguientes inconvenientes:

- Si el variador de frecuencia está averiado y la bomba sólo puede funcionar a 50Hz nominal, el rendimiento de una bomba de 60Hz baja hasta el 50-80 % del de una bomba de 50 Hz, dependiendo de las características de la tubería de impulsión y las pérdidas por fricción.
- El motor tiene probablemente bobinados especiales, debido a las diferencias de tensión de bombas estándar de 60 Hz comparadas con bombas estándar de 50 Hz, lo que dificultará el servicio de recambios en el futuro.
- El rendimiento de la bomba puede ser inferior, ya que algunas bombas de 60 Hz han sido transformadas de 50 Hz, reduciendo el diámetro del impulsor.

recomienda calcular la frecuencia mínima del caudal mínimo necesario con ayuda de la curva Q/H de la bomba y las características de la tubería de impulsión.

El bombeo de aguas fecales a un caudal demasiado bajo (frecuencia demasiado baja) puede ocasionar un desgaste excesivo de la bomba debido a arena u otras materias abrasivas que permanecen en la bomba en vez de salir con el líquido bombeado. Un caudal demasiado pequeño puede también atascar la bomba. Si la parte geodésica de la altura de la bomba es grande (más del 40 %), el punto de trabajo se moverá a la izquierda de la curva Q/H de la bomba, donde su rendimiento es inferior y los costes de energía pueden subir. Como regla general, el funcionamiento mínimo puede limitarse al 25 % del caudal al mejor rendimiento a frecuencia nominal ($Q_{\text{ópt.}}$).

Si la curva característica de la tubería de impulsión sube pronunciadamente y posiblemente varias bombas funcionan simultáneamente, puede ser necesario definir varios niveles de caudal mínimos de bomba, dependiendo del número de bombas en uso al mismo tiempo. Las bombas deben entonces controlarse por medio de un autómata programable adecuado. Una frecuencia mínima determinada para el número máximo de bombas que funcionan simultáneamente, y después utilizada en todas las situaciones, dando un funcionamiento mínimo variable, dependiendo de las bombas en uso.



6.1.3 Frecuencia y funcionamiento mínimos

A menudo se pregunta por la frecuencia mínima permitida de una bomba específica. Una respuesta completa a esta pregunta requiere información respecto a la instalación y tubería de impulsión, ya que el desplazamiento del punto de trabajo al reducirse la frecuencia del funcionamiento depende de la forma de la curva Q/H de la bomba y las características de la tubería de impulsión. Se

6.1.4 Curvas de frecuencias de la bomba

Las curvas Q/H de la bomba para diferentes frecuencias son necesarias para determinar su funcionamiento a varias velocidades contra una determinada curva característica de la tubería de impulsión. Debe determinarse la frecuencia mínima, así como el rendimiento de la bomba a varias frecuencias. Se trazan fácilmente las curvas de la bomba para diferentes frecuencias, en base a cálculos de reglas de afinidad, pero las posibles limitaciones de utilización de las curvas sólo puede determinarlas el fabricante de bombas. Se recomienda pedir curvas de frecuencias al fabricante, con Q, H y η para diferentes frecuencias a intervalos de por ejemplo 5 Hz.

Las curvas de frecuencias pueden calcularse en base a las reglas de afinidad, utilizando las siguientes ecuaciones

$$Q' = Q \left(\frac{f}{f}\right) \quad (40)$$

$$H' = H \left(\frac{f}{f}\right)^2 \quad (41)$$

$$P' = P \left(\frac{f}{f}\right)^3 \quad (42)$$

$$\eta' = \eta \quad (43)$$

$$NPSH_R' = NPSH_R \left(\frac{f}{f}\right)^2 \quad (44)$$

Las ecuaciones anteriores son válidas al mismo tiempo para cambiar un punto de trabajo Q/H determinado y tienen una exactitud aceptable para planteamientos prácticos.

6.1.5 Atascos de las bombas

Durante el funcionamiento con control de frecuencia, el riesgo de atascos de las bombas aumenta debido a los siguientes motivos:

- El nivel del líquido de la estación de bombeo permanece inalterado debido al control exacto del bombeo, lo que ocasiona acumulación de residuos en la superficie y/o fondo de la fosa. Pueden ser mayores que el paso libre de la bomba, bloqueando el impulsor durante el vaciado.
- Las bombas funcionan de forma continua durante periodos demasiado largos, por lo que al pararse, impiden que el refluo limpie los residuos acumulados en las mismas.
- Las bombas paran lentamente al estar controladas por el control de frecuencia, impidiendo que el refluo limpie los residuos acumulados en las mismas. El arranque suave impide también el proceso de limpieza.
- Una velocidad baja, junto con las curvas de la tubería de impulsión y pérdidas, pueden ocasionar configuraciones complicadas del caudal interno de la bomba, aumentando la susceptibilidad a los atascos.

Las instalaciones con control de frecuencia son diferentes entre si y es imposible hacer un pro-

nóstico exhaustivo del comportamiento de la bomba. El riesgo de atascos puede reducirse tomando las siguientes medidas:

- Después de la puesta en marcha de la bomba se controla la frecuencia de manera que el nivel de la fosa de aspiración baja progresivamente y alcanza el nivel de parada de la bomba en una hora en condiciones normales, parando la bomba a continuación.
- Como se indica arriba, y además se programa la bomba para que funcione a velocidad nominal durante 30 segundos antes de parar en el nivel de parada. Esto aumenta el caudal en la fosa de la bomba y la tubería de impulsión, eliminando posibles acumulaciones de residuos.
- Se programa la bomba para 1 – 2 secuencias de baldeo a la hora, aumentando su velocidad hasta la nominal durante 20 segundos durante cada secuencia. Después se para la bomba sin control de frecuencia o se baja la frecuencia a la mínima lo más rápido posible, permaneciendo así durante aproximadamente 20 segundos. Pasado este tiempo se reanuda el funcionamiento normal de la bomba.
- La bomba se programa para funcionar en sentido contrario durante algún tiempo antes de cada arranque. Esto eliminará cualquier principio de atasco que queda en la bomba desde el intervalo del funcionamiento anterior. Cuando la bomba marcha al revés, la frecuencia debe ser inferior que la nominal para evitar vibraciones, es decir 30 Hz para una bomba de 50 Hz.
- Utilizando una válvula automática en vez de una válvula de retención y programarla para que siga abierta durante algún tiempo a ciertos intervalos después de la parada de la bomba, permitiendo que el refluo limpie la bomba.

Cuando la bomba se para de repente, el agua en la tubería de impulsión sigue fluyendo, limpiando a fondo el impulsor que gira libremente y los posibles principios de atascos.

Las medidas anteriores pueden ajustarse en la fase de planificación de la estación de bombeo, pero sólo emplearse en caso necesario.

La utilización del control de frecuencia para lodos de retorno y bombas recirculadoras no aumenta el riesgo de atascos. Esto es también válido para la estación de bombeo de entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales, si el filtrado de las aguas fecales se realiza antes de estas bombas.

6.1.6 Requisito de cable EMC

Según la Directiva del Consejo de la CE respecto a la compatibilidad electromagnética (EMC), los fabricantes de variadores de frecuencia pueden exigir que los cables de motor de la bomba se sustituyan por cables EMC compatibles y homologados. El requisito de cables EMC para bombas sumergibles puede complicar la fabricación y aumentar los costes. Los cables EMC complican también el manejo de la bomba, ya que son menos flexibles que cables eléctricos normales. Para bombas sumergibles, la elección de variador de frecuencia puede estar supeditada al requisito o nó de cables EMC. La utilización de cables EMC puede evitarse mediante filtros supresores de emisiones en el variador de frecuencia.

6.1.7 Corrientes en los cojinetes

El control de frecuencia ocasiona en algunos casos corrientes perturbadoras a través de los cojinetes de motores grandes de jaula de ardilla, refrigerados por aire, dañando los cojinetes. Los motores sumergibles son probablemente menos susceptibles a estas corrientes, ya que tienen buena conexión a tierra mediante la tubería y la inmersión en el agua, por lo que están protegidos. Esta hipótesis está corroborada por la experiencia de GRUNDFOS, que demuestra que, hasta la fecha, los cojinetes de los motores sumergibles no han sufrido daños. El añadir aislante a los cojinetes implicaría tener que hacer grandes cambios del diseño de los motores e incrementaría los costes.

6.1.8 Alta tensión

Para tensiones de alimentación de más de 500 V, el control de frecuencia puede ocasionar oscilaciones de tensión demasiado altas para motores estándar. En estos casos puede ser necesario cambiar el diseño de los motores con aislamiento especial de los bobinados y cojinetes aislados. Por lo tanto, se desaconsejan tensiones por encima de 500 V en combinación con control de frecuencia.

6.1.9 Motores antideflagrantes

Los motores pueden funcionar a temperaturas más elevadas de lo normal cuando tienen control de frecuencia. Por lo tanto, una certificación antideflagrante de un motor a frecuencia nominal puede quedar nula para funcionamiento con control de frecuencia. La certificación antideflagrante de un cable de bomba probablemente no será válida para un cable EMC.

Si se pretende utilizar un motor antideflagrante para control de frecuencia, esto debe indicarse explícitamente en la petición de oferta, para que el fabricante pueda evaluar correctamente si la bomba y el motor son adecuados. Si va a añadirse control de frecuencia a una instalación existente también hay que pedirle autorización al fabricante.

6.1.10 Valores garantizados

El requisito principal del funcionamiento de una bomba es que su volumen de caudal corresponda a la demanda específica y que los costes de energía de la bomba estén bajo control.

Para conseguir el rendimiento total, el punto de trabajo garantizado debe ser según funcionamiento en paralelo de las bombas. Si la curva característica de la tubería de impulsión es plana (H_{geod} alta), o si cada bomba tiene su propia tubería de impulsión, el mismo punto de trabajo es también adecuado para evaluar la garantía del rendimiento de la bomba. Al otro lado, si la curva característica de la tubería de impulsión es abrupta o si la altura geodésica oscila, resulta difícil determinar un punto de garantía racional del rendimiento de la bomba. El punto de trabajo de garantía de η puede ser diferente de aquél del volumen de caudal y altura. Se recomienda decidir aparte el punto de trabajo que se utilizará para evaluar el rendimiento de la bomba. Este punto podría ser el punto del rendimiento máx. o el punto de la intersección de la curva Q/H de la bomba a frecuencia nominal y la curva característica de la tubería de impulsión. Como punto de garantía puede también elegirse un punto de trabajo a una frecuencia distinta a la nominal. Hay que tener en cuenta que, según las normativas de pruebas, la velocidad de prueba de la bomba puede diferir en $\pm 20\%$ de la velocidad de trabajo especificada de la instalación de bombeo y que los resultados de los bancos de pruebas se convierten mediante ecuaciones de la ley de afinidad en información del punto de trabajo.

6.1.11 Pruebas con variador de frecuencia (pruebas simultáneas)

Si va a comprobarse el rendimiento total de la combinación de bomba y variador de frecuencia, el fabricante de bombas está en una situación difícil. Se necesita información exacta del rendimiento del variador de frecuencia y del rendimiento del motor a intensidad modulada, cuando

la alternancia de tensión es diferente que la onda sinusoidal no modulada. Estos datos son específicos para cada dispositivo y es casi imposible conseguir información exacta de antemano, por lo que hay que reclamarlos. La normativa de pruebas tampoco especifica valores de tolerancias para rendimientos totales medidos en estas circunstancias. El fabricante de bombas debe también disponer del variador de frecuencia de antemano para pruebas, lo que complica más las cosas y añade costes. Las pruebas simultáneas tienen poco valor en la práctica.

6.1.12 Colaboración con el fabricante de bombas

El diseño y la ejecución de una instalación con control de frecuencia de las bombas son mucho más complejos que las instalaciones sencillas de bombas de velocidad constante. Por lo tanto, una colaboración estrecha entre el fabricante de bombas y el cliente es importante ya en la fase de planificación. También deben acordarse de antemano los puntos de trabajo garantizados y la utilización de normativas de pruebas al negociar el contrato, siempre que sea posible.

7 Evaluación del coste del ciclo vital de la bomba

El proceso de selección de bomba debe incluir una evaluación del coste vital de la misma, con una estimación de todos los costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento de la estación de bombeo durante toda la duración prevista. La importancia de las evaluaciones del coste del ciclo vital y de los cálculos comparativos aumenta al incrementarse el tamaño de la estación de bombeo. Por ejemplo, los costes de energía para el funcionamiento de bombas de tamaño medio de aguas residuales (30 kW) durante tres años equivalen a los costes de adquisición iniciales de las bombas.

7.1 General

Se necesitan los costes del ciclo vital de la instalación de bombeo para calcular la viabilidad financiera y de la inversión en el proyecto. Por ejemplo, en un proyecto de reforma de una estación de bombeo, donde se cambian bombas viejas con nuevas, el criterio principal de evaluación de la inversión es la evaluación del coste del ciclo vital. Unos cálculos correctos a largo plazo deben incluir los cambios previstos del coste energético, las tasas de devaluación e intereses, además de los costes del ciclo vital de la bomba. Estos cálculos exigen experiencia financiera y en dirección de proyectos, además de unos conocimientos sólidos de bombas.

Se utilizan habitualmente los cálculos del coste del ciclo vital para comparar las bombas durante la adquisición. Las alternativas a considerar o son distintas marcas, o distintos modelos del mismo fabricante. En estas comparaciones los componentes financieros tienen normalmente la misma importancia proporcional para las distintas alternativas. Los cambios futuros de los costes de energía y de la mano de obra de mantenimiento son difíciles de predecir, por lo que resulta lógico simplificar los cálculos comparativos para que consten de cálculos de los costes del ciclo vital al nivel actual de los costes, sin análisis financiero. De esta manera el análisis puede basarse en dos planteamientos:

- Se calculan los costes del ciclo vital de las distintas alternativas al nivel actual de los costes y se comparan.
- Se hace una comparación basada en la alterna-

tiva más económica, calculando los periodos de amortización de aquellas alternativas que tengan menores costes de funcionamiento y mantenimiento.

Hay que tener en cuenta que estos métodos tienen unos márgenes de error bastante grandes respecto a los costes de energía y mantenimiento que están basados en previsiones, tales como estimaciones del volumen bombeado y del desgaste.

La decisión puede también estar basada en cuestiones de principios o comerciales. Aspectos medioambientales pueden dar énfasis a la utilización y costes de energía. Si las bombas forman parte de un contrato general y las compra un contratista, el precio de adquisición puede ser decisivo.

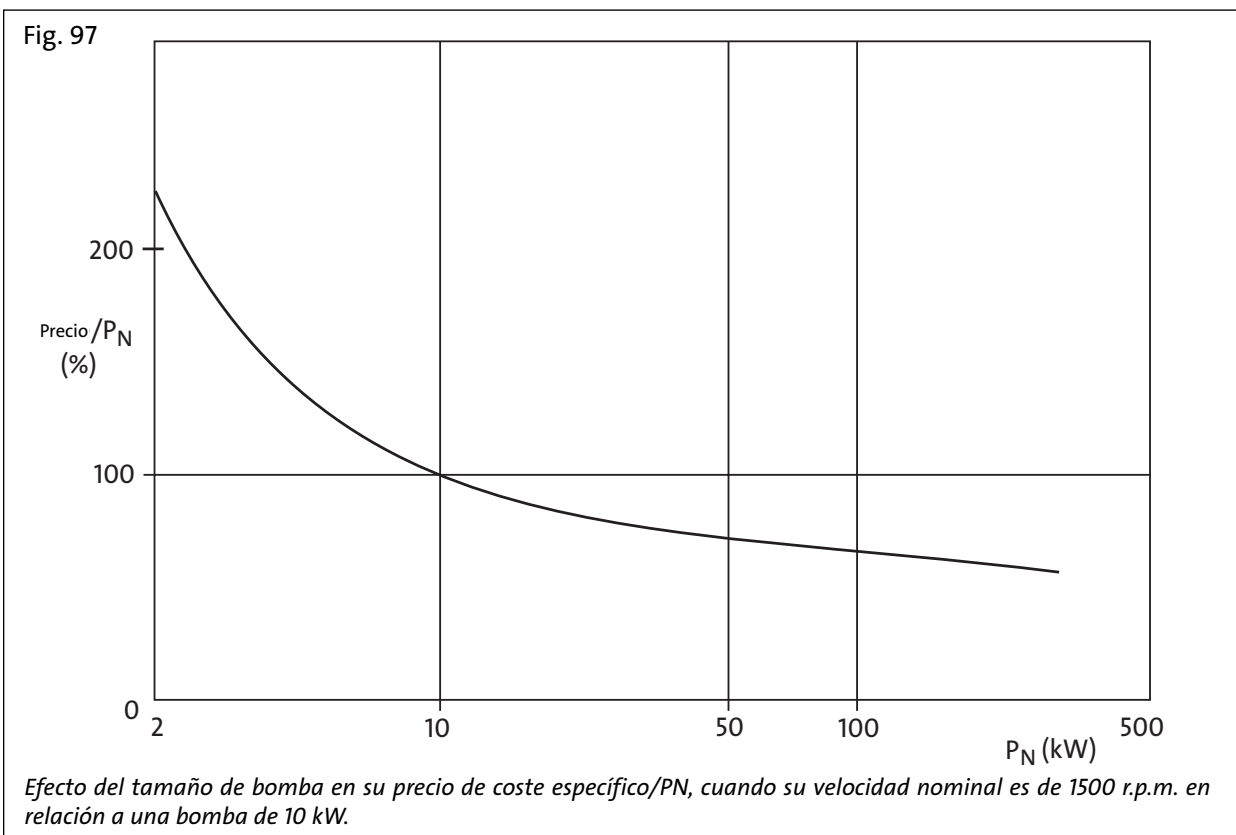
7.2 Periodo de cálculo

La vida útil de bombas modernas de aguas residuales es de unos 25 años. Puede ser necesario reformar una estación de bombeo mucho antes, por ejemplo si cambios del desarrollo urbanístico implican mayores necesidades de bombeo, o medidas urbanísticas requieren su eliminación o reubicación. La bomba puede también pronto quedar obsoleta por falta de repuestos. El periodo adecuado para unos cálculos económicos del ciclo vital es por lo tanto de 8 – 10 años a partir de la puesta en marcha.

7.3 Costes de inversión

Los fabricantes facilitan los precios de compra de las bombas, en base a consultas o negociaciones. El precio final puede también incluir otros costes comerciales y de adquisición, tal como el transporte. También deben tenerse en cuenta los efectos de especificaciones diferentes de las bombas en otros costes de adquisición. Por ejemplo, un motor más potente requiere un variador de frecuencia o un fusible de red de más capacidad, lo que añaden costes de inversión.

La figura 97 muestra el efecto proporcional del tamaño de bomba en el coste de bombas con una velocidad nominal de 1500 r.p.m. Una bomba con una velocidad nominal menor será normalmente más cara que una bomba de la misma capacidad que funcione a más velocidad, debido al mayor



tamaño. La figura muestra que para bombas pequeñas de menos de 10 kW, el precio de compra será decisivo para los costes del ciclo vital.

7.4 Costes de energía

La necesidad de energía se calcula correctamente utilizando el rendimiento (η_{gr}), ya que el rendimiento está sujeto a la garantía del fabricante según las normativas de pruebas, lo que no es el caso respecto a la información de potencia. Es importante que la normativa de pruebas que se utilizará esté acordada en esta fase, ya que diferentes normativas de pruebas tienen diferentes tolerancias para el rendimiento de la bomba, lo que puede influir en los valores de rendimiento informados por el fabricante. Para más información, ver la sección 4, Pruebas de bombas.

7.4.1 Rendimiento a lo largo del tiempo

A excepción de las bombas vortex, el rendimiento de bombeo de las bombas de aguas residuales empeora con el tiempo, debido a que la holgura entre el impulsor y la tapa de aspiración se ensancha por el desgaste. Este cambio debe tenerse en cuenta al calcular la utilización de energía. Los

siguientes factores de reducción del rendimiento, basados en pruebas y experiencias, pueden utilizarse al realizar los cálculos:

- Impulsor cerrado con holgura ajustable de la aspiración: -1,5% (η_{gr} puntos)
- Impulsor semiabierto con holgura ajustable del impulsor: -3,0% (η_{gr} puntos)
- Impulsor cerrado sin holgura ajustable: -3,0% (η_{gr} puntos)
- Impulsor semiabierto sin holgura ajustable del impulsor: -5,0% (η_{gr} puntos)

Los factores anteriores de reducción del rendimiento indican que en la práctica las aguas residuales se bombean con bombas de rendimiento notablemente inferior que bombas nuevas. Los valores altos para bombas sin posibilidad de ajuste de la holgura están basados en el hecho de que estas bombas funcionan durante más tiempo entre recuperaciones de la holgura, ya que hay que cambiar piezas en un taller. El efecto es mayor en bombas con impulsores semiabiertos, ya que estas se desgastan más rápidamente y el rendimiento es más sensible a cambios del espacio (ver la sección 2.2.1 Impulsores).

7.4.2 Cálculos de utilización de energía

Los cálculos pueden realizarse utilizando dos métodos distintos:

- Estimación, utilizando el volumen del agua bombeado al año, calculando primero la energía específica mediante la siguiente ecuación:

$$E_{sp} = \frac{g \cdot H}{\eta_{gr} \cdot 3600} [\text{kWh}/\text{m}^3] \quad (45)$$

donde

H = altura de la bomba en el punto de trabajo (m),

$g = 9,81 [\text{m}/\text{s}^2]$,

η_{gr} = rendimiento total (bomba + motor) en el punto de trabajo (valor decimal),

Se supone una densidad del líquido de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Se calcula el consumo de energía utilizando la energía específica y el volumen bombeado estimado al año.

- Estimación basada en horas de funcionamiento, calculando primero la potencia al rendimiento garantizado, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{gr} = \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_{gr} \cdot 1000} [\text{kW}] \quad (46)$$

donde

Q = volumen del caudal de la bomba en el punto de trabajo [l/s]

H = altura de la bomba en el punto de trabajo (m),

$g = 9,81 [\text{m}/\text{s}^2]$,

η_{gr} = rendimiento total (bomba + motor) en el punto de trabajo [valor decimal],

Se supone una densidad del líquido de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Se calcula el consumo de energía utilizando la potencia obtenida y las horas de funcionamiento al año estimadas. Si la curva Q/H de la bomba pasa por encima del punto de trabajo

deseado, el rendimiento de la bomba será superior y por consiguiente menos horas de funcionamiento. Esto debe tenerse en cuenta al utilizar el método basado en las horas de funcionamiento de la bomba.

Los métodos de cálculo de energía son bastante sencillos cuando la bomba funciona en un solo punto de trabajo. La situación se complica con bombas que funcionan en paralelo y si la bomba se utiliza con variador de frecuencia. Para funcionamiento en paralelo los cálculos deben realizarse por separado para los distintos puntos de trabajo y después aproximando los volúmenes bombeados u horas de funcionamiento acumulados en cada uno de ellos.

Una bomba con variador de frecuencia tiene un número infinito de puntos de trabajo. Para realizar los cálculos en estos casos debe seleccionarse un punto de trabajo que represente el punto de trabajo medio. Otro factor de incertidumbre al calcular el consumo de energía de bombas con control de frecuencia es la dificultad de determinar exactamente el rendimiento total del sistema. Para cálculos comparativos puede utilizarse el rendimiento de la bomba sin variador de frecuencia.

7.5 Costes de mantenimiento

Se recomienda normalmente realizar un mantenimiento rutinario anual de las bombas sumergibles. El mantenimiento incluye control del aceite del cierre, control del aislamiento del motor con medidor de resistencia, control y, si es necesario, ajuste de la holgura de la aspiración, así como inspección general de la parte exterior. La mayoría de los fabricantes recomienda rutinas muy similares. Las diferencias entre bombas de diferentes fabricantes son más obvias en las posibilidades de mantener y recuperar su rendimiento.

Si la bomba lleva un mecanismo ajustable de la holgura de la aspiración, los costes de mantener el rendimiento de la bomba no aumentan los costes, ya que el ajuste puede hacerse durante el mantenimiento rutinario normal in situ. Si de lo contrario hay que utilizar repuestos o llevar la bomba a un taller para mantener su rendimiento, los gastos ocasionados deberán tenerse en cuenta al calcular los costes del ciclo vital de la bomba.

7.6 Cooperación con proveedores de bombas

Los cálculos del coste del ciclo vital y las comparaciones son raras veces completamente inequívocos, por lo que es razonable y justo realizarlos abiertamente y en cooperación con los proveedores, por lo menos al considerar una bomba de aquél proveedor. Así pueden evitarse posibles malentendidos y las sugerencias y alternativas propuestas por el proveedor pueden tenerse en cuenta para hacer la selección óptima.

7.7 Publicación del coste del ciclo vital

Las asociaciones de fabricantes de bombas Europump (Europa) e Hydraulic Institute (Instituto Hidráulico) (EEUU) han publicado conjuntamente una guía para evaluar el coste del ciclo vital de una bomba (LCC):

PUMP LIFE CYCLE COSTS
A GUIDE TO LCC ANÁLISIS
(ISBN 1-880952-58-0)

Esta publicación trata sobre el sistema de bombeo completo desde la fase de diseño, sistemas de bombeo existentes y ejemplos de mejoras implementadas.

8 Puesta en marcha

Durante la puesta en marcha de la bomba deben inspeccionarse los siguientes puntos:

- Comprobar el (los) punto(s) de trabajo midiendo la presión y posiblemente el caudal, utilizando el método volumétrico para compararles con los valores proyectados y confirmar que el punto de trabajo real esté dentro de los límites permitidos de la curva Q/H de la bomba. Puede llevar algún tiempo estabilizar la situación real en tuberías de impulsión largas con varios puntos altos y bajos hasta el punto de descarga. Por lo tanto las mediciones deben repetirse algún tiempo después de la puesta en marcha para confirmar el punto de trabajo.
- Comprobar si la bomba vibra o hace ruido al funcionar. Comprobar si hay señales de cavitación.
- Comparar los niveles de arranque y parada con los valores proyectados y ajustarlos, si es necesario. El nivel de parada más bajo posible de bombas instaladas en seco debe encontrarse mediante pruebas, observando la aspiración de aire en la tubería de entrada.

Para bombas sumergibles en combinación con grandes volúmenes de caudal, comprobar los remolinos en la superficie a nivel bajo. Ajustar el nivel de parada donde sea necesario.

9 Funcionamiento y servicio

Las bombas sumergibles de aguas residuales deben someterse a inspección y mantenimiento rutinarios cada año. El mantenimiento previsto debe realizarse in situ e incluye

- Comprobación del aceite y cambio en caso necesario.
- Inspección y ajuste de la holgura de la aspiración (impulsor/voluta), si la holgura se ha ensanchado hasta 2 mm o más por el desgaste. Para bombas sin posibilidad de ajuste, la recuperación del espacio de la aspiración y el funcionamiento de la bomba requiere la instalación de nuevas piezas.
- Medición de la resistencia del aislamiento del motor en el panel de control.
- Comprobación de la cadena de elevación, así como cáncamos y asas.
- Inspección general de la bomba y control del funcionamiento.

El manual de la bomba contiene información completa respecto al mantenimiento.

El propietario o una compañía de servicios contratada puede realizar el mantenimiento rutinario. El cambio de impulsor debe poder realizarse in situ durante el mantenimiento, si fuera necesario. El cambio de cierre y otros trabajos en la protección hermética del motor deben siempre encargarse a un taller oficial.

La disponibilidad de repuestos no es problema para bombas sumergibles de un fabricante reconocido. Las series de fabricación de bombas son largas y se tienen piezas en stock, tanto para el montaje de bombas nuevas como para repuestos. Normalmente no es necesario mantener un stock de repuestos.

9.1 Seguridad

Los factores de riesgo más importantes asociados con el funcionamiento de bombas de aguas residuales están relacionados con lo siguiente:

- electricidad
- elevación y manejo de bombas
- temperaturas calientes de las superficies de bombas instaladas en seco
- manejo de piezas de bomba durante el mantenimiento y reparaciones
- incidentes de fuego y explosiones en entornos peligrosos
- riesgos de salud por el contacto humano con las aguas residuales.

Las siguientes normativas internacionales tratan de cuestiones de bombas y seguridad de bombeo:

- EN 809 (1998)
Bombas y equipos de bombas para líquidos – requerimientos de seguridad generales
- prEN 13386 (1999)
Bombas para líquidos – bombas sumergibles y equipos de bombas – requerimientos de seguridad especiales (propuesta 2002)

10 Control y comprobación del estado de estaciones de bombeo

Todas las estaciones de bombeo de aguas residuales, tanto si funcionan individualmente como si forman parte de una red de alcantarillado con varias estaciones de bombeo, deben controlarse de forma fiable para que ofrezcan un funcionamiento seguro y eficiente. La tecnología moderna de control electrónico ofrece posibilidades de diseñar y construir sistemas versátiles de control y comprobación del estado con el fin de reducir los costes de funcionamiento a largo plazo e incrementar la fiabilidad de funcionamiento.

Estaciones de bombeo de aguas residuales inseguras suponen un riesgo, tanto ecológico como económico, en forma de derrames de aguas residuales en los alrededores o sótanos de los edificios. Por lo tanto, la seguridad es primordial en el diseño de una unidad de control para una estación de bombeo de aguas residuales.

Este capítulo describe los sensores, que son la base para un control seguro de la estación de bombeo, diferentes métodos de control con enfoque en la última tecnología de control y un sistema de control y comprobación a distancia a nivel de redes y sus posibilidades futuras, combinando Internet y tecnología WAP.

10.1 Métodos de control local

El control local es siempre necesario in situ en la estación de bombeo para controlar el funcionamiento de las bombas. La unidad de control local puede construirse a diferentes niveles técnicos según las características de control necesarias, así como los costes.

10.1.1 Unidades de control manual

El control manual es el método de control más sencillo. Es simplemente un interruptor (normalmente manual-off-auto) con los relés y disyuntores necesarios para el arranque y parada de las bombas. Normalmente nunca se utiliza el control manual como control principal de las bombas, sino como método de control de reserva, cuando los controles normales están defectuosos y para

comprobar el funcionamiento de la bomba durante reparaciones y trabajos de mantenimiento de la misma. Debe siempre existir la posibilidad de control manual.

10.1.2 Unidades de control basadas en relés

Si no es necesario comprobar el estado de la bomba, pueden utilizarse unidades de control automáticas basadas en relés para realizar controles locales. Los controles basados en relés son unidades sencillas con niveles de arranque y parada fijos o ajustables. Pueden incluir alternancia de bombas múltiples, o esto puede realizarse con unidades adicionales de alternancia de bombas.

Si se utiliza medición continua del nivel, estos controles pueden tener niveles de arranque y parada de ajuste libre y pantalla de nivel local. No obstante, en la mayoría de los casos los controles basados en relés utilizan interruptores de nivel preajustados o de ajuste manual, tales como flotadores.

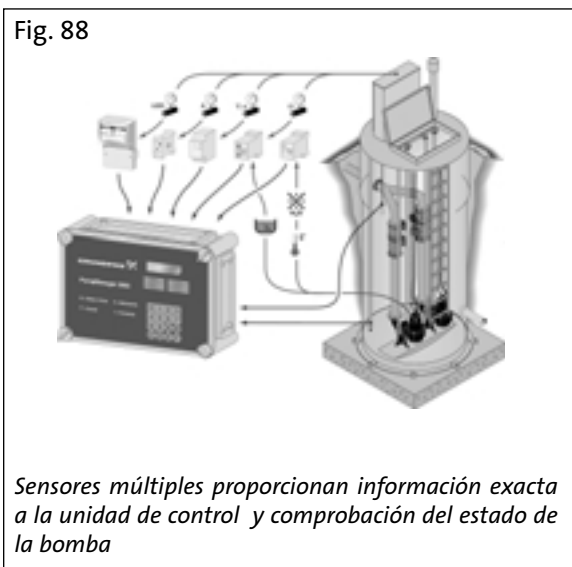
Las unidades de control basadas en relés son fáciles de utilizar, así como seguras gracias a la sencillez del diseño. Son adecuadas para estaciones de bombeo pequeñas o secundarias, donde se necesita poca o ninguna flexibilidad de funcionamiento.

10.1.3 Controladores lógicos programables

Unidades de control de bombas basadas en controladores lógicos programables (PLCs) ofrecen grandes posibilidades de regulación de las condiciones de la bomba, registro de datos y análisis, así como control flexible de la bomba. El diseño de una buena unidad de control basada en PLCs es laborioso y requiere siempre conocimientos profundos del funcionamiento y necesidades de una estación de bombeo de aguas residuales, además de experiencia de programación. La selección de señales de control y medición, el análisis de la bomba y estación de bombeo, así como la elección de sensores para medición del nivel son algunos factores que deben considerarse.

10.2 Sensores para control y comprobación del estado de la bomba

El control de bomba, que puede ser sencillo basado en relé o PLC versátil, requiere varios sensores para recoger información del funcionamiento de las bombas, así como de toda la estación de bombeo, ver la figura 88. Estos sensores proporcionan información del nivel de agua en la fosa húmeda, del consumo de corriente de la bomba, del estado del cierre primario de la bomba, así como del aislamiento del bobinado del motor, etc.



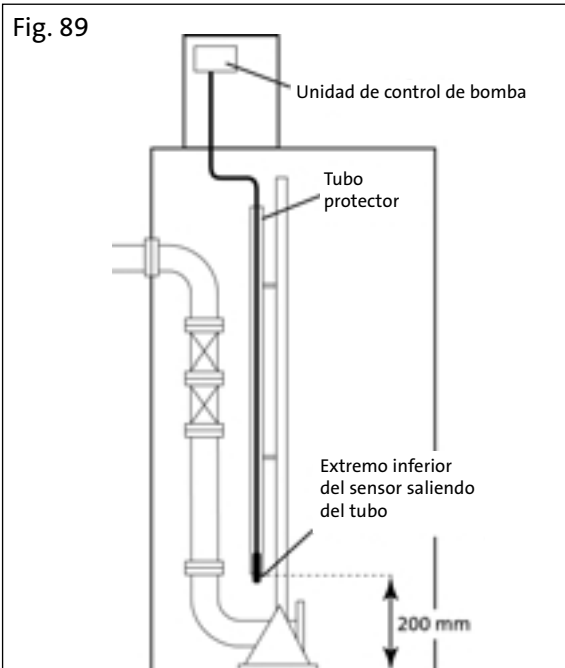
10.2.1 Sensores del nivel de agua en fosas húmedas

La información básica que necesita cualquier sistema de control automatizado de bombas es el nivel del agua en la fosa húmeda de la estación de bombeo. Hay formas múltiples de proporcionar dicha información, ya que también hay diferentes tipos de información disponibles. Dependiendo del sensor, el nivel actual del agua se indica como una señal analógica continua o información on/off, cuando el nivel del agua supera ciertas alturas, normalmente preajustadas.

La experiencia muestra que los **sensores de presión** ofrecen la forma más segura y económica de medir de forma continua el nivel del agua en aplicaciones de aguas fecales. Especialmente un sensor presión piezorresistivo, encapsulado en acero inoxidable o integrado en una construcción de goma cerrada llena de líquido, es excelente para

utilización en aguas residuales. Los sensores de presión dan una señal analógica continua de la corriente (0 – 20 mA ó 4 – 20 mA) o de la tensión (0 – 45 mV) proporcional al nivel del agua.

La función de los sensores de presión es sensible a la sedimentación, pero esto puede evitarse instalando correctamente el sensor dentro de un tubo protector, ver la figura 89.



La instalación correcta del sensor de nivel es fundamental. El sensor, totalmente cerrado, se cuelga en la fosa húmeda y su elemento piezorresistivo transmite la señal de nivel a la unidad de control. Se utiliza el sensor con unidades de control electrónico de bombas y ofrece una lectura continua del nivel.

Los **dispositivos ultrasónicos** son la elección única si los sensores de nivel no pueden estar en contacto con el líquido. Los sensores ultrasónicos modernos incorporan funciones programables para varias condiciones y gamas de funcionamiento. Son también bastante caros.

Los sensores ultrasónicos son normalmente exactos y seguros. Por otra parte, en aplicaciones de aguas residuales el vapor y la espuma en la superficie del líquido pueden ocasionar indicaciones erróneas del nivel o pérdida total de resonancias, lo que puede interrumpir el control del nivel. Pueden evitarse problemas debidos a dichas situaciones, instalando dispositivos de reserva

para las funciones más vitales, tales como un flotador para alarma de nivel alto.

Algunos sensores antiguos estaban basados en **sensores capacitivos**. Este tipo de sensor se instala también en la fosa húmeda y consta de una bolsa de goma o plástico que se conecta a una tubería vertical que contiene un líquido de referencia. Se cuelga un cable en la tubería y se conecta al sensor de señal. El nivel del líquido de referencia en la tubería sube y baja según el nivel del contenido en la fosa húmeda. La capacitancia del elemento cable-tubería cambia igualmente y la señal se transforma en el sensor en una señal adecuada para la unidad de control de la bomba.

Los dispositivos capacitivos son normalmente seguros, pero están expuestos a fallos del funcionamiento causados por la acumulación de sedimentos en la cámara en el fondo de la fosa húmeda. Su instalación es también más complicada y precisa más mantenimiento que los sensores de presión.

Se han utilizado **flotadores para control** de nivel en aplicaciones de bombeo de aguas fecales durante muchos años. Proporcionan la forma más sencilla de control de nivel a niveles fijos, pero no ofrecen ninguna posibilidad de control de nivel de forma continua. En instalaciones con muchos flotadores existe siempre el riesgo de que los cables de control se enreden entre sí o con los cables de la bomba. Hoy día se utilizan flotadores, junto con una unidad de control basada en relés, principalmente en instalaciones pequeñas.

Por otra parte, debido a su sencillez y seguridad, los flotadores se utilizan, incluso hoy día, muchas veces como sistema de control de nivel de reserva o emergencia también en unidades grandes, lo que proporciona un funcionamiento de emergencia, si el equipo principal de medición del nivel falla.

Una **campana de nivel** es otro dispositivo sencillo de detección de nivel. Consta de un cono plástico o metálico colocado al revés, con un tubo de aire entre el extremo superior del cono y el controlador. Cuando el nivel del agua llega al cono, el aire dentro del cono y del tubo se comprime, ocasionando presión contra un interruptor en el controlador. Cuando la presión sube, el interruptor hace contacto y la bomba arranca. Con este tipo de dis-

positivo la bomba se para normalmente después de un retardo preajustado.

10.2.2 Sensor de corriente

Se comprueba la corriente de entrada de la bomba mediante un transformador de corriente, a través del cual pasa uno de los tres cables de fase de red. Cada bomba requiere un transformador de corriente para que la seguridad de la comprobación sea adecuada. Los transformadores de corriente proporcionan una señal analógica (0 – 20 mA ó 4 – 20 mA) proporcional a la corriente de entrada de la bomba.

10.2.3 Medidor de kWh

Las estaciones de bombeo que tienen un controlador electrónico moderno deben siempre llevar un medidor de kWh, con una salida de impulsos de libre potencial. El medidor proporciona un número de impulsos determinado por cada kWh utilizado por la estación de bombeo, por lo que puede comprobarse el consumo de energía.

10.2.4 Relé de fallo de fases

Las tres fases de red están conectadas al relé de fallo de fases. Este dispositivo da una señal de alarma en el caso de pérdida de potencia o fase errónea en la estación de bombeo.

10.2.5 Dispositivo de comprobación SARI 2

GRUNDFOS SARI 2 es un dispositivo de comprobación combinado de la resistencia del aislamiento del motor y del contenido de agua en el aceite del cierre. Se mide la resistencia del aislamiento del motor entre una de las fases de red y tierra, estando la bomba parada y desconectada del suministro de red. Una baja resistencia del aislamiento indica humedad dentro del motor, lo que podría quemar el motor y ocasionar costosos trabajos de reparación.

Si la bomba lleva un sensor del estado del aceite GRUNDFOS OCT 1, SARI 2 comprueba también de forma continua el contenido de agua en la cámara de aceite del cierre. A medida que el cierre del eje primario se desgasta y entra agua en la cámara de aceite, la sonda OCT 1 indica el contenido de agua en el aceite del cierre. Esta información se transmite al SARI 2 que da una alarma.

Fig. 90



Dispositivo de comprobación GRUNDFOS SARI 2. SARI 2 está montado en un rail DI en el panel de control. Se utiliza tanto para utilización como alarma independiente como para conexión con un sistema de control remoto.

10.2.6 Módulo de estado de alarma ASM 3

Todas las bombas sumergibles GRUNDFOS llevan un interruptor de humedad interno, así como interruptores de temperatura encapsulados en cada bobinado del motor. Estos dispositivos de seguridad están conectados en serie y si uno de ellos se dispara, el controlador para la bomba y da una alarma de fallo del dispositivo de seguridad. Con el módulo ASM estas dos alarmas (de humedad o sobrecalentamiento) pueden separarse para proporcionar información exacta de la alarma.

Fig. 91



Módulo de estado de alarma GRUNDFOS ASM 3.

Fig. 92



Unidad de control electrónico y comprobación de las condiciones de las bombas GRUNDFOS PumpManager. La unidad controla todas las funciones de la estación de bombeo con software en un sistema de circuitos PLC. Los parámetros de funcionamiento se ajustan mediante el teclado y la pantalla LCD de la unidad. Entrando códigos con el teclado pueden verse en la pantalla los datos de la estación de bombeo, registrados y calculados por la unidad o desde un sistema de control remoto. Con un teclado mínimo, el operario tiene mediante un explorador acceso a todos los datos importantes.

10.3 Unidades de control de bombas

Una unidad de control moderna y versátil de bombas está basada en microprocesadores y software de control. Es probablemente un PLC que incorpora un software de aplicaciones para el control y comprobación de las condiciones de las bombas. Las interfaces del usuario con la unidad para acceder a los parámetros de control necesarios, tales como niveles de arranque y parada, pueden fácilmente comprobarse y ajustarse. La unidad de control completa consta de un controlador electrónico y un equipo auxiliar, tal como sensor de nivel, transformadores de corriente y relés de tensión de fases, etc., formando un paquete integrado. La figura 92 muestra una inteligente unidad de control electrónico de bombas.

10.3.1 Características de control

El parámetro principal a medir es el nivel del agua en la fosa húmeda. Se utiliza siempre un indicador de nivel continuo en este tipo de unidad de control. Existen varios tipos de sensores, tales como un transformador de presión sellado y dispositivos ultrasónicos.

La secuencia de control de la bomba es normalmente bastante sencilla. En una aplicación normal para funcionamiento en servicio-standby, los niveles de funcionamiento preajustados son el nivel de parada, el nivel de arranque y el segundo nivel de arranque. La bomba en servicio arranca cuando el agua en la fosa húmeda llega al nivel de arranque, y para cuando el agua haya sido bombeada hasta el nivel de parada. La bomba en servicio se alterna en cada ciclo con el fin de asegurar un reparto igual de la utilización y desgaste entre las bombas. La bomba en standby arranca en el segundo nivel de arranque cuando la afluencia de caudal es mayor que la capacidad de una bomba. Si más de una bomba en standby está instalada, éstas pueden arrancarse en el mismo nivel simultáneamente o a intervalos ajustables, o en niveles diferentes.

Todas las bombas en funcionamiento paran simultáneamente cuando el nivel llega al nivel de parada o a intervalos ajustables. En algunas instalaciones con muchas bombas, todas las bombas pueden tener niveles de arranque y parada diferentes. No obstante, esto significa que los cálculos de la regulación de las condiciones de las bombas sean más complicados y menos seguros.

En algunos casos puede instalarse una bomba de drenaje separada con características diferentes para manejar grandes caudales. Esta bomba no participa en la alternancia y debe estar controlada por una unidad separada, independientemente de las demás bombas.

La medición del caudal es factible sin un caudalímetro separado. Se realiza mediante el método volumétrico, donde se miden con toda premura los cambios de nivel en una fosa húmeda de dimensiones conocidas. El software calcula tanto los caudales afluentes como los bombeados con la misma exactitud que un caudalímetro magnético. El método volumétrico es también la base para medir **la capacidad de la bomba**, que se mide de forma continua como una media de las diez últimas acciones de bombeo.

En el caso de **desbordamiento** de una estación de bombeo, debe poder estimarse exacta e inequívocamente el volumen para que el operario pueda gestionar las posibles reclamaciones de daños. Cuando se conoce la afluencia de caudal en el momento del desbordamiento y su duración, el

software estima el volumen para el informe a las autoridades.

La medición de la corriente del motor de bomba es necesaria para el control y la regulación de las condiciones. La unidad se ajusta con límites ajustables de sobrecorriente y baja corriente para proteger el motor en situaciones anómalas. Si la corriente de entrada sube por encima del límite superior de corriente, donde hay riesgo de quemado del motor debido al posible fallo o atasco de la bomba, ésta parará automáticamente. Esto ofrece, junto con relés térmicos encapsulados o protecciones de motor electrónicas en el arrancador del motor, una protección de motor muy segura. Una corriente de entrada anormalmente baja indica que la bomba no bombea de forma normal, lo que puede estar debido al desgaste del impulsor o fallo de la bomba, o retención de gas.

Las horas de funcionamiento y el número de arranques de la bomba son información necesaria para programar su mantenimiento. Son también información importante para verificar el diseño operacional de la estación de bombeo y al determinar los niveles de arranque y parada correctos durante la puesta en marcha.

Todas las características anteriores están disponibles en la unidad de control y comprobación del estado GRUNDFOS PumpManager y pueden verse en la pantalla de interfase. Esto permite un panel de control del motor sencillo sin amperímetros, contadores de horas y relés de alternancia individuales, estando todas estas características incorporadas en el PLC.

Al tener unidades de control que controlan completamente las bombas mediante software resulta fácil introducir características especiales en el programa. Por lo tanto se puede, por ejemplo, dejar que **la estación bombee por debajo del nivel de parada** para que la bomba aspire (funcionamiento en seco controlado) a intervalos determinados. La finalidad es evitar acumulación de lodos y formación de costras en la superficie de la fosa húmeda. De esta forma pueden evitarse posibles bloqueos de la bomba, ahorrando costes de mantenimiento no programado. La experiencia muestra también que es una forma eficiente de evitar problemas de malos olores.

Otra posible característica operacional ventajosa

es dejar que el nivel de arranque de la bomba oscile intencionalmente alrededor de su ajuste; la finalidad es evitar que se formen bordes de lodos en la pared de la fosa húmeda en el nivel de arranque.

La unidad de control de la bomba está también programada para indicar todos los fallos de funcionamiento de la estación, tales como alarmas de nivel alto y bajo, fallo de la potencia de la bomba y otras alarmas que están basadas en ajustes de límites de los parámetros.

10.3.2 Características de la comprobación del estado

La unidad de control de la bomba realiza una **comprobación automática** del estado de la bomba, basada en los parámetros registrados y analizados. Cuando se comprueba la velocidad en que el nivel del agua en la fosa húmeda sube y baja durante el ciclo de bombeo puede calcularse la **capacidad de bombeo** de cada bomba. La unidad compara después estos valores con los datos del funcionamiento nominal de la bomba, almacenados en la memoria, y da una alarma si el funcionamiento está fuera de los límites de tolerancia ajustados.

El beneficio de este tipo de sistema está en su capacidad de dar aviso inmediato de defectos que se están desarrollando lentamente y que al final pueden ocasionar un fallo repentino e inesperado de la bomba y el consiguiente daño al medio ambiente. Al analizar detenidamente el funcionamiento de la bomba, pueden también detectarse problemas que se están desarrollando en las tuberías de impulsión. Otra ventaja de este tipo de sistema es la comprobación del funcionamiento desde el punto de vista económico, pudiendo programarse y llevarse a cabo acciones de mantenimiento según la necesidad. Esto lleva al final a un mantenimiento preventivo e incluso predictivo, en vez de sólo la reparación de fallos.

10.3.3 Parámetros y señales

La unidad de control de la bomba necesita varios parámetros para funcionar como se requiere. Éstos se introducen en la unidad, basados en las dimensiones de la estación de bombeo actual y las unidades, tomados de los planos o medidos in situ. Para el calibrado pueden utilizarse tanto las dimensiones actuales como porcentajes de los valores de referencia. Los valores a introducir son

normalmente varios niveles de funcionamiento, tales como niveles de arranque y parada de la bomba, nivel de alarma bajo y alto, así como niveles de desbordamiento, que todos corresponden a un nivel de agua determinado en la fosa húmeda. Otros parámetros que se necesitan normalmente son las dimensiones de la fosa húmeda y los valores de régimen de la bomba para la corriente de entrada y capacidad, que están disponibles en las hojas de datos de la bomba.

Varias señales son necesarias para que el control de la bomba funcione según lo previsto. Éstas son digitales o analógicas. Las señales digitales son señales de entrada o de salida e indican una situación ON u OFF. Las señales digitales de entrada necesarias son la indicación del funcionamiento o standby de la bomba de los disyuntores, así como las señales de contacto de libre potencial del relé de voltaje de fases y medidor de energía, si lo hay. Se necesitan las señales digitales de salida para arrancar y parar las bombas.

Se utilizan señales analógicas de entrada de sensores adicionales para varias mediciones continuas. Estas señales son, por ejemplo, mediciones de la temperatura del bobinado del motor de la bomba y de los cojinetes, información del estado del aceite en la cámara de cierres de la bomba, datos de un caudalímetro o variador de frecuencia adicional, etc. Para utilizar estas señales pueden necesitarse una tarjeta complementaria y una versión especial del software.

10.3.4 Registro y análisis de datos

El control de la bomba debe tener suficiente memoria para registrar y analizar datos durante un periodo de tiempo determinado. La unidad debe registrar por lo menos las horas transcurridas, el número de arranques de las bombas e incidencias de corriente irregular del motor. Debe analizar y calcular el caudal, la capacidad de la bomba y desbordamiento mediante los datos registrados. Los datos registrados pueden recogerse y analizarse más a fondo, descargando los datos a intervalos a un ordenador portátil con software adecuado, o continuamente por un sistema de control remoto automático.

Incluso si la unidad de control de la bomba funciona como terminal de un sistema de control y comprobación a nivel de red, debe tener suficiente memoria para almacenar los datos registrados

y analizados durante varios días. Esto se debe a que los datos vitales no deben perderse ni siquiera durante posibles cortes de comunicación entre la terminal y el centro de control.

10.3.5 Interfase del usuario

Para acceder a los datos e introducir parámetros, el operario necesita tener interfase a la unidad de control de la bomba. Debe ser por lo menos una pequeña pantalla LCD y un teclado. El usuario podrá con el teclado introducir todos los parámetros necesarios y visualizar los datos registrados y calculados. La utilización de la interfase tiene que ser sencilla y lógica.

Algunas características de ayuda, tal como un explorador automático, facilita y agiliza normalmente la comprobación rutinaria de los datos. Se utilizan luces de señal LED separadas para indicar las alarmas y el estado de funcionamiento de la bomba.

10.4 Sistema de control y comprobación a distancia

Las estaciones de bombeo de aguas residuales están diseñadas para incorporar capacidad adicional en el caso de una afluencia demasiado grande

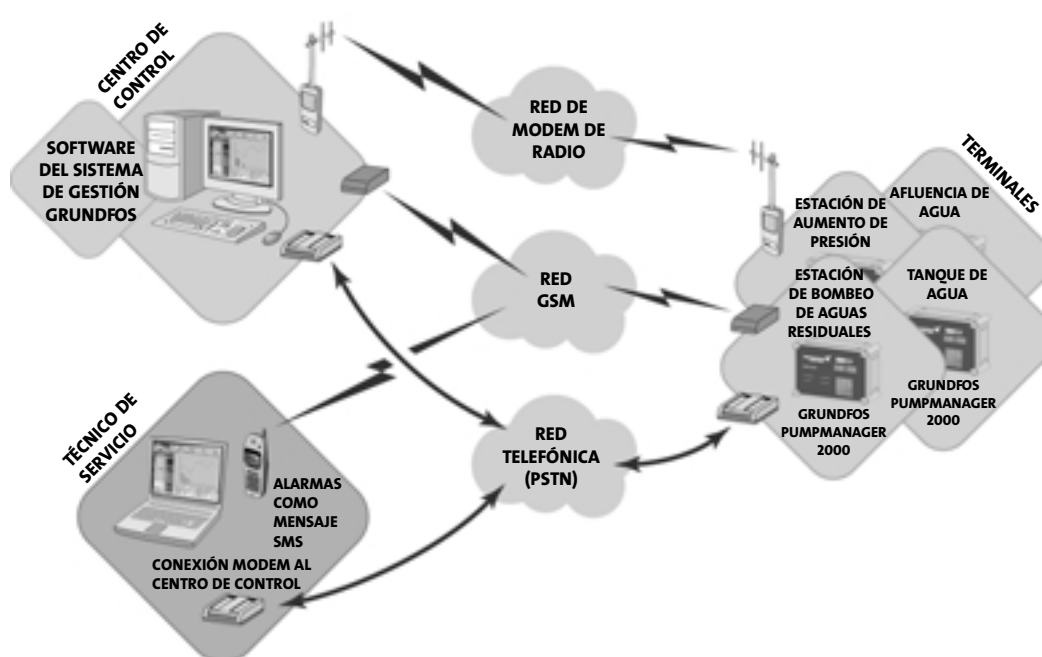
o fallo de la bomba. No obstante, este volumen de reserva no evita el desbordamiento si el fallo pasa desapercibido durante mucho tiempo. Las visitas de mantenimiento programadas no pueden solas evitar todos los imprevistos posibles en estaciones de bombeo; por eso se han desarrollado sistemas para el control y comprobación del estado a distancia, así como para la transmisión de alarmas.

Las alarmas visibles y audibles, colocadas fuera de la estación de bombeo, que se utilizaban años atrás se han transformado en sistemas de control remoto sofisticados y descentralizados. Estos sistemas constan de unidades de control basadas en PLC, que controlan y comprueban los procesos locales en las estaciones de bombeo. Estas unidades de control funcionan también como terminales telemétricos y están conectadas a distancia a un ordenador central donde un sistema de telegestión centralizado para redes se encarga de controlar la operatividad del sistema.

10.4.1 Diferentes niveles de control remoto

Las unidades de control modernas de bombas permiten que el sistema de control y comprobación del estado a distancia se diseñe según las características exigidas por el cliente, si compara-

Fig. 93



La solución GRUNDFOS para la gestión a distancia a nivel de red. Las unidades de control locales en las estaciones de bombeo se conectan al centro de control mediante un teléfono normal (PSTN), radio, modem GSM o cualquier combinación de ellos. También puede utilizarse líneas fijas (arrendadas) de comunicación, pero están quedando en desuso.

mos con los fondos de inversión disponibles. Si se prefiere una **transferencia automática de alarma** muy sencilla, el control puede equiparse de un modem GSM, mediante el cual las alarmas generadas por la unidad de control serán transmitidas al teléfono GSM del técnico de servicio como un mensaje SMS.

Este tipo de sistema ofrece una seguridad operacional muy incrementada con unos modestos costes de inversión, ya que no existe ningún centro de control. Por otra parte, la unidad de control puede utilizar todo el mensaje SMS al añadir la información más importante registrada y analizada al mensaje de alarma. Esta información puede ser las horas de funcionamiento de la bomba, el número de arranques, el consumo de energía, la afluencia a la estación de bombeo y las capacidades de las bombas. En este caso un sistema crea informes automáticos y los transmite cada semana al técnico que está de servicio, incluso cuando no se han producido alarmas, y pueden evitarse en gran medida las habituales salidas en coche a las estaciones de bombeo.

Si se implanta un sistema de **control y comprobación a distancia a nivel de red** existen varias formas de establecer la comunicación entre las terminales y el centro de control, tal como se describe en las siguientes secciones.

10.4.2 Software y hardware

El centro de control consta de un PC normal, una impresora para imprimir los informes y el software de gestión diseñado para este fin. La interfase del usuario del software debe estar controlado con ratón y tener menús para una utilización flexible y fácil. Dependiendo de la configuración del sistema, teóricamente puede controlarse y comprobarse un número ilimitado de unidades de control de bombas por una sola estación de control. El número está prácticamente limitado a unas 200 terminales a la hora necesaria de recogida de los datos de observación de las terminales durante la noche.

La estación de control central realiza el control y comprobación a distancia, pudiendo verse en cualquier momento las condiciones de las estaciones de bombeo en tiempo real. Esta característica suple en gran medida las visitas in situ de los operarios. Las bombas pueden arrancarse y pararse; pueden cambiarse los niveles y otros parámetros,

etc. El sistema recoge diariamente todas las observaciones de la estación de bombeo y guarda la información en las bases de datos, de las cuales, si así se desea, pueden comprobarse los datos de bomba y caudal de hace muchos años atrás para más análisis. El software genera también informes numéricos y gráficos de caudales, datos de bombas, alarmas y otros parámetros. La figura 93 muestra un arreglo de control remoto.

10.4.3 Transmisión de datos

Aunque las unidades de control de las bombas funcionan completamente independientes, la transmisión de datos es fundamental para que el sistema de control remoto funcione. El tiempo necesario para la transmisión de datos puede reducirse, si el control de la bomba realiza todos los análisis de los datos localmente y guarda los resultados en su memoria. Sólo hace falta transferir los datos calculados al centro de control, en vez de todos los datos registrados. De este modo las unidades de control de la bomba pueden también funcionar independientemente, sin tener que estar conectadas constantemente al centro de control.

Los resultados pueden también guardarse en la terminal durante algún tiempo, normalmente una semana, antes de su envío automático como un paquete. Es una característica importante si hay cortes indefinidos de las líneas de comunicación.

La transmisión de datos se configura siempre según las necesidades individuales. La comunicación debe ser flexible y normalmente pueden utilizarse la red telefónica pública, modems de radio, modems GMS o cualquier combinación de ellos. También pueden utilizarse líneas fijas, pero últimamente son poco comunes debido al aumento de las mensualidades y una dudosa seguridad. Se necesita un modem a ambos extremos de la línea de comunicación para modular los datos para su transmisión. La elección entre diferentes métodos de transmisión debe hacerla el cliente, teniendo en cuenta los costes de la obra, los costes de transmisión de datos y las características que cada método requiere y ofrece.

En general se utilizan los modems de radio y las líneas fijas para distancias cortas y siempre cuando se necesite una comunicación continua, tal como con bucles de control entre un tanque de

agua limpia y una estación de toma de agua. Si la estación de bombeo y la estación de control central están conectadas a través de la red telefónica pública, la distancia entre ellas puede ser prácticamente ilimitada. La red telefónica pública permite también autorizar el acceso por motivos especiales a una estación de bombeo a terceros, tales como proveedores de equipos y compañías de servicios.

La moderna tecnología de telecomunicaciones GSM ofrece una solución atractiva de control y comprobación a distancia para terminales lejanas con largas distancias. GSM ofrece a menudo la mejor alternativa para instalaciones reformadas, ya que la instalación posterior de la línea de acceso de PSTN es cara y la disponibilidad puede estar limitada. La tendencia muestra claramente que las conexiones vía modem GSM seguirán ganando terreno en el futuro.

10.4.4 Transferencia de alarma

Las alarmas producidas en una subestación son transferidas al centro de control, donde todas las alarmas que entran son guardadas en la base de datos. El software de gestión en el ordenador del centro de control incluye una categorización automática de alarmas, así como un calendario de trabajo del personal técnico de servicio y de acuerdo con este calendario la alarma se transfiere a la persona correcta y a la hora correcta (si la alarma está categorizada para ser transferida). El ordenador del centro de control lleva también a veces una impresora de alarmas, que imprime todas las alarmas para su posterior análisis.

Las alarmas se transfieren normalmente al teléfono GSM del técnico en servicio como un mensaje SMS (texto). El mensaje puede incluir, además del texto de la alarma y el nombre de la estación, información más detallada del estado de la bomba (funcionamiento/parada/fallo), afluencia a la estación, volumen bombeado durante el día, otras alarmas activas (con indicación de no ser transferidas), etc.

Otra forma de transferir las alarmas es por compaginador. El ordenador del centro de control crea el texto de informe de las alarmas, contacta con el operador del compaginador y envía el mensaje para que se visualice en el compaginador. El mensaje contiene típicamente información codificada de la identidad de la estación y tipo de alarma

emitida.

Si es necesario, el centro de control puede también transferir las alarmas con mensaje de voz. Un texto que corresponde a la alarma y que está grabada oralmente en el disco duro del ordenador es recuperado por el software y utilizado para su transmisión por teléfono al operario. El centro de control puede programarse para llamar a diferentes números, hasta que la alarma es aceptada por un operario.

10.4.5 Integración de sistemas

Si se prefiere un control combinado, un sistema de control y comprobación de bombeo de aguas residuales puede integrarse en otro sistema de control, tal como un sistema de control de plantas de tratamiento, o un sistema de control integrado de compañías de agua.

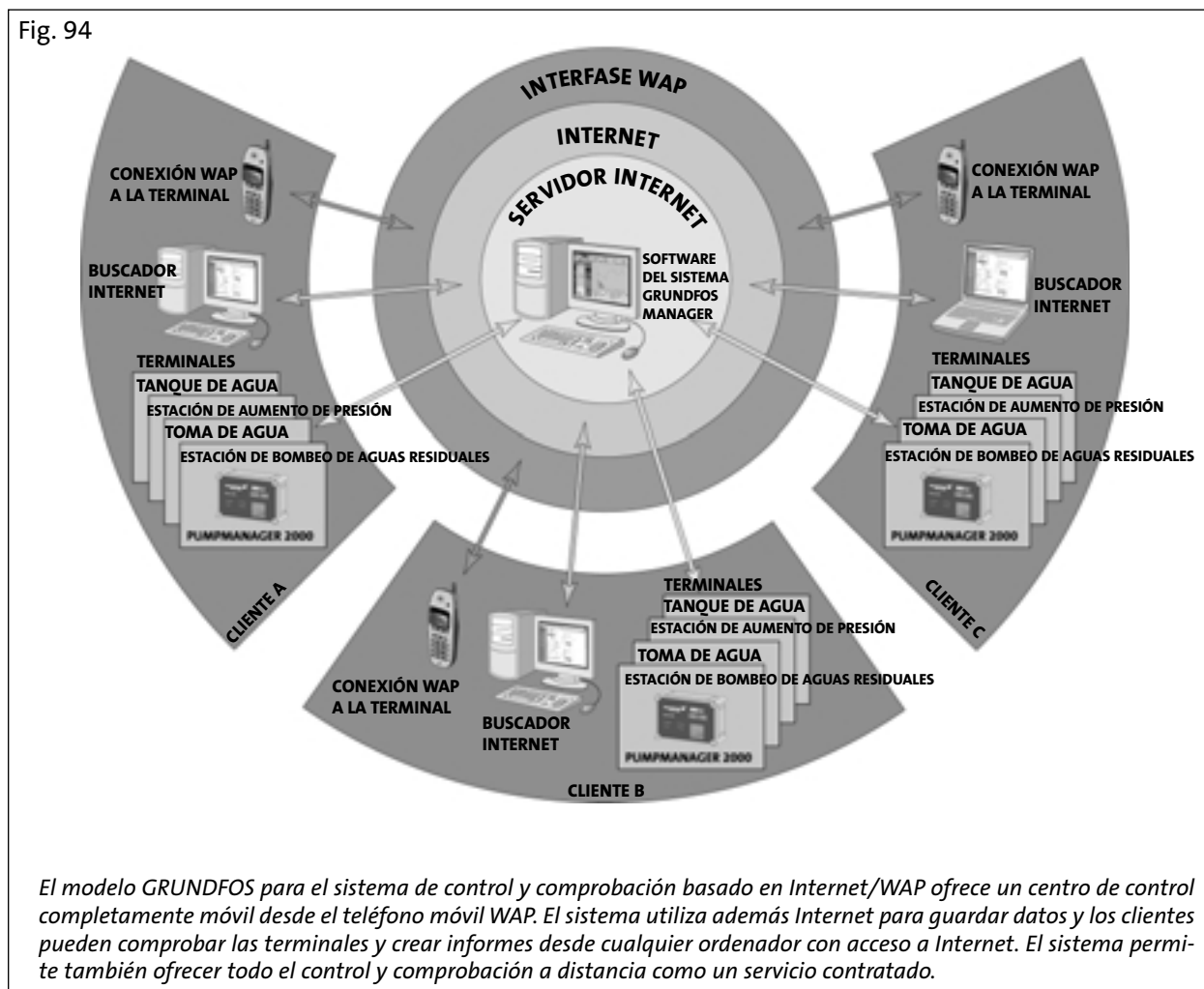
La integración no significa que todos los sistemas tengan el mismo ordenador y el mismo software. Resulta normalmente útil elegir el mejor sistema para cada aplicación y combinarlos en un nivel adecuado. Esto podría, por ejemplo, significar un software común para la transferencia e informe de alarmas. Para que la integración sea posible, los sistemas deben diseñarse utilizando procedimientos estándar, tales como sistemas operativos basados en PC, transmisión estándar de datos y protocolos de entrada y salida de señales.

10.5 Control y comprobación a distancia, basados en Internet y WAP

Los mensajes de alarma transferidos a los técnicos como mensajes SMS son solamente información en un sentido. Si el técnico cuando está en el campo tuviera la posibilidad de controlar el sistema y cambiar algunos parámetros vitales desde su móvil, se podría conseguir una flexibilidad total mediante un centro de control móvil.

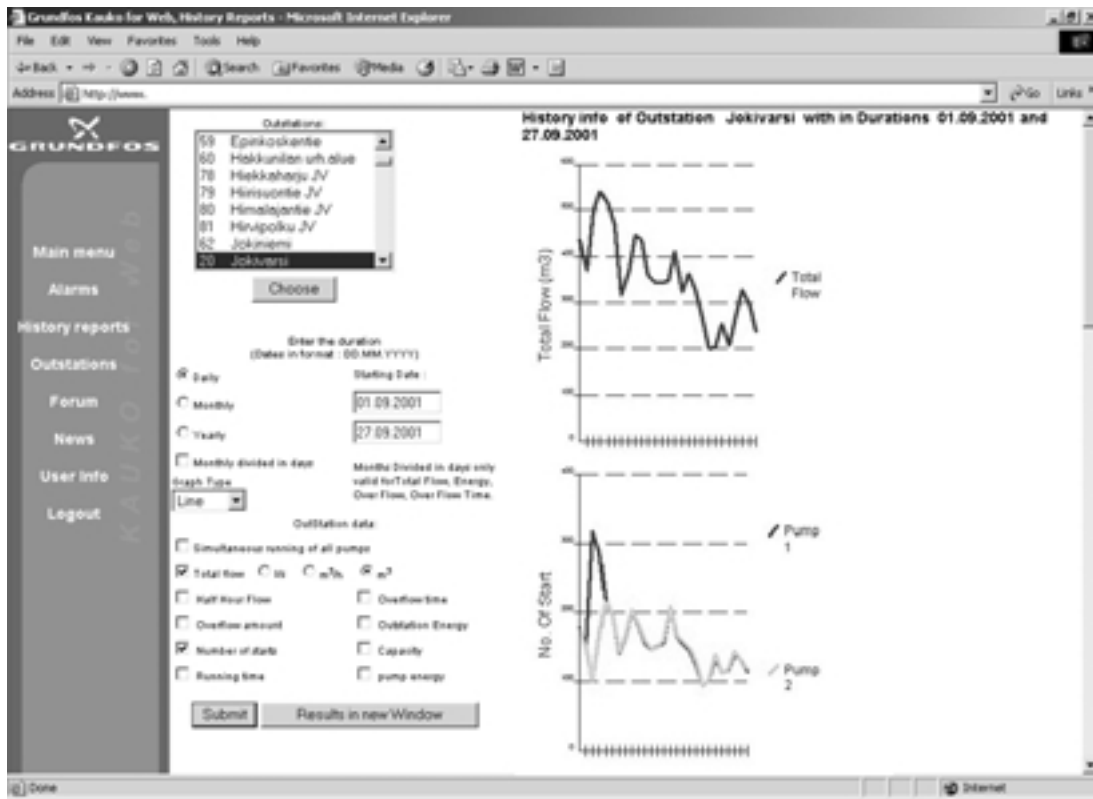
Las últimas mejoras de las técnicas de control y comprobación a distancia incluyen Internet y tecnología WAP para vencer las limitaciones de los sistemas de control tradicionales descritos anteriormente. Los sistemas de control y comprobación por Internet/WAP permiten también ofrecer el control remoto como un servicio a las municipalidades. La figura 94 muestra un control remoto basado en Internet o WAP.

Fig. 94



El sistema de control y comprobación por Internet permite la visualización e información de datos históricos de las terminales de muchos sitios, por lo que la información puede utilizarse donde se necesite. Después de introducir su identificación de usuario, los operarios, personal en servicio, decisores, ingenieros del sistema de aguas residuales, etc. pueden buscar datos históricos detallados de las terminales de muchos años atrás, por ejemplo de sus propios ordenadores. La figura 95 muestra la página de interfase del servicio de control basado en GRUNDFOS Web.

Fig. 95



Los clientes pueden buscar en Internet el historial de sus propias terminales, independientemente de la ubicación. La información puede también fácilmente compartirse dentro de la organización – operarios, técnicos, decisores, así como proyectistas e ingenieros del sistema de aguas residuales.

Símbolos

A	área	l	longitud
A_W	área de superficie de fosa húmeda	M_B	masa concreta, Kg.
a	velocidad onda de presión	MH	incertidumbre de medición de altura
D	diámetro interior de tubería	MQ	incertidumbre de medición de caudal
F_a	fuerza axial	m	masa
F_r	fuerza radial	NPSH	altura de aspiración positiva neta
f_H	factor de incertidumbre de medición de la altura	n	velocidad rotacional
$f_{m\acute{a}x}$	frecuencia máxima	n_N	velocidad rotacional nominal
$f_{m\acute{i}n}$	frecuencia mínima	P	potencia de entrada bomba
f_N	frecuencia nominal	P_{gr}	potencia de entrada motor
f_Q	factor de incertidumbre de medición de caudal	p	presión
g	aceleración por gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$	p_b	presión ambiente en el nivel del líquido
H	altura total de bomba (altura)	p_L	presión atmosférica en fosa de bomba
H_0	altura a caudal cero	P_m	contenido de arena en peso
H_d	altura dinámica	P_{min}	presión estática mínima bomba
H_f	pérdidas de carga por fricción	p_U	presión atmosférica fosa receptora
H_G	altura garantizada	P_v	tensión de vapor de líquido, contenido de arena en volumen
H_{geod}	altura geodésica	Q	volumen de caudal
H_j	pérdida de carga en la tubería	Q_0	volumen de caudal a altura cero
H_{jn}	pérdida de carga local	Q_1	volumen de caudal, una bomba
H_{jp}	pérdida de carga en tubería de impulsión	Q_{II}	volumen de caudal, dos bombas
H_{jt}	pérdida de carga en tubería de aspiración	Q_{in}	caudal entrante
$H_{m\acute{a}x}$	altura máx. permitida	Q_N	caudal nominal de bomba
$H_{m\acute{i}n}$	altura mín. permitida	q	volumen de caudal
H_r	pérdida de carga	Re	número de Reynold
H_{rt}	pérdida de carga en la tubería de aspiración	S	inclinación curva
H_s	pérdida por discontinuidad	T	duración ciclo
H_{st}	altura estática	t	tiempo de funcionamiento bomba
H_t	altura teórica	t_H	factor de tolerancia de altura
$H_{t\infty}$	altura idónea	t_Q	factor de tolerancia de caudal
H_v	pérdidas de carga por fugas	U_1	tensión de línea
h	altura	U_{ph}	tensión de fase
h_A	diferencia de altura entre plano de referencia y punta del borde delantero del álabe	u	velocidad perimetral
h_s	nivel de parada de bomba	V	volumen
h_t	altura geodésica de entrada	V_G	volumen de estación de bombeo por debajo del nivel freático, m^3
I	corriente eléctrica	V_H	volumen efectivo fosa húmeda
I_l	corriente de línea	V_h	volumen efectivo fosa húmeda
I_{ph}	corriente de fase	v	velocidad real líquido
k	coeficiente	V_2	velocidad caudal en salida bomba
L	longitud	v_m	componente radial de velocidad real
		v_u	componente tangencial de velocidad real
		w	velocidad relativa al álabe
		X_H	factor de tolerancia de altura
		X_Q	factor de tolerancia de caudal

Z	frecuencia de arranques
$Z_{1,2}$	altura del manómetro por encima del nivel de agua
$Z_{Imáx}$	frecuencia máx. de arranques de bomba
$Z_{IIImáx}$	frecuencia máx. de arranques de bomba
$Z_{máx}$	frecuencia máx. de arranques de bomba
β	ángulo del borde de álabe
Δ_h	bajada presión local en borde delantero de álabe
Δh	cambio de presión (altura)
ΔH_L	desviación inferior permitida de altura
ΔH_T	desviación permitida de altura
ΔH_U	desviación superior permitida de altura
ΔQ_L	desviación inferior permitida de caudal
ΔQ_T	desviación permitida de caudal
ΔQ_U	desviación superior permitida de caudal
Δv	cambio de velocidad de caudal
ζ	factor de resistencia local
η	rendimiento de bomba
η_{gr}	rendimiento total
η_h	rendimiento hidráulico
η_{mot}	rendimiento de motor
λ	factor de fricción duración ciclo de reflexión
ν	viscosidad cinemática
ρ	densidad líquido

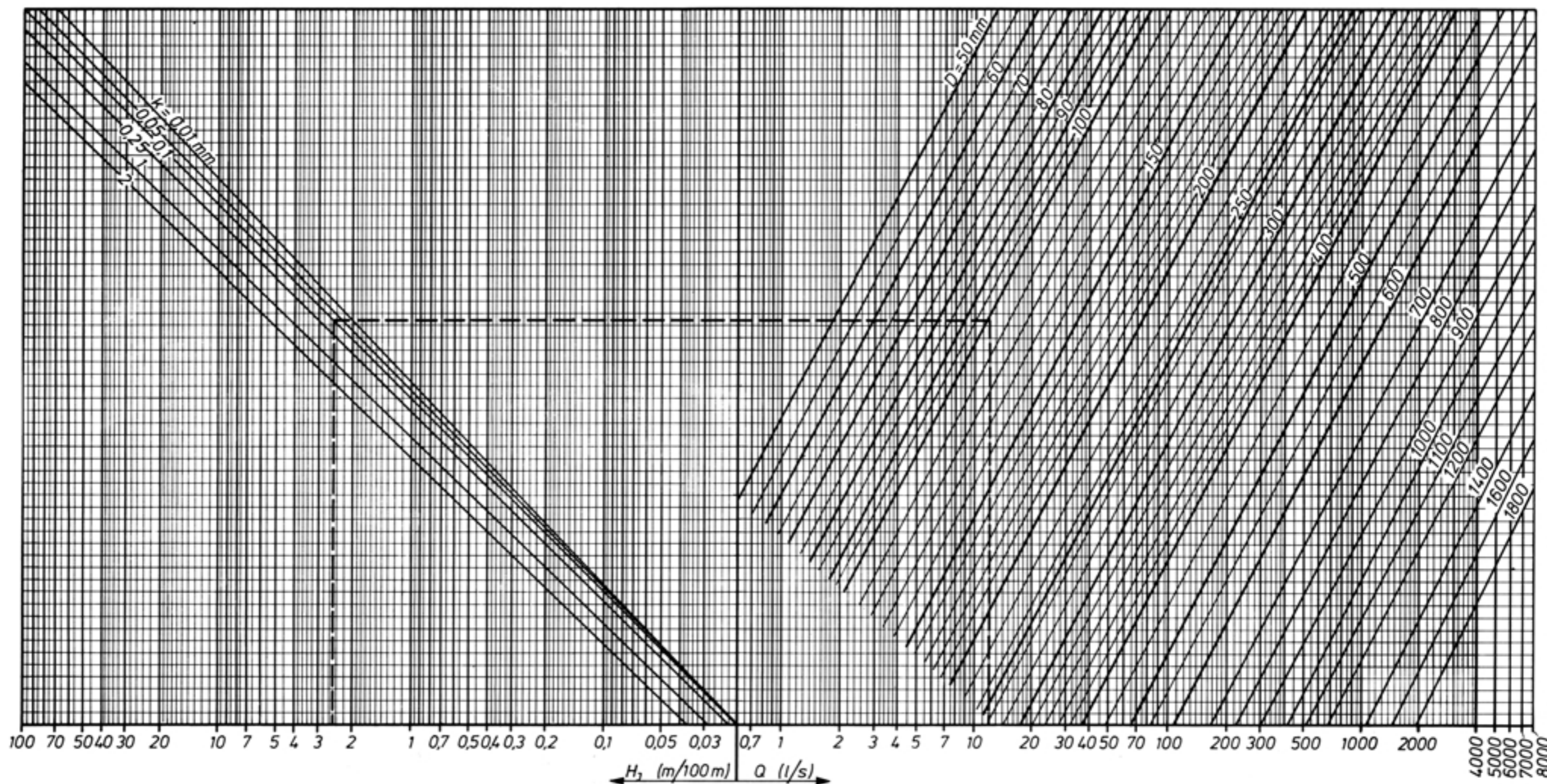
Nomograma para pérdidas en tuberías, agua limpia a 20°C

Valores orientativos de rugosidad superficial (k) para tuberías

Material de la Tubería	Tubería nueva k (mm)	Tubería vieja k (mm)
plástico	0,01	0,25
acero estirado	0,05	1,0
acero soldado	0,1	1,0
acero inoxidable estirado	0,05	0,25
acero inoxidable soldado	0,1	0,25
fundición	0,25	1,0
acero galvanizado	0,15	
fundición bituminada	0,12	
hormigón	0,3...2,0	
amianto-cemento	0,025	

Q = Caudal, l/s
 D = Diámetro interior de la tubería, mm
 k = Rugosidad superficial, mm
 H_f = Pérdidas en la tubería, m/100 m

Ejemplo
 Q = 12 l/s
 D = 100 mm
 k = 0,01 mm
 H_f = 2,5 m / 100 m



Nomograma para pérdidas de carga en codos, válvulas etc.

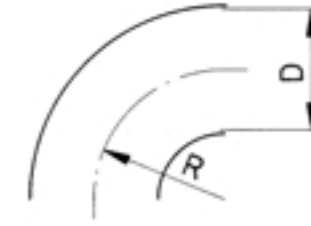
Q = Caudal, l/s
 D = Diámetro interior de la tubería, mm
 v = Velocidad del caudal, m/s
 ζ = Coeficiente de pérdida
 H_J = Pérdidas de carga, m

Ejemplo
 Q = 12 l/s
 D = 100 mm
 v = 1,55 m/s
 Σζ = 5
 H_J = 0,6m

Valores orientativos para pérdidas de carga en codos, válvulas, etc.

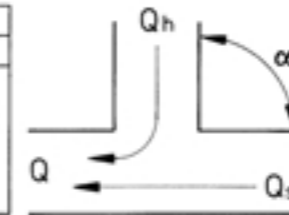
- Codo de tubería de 90°, R/D = 1,5
- Pérdida en la descarga
- Válvula de retención de clapeta
- Válvula de retención de bola
- Válvula de compuerta

ζ
0,3
1,0 (tubería sin dilatación)
1...2
0,7...1,2
0,2



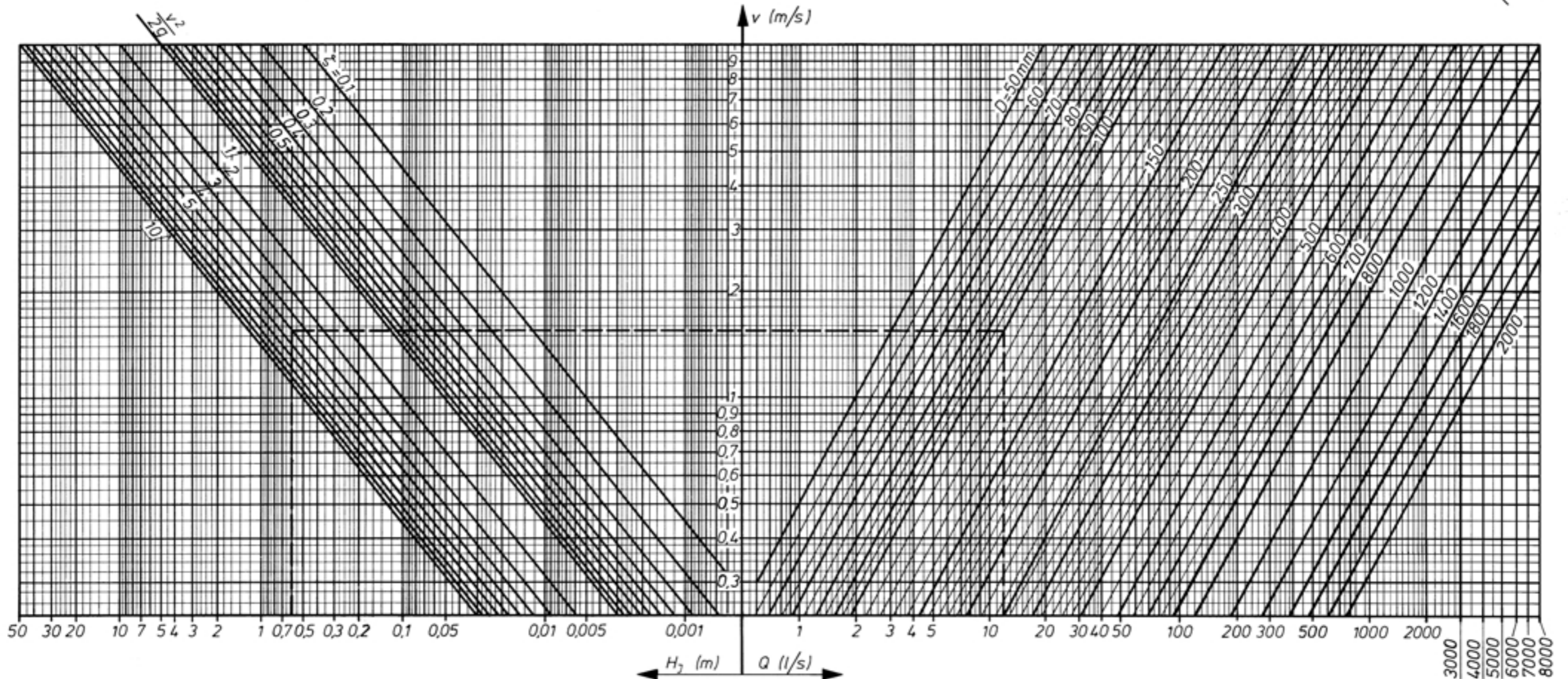
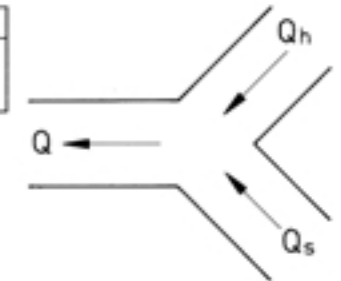
- Unión en T

Q _h /Q	α = 90°		α = 45°	
	ζ _h	ζ _s	ζ _h	ζ _s
0,0	-1,00	0,04	-0,90	0,04
0,2	-0,40	0,17	-0,38	0,17
0,4	0,08	0,30	0,00	0,19
0,6	0,47	0,41	0,22	0,09
0,8	0,72	0,51	0,37	-0,17
1,0	0,91	0,60	0,37	-0,54



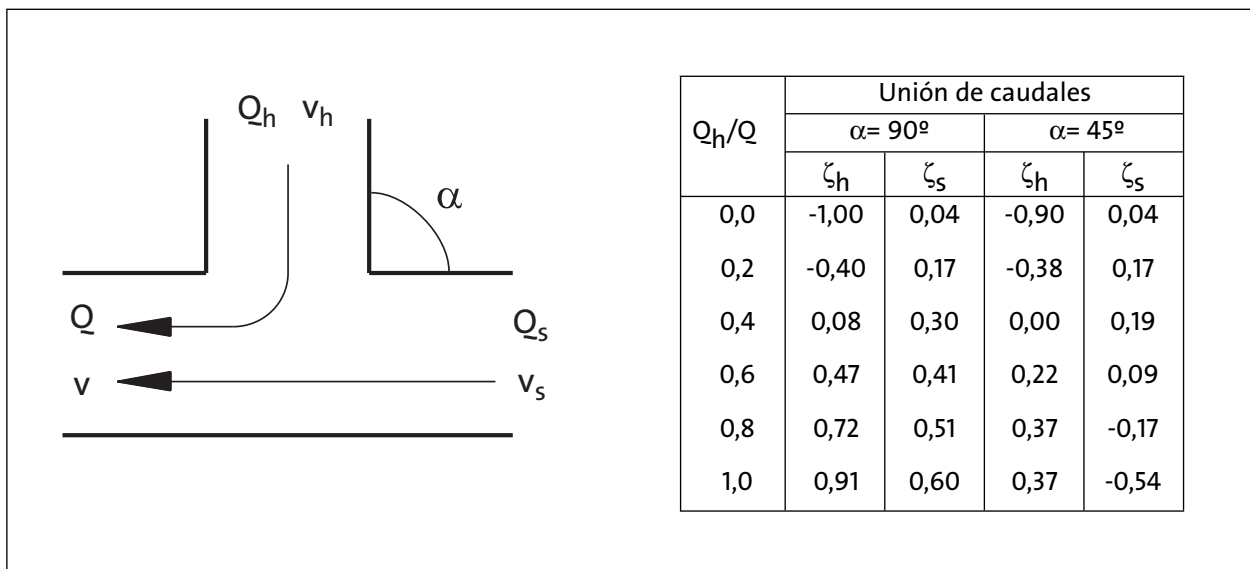
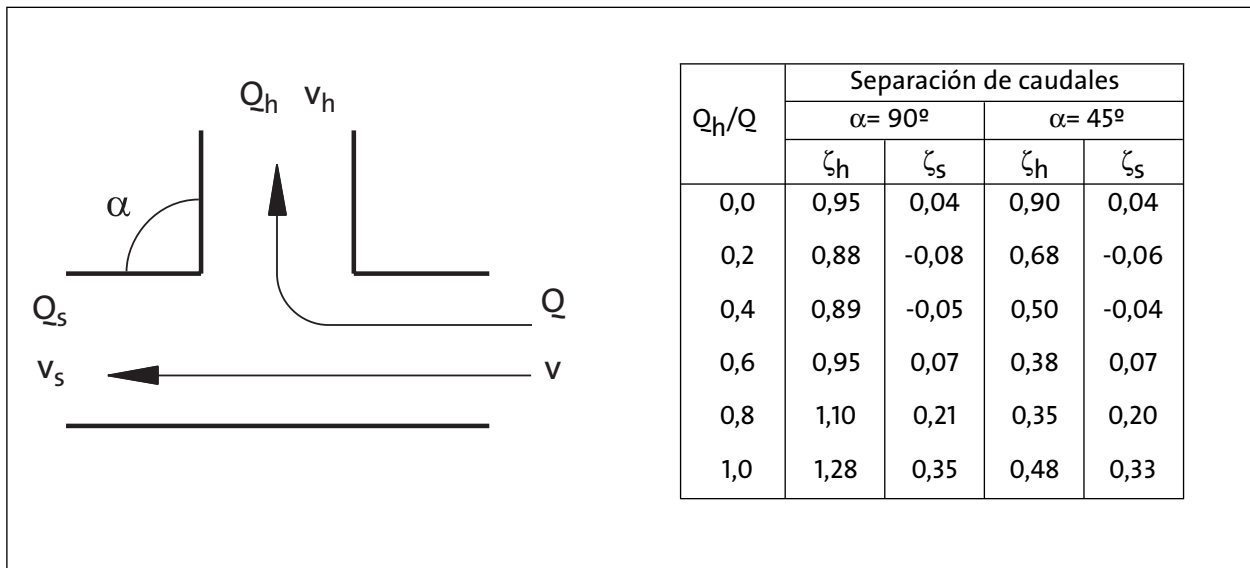
- Unión en Y

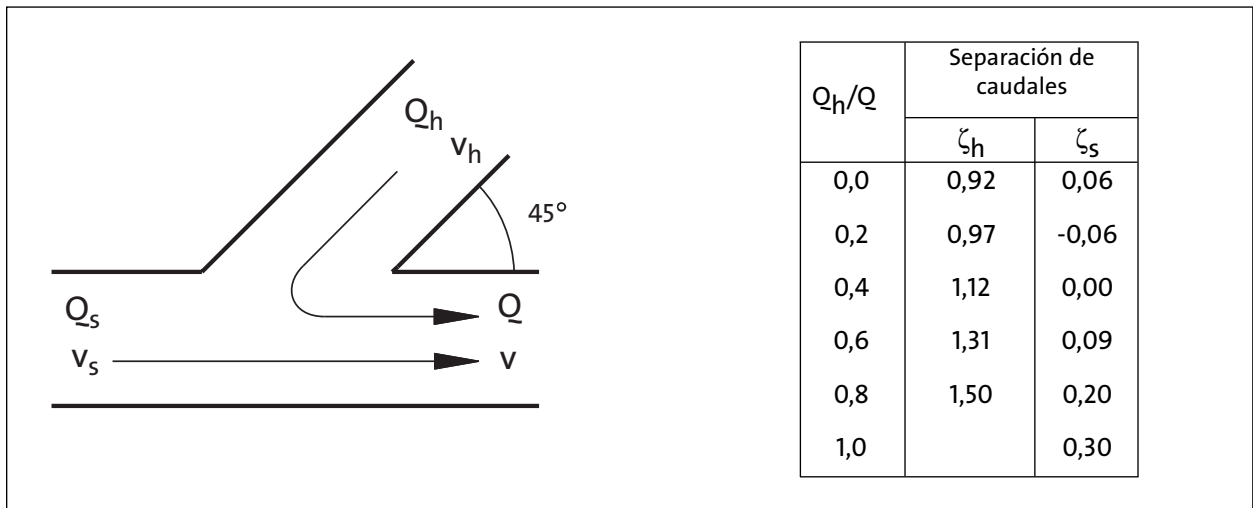
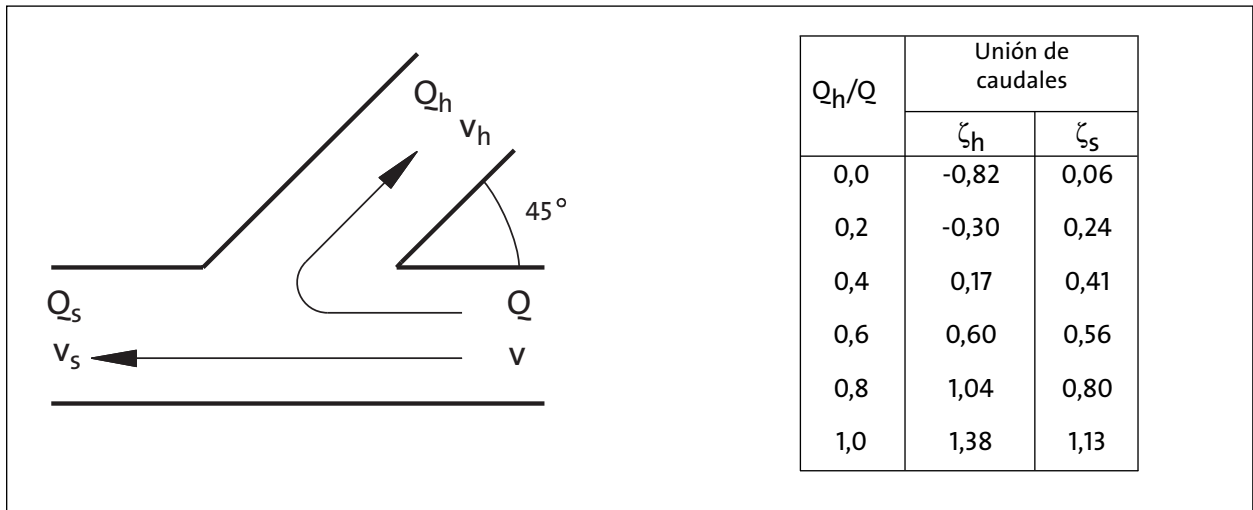
Q _h /Q	ζ _h	ζ _s
0,0	-	0,6
0,5	0,3	0,3
1,0	0,6	-



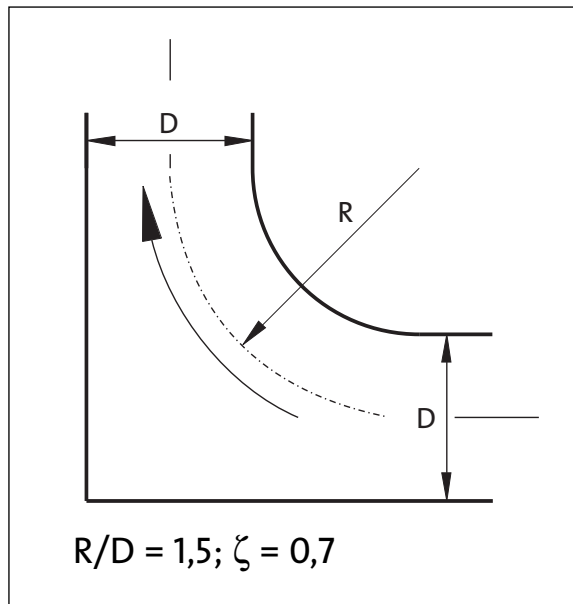
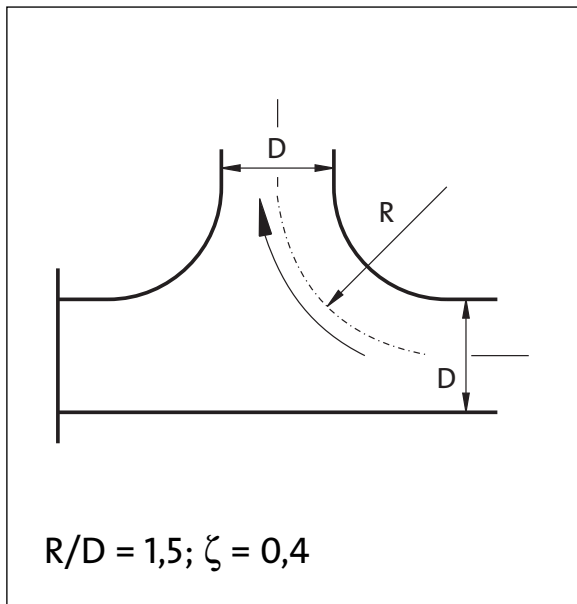
Factores de resistencia local

Ramales





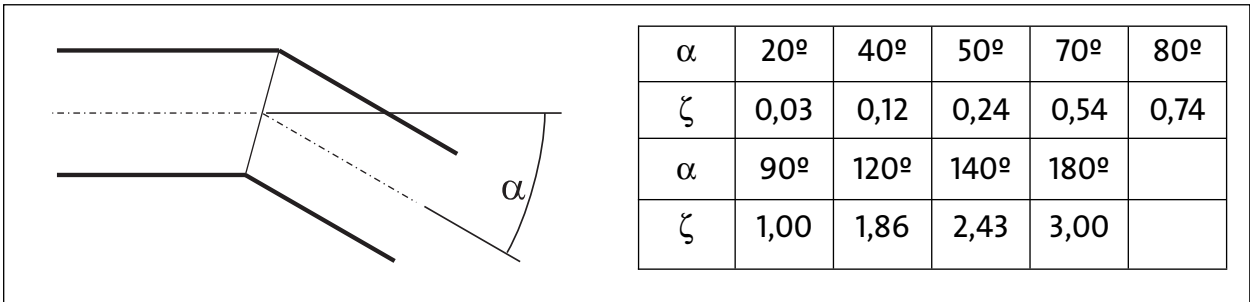
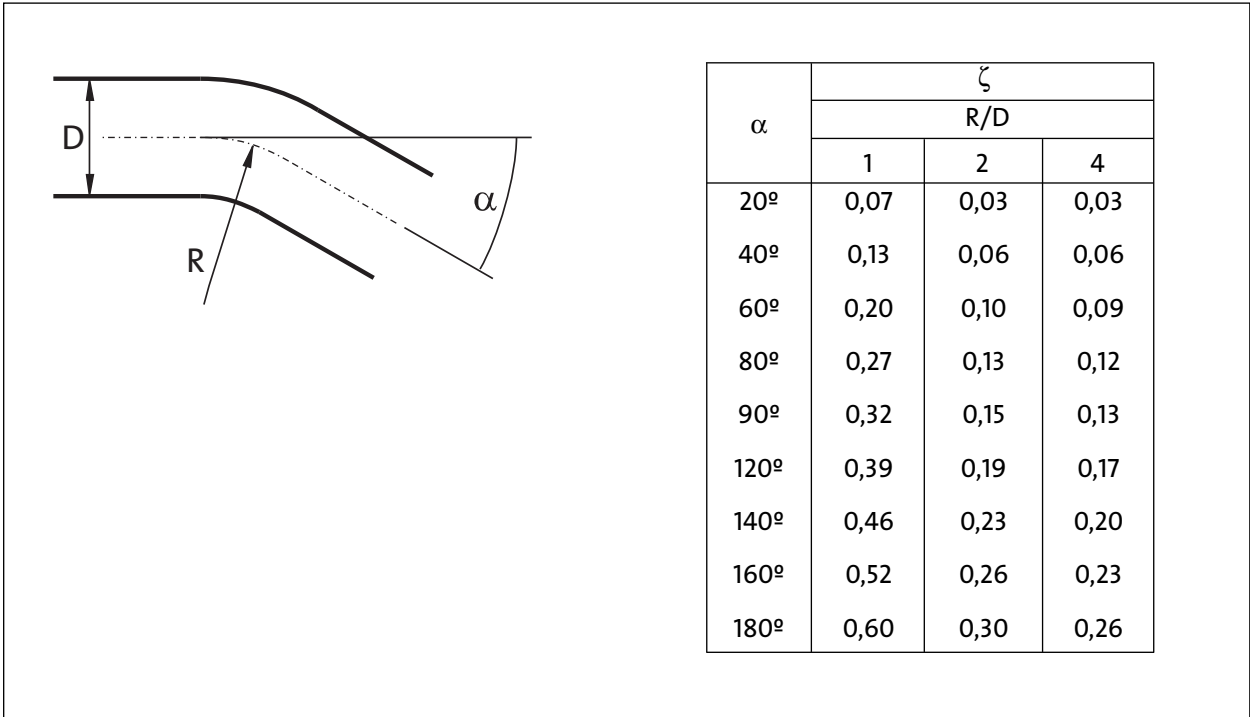
Codos



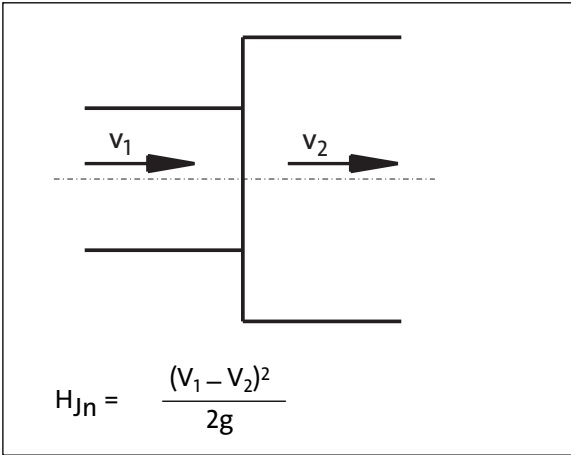
90°

R/D	1	2	3	4	6
ζ	0,36	0,19	0,16	0,15	0,21
R/D	8	10	12	16	20
ζ	0,27	0,32	0,35	0,39	0,41

Apéndice A

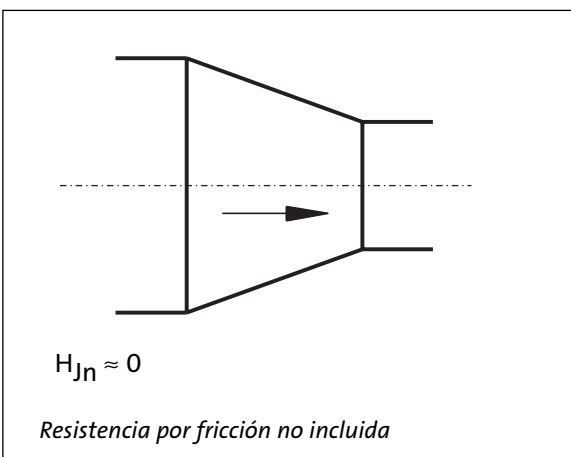


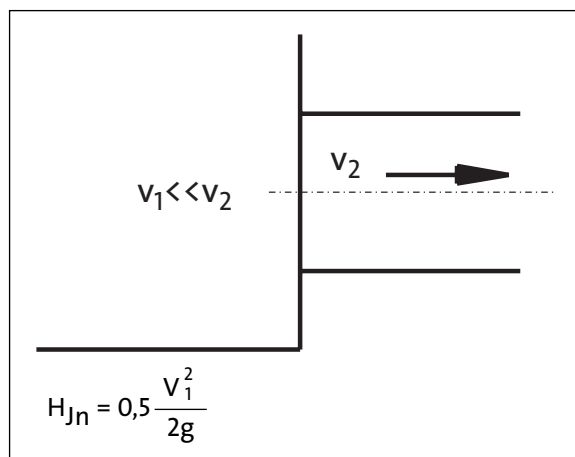
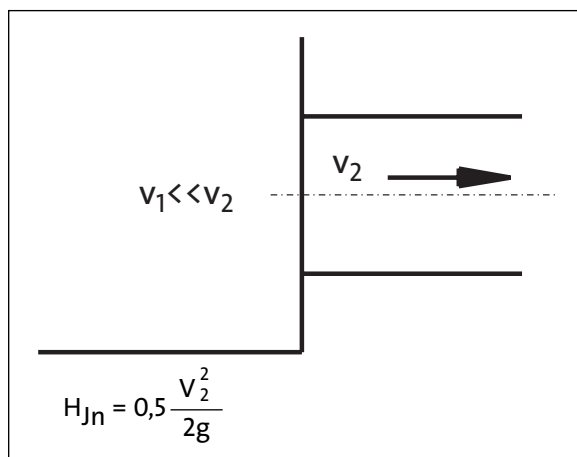
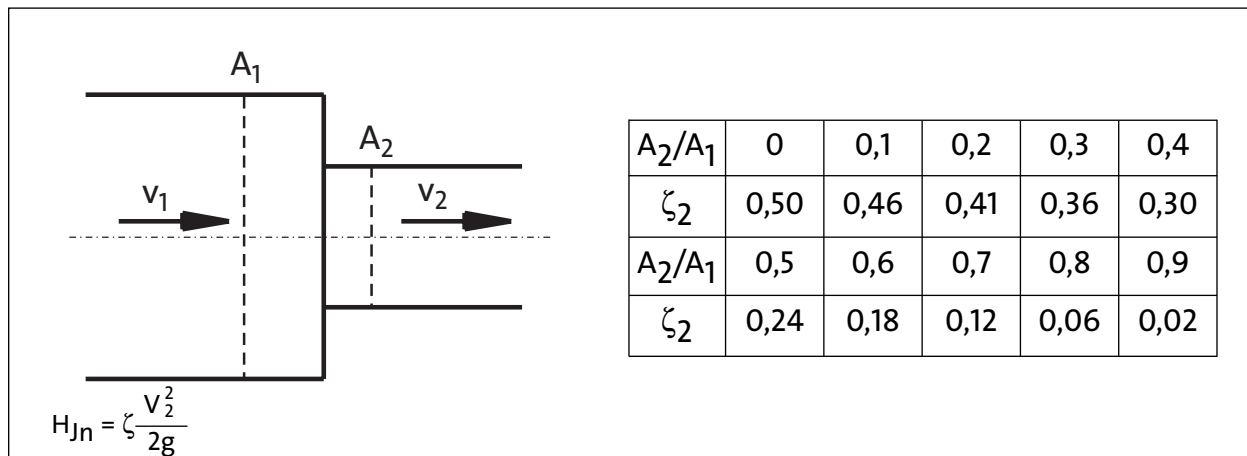
Ampliaciones y reducciones



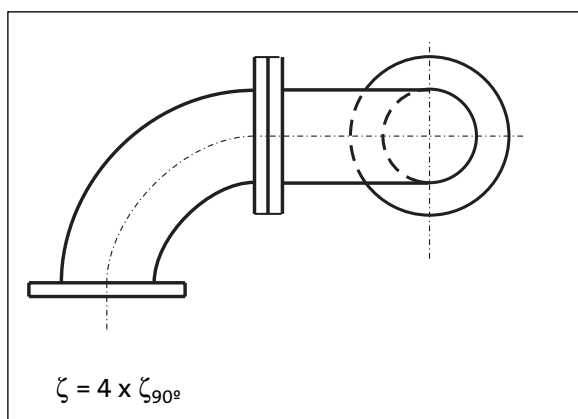
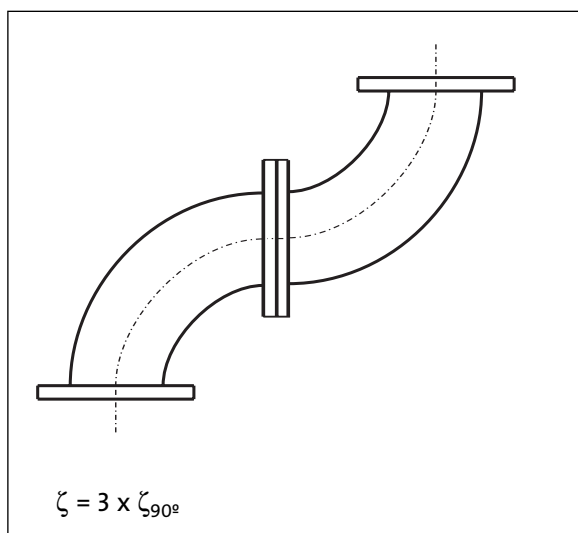
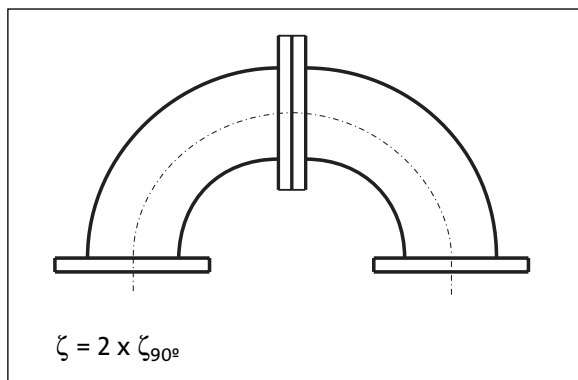
β°	k	β°	k	β°	k
5	0,13	45	0,93	100	1,06
10	0,17	50	1,05	120	1,05
15	0,26	60	1,12	140	1,04
20	0,41	70	1,13	160	1,02
30	0,71	80	1,10		
40	0,90	90	1,07		

$H_{Jn} = \zeta \frac{v_1^2}{2g} \quad \zeta = k \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$

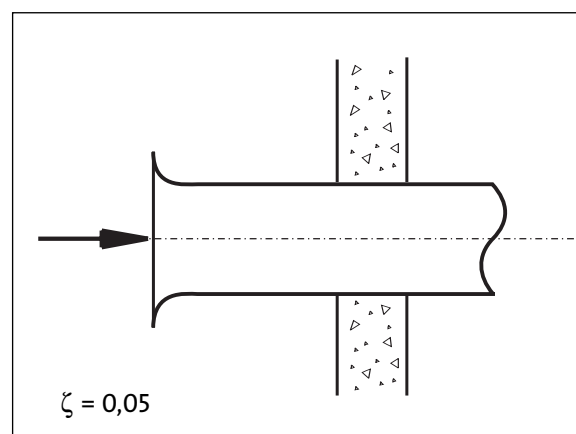
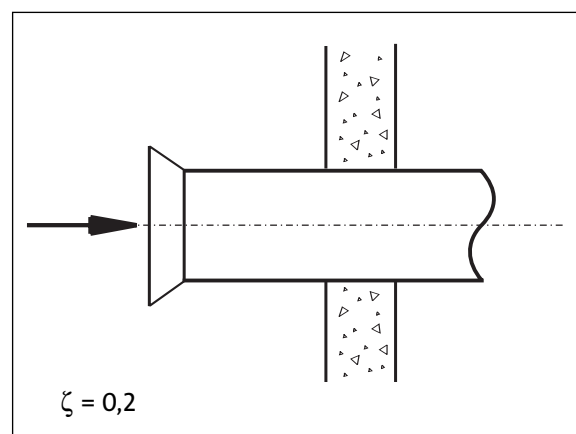
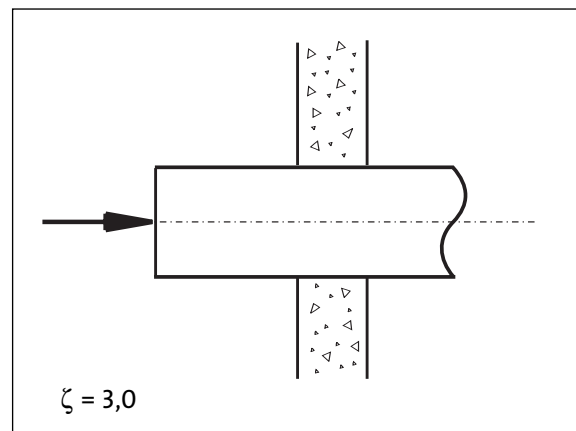




Combinaciones de codos

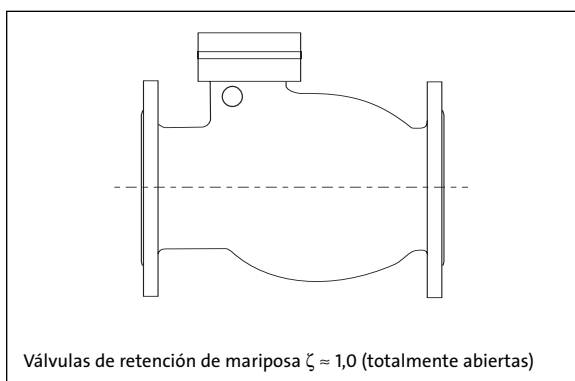
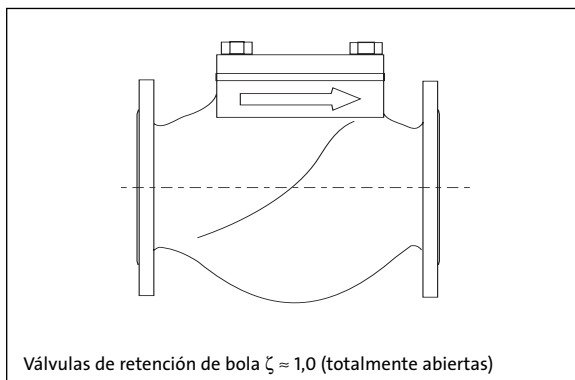
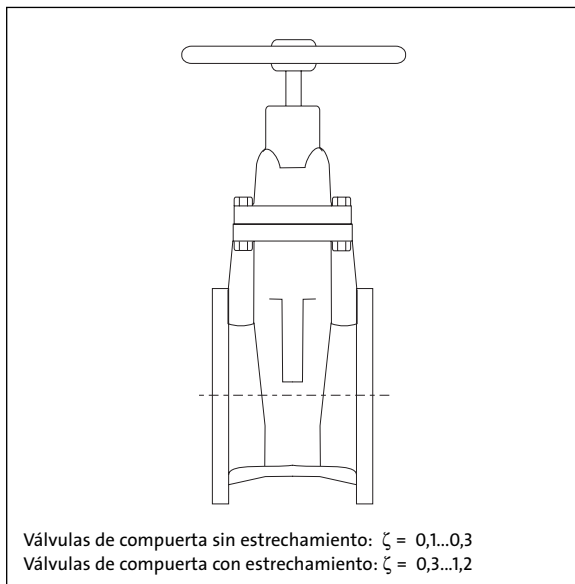


Entradas de aspiración



Válvulas

Los valores ζ dependen mucho de la forma. Deben usarse valores de fábrica cuando están disponibles.



Los anteriores valores ζ son válidos para válvulas totalmente abiertas. En posición parcialmente abierta, ζ puede ser 1,5 – 2 veces mayor. Dependiendo de la forma y la posición se necesita cierta velocidad mínima del caudal a través de la válvula para que se considere totalmente abierta. El fabricante o proveedor dispone de información exacta de cada válvula.

Frecuencia de arranques y capacidad de bombeo de la estación de bombeo

El volumen de agua de una estación de bombeo consta del volumen por debajo del nivel de parada más bajo de la bomba y el volumen bombeable por encima de este nivel, y varía con el bombeo y la afluencia de caudal. La frecuencia de arranques de las bombas depende del volumen bombeable y la afluencia de caudal.

Estudiamos los siguientes casos diferentes:

- estación de bombeo con una bomba
- estación de bombeo con dos bombas de funcionamiento en servicio-standby
- estación de bombeo con más de dos bombas.

Estación con una bomba

La afluencia de agua durante una unidad de tiempo (ciclo) puede expresarse como:

$$V = Q_{in} \cdot T \quad (B1)$$

donde

Q_{in} = afluencia de caudal

T = duración del ciclo

La bomba debe eliminar el mismo volumen durante el ciclo, por lo tanto

$$V = Q \cdot t \quad (B2)$$

donde

Q = capacidad de la bomba

t = tiempo de funcionamiento de la bomba

Al combinar las ecuaciones B1 y B2 se obtiene

$$t = \frac{Q_{in} T}{Q} \quad (B3)$$

Al parar la bomba, el volumen entre los niveles de arranque y parada V_h se llena durante el tiempo $T - t$, por lo que

$$V_h = Q_{in} \cdot (T - t) = Q_{in} \cdot T - Q_{in} \cdot t \quad (B4)$$

Al sustituir con la expresión B3 de t en la ecuación B4:

$$V_h = Q_{in} T - Q_{in} \frac{Q_{in} T}{Q} \quad (B5)$$

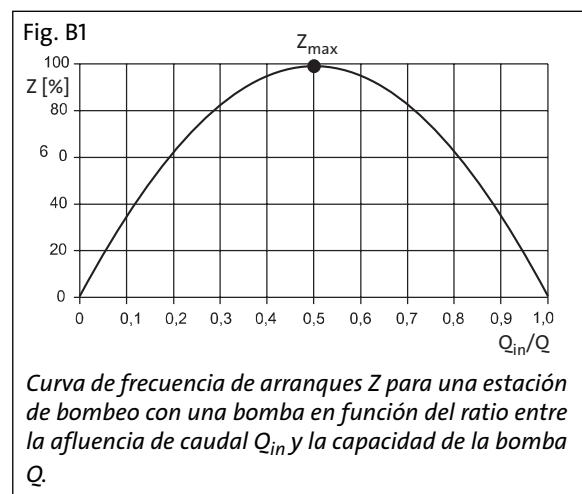
Al solucionar la ecuación B5 de T se obtiene:

$$T = \frac{V_h Q}{Q_{in} Q - Q_{in}^2} \quad (B6)$$

La frecuencia de arranques es el valor invertido de T :

$$Z = \frac{Q_{in} Q - Q_{in}^2}{V_h Q} \quad (B7)$$

La frecuencia de arranques Z es una función del ratio Q_{in}/Q y está indicada en la figura B1.



Al diferenciar la ecuación B7 sobre Q_{in} se obtiene:

$$\frac{dZ}{dQ_{in}} = \frac{Q - 2Q_{in}}{V_h Q} \quad (B8)$$

La ecuación B8 es igual a 0 cuando $Q_{in} = 1/2 Q$

Al sustituir $Q_{in} = 1/2 Q$ a ecuación B7:

$$Z_{max} = \frac{Q}{4 \cdot V_h} \quad (B9)$$

Apéndice B

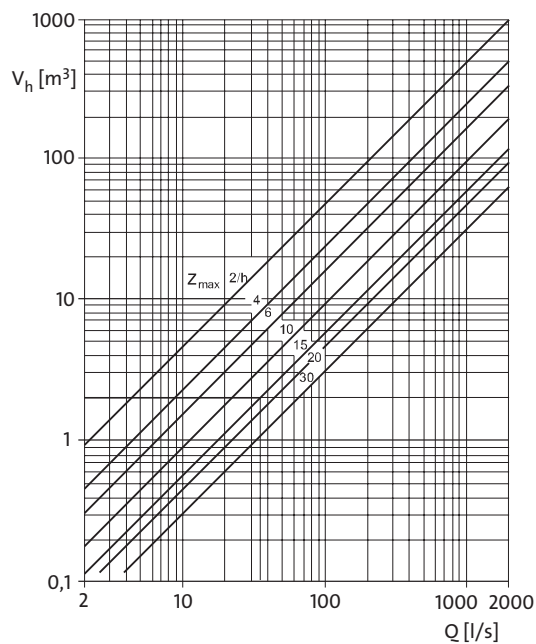
Se obtiene la capacidad V_h de la estación de bombeo:

$$V_h = \frac{Q}{4 \cdot Z_{\max}} \quad (\text{B10})$$

La figura B2 muestra en forma gráfica la solución a la ecuación B10.

En la práctica puede haber situaciones cuando la afluencia de caudal a una estación de bombeo es muy pequeña y sólo instantánea, por ejemplo en estaciones de bombeo para pocos hogares. En dichos casos debe seleccionarse una capacidad de bomba mucho mayor con el fin de conseguir una velocidad de caudal lo suficientemente alta en la tubería de impulsión como para evitar sedimentación. En esta situación el ratio Q_{in}/Q sigue pequeño, y no se alcanza el valor Z_{\max} , o sólo rara vez.

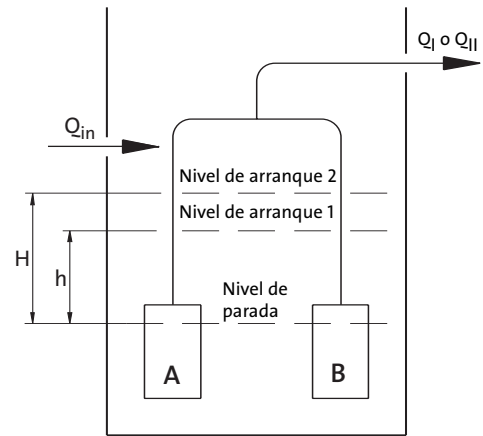
Fig. B2



Q = Capacidad de la bomba, l/s
 Z_{\max} = Frecuencia máxima de arranques, l/h
 V_h = Volumen efectivo de la fosa húmeda, m³

Diagrama para determinar el volumen efectivo V_h de la fosa húmeda para una estación de bombeo con una bomba.

Fig. B3



Estación de bombeo con dos bombas funcionando en alternancia. La bomba principal arranca cuando el nivel del agua sube al nivel de arranque 1. Si la afluencia de caudal supera la capacidad de una bomba, la bomba secundaria arrancará en el nivel de arranque 2. Las bombas alternan como bomba principal y secundaria durante cada ciclo de funcionamiento.

Fig. B4

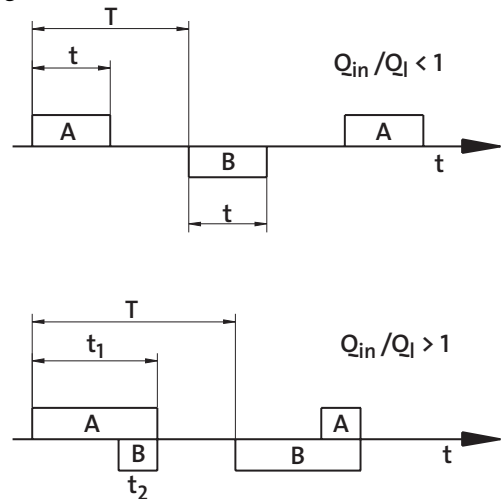


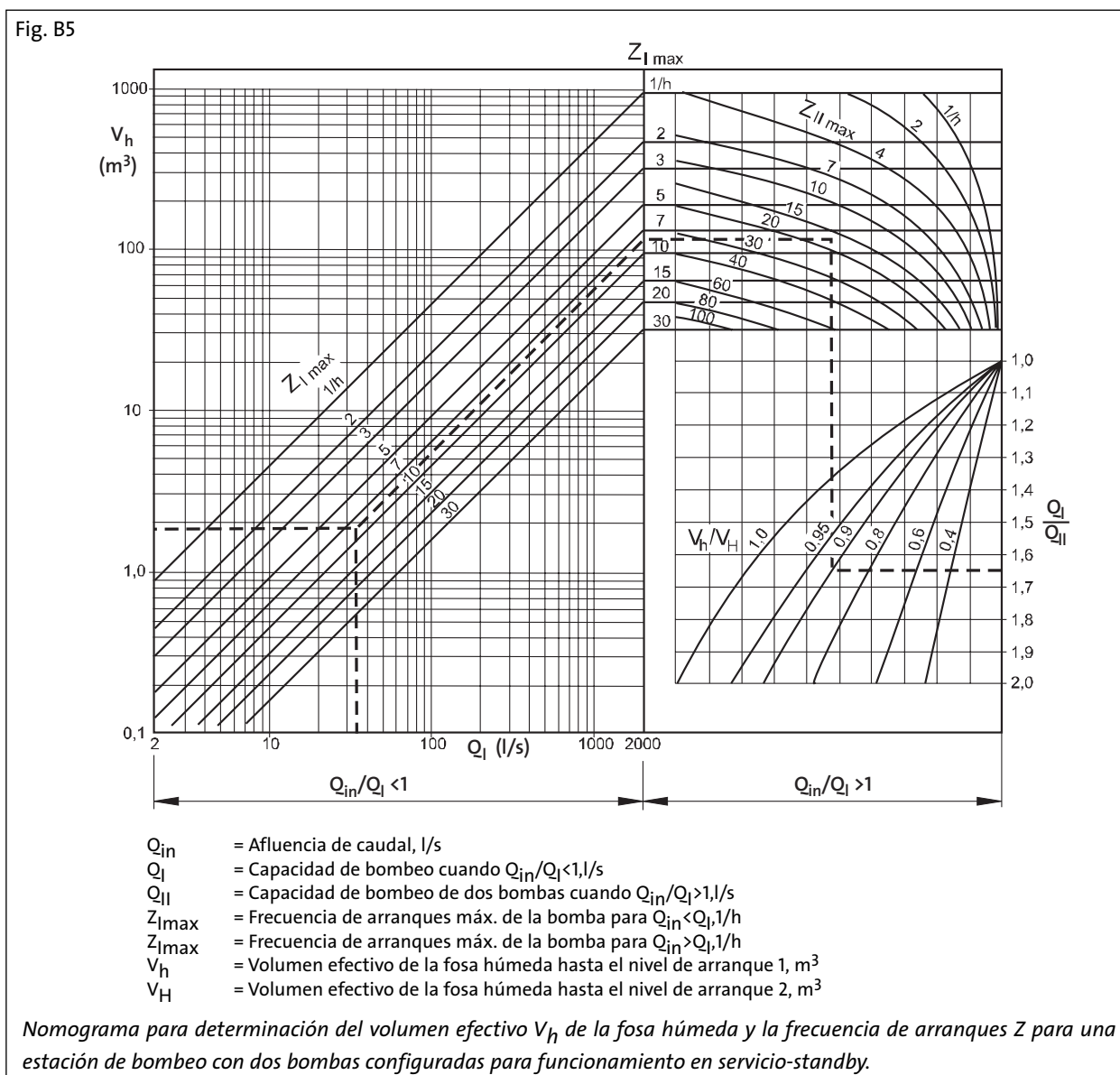
Diagrama del tiempo de funcionamiento de las bombas de servicio y standby en una estación de bombeo para una afluencia de caudal (Q_{in}) tanto menor como mayor que la capacidad de una bomba (Q_I).

Dos bombas configuradas para funcionamiento en servicio-standby

La figura B3 muestra el principio de funcionamiento de una estación de bombeo con dos bombas idénticas. Las bombas asumen alternativamente la función de bomba en servicio (principal) y en standby (secundaria) con cada ciclo de funcionamiento. La bomba en servicio se pone en marcha cuando el nivel de agua en la fosa húmeda alcanza el primer nivel de arranque. Las bombas paran cuando el nivel de agua llega al nivel de parada, permitiendo que el nivel de agua suba de nuevo hasta el primer nivel de arranque, completando el ciclo.

La bomba en servicio puede sola manejar las situaciones más normales de afluencias de caudal (Q_{in}) y la bomba en standby sólo arrancará si la afluencia de caudal es mayor que la capacidad de una bomba (Q_I), en cuyo caso el nivel de agua sigue subiendo hasta el segundo nivel de arranque, poniéndose en marcha la bomba en standby. Si la capacidad combinada de las dos bombas (Q_{II}) es mayor que la afluencia de caudal, ambas bombas paran cuando el agua llega al nivel de parada.

La figura B4 muestra un diagrama de tiempo del ciclo de funcionamiento de dos bombas que funcionan en alternancia, con más detalles del principio.



$$Q_{in} < Q_l$$

Las ecuaciones B9 y B10 pueden utilizarse para calcular la frecuencia de arranques de cada bomba, cuando la afluencia de caudal es menor que la capacidad de una bomba. Con dos bombas que arrancan alternativamente, se dividen las expresiones en dos, por lo tanto

$$Z_{I\max} = \frac{Q_l}{8 \cdot V_h} \quad (B11)$$

$$V_h = \frac{Q_l}{8 \cdot Z_{I\max}} \quad (B12)$$

La figura B5 muestra gráficamente la solución a las ecuaciones B11 y B12.

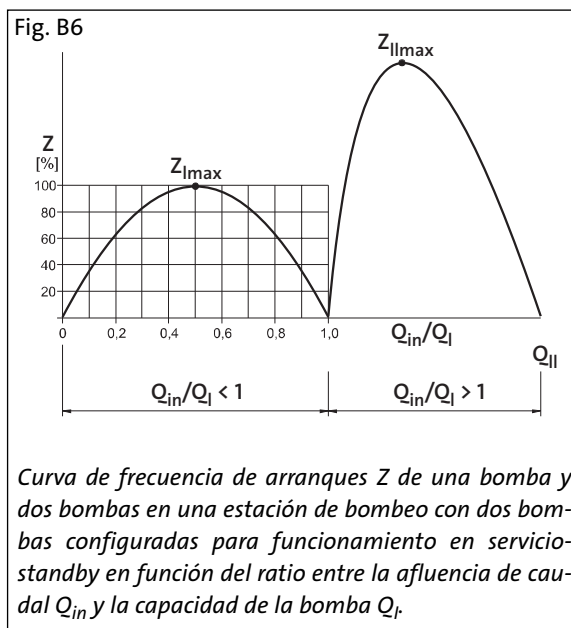
$$Q_{in} > Q_l$$

Si la afluencia de caudal es mayor que la capacidad de una bomba, deben considerarse dos factores adicionales. Son el ratio de la capacidad de la estación de bombeo hasta el primer nivel de arranque, V_h , y el segundo nivel de arranque, V_H , así como la capacidad combinada de las bombas Q_{II} . La siguiente ecuación para la frecuencia de arranques puede entonces desarrollarse:

$$Z_{II} = \left[\frac{Q_l(V_H - V_h)}{Q_{in}^2 - Q_l Q_{in}} + \frac{Q_{II} V_H}{Q_{in} Q_{II} - Q_{in}^2} \right]^{-1} \quad (B13)$$

La expresión para $Z_{II\max}$ puede solucionarse mediante diferenciación, pero la expresión es muy compleja. La figura B5 muestra una presentación gráfica de la solución.

La figura B6 muestra la relación entre la frecuencia de arranques y el ratio Q_{in}/Q_l . La frecuencia de arranques sube bruscamente cuando las condiciones requieren funcionamiento en paralelo. El diagrama muestra un valor $Z_{II\max}$ pronunciado.



El diagrama de la figura B7 muestra el efecto del ratio V_h/V_H sobre Z para V_H constante y V_h variable. En este caso el ratio Q_{II}/Q_l es 1,6. De la figura B7 se deduce que $Z_{II\max}$ disminuye y $Z_{I\max}$ aumenta cuando el nivel de arranque 1 es más bajo.

El diagrama de la figura B8 muestra el efecto del ratio Q_{II}/Q_l sobre Z para un ratio V_h/V_H constante de 0,8. Al aumentar las pérdidas en la tubería de impulsión y disminuir Q_{II}/Q_l , $Z_{II\max}$ disminuye también.

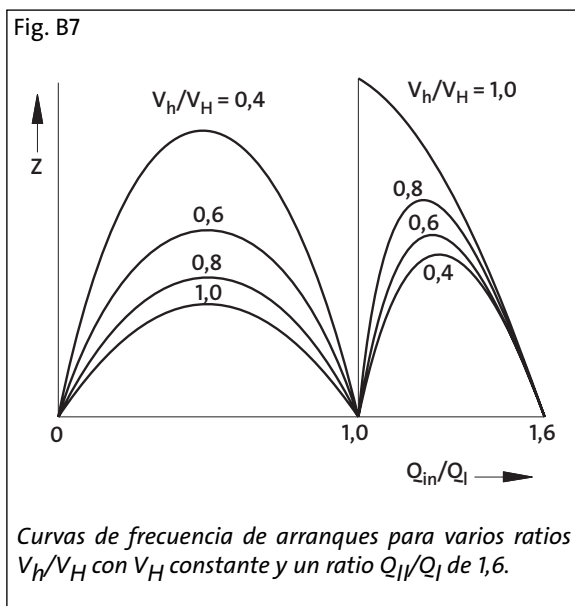
$Z_{II\max}$ pierde importancia si se seleccionan las bombas de modo que una bomba puede manejar todas las afluencias de caudal.

Estaciones de bombeo con más de dos bombas

Estaciones de bombeo con muchas bombas pueden dividirse en las dos siguientes categorías de diseño:

- Estaciones con nivel de parada común para todas las bombas
- Estaciones con niveles de parada diferentes o escalonados para cada bomba

El ciclo de arranque de las bombas se alterna normalmente entre las bombas para conseguir un reparto uniforme del desgaste.

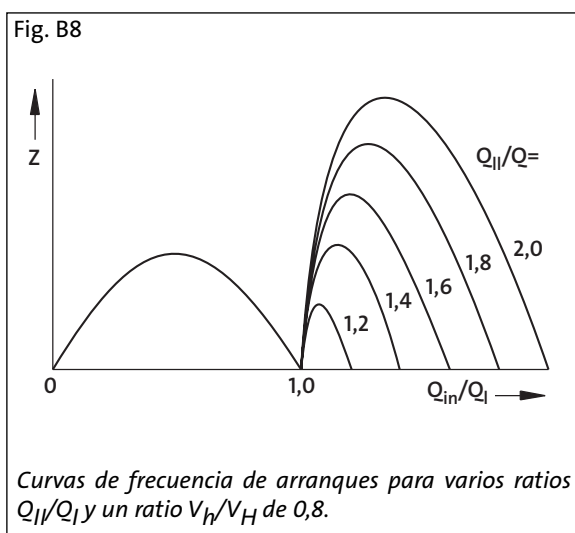


Capacidades y frecuencias de arranques de estaciones de bombeo

Cuando varias bombas están instaladas en una estación de bombeo, la frecuencia de arranques cambia drásticamente con variaciones en la afluencia de caudal. La frecuencia de arranques variará entre cero y valores máximos, que son varios.

Fluctuaciones de caudal grandes son típicas para el bombeo de aguas residuales y resulta imposible, así como también bastante innecesario, calcular el número de frecuencias de arranques de cada bomba. Con ayuda de nomogramas de diseño pueden determinarse las capacidades totales de bombeo y las frecuencias medias de arranques, pudiendo servir de base para diseños nuevos de estaciones de bombeo en todos los casos prácticos.

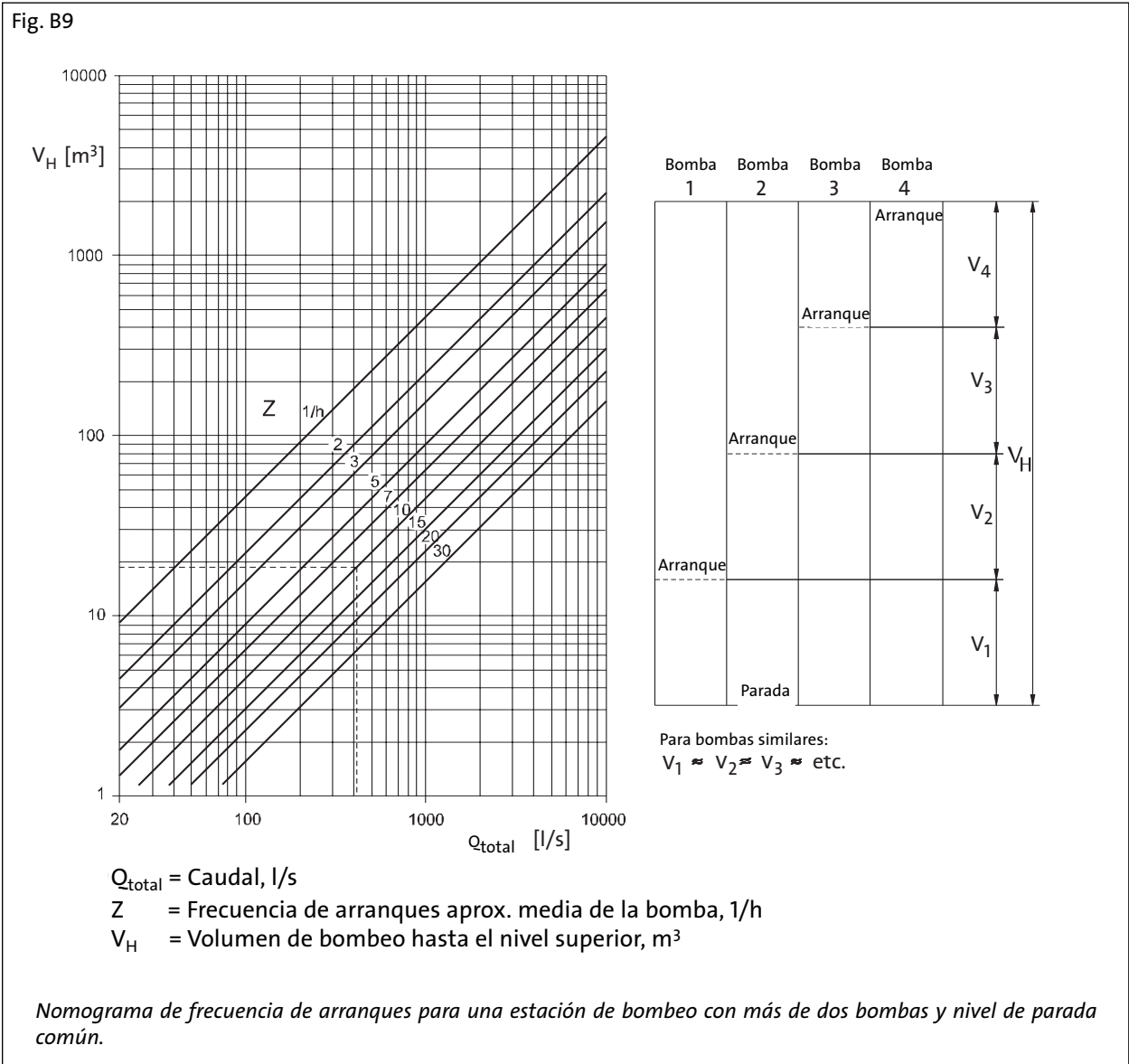
Pueden utilizarse los siguientes nomogramas para las distintas categorías de diseños.



Nivel común de parada

La figura B9 muestra un diagrama donde se puede seleccionar V_H o Z como funciones del caudal total Q_{total} .

Para ambas categorías es buena costumbre dividir el volumen total de bombeo (V_H) entre los niveles de arranque a intervalos casi iguales, si todas las bombas son idénticas. Si tienen capacidades diferentes, el volumen de bombeo puede dividirse en intervalos proporcionales a las capacidades de las bombas. La utilización de modernos equipos de control electrónico del nivel permite optimizar los niveles de arranque, tanto manual como automáticamente.



Niveles de parada escalonados

La figura B10 muestra un diagrama donde pueden seleccionarse V_H o Z como funciones del caudal total Q_{total} .

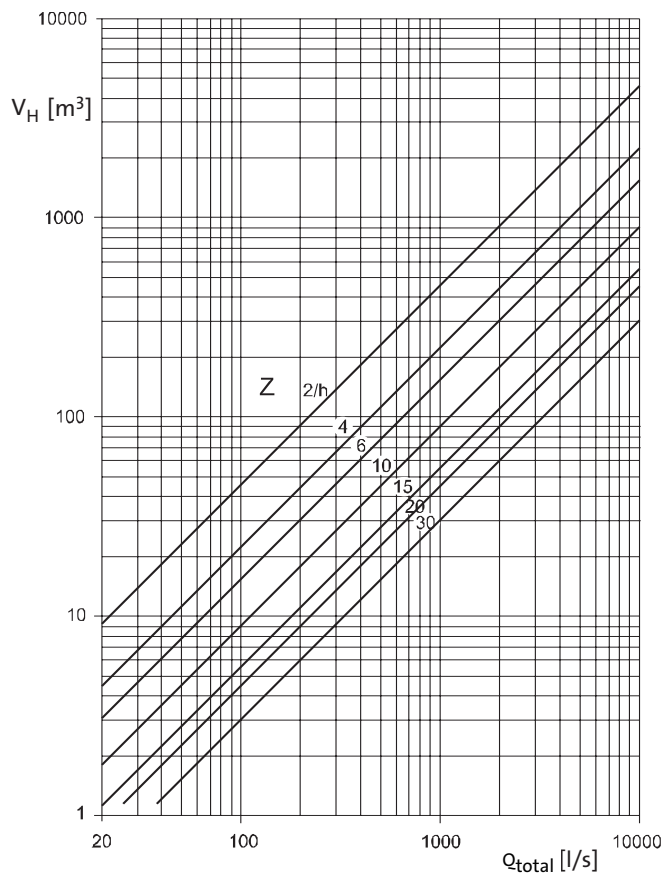
Frecuencias de arranques recomendadas

El funcionamiento y desgaste de la bomba y equipo están muy relacionados con el número de arranques y paradas durante un periodo largo, por ejemplo un año, ya que frecuencias de arranques muy altas pueden estar permitidas durante periodos breves. Si se utilizan frecuencias de arranques muy altas para el dimensionamiento, hay que investigar su incidencia. Como se ha mostrado antes, posiblemente nunca se alcanzará la frecuencia máx. de arranques de una bomba Z_{lmax} en la práctica. Del mismo modo, la frecuencia máx. de arranques Z_{llmax} de dos bombas que funcionan en paralelo es normalmente mucho más alta (1,5–2 veces) que el valor Z_{lmax} y sólo ocurre a veces.

La selección de frecuencias de arranques debe corroborarse con las recomendaciones del fabricante de bombas y equipo de control. Pueden utilizarse las siguientes recomendaciones para frecuencias de arranque medias permitidas para bombas sumergibles:

Potencia de bomba	Z permitida
0...5 kW	25 1/h
5...20 kW	20 1/h
20...100 kW	15 1/h
100...400 kW	10 1/h

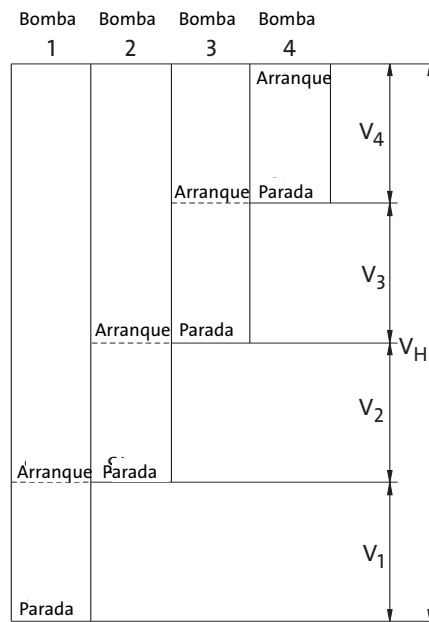
Fig. B10



Q_{total} = Caudal, l/s

Z = Frecuencia de arranques aprox. media de la bomba, 1/h

V_H = Volumen de bombeo hasta el nivel superior, m³



Para bombas similares:
 $V_1 \approx V_2 \approx V_3 \approx \text{etc.}$

Nomograma de frecuencia de arranques para una estación de bombeo con más de dos bombas y niveles de parada escalonados.

BE > THINK > INNOVATE >

Ser responsables es nuestra base
Pensar en el futuro lo hace posible
La innovación es la esencia

Bombas GRUNDFOS España, S.A.
Camino de la Fuentecilla, s/n
28110 Algete (Madrid)
Teléf.: + 34 918 488 800
Fax: + 34 916 280 465
www.grundfos.com

GRUNDFOS 