

## Tema 12. Máquinas Hidráulicas de Desplazamiento Positivo.

### 12.1. Principio del Desplazamiento Positivo

El principio de funcionamiento de las máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo no se basa en la ecuación de Euler, sino que tiene una teoría más sencilla. Las máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo se emplean para caudales pequeños de fluido o, dicho de otra manera, son mucho más grandes que las rotodinámicas para el mismo caudal.

Visto así, podría parecer que no son importantes. Sin embargo, son fundamentales en aplicaciones tales como transmisiones hidráulicas (fluidos incompresibles) y neumáticas (fluidos compresibles), y se presentan en multitud de diseños.

El principio del desplazamiento positivo consiste en que el movimiento del fluido en la máquina se produce por la variación, aumento o disminución, del volumen de una cámara. La zona de aspiración y la de impulsión deben permanecer separadas.

A diferencia de las turbomáquinas, las máquinas de desplazamiento positivo son reversibles, es decir, pueden funcionar como turbinas o como bombas sin alterar el diseño. En ellas, el intercambio de energía entre el fluido y la máquina se produce en forma de presión. El esquema sencillo de la Figura 12.1 muestra cómo la aplicación de una fuerza sobre un émbolo lo hace avanzar sobre un cilindro, produciendo un caudal  $Q$  (no constante) dado por:

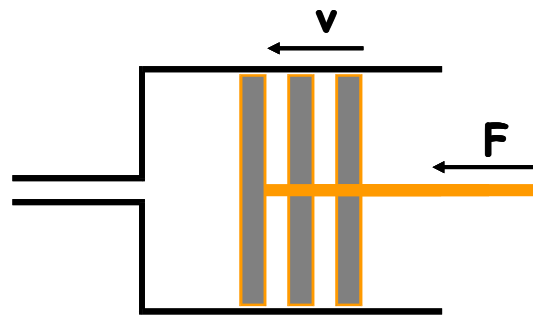


Figura 12.1. Avance del émbolo sobre el cilindro, generando un caudal, en una máquina de desplazamiento positivo.

$$Q = A \cdot \frac{l}{t} = A \cdot v \quad (12.1)$$

donde  $A$  es la sección ocupada por el émbolo,  $l$  es la longitud que avanza el émbolo en el tiempo  $t$ , y  $v$  la velocidad de avance del émbolo.

Si no se producen pérdidas por rozamiento en el avance del émbolo, la potencia aplicada sobre el émbolo,  $P_i$ , será la transmitida al flujo,  $P$ , de modo que:

$$P_i = F \cdot v = p \cdot A \cdot v = P \quad (12.2)$$

donde  $F$  es la fuerza ejercida sobre el émbolo, dada por el producto de la presión  $p$  ejercida y la superficie  $A$  del émbolo. De acuerdo con la ecuación (12.1), se puede escribir a partir de la ecuación (12.2):

$$P = p \cdot Q \quad (12.3)$$

En teoría, el caudal proporcionado por la máquina, de acuerdo con la ecuación (12.1), no depende de la presión o, dicho de otra manera, la altura que comunica la máquina de desplazamiento positivo al fluido no depende del caudal, sino sólo de la presión en la impulsión. Así, la curva motriz para este tipo de bombas es vertical, como se muestra en la Figura 12.2.

La Figura 12.2 también muestra la curva de la instalación y cómo va cambiando a medida que se cierra una válvula en el tubo de impulsión a la salida de la bomba. Como puede observarse, en este tipo de bombas, cerrar una válvula en el conducto de impulsión no modifica el caudal, que se mantiene constante. Lo que se modifica es la presión en la propia bomba y en el conducto de impulsión, hasta la válvula. Si esta presión aumenta demasiado, se producirá una ruptura en el punto más débil.

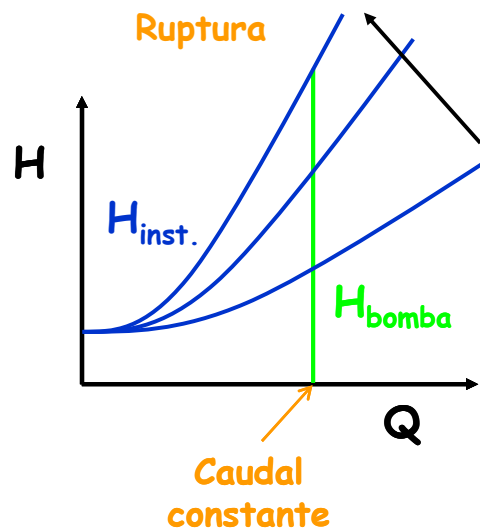


Figura 12.2. Curvas de la instalación y de una bomba de desplazamiento positivo.

Así, es importante dejar claro que en bombas de desplazamiento positivo nunca se puede instalar una válvula en el circuito de impulsión para regular el caudal. Dicho de otra forma, antes de cerrar cualquier válvula en una instalación es necesario asegurarse del tipo de bomba que tiene instalada.

## 12.2. Clasificación de las Máquinas de Desplazamiento Positivo

Las máquinas de desplazamiento positivo se clasifican de acuerdo con dos criterios: el tipo de movimiento del elemento de intercambio de energía con el fluido, y la variabilidad del desplazamiento. Todas ellas tienen el mismo principio de funcionamiento, y a todas ellas les comunica la energía, normalmente, un motor que gira.

### a) Según el tipo de movimiento del elemento de intercambio de energía

De acuerdo con el tipo de movimiento del elemento de intercambio de energía con el fluido, o desplazador, las máquinas se clasifican como: alternativas, y rotativas o rotoestáticas. En las máquinas alternativas, el desplazador tiene un movimiento de vaivén, mientras que en las rotativas tiene un movimiento giratorio, pero mucho más lento que el de las máquinas rotodinámicas (y de ahí que se llamen rotoestáticas).

Entre las máquinas de desplazamiento positivo alternativas, las más comunes son las bombas de émbolo y las de membrana. Un tipo de bomba de émbolo manual, es el que se usa en los pozos para extraer agua, como las que se pueden ver en las típicas películas del oeste. En las de membrana, el movimiento del émbolo se sustituye por una membrana flexible. En ambas, se requiere del uso de válvulas anti-retorno, para que el fluido avance hacia la impulsión, en la que hay mayor presión.

La Figura 12.3 muestra la imagen de una bomba de desplazamiento positivo de membrana, abierta para que se vea la membrana y la cavidad que varía de volumen con su movimiento. La membrana se mueve mediante un ariete situado en la parte posterior, movido, a su vez, por el motor (en la carcasa verde en la figura).



Figura 12.3. Imagen de una bomba de membrana (la membrana es la pieza blanca).

Entre las máquinas rotativas, las más sencillas son las bombas peristálticas, que se emplean para caudales muy pequeños, a escala de laboratorio, en las que un tubo flexible es comprimido por un elemento giratorio, que empuja el fluido hacia delante al girar. La Figura 12.4 muestra una bomba peristáltica, donde se aprecia el elemento giratorio (el triángulo metálico) y el tubo flexible.

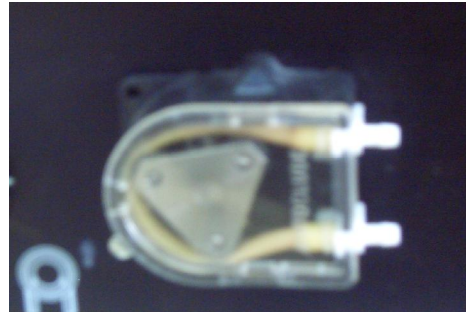


Figura 12.4. Imagen de una bomba peristáltica (el elemento giratorio es el triángulo metálico).

Otro tipo de bomba rotatoria común son las bombas de engranajes, de las que la Figura 12.5 muestra un ejemplo, abierto para que se vean los engranajes que mueven el fluido.

Los engranajes encajan perfectamente por lo que, al girar, el fluido avanza por el borde exterior desde la cámara de baja presión hasta la de alta presión, que corresponden a los dos huecos a la derecha y a la izquierda del punto donde se unen los engranajes, en la Figura 12.5.



Figura 12.5. Vista frontal y lateral de una bomba de engranaje abierta.

### b) Según la variabilidad del desplazamiento

En función de la variabilidad del desplazamiento, las máquinas de desplazamiento positivo se pueden clasificar en dos grupos: máquinas de desplazamiento fijo, y máquinas de desplazamiento variable.

Se refiere esta clasificación a la posibilidad de variar el caudal de la máquina sin modificar la velocidad de giro del motor que la mueve. En las de desplazamiento fijo, no hay posibilidad de variar el caudal sin cambiar la velocidad de giro. En las de desplazamiento variable, sí se puede modificar el caudal sin cambiar la velocidad de giro del motor. En general, hay dos posibilidades, para conseguir esta modificación: modificar la carrera, o modificar la excentricidad.

La carrera está relacionada con las máquinas alternativas, mientras que la excentricidad está relacionada con algunas máquinas rotativas. La carrera es el recorrido que hace el émbolo dentro del cilindro, desde la posición más cercana hasta la más alejada. Cuando la carrera aumenta, el volumen de líquido desplazado en cada embolada es superior, lo que aumenta el caudal aunque las emboladas se produzcan a la misma velocidad.

La excentricidad se relaciona con bombas rotativas en las que el elemento desplazador y la carcasa, cada uno de simetría circular, tienen sus centros en distinta posición geométrica. La excentricidad se define como la distancia entre ambos centros. Aumentar la excentricidad permite un mayor desplazamiento de volumen, lo que aumenta el caudal con la misma velocidad de giro.

### 12.3. Bombas de Émbolo

Para ilustrar el comportamiento de las bombas de desplazamiento positivo alternativas, se va a centrar este apartado en las bombas de émbolo, como representantes más comunes del grupo. Estas bombas se emplean en el bombeo de líquidos (por ejemplo, en las bombas cromatográficas) y, sobre todo, en transmisiones hidráulicas (el accionamiento del freno de un automóvil, por ejemplo) y neumáticas.

En este tipo de bombas, no existen problemas de cebado, puesto que se mantiene el caudal independientemente del fluido que la llene y, tarde o temprano, el líquido acabará alcanzando la bomba. Sin embargo, cuando el flujo es muy pequeño, y los tubos muy finos (como en aplicaciones cromatográficas) puede ser necesario cebarla debido a la pérdida de carga generada.

La Figura 12.6 muestra el esquema de una bomba de émbolo, donde se indica la carrera,  $s$ , y las válvulas anti-retorno.

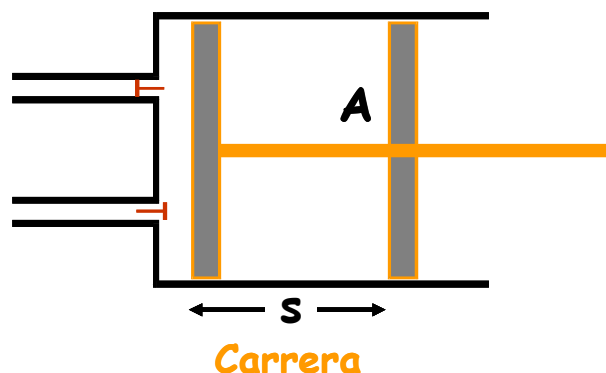


Figura 12.6. Esquema de una bomba de émbolo.

El caudal teórico medio que proporciona este tipo de bombas viene dado por la expresión:

$$Q_t = \frac{A \cdot s \cdot n}{60} \quad [m^3/s = m^2 \cdot m \cdot 1/\text{min} / \text{s/min}] \quad (12.4)$$

que es independiente de la presión, donde  $n$  indica las veces por minuto que el émbolo hace un recorrido de ida y vuelta, asociadas a las vueltas por minuto de velocidad de giro del motor acoplado a la bomba, a través de una biela.

La forma de modificar el caudal, en este tipo de bombas, es modificar la carrera (si se puede), puesto que  $n$  está limitado por la inercia. La máxima velocidad de avance del émbolo está limitada en, aproximadamente, 1,5 m/s. Otra posibilidad es realizar un by-pass entre el tubo de impulsión y el de aspiración, con una válvula de regulación. Cuando se cierra la válvula, se cierra el by-pass, y todo el fluido circula por el tubo de impulsión, produciendo el caudal máximo. A medida que la válvula del by-pass se abre, parte del fluido circula por él desde la impulsión hacia el tubo de aspiración, que está a menor presión, de modo que el caudal que avanza por la impulsión disminuye. Debe quedar muy claro que en este tipo de bombas no se puede colocar una válvula de regulación en la impulsión para regular el caudal, como ya se ha explicado en el punto 12.1.

El caudal real medio que proporciona la bomba es inferior al teórico, y está relacionado con el caudal teórico medio por el rendimiento volumétrico,  $\eta_v$ :

$$Q = Q_t \cdot \eta_v \quad (12.5)$$

El rendimiento volumétrico en este tipo de bombas suele estar comprendido entre 0,85 y 0,99, debido a las pérdidas de fluido que se producen en prensaestopas, émbolo, válvulas, etc., tanto mayores cuanto mayor es la presión a la que opera la bomba.

El caudal instantáneo que proporciona este tipo de bombas es sinusoidal, no constante, ya que la biela produce velocidad máxima del émbolo en el punto central del cilindro, y velocidad nula en ambos extremos, en el cambio de sentido de avance, como se muestra en la Figura 12.7. Además, durante el retroceso del émbolo y llenado de la cámara no se produce caudal.

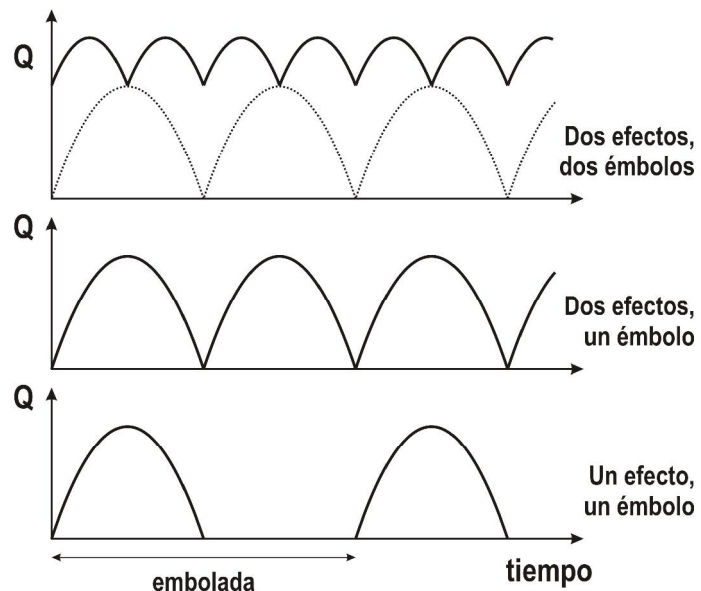


Figura 12.7. Caudal instantáneo en bombas de émbolo, con el tiempo.

Esto es un problema importante en muchas aplicaciones, por lo que es frecuente que este tipo de bombas no funcione en efecto simple, sino aprovechando el émbolo en

ambos sentidos, en doble efecto y, si es necesario que el caudal oscile muy poco, con dos cilindros acoplados, moviéndose a la misma velocidad, pero desplazados en el tiempo, como se muestra en la Figura 12.7.

La potencia indicada, o interna, se define, de acuerdo con la ecuación (12.2) y la ecuación (12.1), como:

$$P_i = p_i \cdot Q_t = p_i \cdot \frac{A \cdot s \cdot n}{60 \cdot \eta_v} \quad (12.6)$$

donde  $p_i$  es la presión en el interior de la bomba. El rendimiento hidráulico viene dado por:

$$\eta_h = \frac{P}{P_i} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{p_i \cdot Q_t} = \frac{H \cdot \eta_v}{\left( \frac{p_i}{\rho \cdot g} \right)} \quad (12.7)$$

El rendimiento global de este tipo de bombas,  $\eta$ , que incluye también el rendimiento mecánico, está comprendido entre 0,7 y 0,92, y aumenta con el tamaño de la bomba.

#### 12.4. Máquinas de Fluidos Rotoestáticas

Las máquinas de fluidos rotatorias o rotoestáticas se caracterizan por que el elemento de transferencia de energía entre la máquina y el fluido gira, pero dentro de esta característica general hay una inmensa variedad de modelos, hidráulicamente reversibles en general.

En función del elemento desplazador giratorio, se clasifican en: máquinas de émbolos; máquinas de paletas, que incluye las peristálticas; y máquinas de engranajes. En el punto 12.2 se han mostrado imágenes de algunas de ellas. Cada una de ellas, además, puede ser de desplazamiento fijo o variable, en función de que el caudal pueda modificarse sin cambiar la velocidad de giro del motor.

##### 12.4.1. Máquinas Rotoestáticas de Émbolos

Las máquinas rotoestáticas de émbolos son máquinas excéntricas, donde la excentricidad del elemento giratorio con respecto a la cámara modifica la posición de un émbolo, causando un aumento de volumen de cámara en la zona de aspiración y una disminución del volumen de cámara en la zona de impulsión. La Figura 12.8 muestra un esquema de este tipo de máquinas, con diferente posición del émbolo durante el giro, y una vista lateral que indica dónde están conectados los tubos de aspiración e impulsión.

El caudal de este tipo de bombas se puede modificar (en función del diseño) variando la excentricidad. Dado que se modifica la posición de un émbolo, la expresión de los caudales es similar a la de las bombas alternativas de émbolo. Sin embargo, de acuerdo

con la Figura 12.8, la carrera se sustituiría en este caso por la excentricidad ( $e$ , distancia entre los centros del elemento desplazador y de la carcasa), de modo que:

$$Q_t = \frac{A \cdot e \cdot n}{60} \quad (12.8)$$

Si hubiese más de un émbolo en el elemento desplazador, habría que multiplicar por el número de émbolos, para considerar el volumen total desplazado por vuelta.

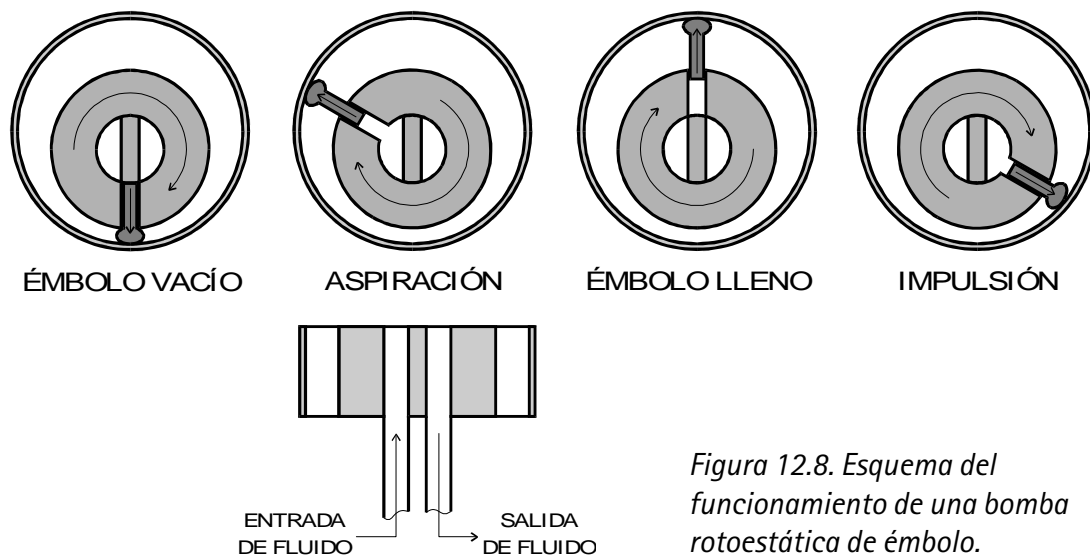


Figura 12.8. Esquema del funcionamiento de una bomba rotoestática de émbolo.

#### 12.4.2. Máquinas Rotoestáticas de Paletas

En las máquinas rotatorias de paletas, el volumen desplazado se encuentra en la parte exterior, entre el elemento desplazador y la carcasa, como se puede ver en el esquema de la Figura 12.9, donde se muestra una vista frontal y una vista lateral de la bomba.

En este tipo de bombas, el caudal teórico viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{2 \cdot e \cdot b \cdot [\pi \cdot (d - e) - \delta \cdot z] \cdot n}{60} \quad (12.9)$$

donde el término  $2 \cdot e \cdot b \cdot [\pi \cdot (d - e) - \delta \cdot z]$  corresponde al volumen de fluido desplazado por vuelta:  $e$  es la excentricidad,  $b$  es la altura de la bomba,  $d$  es el diámetro interno de la carcasa,  $z$  es el número de paletas, y  $\delta$  es el espesor de cada paleta. En este caso, el caudal también podría modificarse cambiando la excentricidad, aunque depende del diseño.

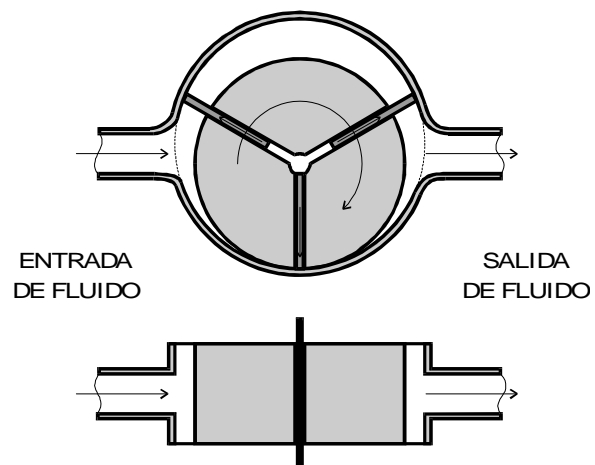


Figura 12.9. Esquema de una máquina rotoestática de tres paletas.

### 12.4.3. Máquinas Rotoestáticas de Engranajes

La Figura 12.5 muestra dos imágenes de una bomba rotativa de engranajes. En este tipo de bombas, el caudal sólo se puede modificar si se cambia la velocidad de giro, ya que el volumen desplazado depende de los engranajes, y no es modificable. El caudal teórico en bombas de engranajes viene dado por:

$$Q_t = \frac{2 \cdot A \cdot b \cdot z \cdot n}{60} \quad (12.10)$$

donde, de nuevo, el término que multiplica a  $n/60$  corresponde al volumen de fluido desplazado por vuelta:  $A$  es el área ocupada por cada diente,  $b$  es la altura del engranaje,  $z$  es el número de dientes que tiene cada rueda, y 2 es el número de ruedas.

### 12.5. Comparación entre Bombas de Desplazamiento Positivo y Rotodinámicas

Tras todo lo visto a lo largo del tema y en la asignatura, se puede hacer una comparación entre las características de las bombas de desplazamiento positivo y las rotodinámicas.

#### a) Sobre la presión

Las bombas de desplazamiento positivo trabajan, normalmente, a presiones mayores que las rotodinámicas: las bombas alternativas pueden operar hasta unos 1.000 bares de presión, y las rotativas o rotoestáticas hasta unos 30 bares. Por su parte, las bombas rotodinámicas pueden también producir incrementos de presión muy elevados, de hasta unos 350 bares, pero se requiere para ello de múltiples efectos. Múltiples efectos es equivalente a la colocación de varias bombas en serie, por lo que, si se analiza la expresión para el rendimiento de la ecuación (10.15) para bombas en serie, se puede apreciar que muchos efectos producen una importante reducción del rendimiento de la bomba.

#### b) Sobre el caudal

Las bombas de desplazamiento positivo producen caudales más pequeños que las bombas rotodinámicas, mucho menores en las bombas alternativas que en las rotativas, para el mismo volumen de bomba. Esto es debido a la limitación de la velocidad de giro máxima por la inercia.

Se puede relacionar este comportamiento (presión y caudal) con la velocidad específica, y deducir que las bombas alternativas operan a velocidad específica muy inferior a las bombas rotativas, y éstas, a su vez, a velocidad específica inferior a las bombas rotodinámicas.

En relación con todo esto, las bombas alternativas suelen tener un tamaño muy superior al de las bombas rotodinámicas.



## c) Sobre el rendimiento

Las bombas de desplazamiento positivo suelen presentar rendimientos globales superiores a los de las bombas rotodinámicas.

## d) Sobre la potencia

Dado que las bombas alternativas suelen tener un tamaño muy superior al de las bombas rotodinámicas, su potencia específica (por unidad de masa) es inferior.

## e) Sobre su comportamiento mecánico

En el caso de las bombas alternativas, el movimiento de oscilación produce vibraciones, lo que ocasiona desajustes y desgaste, por lo que las bombas requieren de más mantenimiento. Por otro lado, también contribuye a los requisitos de mantenimiento por desajustes y desgaste la necesidad de utilizar válvulas anti-retorno que están continuamente abriéndose y cerrándose.

Las bombas de desplazamiento positivo, a diferencia de las rotodinámicas, dada su baja velocidad de giro, no se pueden acoplar directamente a un motor eléctrico, sino que requieren de una reductora.

## f) Sobre su seguridad

Las bombas de desplazamiento positivo pueden producir roturas de la instalación por sobrepresión si se cierra una válvula en la impulsión, lo que puede resultar peligroso.

## g) Sobre su coste

Las bombas de desplazamiento positivo, y particularmente las alternativas, resultan más caras, tanto en adquisición como en mantenimiento. A esto contribuyen muchos de los puntos que ya se han comentado: el buen ajuste entre las piezas para evitar pérdidas volumétricas, el tamaño, la necesidad de reductora, las válvulas anti-retorno, etc.

La mayor parte de los aspectos comentados son desventajas en contra de las bombas de desplazamiento positivo, por lo que, en la mayoría de las aplicaciones se colocan bombas rotodinámicas. Se colocan bombas de desplazamiento positivo sobre todo en aplicaciones específicas, en las que éstas presentan claras ventajas frente a las rotodinámicas, o las rotodinámicas presentan problemas.

Entre estas situaciones, cabe destacar las siguientes: cuando es muy importante controlar que el caudal alimentado sea constante, independientemente de las variaciones de presión que se puedan producir en la instalación; en transmisiones hidráulicas o neumáticas; o cuando es necesario bombear fluidos muy viscosos o con sólidos en suspensión (hormigón, por ejemplo).