



Sensores y Actuadores 22.88

Bombas

Definición

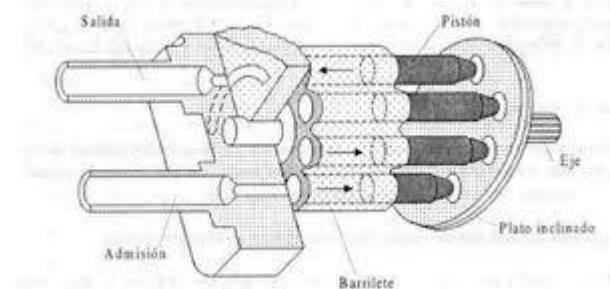
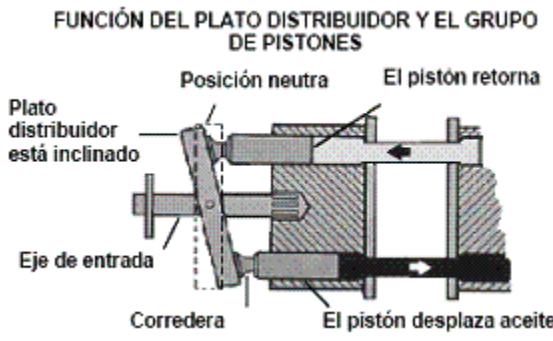
Una bomba es un dispositivo que agrega energía a un fluido.

Un aumento de la energía se traduce en un aumento de la presión y el caudal.

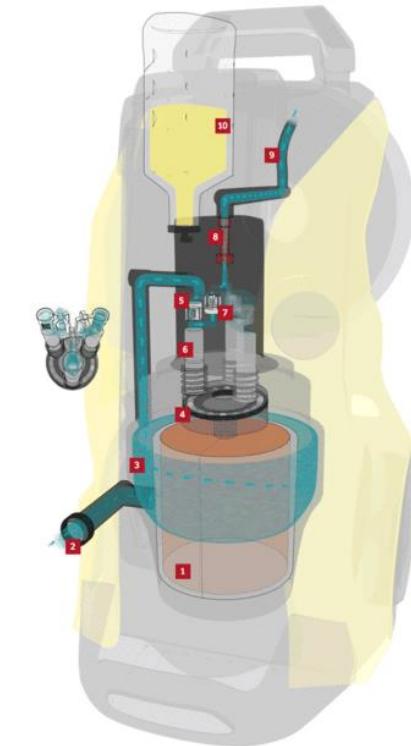
Tipos de Bombas

- **Bombas Rotodinámicas:** Se basan en aumentar la velocidad del fluido para generar caudal.
 - Pueden operar con una válvula cerrada en la descarga
 - Son utilizadas para producir un fluido continuo
 - El caudal es inversamente proporcional al ΔP
- **Bombas de Desplazamiento Positivo:** Se basan desplazar el fluido atrapado mediante un movimiento mecánico que no se ve afectado por la presión del fluido.
 - No pueden operar con una válvula cerrada en la descarga dado que habría una sobrepresión.
 - Son utilizadas para generar un caudal preciso y/o para bombear fluidos viscosos o con sólidos en suspensión.
 - El caudal es independiente del ΔP

Bombas de pistones axiales



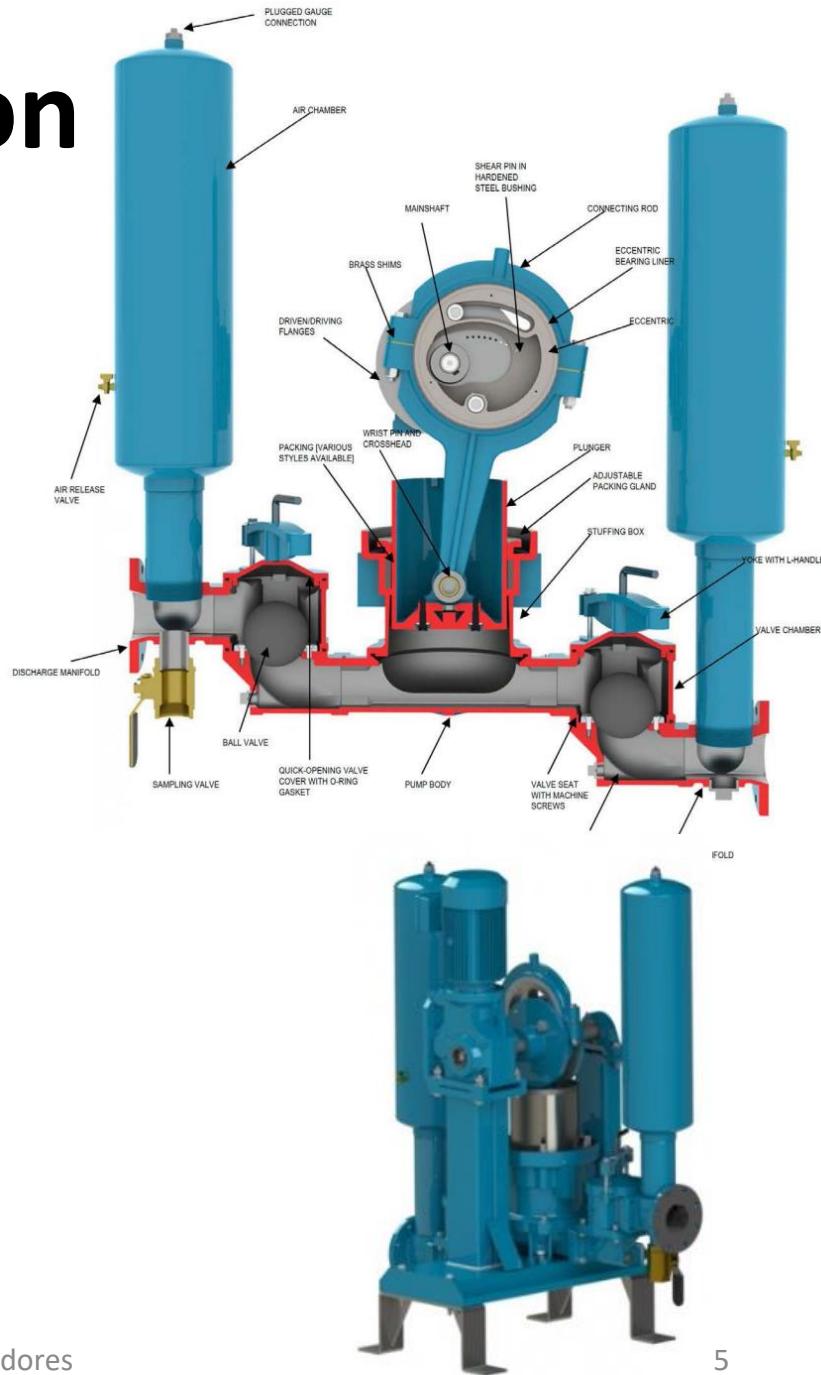
- Es una bomba de desplazamiento positivo reciprocatante.
- Pensadas para bombear líquidos a altas presiones (>100bar).
- Utilizadas por ejemplo en hidrolavadoras.
- Alterando el ángulo del plato distribuidor se puede regular el caudal de la bomba



https://www.youtube.com/watch?v=8I5FtW2E4_A

Bomba a piston

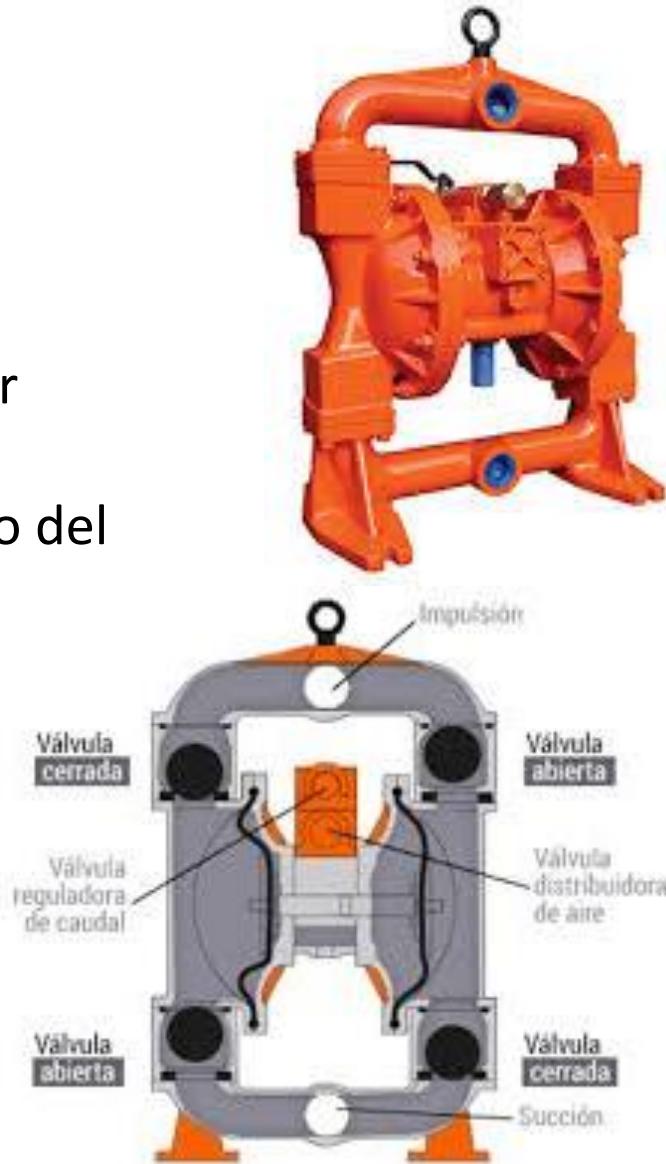
- Embolo movido por un motor electrico y valvulas de retención en la succión y descarga
- Posee camaras de aire presurizadas en la entrada y salida como amortiguadores
- Pueden suministrar grandes caudales (100m³/h o más)
- Utilizada en plantas potabilizadoras de agua.



Bombas a Diafragma o Membrana

- Es una bomba de desplazamiento positivo reciprocente.
- Normalmente neumáticas, aunque existen alternativas eléctricas.
- Suelen ser de doble diafragma para una mejor eficiencia y caudal.
- La presión de salida es proporcional al tamaño del diafragma y a la presión del aire comprimido utilizado para impulsarla.
- Ideal para usar en zonas explosivas.
- Pueden bombear líquidos acuosos sin presentar sólidos en suspensión.
- No requieren una válvula de alivio a la salida

<https://www.youtube.com/watch?v=7Ipms2yTK-o>

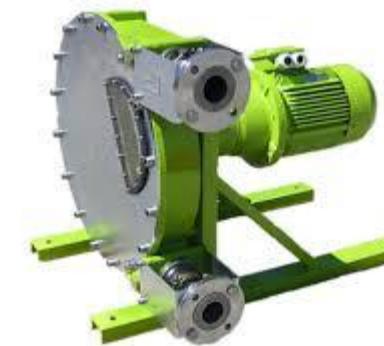
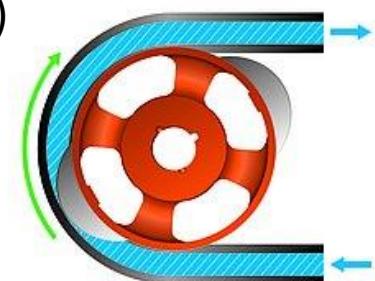


Bombas Peristálticas

- Es una bomba de desplazamiento positivo usada para bombear líquidos acuosos y viscosos.
- El fluido es contenido dentro de un tubo flexible (manguera).
- El rotor posee un cierto número de rodillos o zapatas que comprimen el tubo flexible.
- Mientras que el rotor da vuelta, la parte del tubo bajo compresión se cierra (o se ocuye) forzando, de esta manera, el fluido a ser bombeado para moverse a través del tubo.
- Son muy utilizadas para bombear fluidos muy viscosos y en aplicaciones fluidos estériles (la manguera es parte del sistema estéril) o bien con fluidos agresivos o peligrosos.
- Típicamente pueden operar hasta los 16bar.
- Se requiere una válvula de alivio a la salida.

<https://youtu.be/RN5ACUS7BkI>

<https://youtu.be/ux6v4EUOHBk>

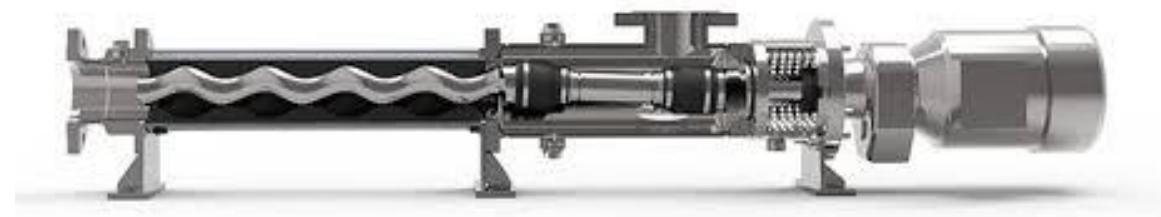


Bombas de dosificación

- Son bombas a membrana o peristálticas
- Con motor eléctrico y para uso específico de dosificación precisa de fluidos a caudales bajos
- La bomba auto-regula el caudal y volumen doficicado. De esta forma se evita la compra de un caudalímetro adicional.
- Suelen ser inteligentes y están disponibles con diversos protocolos de comunicación



Bombas de Cavidad Progresiva



- Esta bomba utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa.
- Entre rotor y estator se definen cavidades que están selladas.
- Al girar el rotor, estas cavidades se desplazan o progresan, en un movimiento combinado de translación y rotación lo cual se manifiesta en un movimiento helicoidal de las cavidades desde la succión a la descarga de la bomba.
- Está específicamente indicada para bombear fluidos acuosos o viscosos con altos contenidos de sólidos, que no necesiten removverse o que formen espumas si se agitan.
- Características:
 - Alta eficiencia energética
 - Muy buena resistencia a la abrasión
 - Bajo mantenimiento
 - Bajo nivel de ruido
 - Para bajos caudales (<5m³/h)

<https://www.youtube.com/watch?v=FX97BUQbD-c>

Bomba Lobular

- Las bombas lobulares son bombas volumétricas rotativas.
- El bombeo está producido por 2 lóbulos que giran en sentido contrario, para conducir el líquido al espacio entre el cuerpo y un lóbulo.
- El efecto es suave, con buena aceptación de grandes partículas en suspensión.
- Son equipos de una gran fiabilidad y de bajo costo de mantenimiento.

Características:

- Trabajan con fluidos de cualquier viscosidad
- No les afectan los sólidos en suspensión
- Gran resistencia a la abrasión y vida útil
- Autocebantes
- Reversibles
- Amplio rango de caudales y presiones (hasta 120m³/h y 10bar)



Bomba de doble tornillo

- Durante el bombeo no hay contacto de metal con metal dentro de la carcasa de la bomba. Esto permite un buen rendimiento de bombeo incluso con fluidos no lubricantes, corrosivos y contaminados.
- A medida que la bomba gira, la unión de los dos tornillos junto con la carcasa de la bomba forman cámaras. Estas cámaras se llenan con el fluido bombeado y lo mueven desde el lado de succión de la bomba al lado de descarga de mayor presión de la bomba.
- La bomba está diseñada para permitir el flujo inverso simplemente cambiando la dirección del eje. La succión se convierte en la descarga y viceversa, todo sin modificaciones en la bomba.



<https://www.youtube.com/watch?v=Prd8r-cZTZY>

Bomba de doble tornillo

Ventajas:

- Autocebante
- Capacidad bombeada proporcional a la velocidad
- Construcción compacta
- Cambio de dirección de bombeo – simple
- Elementos de bombeo: fáciles de reemplazar
- Fácil mantenimiento
- Para casi todos los medios y fluidos
- Altas viscosidades posibles
- Pulsaciones bajas
- Bajo nivel de ruido
- Funcionamiento en seco posible
- Flujo constante en diferentes presiones y volúmenes.
- Muy buen rendimiento de succión hasta NPSH 1 – 1,5 m



Perdidas por fricción en cañerías

- Ecuación de Darcy Weisbach

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

h_f = pérdida de carga debido a la fricción [mca]

f = factor de fricción de Darcy adimensional

L = longitud de la tubería [m]

D = diámetro interno de la tubería [m]

v = velocidad media del fluido [m/seg]

- Puede ser escrita en función del caudal

$$h_f = \left(\frac{8 \cdot f}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \right) \cdot L \cdot Q^2$$

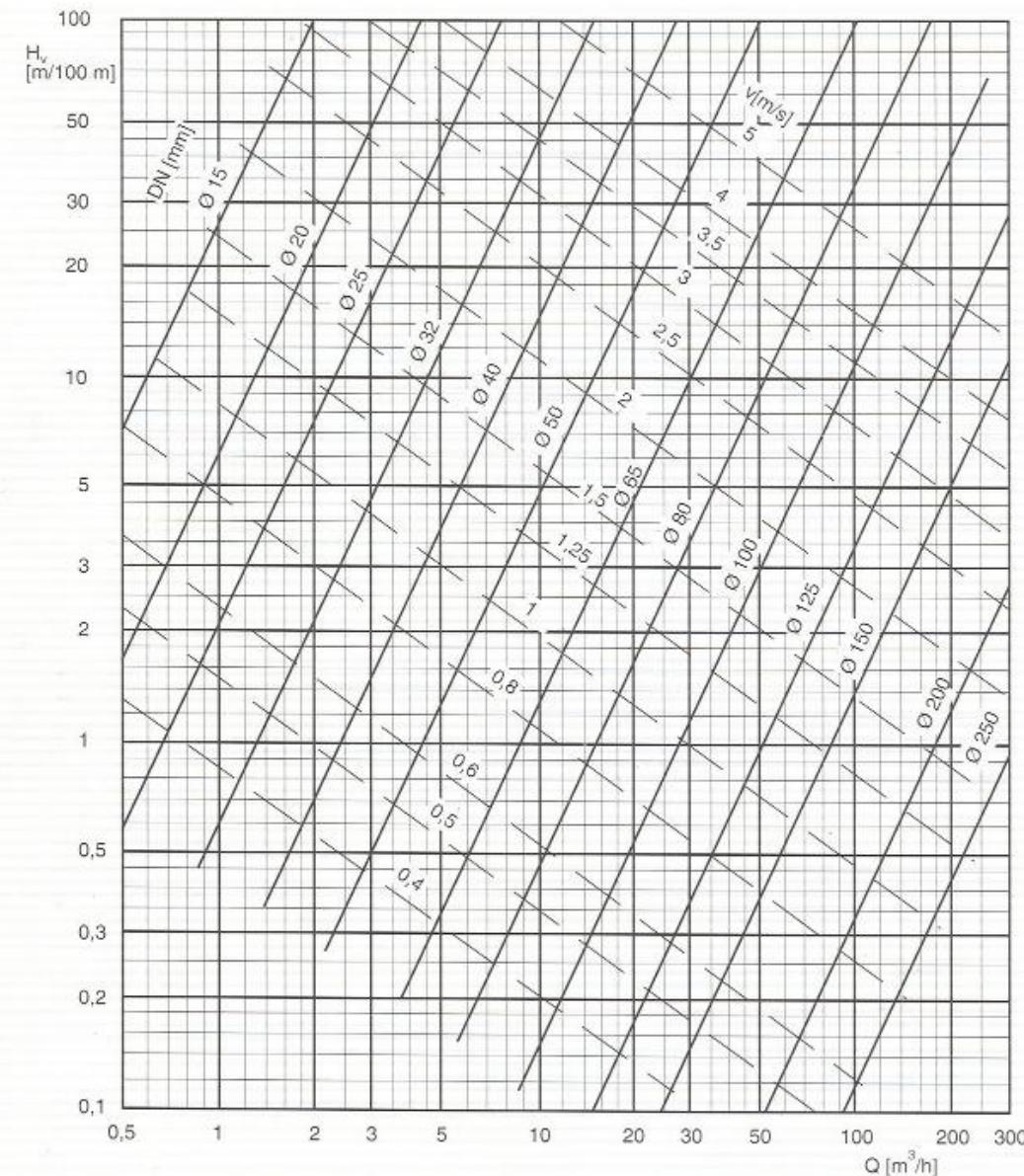
- El factor de fricción f es adimensional y varía de acuerdo a los parámetros de la tubería (rugosidad y diámetro) y del tipo de flujo (número de Reynolds).

Perdidas por fricción en cañerías

- De esta ultima expresión Podemos ver que:
 - Aumenta linealmente con el largo de la cañería
 - Aumenta linealmente con la rugosidad del caño y/o la turbulencia en la misma
 - Aumenta cuadraticamente con el caudal
 - Disminuye con la 5ta potencia del diametro de la cañería

Perdidas por fricción en cañerías

- Ejemplo tabla de caída de presión cada 100m de tuberías de distinto tamaño con rugosidad $k=0,05\text{mm}$ para agua con $1400 < \text{Re} < 3500$ (entre laminar y turbulento).



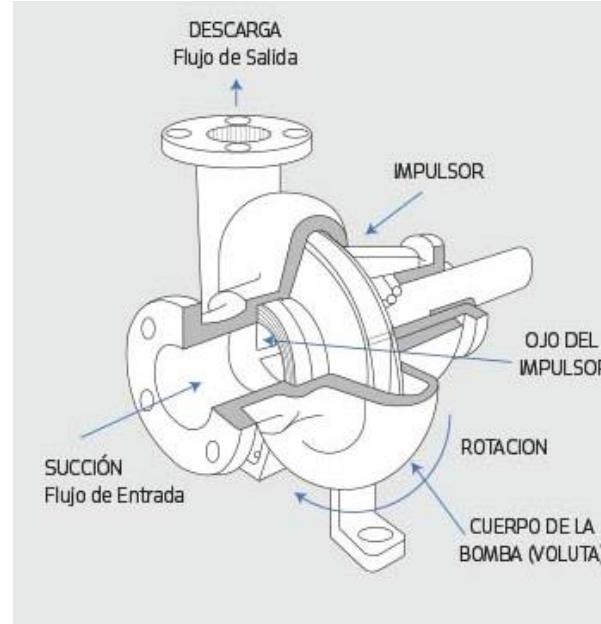
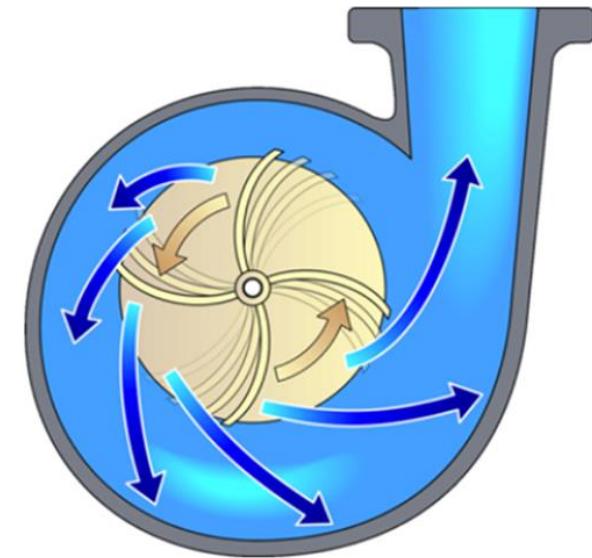
Perdidas por fricción en cañerías

- Ejemplo tabla de conversión de distinto tipo de restricciones a metros de cañería equivalentes
- Valido para cañerías con rugosidad $k=0,05\text{mm}$ y agua con velocidades entre 1 y 3m/seg

Armatur / Fitting	Nennweite in mm / Nominal width in mm								
	25	32	40	50	65	80	100	125	150
$\zeta = 0,05$ Reduzierung / reducer	0,05	0,07	0,09	0,12	0,17	0,20	0,28	0,40	0,48
T-Stück / tee									
$\zeta = 0,15$ Bogen / bend 45°	0,14	0,20	0,27	0,35	0,50	0,60	0,85	1,20	1,40
$\zeta = 0,25$ Bogen / bend 90°	0,25	0,35	0,45	0,60	0,80	1,00	1,35	1,90	2,4
Erweiterung / extension Scheibenventil / butterfly valve Einlauf / inlet (Tankauslauf) / (tank outlet)									
$\zeta = 0,90$ T-Stück / tee	0,90	1,20	1,60	2,00	3,00	3,70	5,20	7,00	8,80
$\zeta = 1,30$ T-Stück / tee	1,20	1,80	2,30	3,00	4,30	5,40	7,40	10,00	12,50
$\zeta = 1,5$ Rückschlagklappe / reflux valve	1,40	2,10	2,70	3,50	5,00	6,30	8,50	11,50	14,50

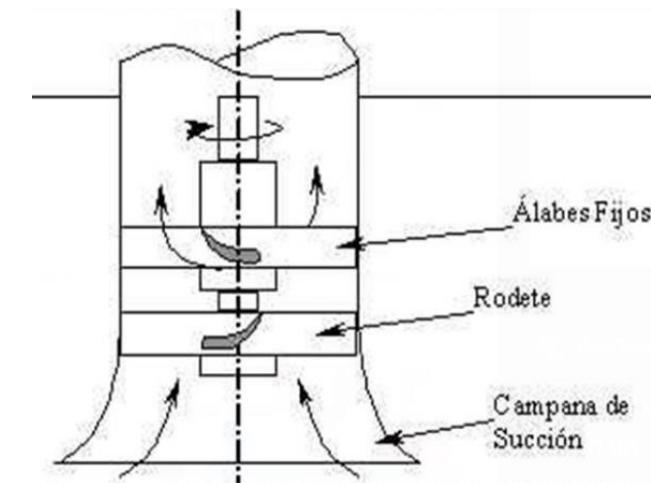
Bombas Centrífuga

- El fluido es succionado e ingresa a la bomba a través del ojo del impulsor.
- El impulsor le agrega energía cinética mediante la acción Centrífuga.
- A medida que el fluido pasa a través del cuello de la voluta, su velocidad decrece debido al aumento de la sección y su presión aumenta.



Bombas Axiales

- Las bombas de flujo axial, también conocidas como bombas de hélice o codo, se utilizan en aplicaciones de alto caudal y baja presión.
- La bomba se compone de una hélice de múltiples álabes-guías fijos por delante y por detrás del rodete.
- El impulsor o rodete tiene la forma de hélice de 2 a 6 aspas, por lo que estas bombas se llaman también de hélice. La acción es pues, similar a la de una hélice de barco, ya que arrastra el agua a través de los álabes directrices de entrada y descarga a través de las álabes-guía de salida.



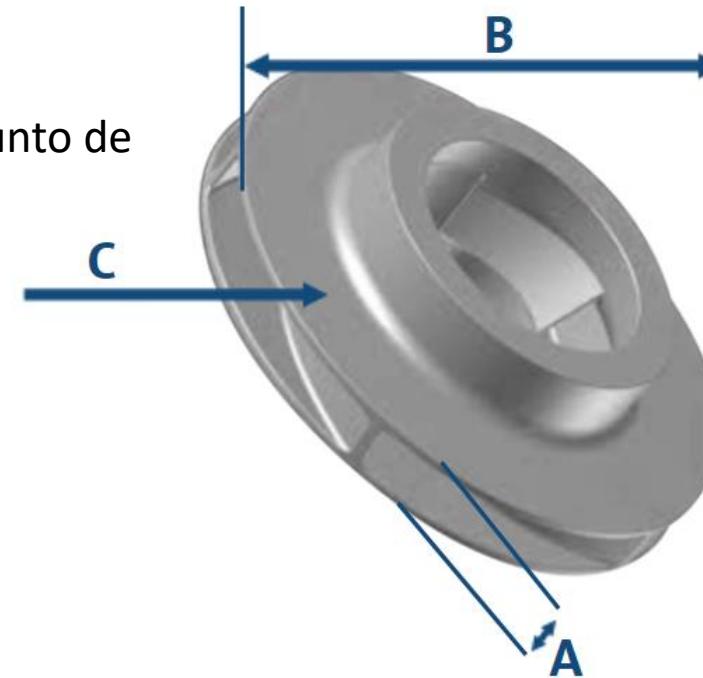
Impulsor de una Bomba Centrífuga

Características constructivas de un impulsor:

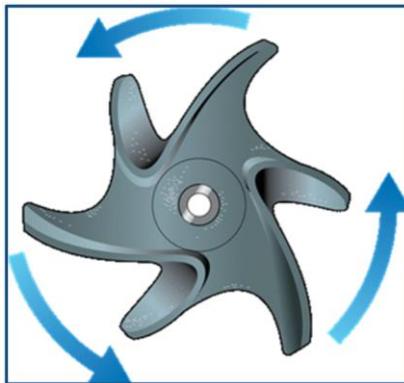
A → Ancho = Caudal

B → Diámetro = $\Delta P / H$

C → Diseño del impulsor = Eficiencia y Punto de
Máxima Eficiencia

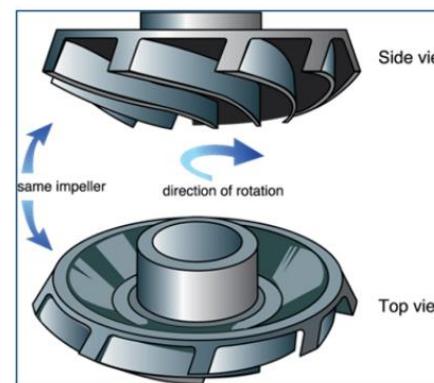


Tipos de impulsores/rodetes



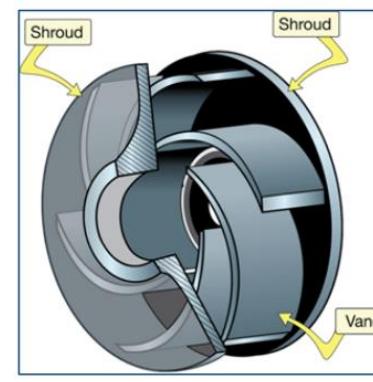
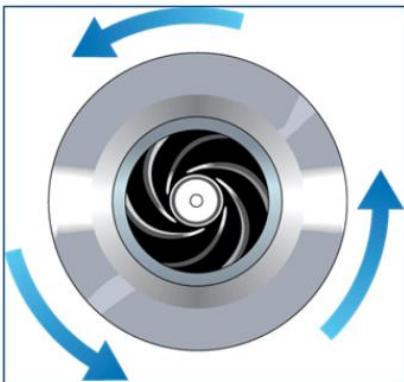
Abiertos:

- Caudal Alto
- Baja presión
- Baja eficiencia



Semi-Abiertos:

- Caudal medio
- Presión media
- Eficiencia media



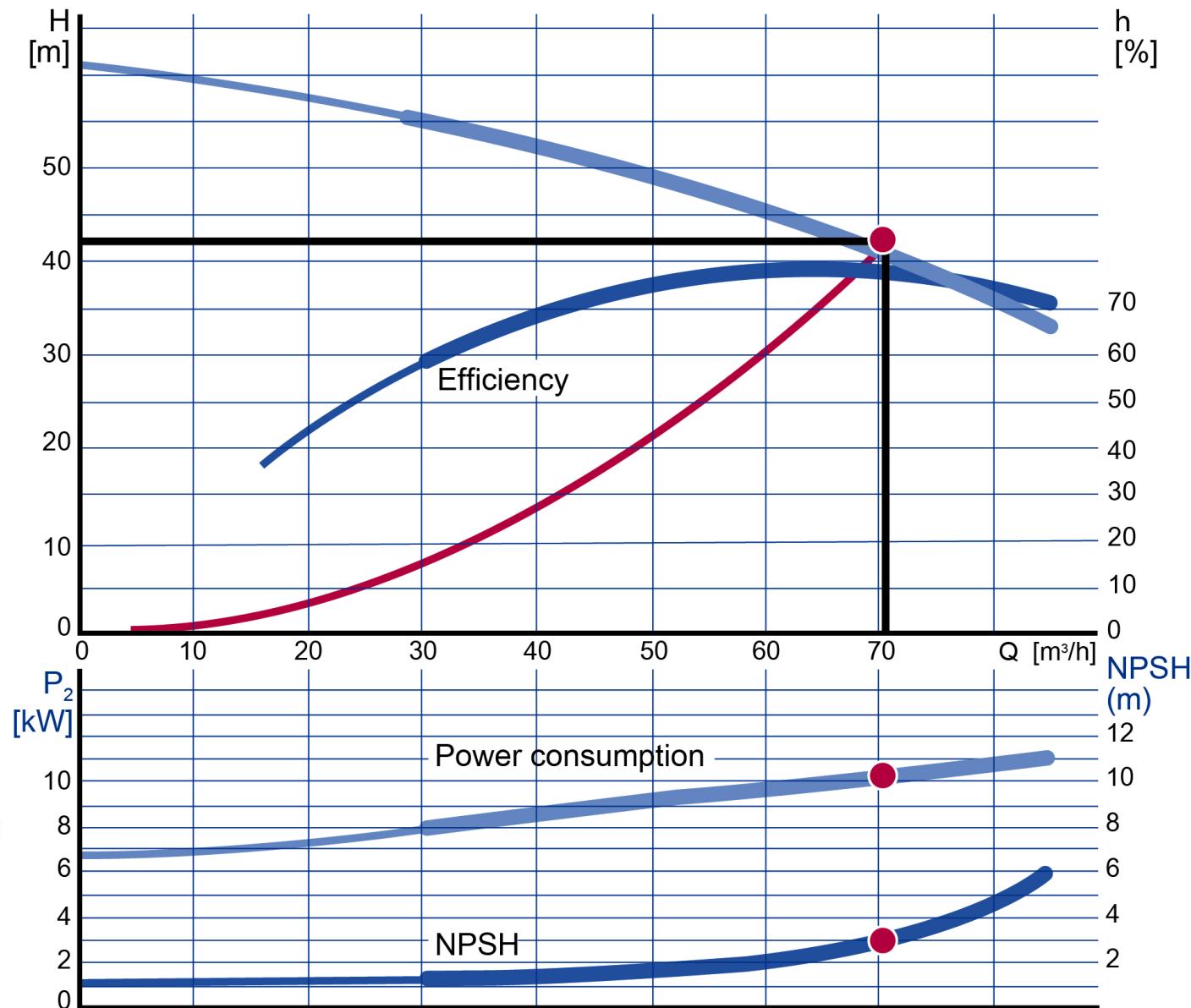
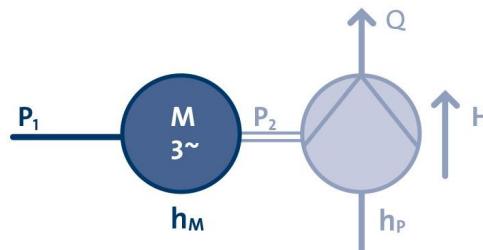
Cerrados:

- Caudal bajo
- Presión alta
- Eficiencia alta

Bomba Centrífuga - Curvas

El rendimiento de una bomba Centrífuga se muestra mediante las curvas de rendimiento.

Estas curvas detallan la altura, consumo de potencia, eficiencia y NPSH en función del caudal **de agua a 20°C**.

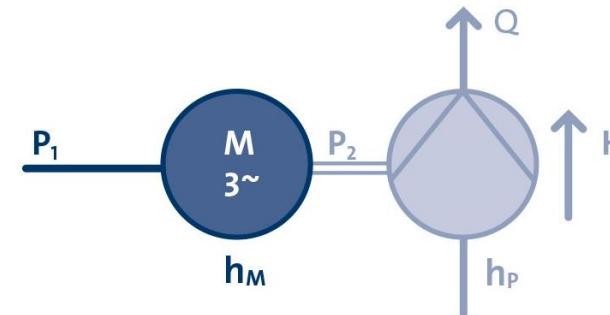


Bomba Centrífuga - Curvas

- Normalmente las curvas de bomba en los catálogos técnicos solo cubren la parte de la bomba y no contemplan al motor, es por eso que:
 - El consumo de potencia corresponde al valor de P_2 .
 - El valor de eficiencia solo hace referencia a la bomba ($\eta = \eta P$).
- En algunos tipos de bomba con motor integrado, la curva de consumo de potencia y la curva η cubren tanto el motor como la bomba. En este caso, es el valor P_1 el que se tendrá en cuenta.

En general, las curvas de la bomba están diseñadas de acuerdo a ISO 9906, que especifica las tolerancias de las curvas:

- Tolerancia $Q = +/- 9\%$
- Tolerancia $H = +/- 7\%$
- Tolerancia $P = +9\%$
- Tolerancia $\eta = -7\%$.

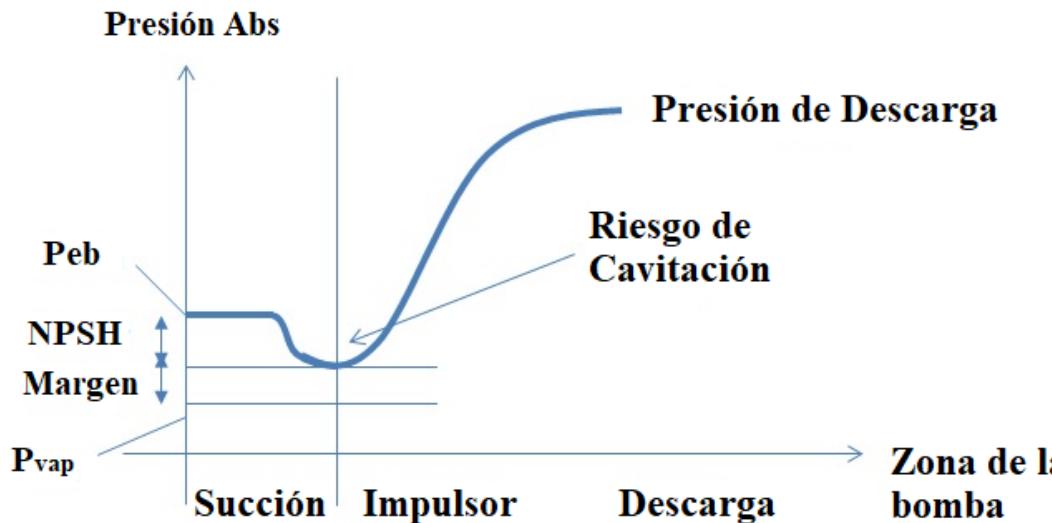


La potencia hidráulica puede calcularse como:

$$P_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600}$$

Bomba Centrífuga - Curvas

- NPSH (Net Positive Suction Head) o ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) es una expresión de la pérdida de presión que tiene lugar en el interior de la primera parte del cuerpo de la bomba.
- Los valores NPSH se miden en [m] y dependen del caudal; cuando el caudal aumenta, el valor NPSH también aumenta.
- Si la presión de entrada es demasiado pequeña, la NPSH hará que la presión existente en el interior de la bomba disminuya por debajo de la presión de evaporación.
- Como consecuencia, en la bomba se produce el efecto denominado **cavitación**, provocando ruido y produciendo roturas.
- **Para evitar la cavitación debemos asegurar que:** $P_{eb} > P_{vapor} + NPSH$



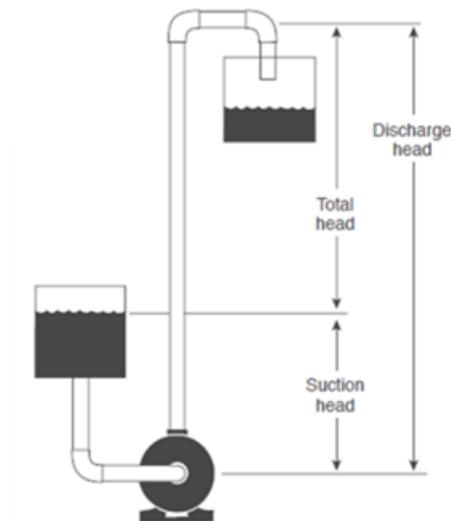
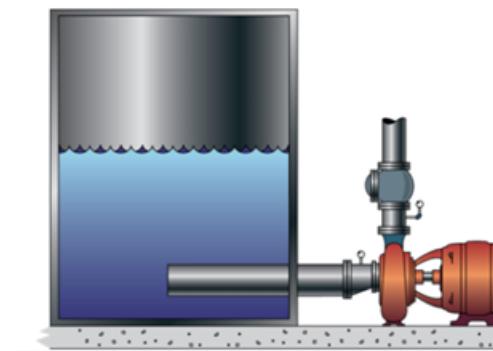
https://www.youtube.com/watch?v=Z9_db6kGC-Y

Condición de la succión

Tanque elevado:

El nivel del líquido es superior al nivel de la bomba previniendo la cavitación.

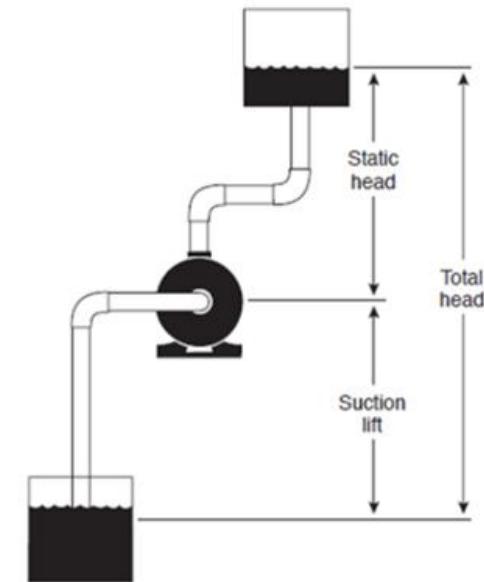
También reduce la altura total requerida por la bomba.



Tanque cisterna:

El nivel del líquido es inferior al nivel de la bomba aumentando el riesgo de cavitación.

También aumenta la altura total requerida por la bomba.



Calculo de altura máxima de succión

Para evitar cavitación, comprobar que haya una presión mínima en la aspiración de la bomba. La altura máxima de aspiración "H" en m.c.a. puede calcularse de la siguiente forma:

$$H = p_b \times 10,2 - NPSH - H_f - H_v - H_s$$

p_b = Presión barométrica en bar.
(La presión barométrica puede ajustarse a 1 bar). En sistemas cerrados, p_b indica la presión del sistema en bar.

NPSH = Net Positive Suction Head (altura positiva neta de aspiración) en m.c.a. (Leída de la curva NPSH al caudal más alto que dará la bomba.)

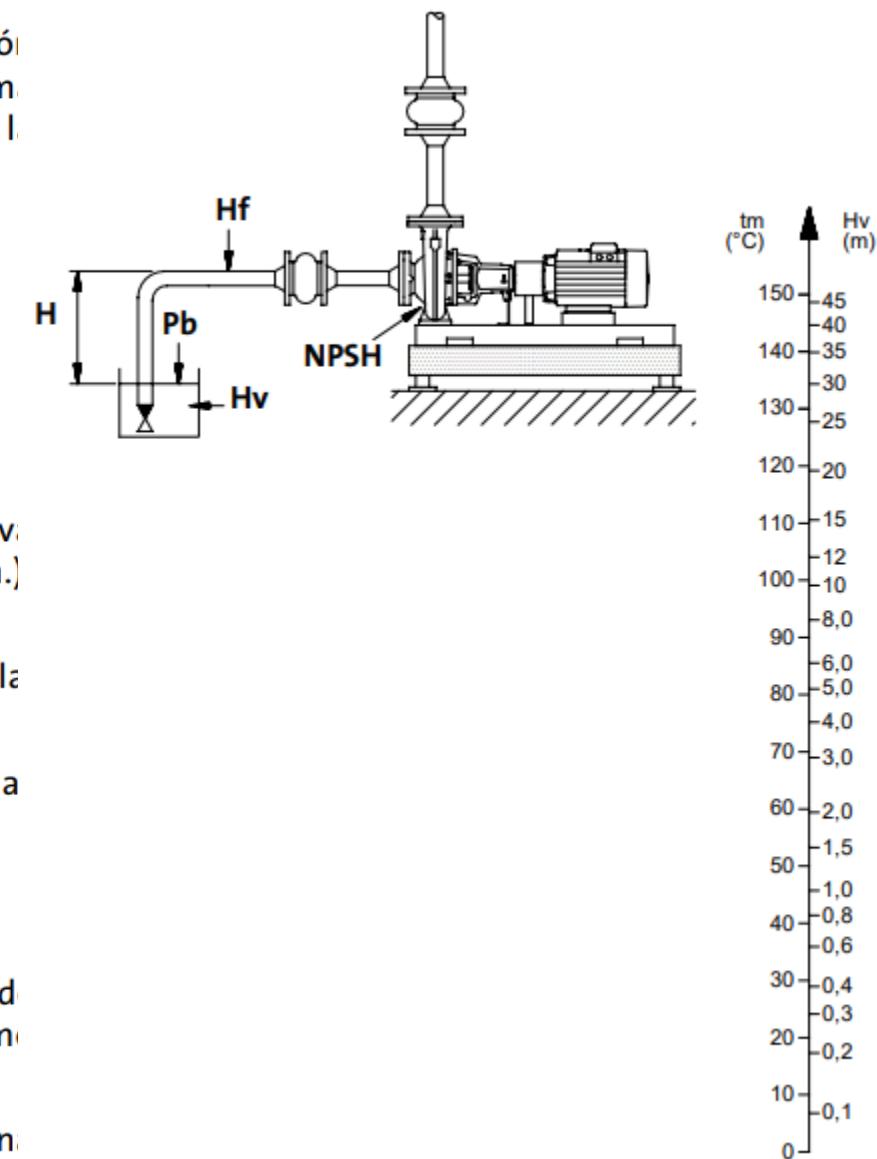
H_f = Pérdida por fricción en la tubería de aspiración en m.c.a. (Al caudal más alto que dará la bomba.)

H_v = Presión de vapor en m.c.a. (Leída de la escala de presión de vapor. " H_v " depende de la temperatura del líquido " T_m ".)

H_s = Margen de seguridad = mínimo 0,5 m.c.a.

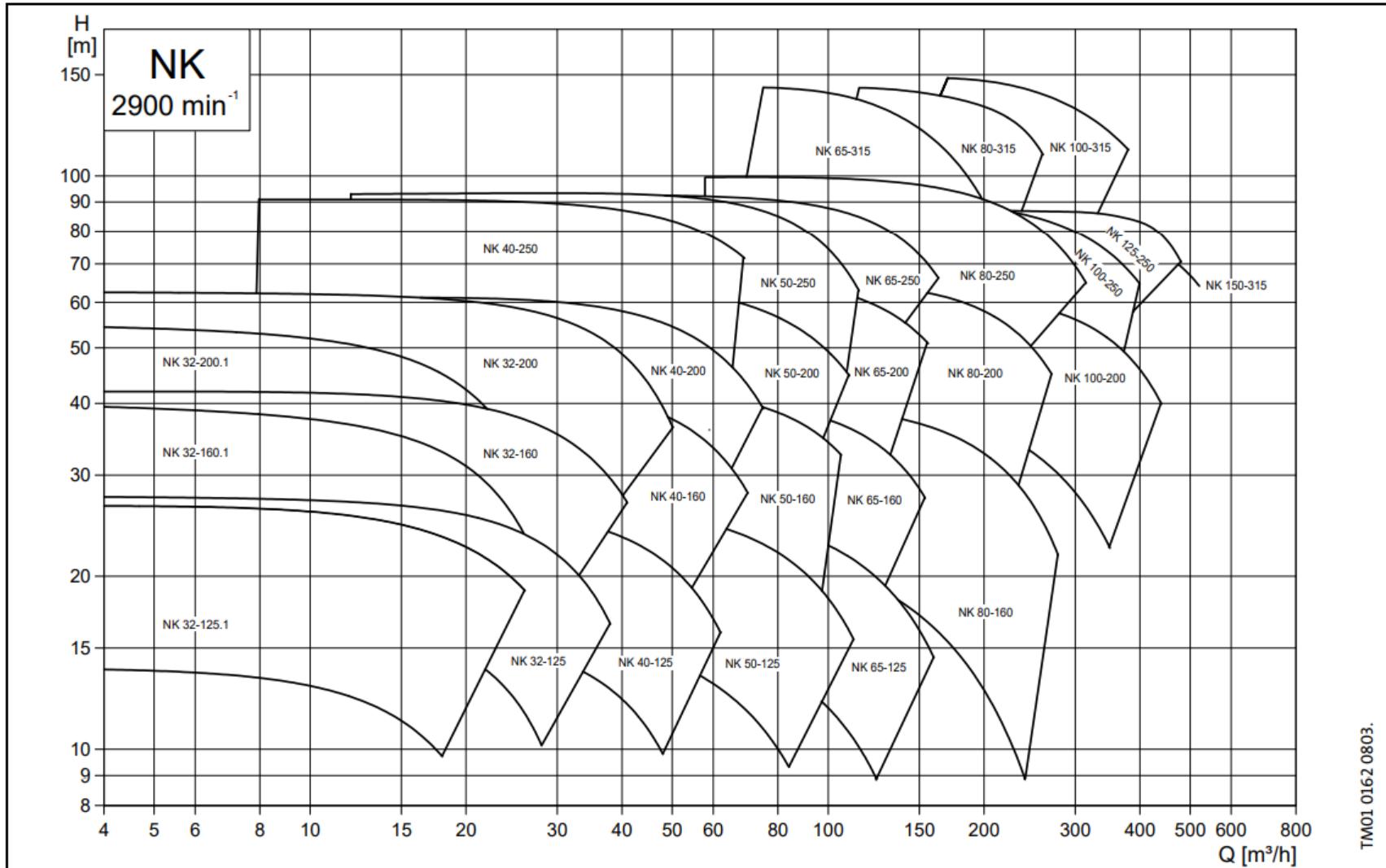
Si el valor de "H" calculado es positivo, la bomba puede trabajar con una altura de aspiración de "H" m.c.a. como máximo.

Si el valor calculado de "H" es negativo, se necesita una presión de entrada de "H" m.c.a. como mínimo.

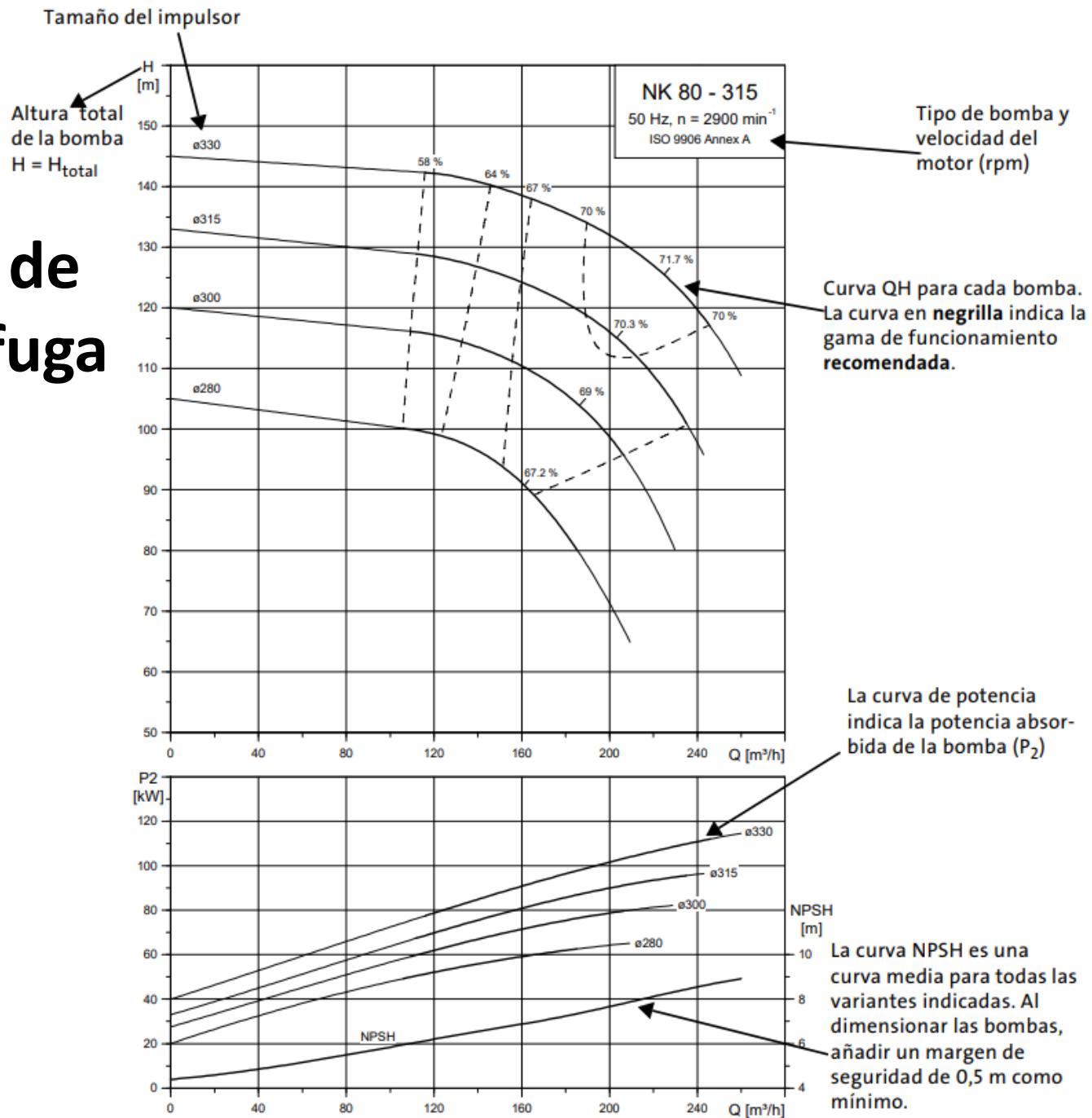


Curva Ejemplo Familia de Bombas

Gama de trabajo, 2900 min^{-1}



Curva modelo de bomba Centrífuga



Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad expresan la relación matemática que existe entre el caudal, la velocidad de la bomba (rpm), la altura y el consumo de energía para el caso de bombas centrífugas.

Las leyes muestran que incluso una pequeña reducción en el caudal se convertirá en reducciones importantes de potencia y, por tanto, de consumos energéticos. Las leyes son la base del ahorro energético.

Cuando se modifica una de las variables involucradas en el rendimiento de la bomba, las otras variables se pueden calcular utilizando la ley de afinidad.

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2$$

$$H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2$$

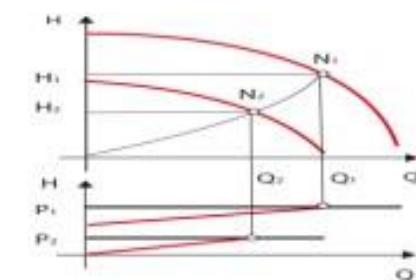
$$P_1/P_2 = (n_1/n_2)^3$$

Q = caudal [m³/h]

n = velocidad de la bomba [rpm]

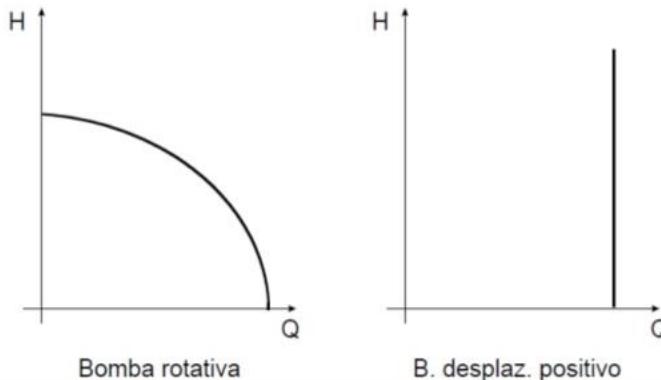
H = altura [bar o mca]

P = potencia [kW]

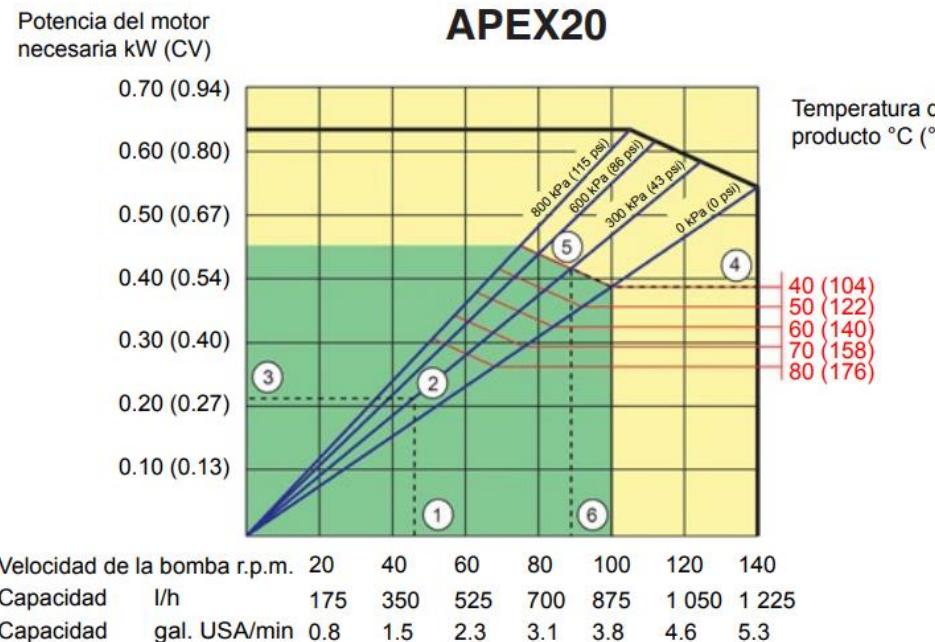


Las fórmulas muestran que si se disminuye la velocidad de la bomba en un 50%, el caudal también se reducirá en un 50%. La altura se reducirá al 25%, y el consumo de energía se reducirá al 12,5%

Curva de Centrífuga vs Positiva



Las curvas de las bombas tienen un enfoque totalmente distinto y apuntan exclusivamente a la potencia requerida para el motor.



- Funcionamiento continuo
- Funcionamiento intermitente*

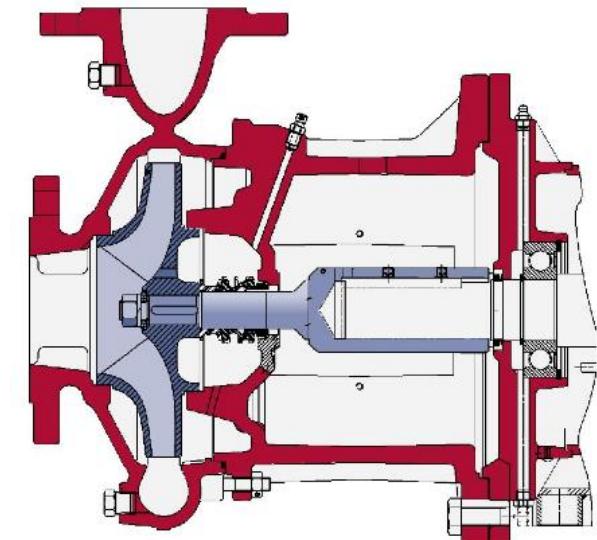
* Máximo 3 horas de funcionamiento seguido de 1 hora de parada como mínimo

1. El flujo necesario indica la velocidad de la bomba
2. Presión de descarga calculada
3. Potencia neta del motor necesaria
4. Temperatura del producto
5. Presión de descarga calculada
6. Velocidad máxima recomendada de la bomba

Bombas Centrífugas

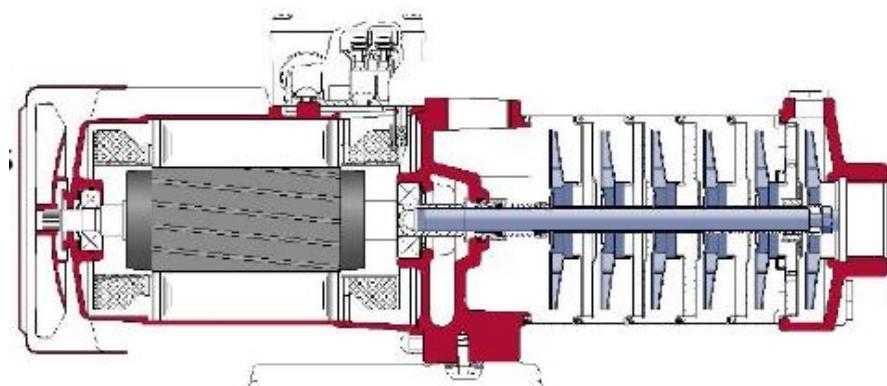
Bombas mono etapa o monocelulares:

- Son las vistas hasta ahora
- Solo tienen un rodeté/impulsor
- El fluido que sale del rodeté pasa a la voluta y luego sale de la bomba



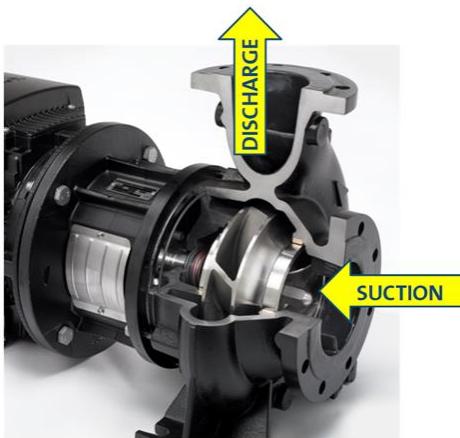
Bombas multi etapa o multicelulares:

- Tienen más de un rodeté/impulsor colocados en serie.
- Las bombas multietapa le sacan partido a la suma de la presión que se consigue al pasar el agua por varias etapas de bombeo puesto que cada impulsor suma presión a la que ha recibido de la etapa anterior, lo que supone mayor presión sin pérdida de eficiencia.



Bombas Centrífugas

Bombas mono etapa o monocelulares:



Bombas multi etapa o multicelulares:

- Pueden ser horizontales o verticales



Bombas Centrífugas

Bombas Sanitarias:

- Diseño higiénico
- Construida en acero inoxidable pulido
- Apta para industria farmacéutica, de alimentos y bebidas



Bombas de aguas residuales:

- Instalación sumergida
- succión ubicada en parte inferior
- Buen manejo de sólidos



Bombas Centrífugas

Bombas de Pozo:

- Instalación bajo tierra en pozos
- Alta eficiencia
- Normalmente construida en acero inoxidable
- Diseño tubular



Bombas sumergibles:

- Utilizadas en refrigeración y lubricación en máquinas herramienta; transferencia de condensados y máquinas de limpieza industrial
- succión de longitud adaptable
- Capaz de bombear virutas de procesos mecanizados



Bombas Centrífugas

Bombas de Cámara Partida:

- Pueden ser mono o multietapa
- Su cámara bipartida permite acceso a todas las partes móviles de la bomba y simplifica el mantenimiento ya que se puede reparar sin desarmar la cañería



Bombas sumergibles:

- Utilizadas en refrigeración y lubricación en máquinas herramienta; transferencia de condensados y máquinas de limpieza industrial
- succión de longitud adaptable
- Capaz de bombear virutas de procesos mecanizados

Sensores & Actuadores K

22.88



Válvulas: Introducción

Definición

- Dispositivo empleado para controlar el flujo de un gas o líquido

Características

Tamaño

- ★ Desde pequeñas válvulas de un neumático de automóvil o de bicicleta
- ★ Hasta válvulas empleadas en esclusas y presas, con diámetros superiores a 5m

Materiales

- ★ Para baja presión suelen ser de latón, hierro fundido o plástico
- ★ Para alta presión son de acero fundido o forjado.
- ★ En fluidos corrosivos puede ser necesario emplear aleaciones: acero inox, etc.

Símil eléctrico

- ★ Resistencia variable

Aplicaciones

- Aislación
- Control de la dirección de un fluido
- Control de caudal
- Control de presión

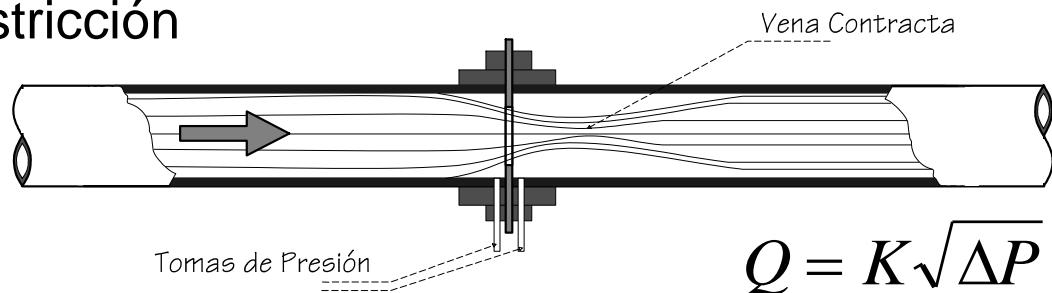
Principio de funcionamiento

* Principio de funcionamiento

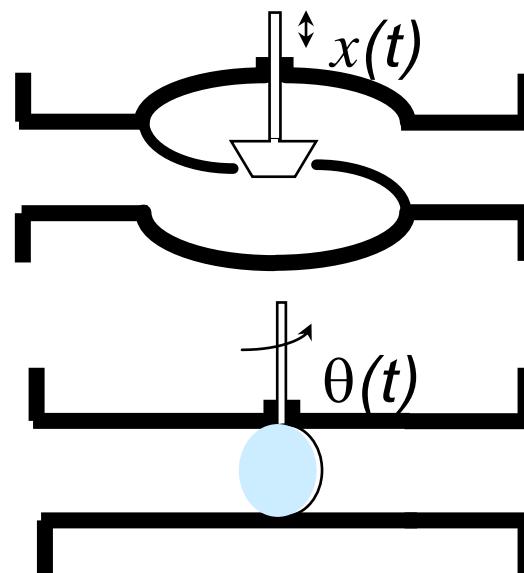
- Cambio de caudal o presión por introducción de una restricción

* Características comunes a todas ellas

- cuerpo
- oclusor
 - ★ asiento
 - ★ cierre, paleta, macho o tapón
 - ★ vástago
 - ★ guías o bujes para el vástago
- bonete (u otra estructura de sellado de presión)
 - ★ prensa estopa
 - ★ empaquetadura
- actuador

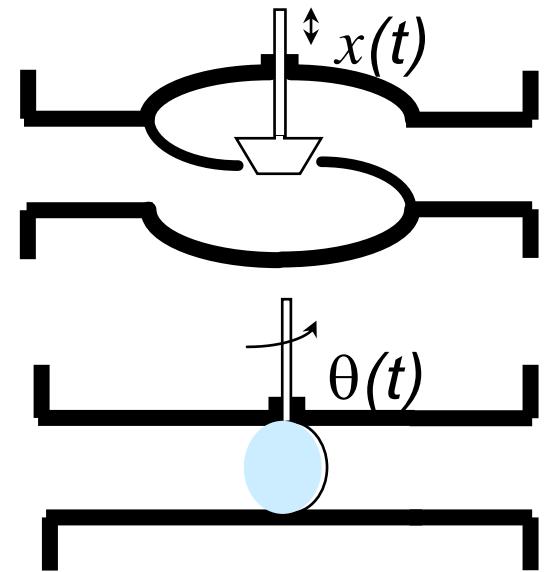


$$Q = K\sqrt{\Delta P}$$



Válvulas: su Clasificación

- Según el movimiento de su vástagos
 - ★ de vástagos reciproca
 - ★ de vástagos rotante
- Según su característica operativa
 - ★ Lineal
 - ★ Igual Porcentaje
 - ★ Apertura Rápida
- Según su comportamiento en condición de falla
 - ★ cerrada en falla (aire para abrir ó AA)
 - ★ abierta en falla (aire para cerrar ó AC)
- Según el material con que se construye
 - ★ acero inoxidable
 - ★ fundición de acero o hierro
 - ★ bronce, etc.
- Según su función
 - ★ bloqueo / aislación
 - ★ retención
 - ★ estrangulamiento
 - ★ de control
- Por su servicio
 - ★ líquidos
 - ★ gases
 - ★ vapores
- Según su tecnología constructiva



Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* Esférica o de Bola (Ball)

- Para usar en aislación
- Usadas para líquidos y gases
- Ventajas

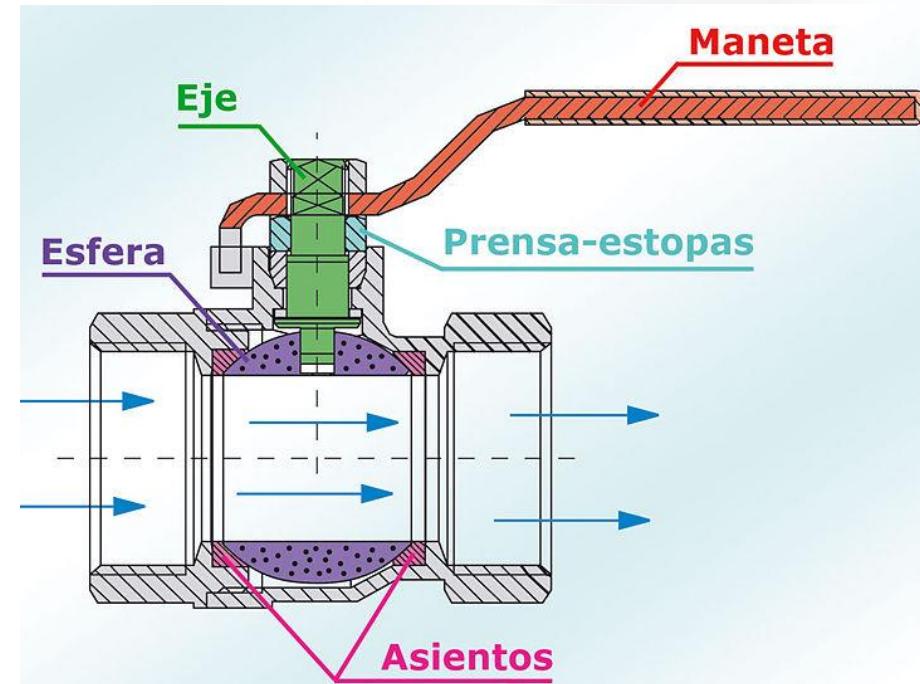
- ★ Muy baja pérdida de carga
- ★ Muy buen sellado
- ★ Cuarto de giro

→ Desventajas

- ★ Cara a partir de 4"
- ★ Voluminosa



Es de paso total
No es apta para regulación

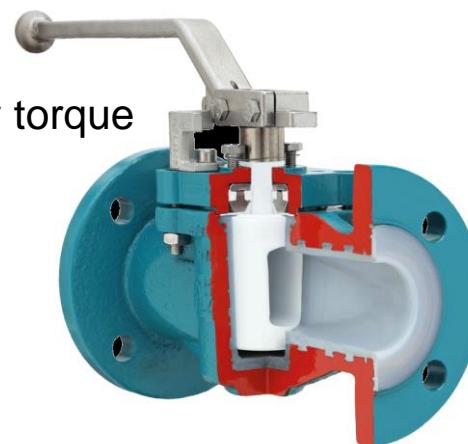
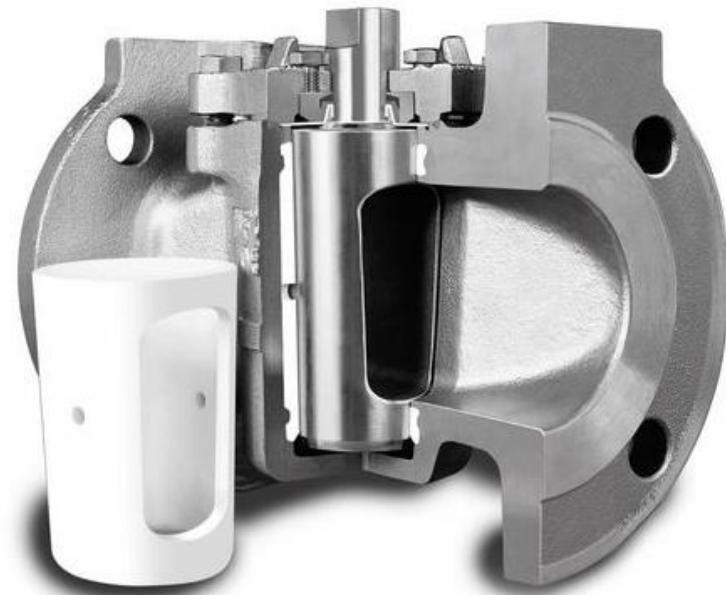


Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* De Tapón (Plug)

- Para usar en aislación
- También de $\frac{1}{4}$ de giro
- Usadas para líquidos y gases
- Con lubricación o auto-lubricadas
- Características
 - ★ Ofrecen un mejor sellado
 - ★ Soportan mayores presiones
- Desventajas
 - ★ Mejor sellado implica mayor torque

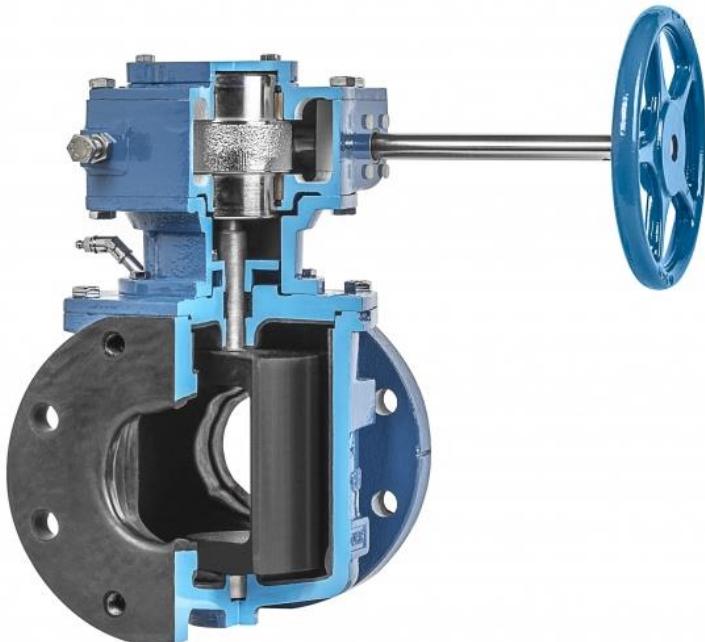
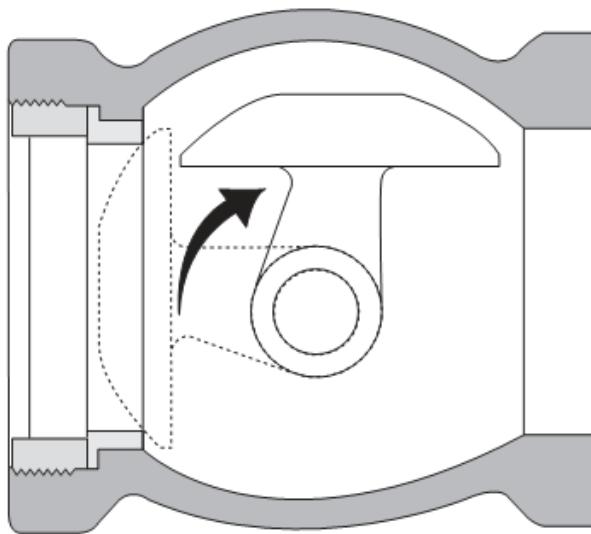
No es de paso total



Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* De Tapón Excéntrico (Eccentric Plug)

- ➔ Para usar en aislación
- ➔ Servicio de agua, efluentes, cloacal y barros
- ➔ También de $\frac{1}{4}$ de giro
- ➔ Utilizada en cañerías de gran tamaño
- ➔ Características
 - ★ Bajo torque requerido
 - ★ Mínimo desgaste del asiento
 - ★ Excelente sellado



Válvulas: distintas tecnologías constructivas

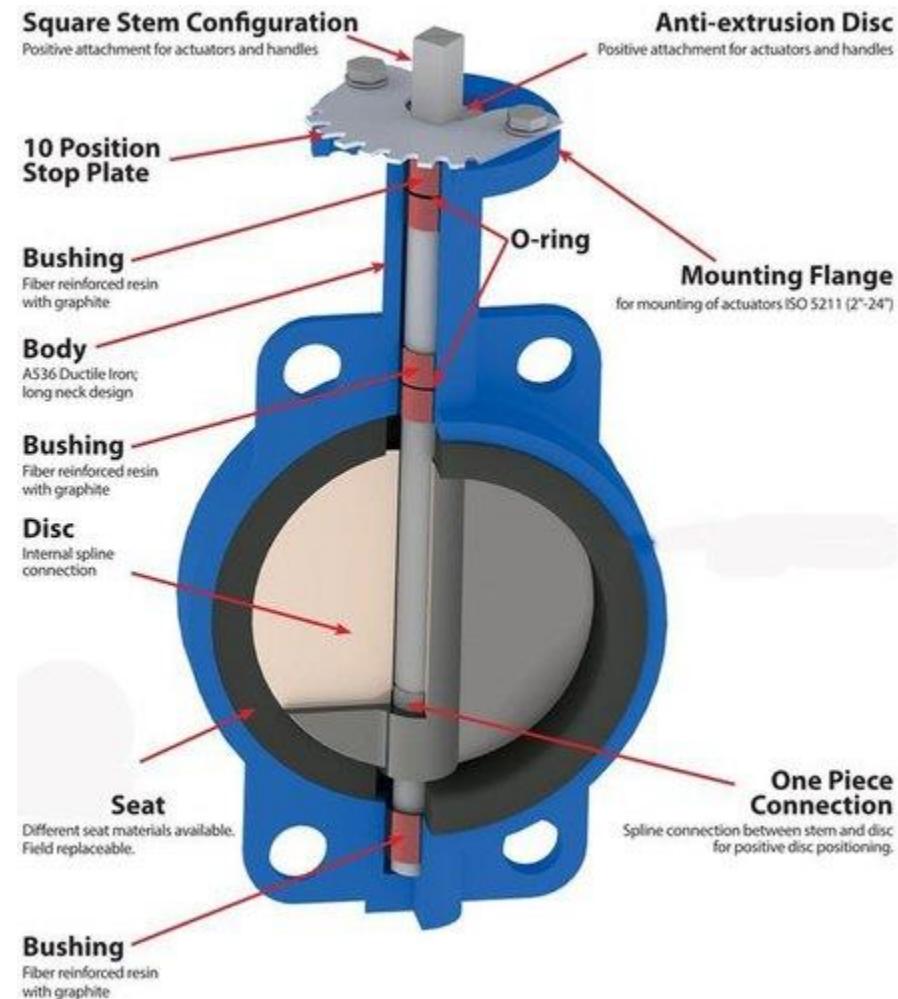
Mariposa (Butterfly)

- Para usar en aislación y control de caudal (limitado)
- Muy populares en todos los tamaños (hasta 72")
- Para presiones bajas y medias (<20 bar)
- Se utilizan para líquidos, gases y vapor
- Características:
 - ★ Baja pérdida de carga
 - ★ Fácil mantenimiento
 - ★ Larga vida útil
 - ★ Cuarto de giro
- Problemas frecuentes:
 - ★ Tras largos periodos sin abrir se suelen trabar
 - ★ Operan mejor húmedas que secas



Válvulas: distintas tecnologías constructivas

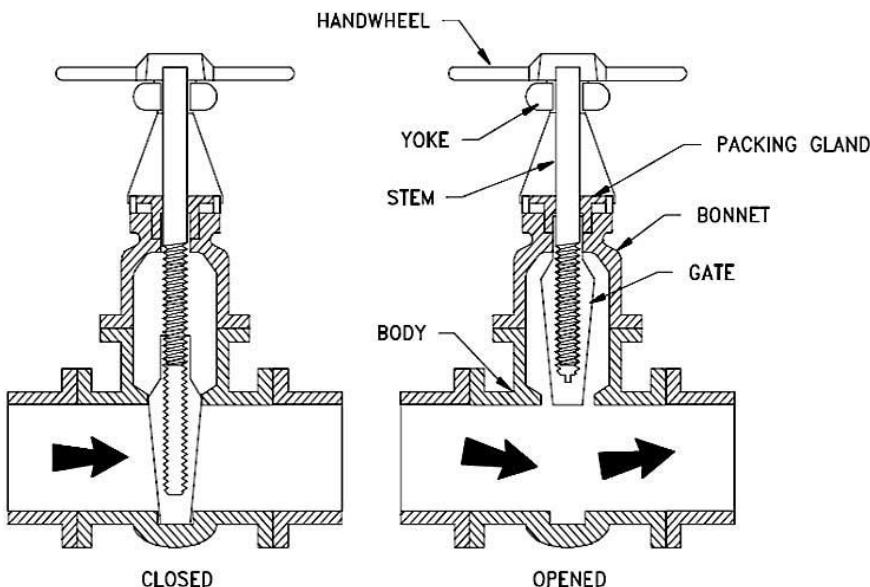
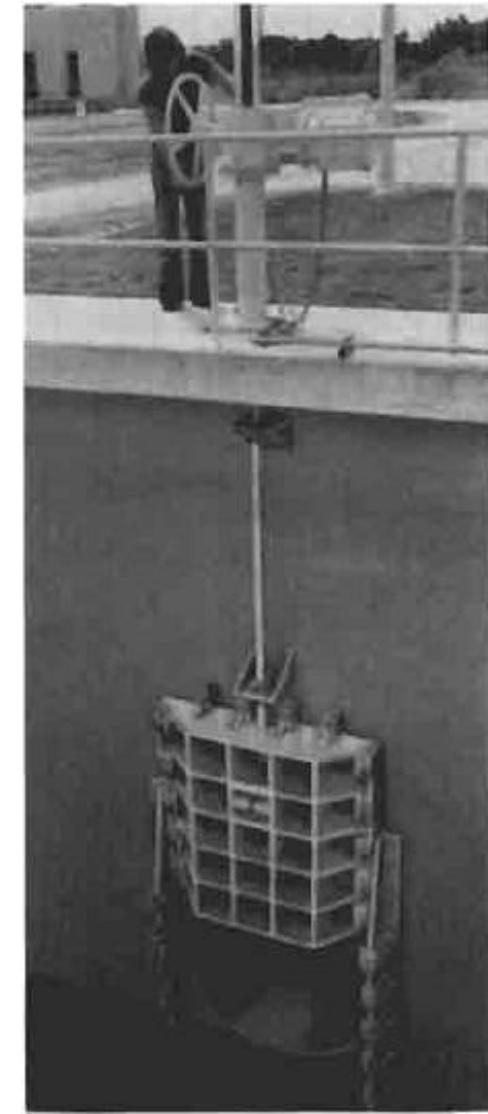
Mariposa (Butterfly)



Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* Esclusa o de Compuerta (Gate)

- Apertura y cierre mediante movimiento vertical de una pieza interior en forma de cuña que encaja en el cuerpo
- Utilizada exclusivamente para aislación
- No es de $\frac{1}{4}$ de giro
- El interior de la cuña esta recubierto de goma, por lo que la estanqueidad es muy buena.
- Utilizadas para agua y efluentes

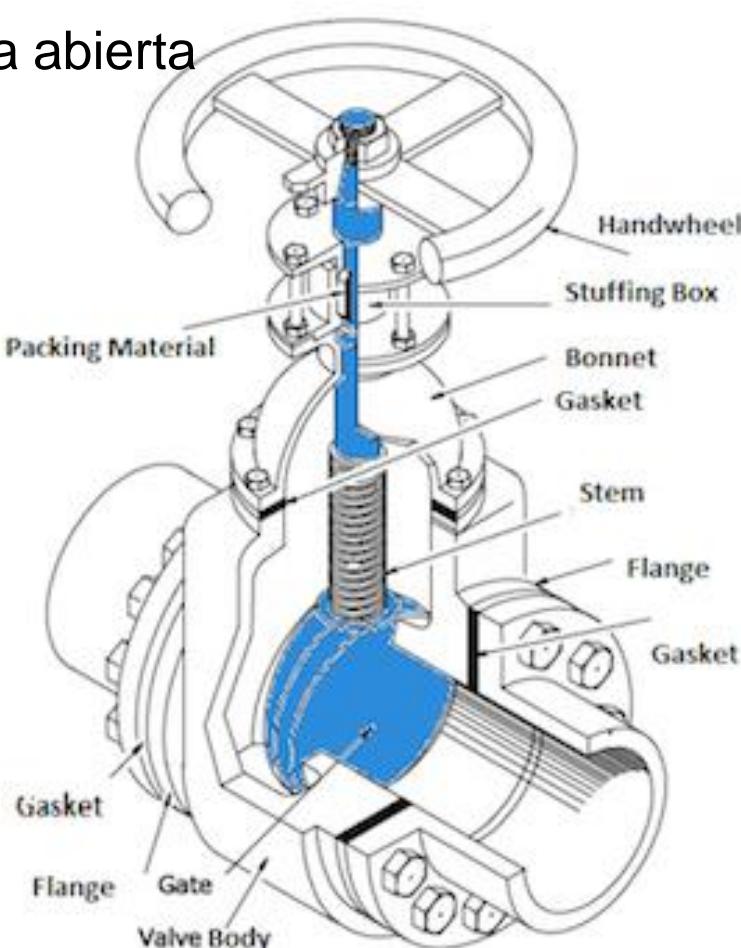


Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* Esclusa o de Compuerta (Gate)

Características:

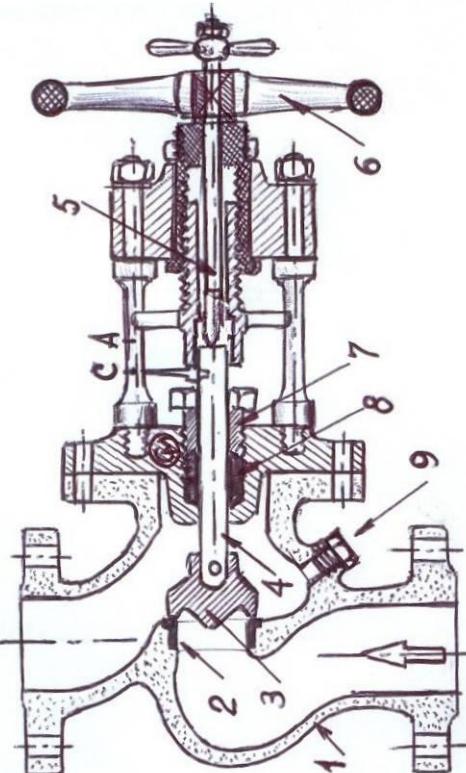
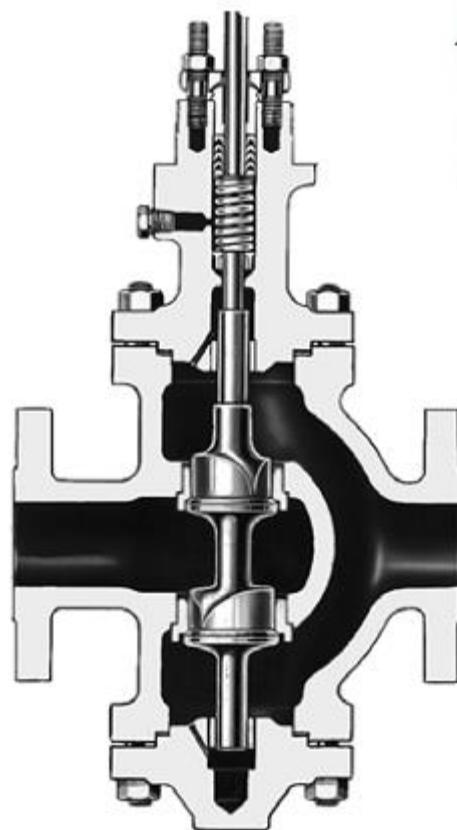
- Minima perdida de carga cuando esta abierta
- Bajo torque requerido
- Soporta muy altas presiones



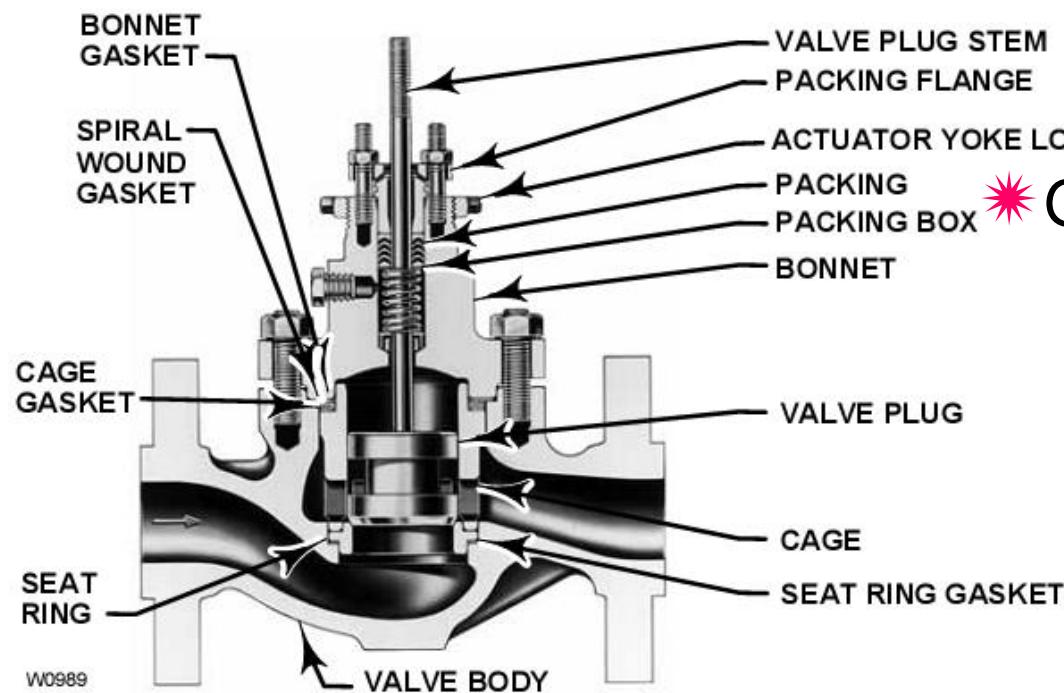
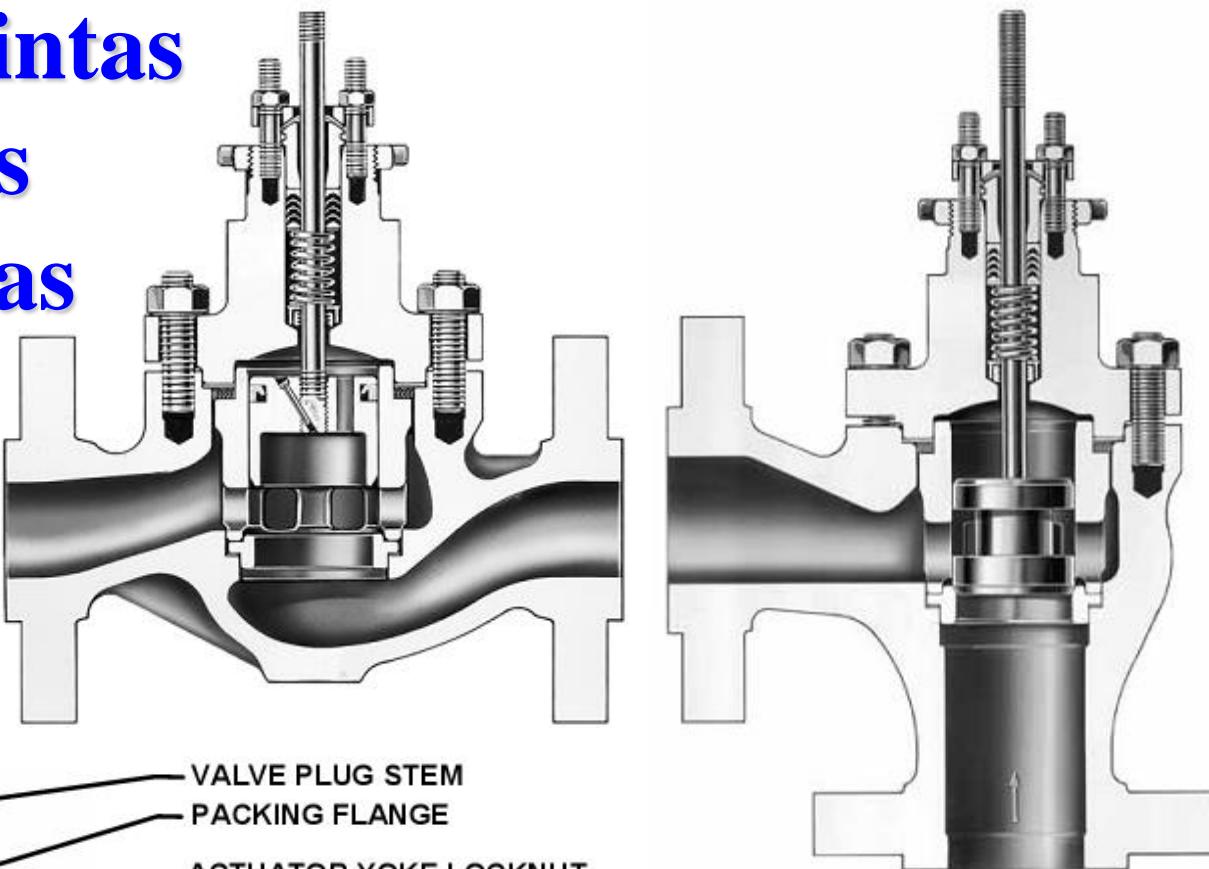
Válvulas: distintas tecnologías constructivas

* Globo (Globe)

- Para usar en control de caudal y presión
- Nunca en aislación
 - ★ Por alta pérdida de carga
 - ★ ¿por qué?
- Servicio de agua
- Nunca en barros o efluentes



Válvulas: distintas tecnologías constructivas



Globo (Globe)

→ Ventajas

- ★ Versión angulada
 - ⇒ Mitad de la pérdida de carga

→ Desventajas

- ★ Alta pérdida de carga
 - ⇒ Por el doble giro del fluido
- ★ Alto costo energético
- ★ Sujeta a abrasión del asiento

Válvulas: distintas tecnologías constructivas

Aguja (Needle) Se puede usar un rotámetro para medir

→ Versión especializada de la válvula globo

★ Tapón muy alargado

→ Servicio **Gases**

⇒ agua, muy limpia

⇒ Fluidos sin sólidos en suspensión

→ Ventajas

★ regulación muy fina del caudal

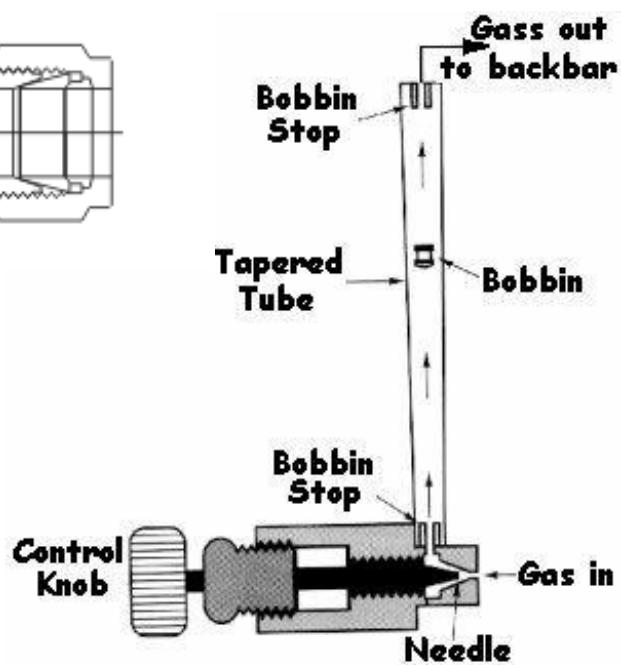
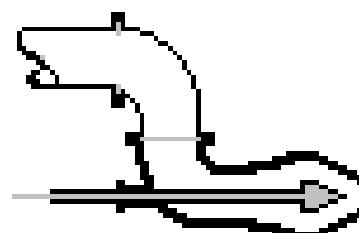
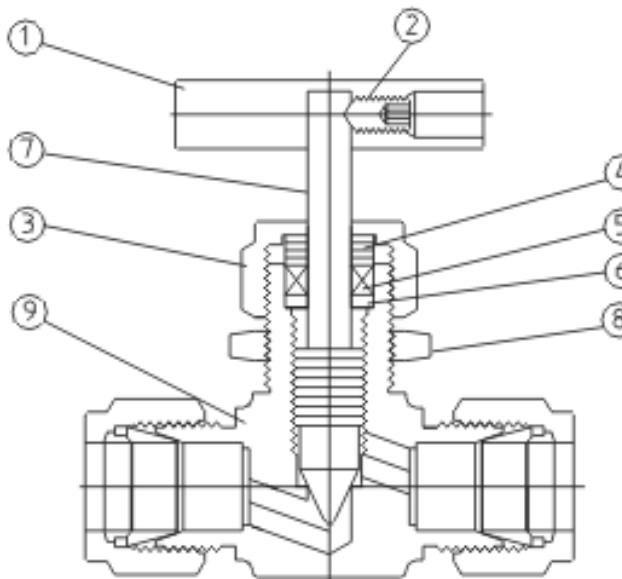
★ En todo el rango de aperturas

→ Desventajas

★ Alta pérdida de carga
⇒ Por el doble giro del fluido

★ Alto costo energético

★ Sujeta a abrasión del asiento



Características específicas de las Válvulas de Control

* Tarea

- ★ Modular caudal o presión operando parcialmente abierta/cerrada para crear un diferencial de presión ajustable, entre su entrada y su salida

* Problema

- ➔ La operación parcialmente abierta puede causar cavitación y ruido
- ➔ El tapón tiende a oscilar,
 - ★ Los rodamientos y empaquetaduras se desgastan rápidamente
 - ★ Los asientos son particularmente vulnerables al desgaste vía micro-canales

* Soluciones

- ➔ Buscar válvulas de comprobada eficacia en control
- ➔ Especificar los mejores materiales

* Actuadores

- ➔ Habitualmente del tipo de potencia
- ➔ Raras veces actuación manual (algunas válvulas aguja)

Actuadores

* Selección del tipo de Actuador

→ Dependiente de

- ★ Diseño de la válvula (rotante, giro ¼ ó reciproante)
- ★ Tamaño de la válvula
- ★ Presiones de operación
- ★ Requerimientos especiales, p.ej.
 - ⇒ Modo de falla
 - ⇒ Picos de presión

→ Normalmente, según instrucciones y datos del fabricante

→ Criterios de selección

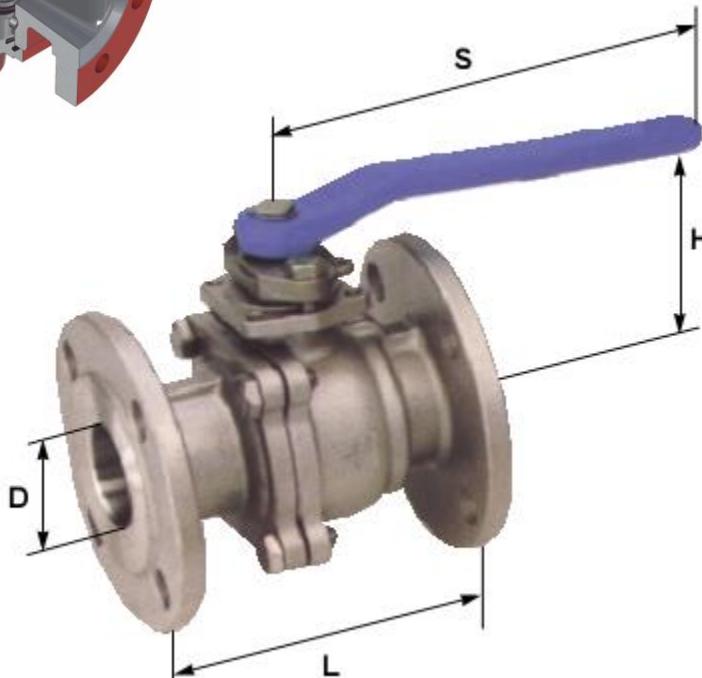
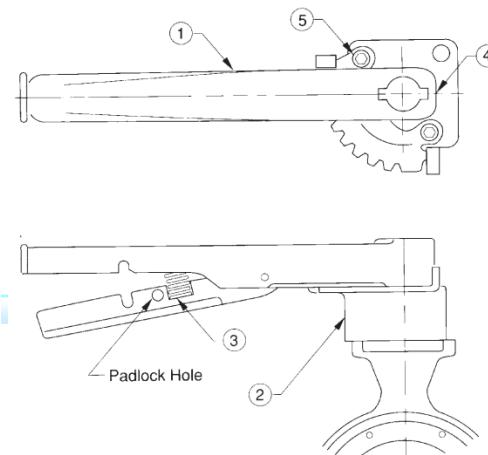
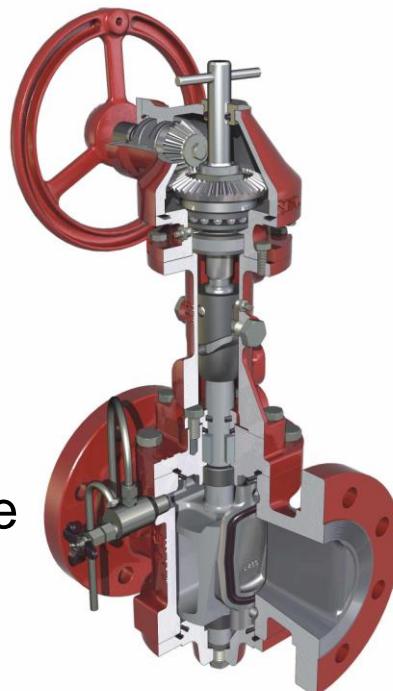
- ★ Fuente de energía disponible en las adyacencias de la válvula
- ★ Características de desempeño en condiciones de falla
- ★ Fuerza a ser generada por el actuador
 - ⇒ balanceo de la fuerza del resorte
 - ⇒ vencer fricción en el vástagos (empaque)
 - ⇒ compensar desbalances de fuerzas en la zona del tapón
 - ⇒ exceso de fuerza para anular las pérdidas

→ Habitualmente se inicia el diseño intentando usar un actuador tipo resorte-diafragma

Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuador Manual

- Recomendado para
 - ★ Mariposas y tapón hasta 6-8"
 - ★ Esféricas hasta 4"
 - ★ Compuertas hasta 12"
- Tamaños mayores, únicamente acopladas a engranaje porque
 - ★ El torque requerido para operar es demasiado
 - ★ Contribuye a una operación más lenta evitando picos de presión
- No recomendado para
 - ★ Compuertas de más de 18"
 - ★ Esféricas, mariposas y de tapón, de más de 8" (algunos ponen el límite en 6")
- Para servicio de regulación y control
 - ★ Suelen tener posiciones discretas fijas, no continuas
 - ★ En particular esto es cierto para mariposas, para evitar oscilaciones



Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuador Eléctrico a Motor

- Típicamente motor acoplado a engranajes
 - ★ Muchas piezas móviles
- Potencia requerida del motor, función de
 - ★ Velocidad de operación
 - ★ Presiones de operación
- Enclavamientos
 - ★ Fin de carrera para limitar torque (extremos abierto y cerrado)
 - ⇒ Puede generar roturas
 - ★ Prioridad del actuador manual
- Poco usuales y no estandarizadas
- Mantenimiento complejo
- Requiere alimentación auxiliar

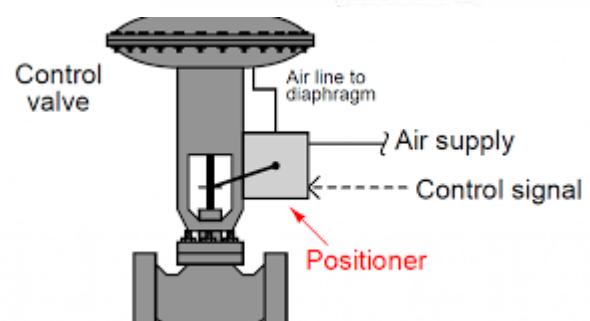
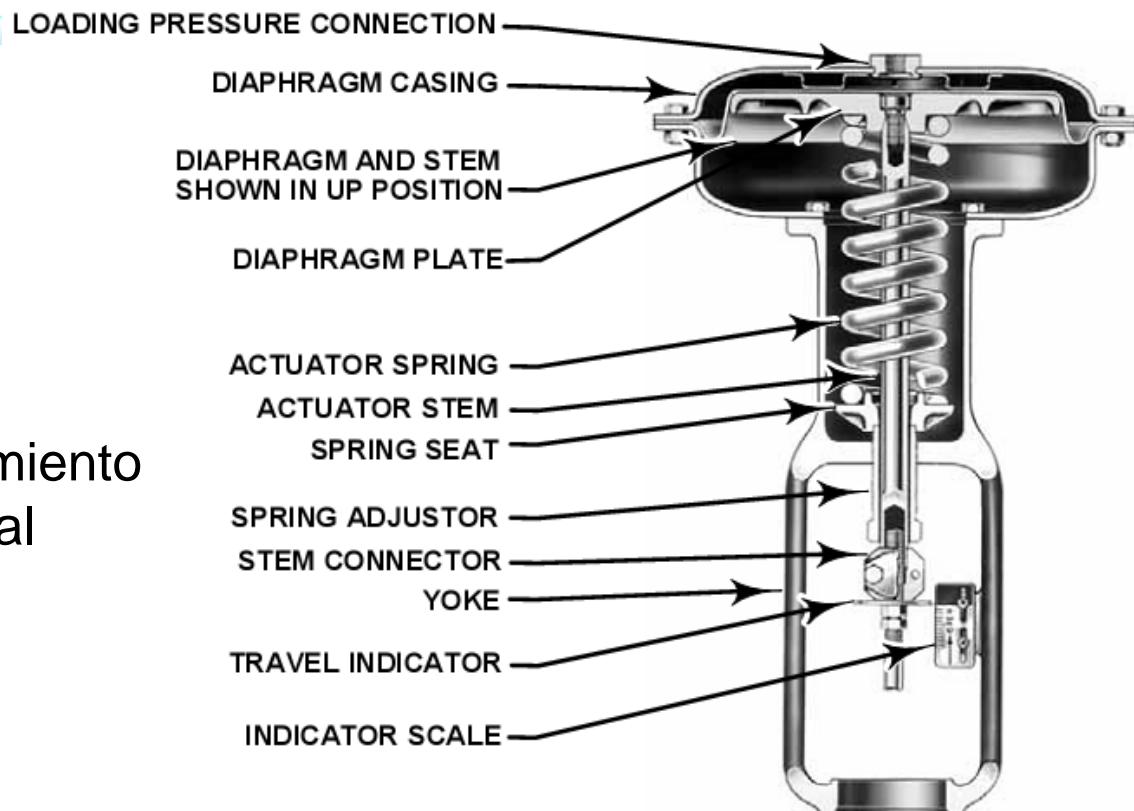


Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuadores Neumáticos

* Diafragma - Resorte

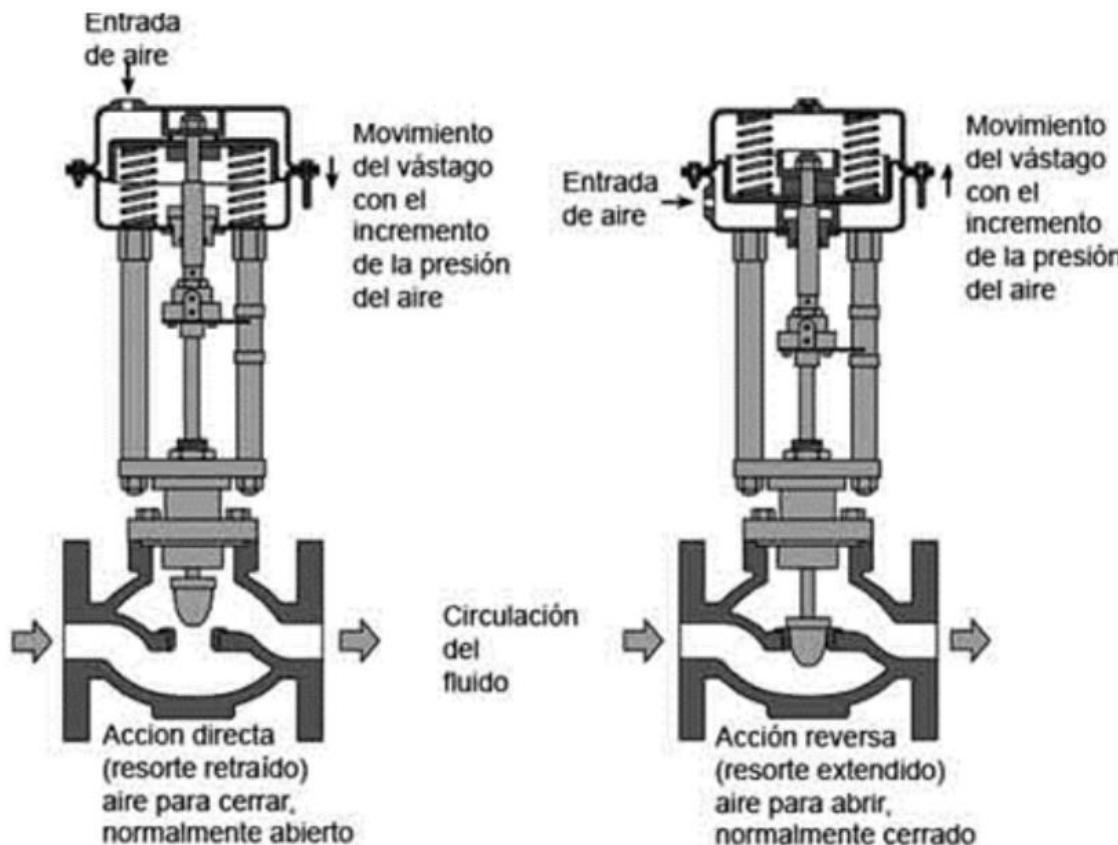
- Es el más utilizado
 - ★ Gran vida útil
 - ★ Bajo mantenimiento
- Bajo costo
- Puede ser de funcionamiento Normal Abierto o Normal Cerrado



Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuadores Neumáticos

* Diafragma - Resorte



Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuadores Neumáticos

★ Diafragma - Resorte

→ Ventajas

- ★ Fácil de entender y reparar
- ★ Pocas partes móviles
- ★ Toda la fuerza transferida directamente al vástagos
- ★ Operación quasi-lineal, sin requerir alto esfuerzo inicial para arranque
- ★ Ideales para uso en ambiente explosivo o inflamable
- ★ Ambientalmente seguros

→ Desventajas

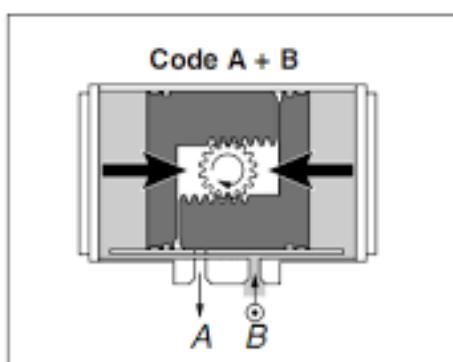
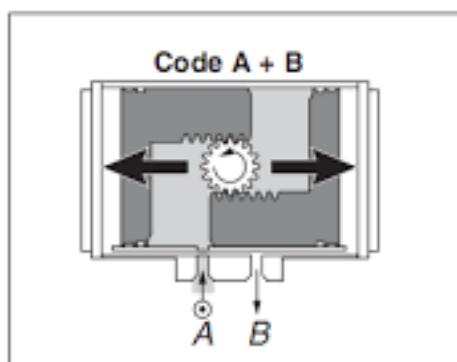
- ★ Fuerza no demasiado alta
- ★ Puede llegar a tamaños demasiado grandes
- ★ La elasticidad del diafragma limita el movimiento posible
 - ⇒ Típicamente < 5cm
 - ⇒ Máximo < 10cm
- ★ Presión de entrada limitada por el diafragma

Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuadores Neumáticos

★ Piñon y cremallera

- ➡ Utilizado para válvulas de $\frac{1}{4}$ de giro
- ➡ Utilizable para válvulas on-off y también para control
- ➡ Muy fácil mantenimiento
- ➡ Requiere lubricación periódica
- ➡ Tamaño variable en función del torque requerido
- ➡ Montaje estandarizado por distintas normas
- ➡ Fácil montaje de sensores de fin de carrera



Válvulas: distintos tipos de actuadores

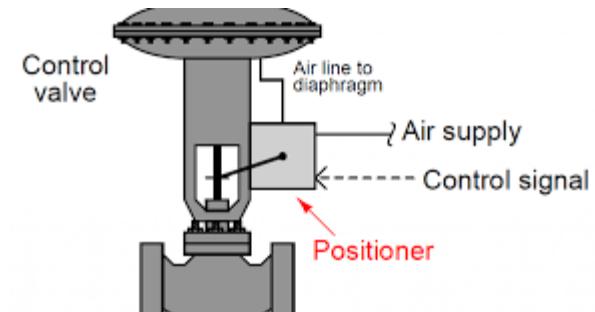
Actuadores Neumáticos

★ Posicionador

→ Convierte

- ★ la señal de salida de un controlador
- ★ en la apertura deseada de una válvula
- ★ operando a lazo cerrado
- ★ minimizando error de posicionamiento

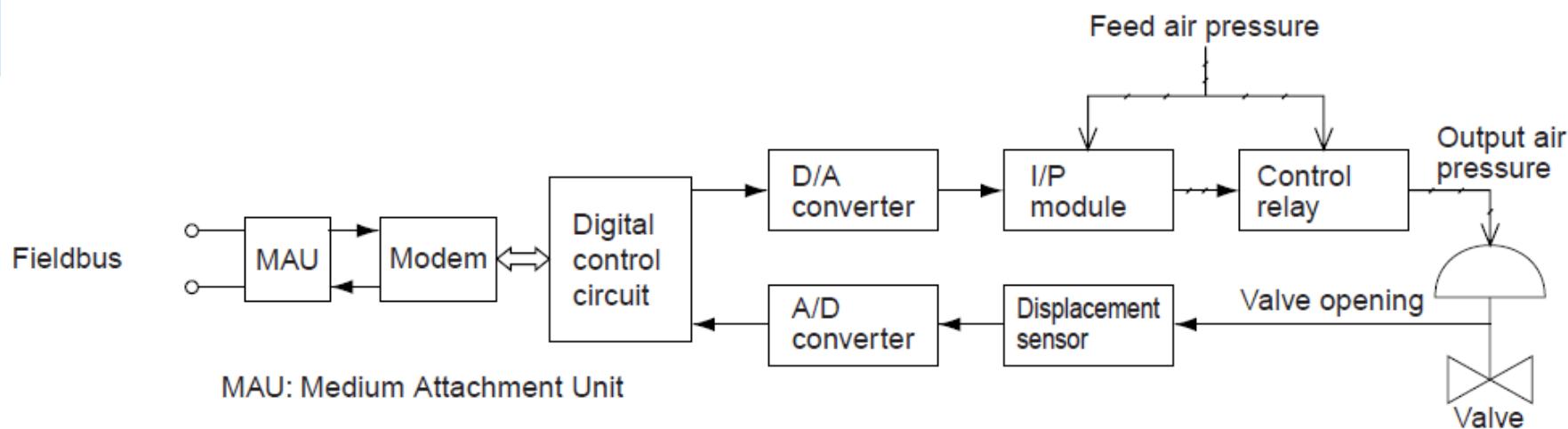
- Reciben set-point de un PLC (AO) y devuelven % apertura (AI) y confirmaciones de cierre y apertura (DIs)
- Montaje estandarizado según distintas normas como por ejemplo Namur
- Adaptable a distintas carreras en función de la posición del brazo
- Se autocalibran



Válvulas: distintos tipos de actuadores

Actuadores Neumáticos

* Posicionador



Posicionador de Pistón Completo

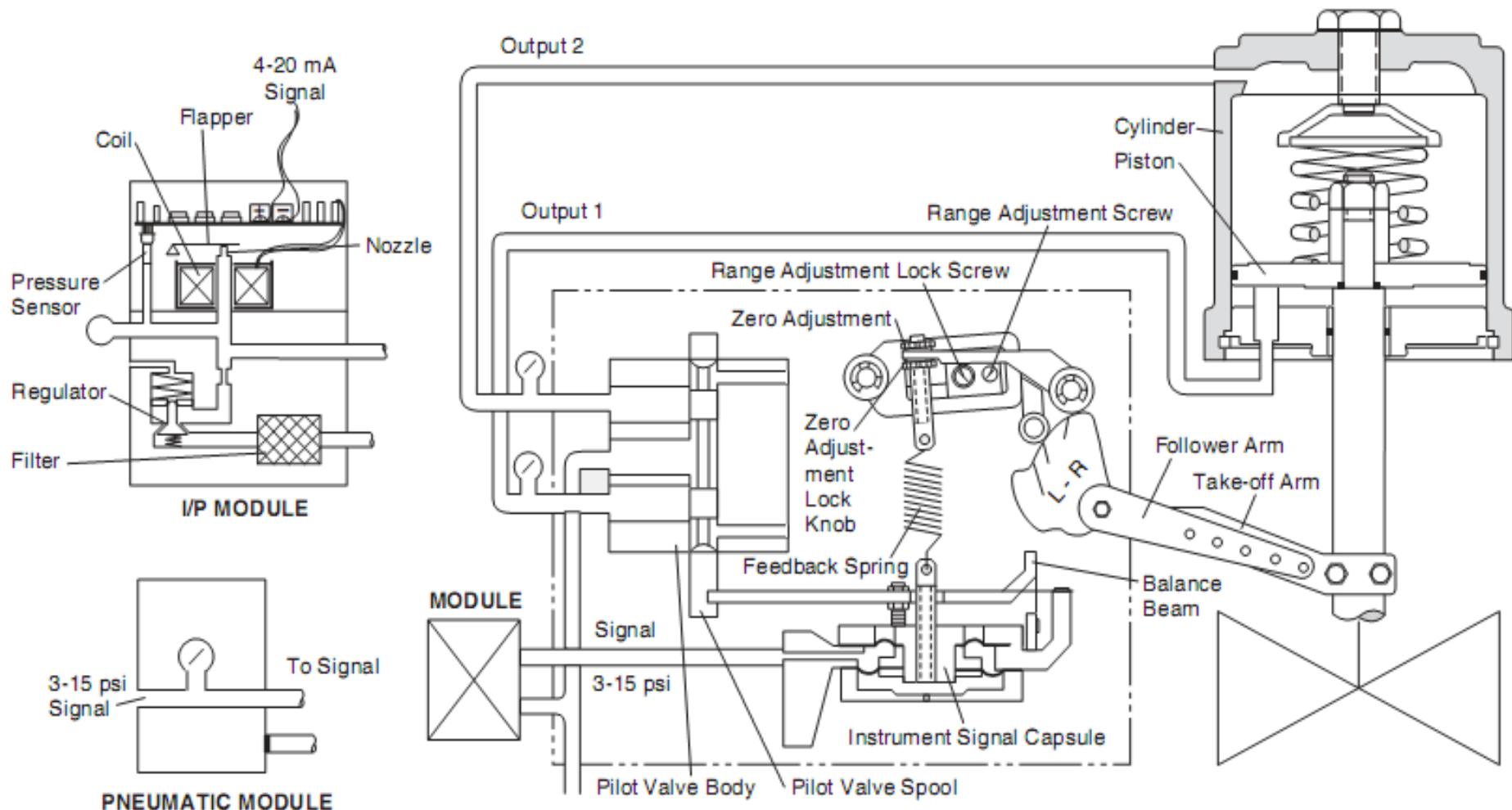


Figure 5.33. Positioner schematic for linear actuator (air-to-retract). (Courtesy of Valtek International)

Válvulas: accesorios

* Fines de Carrera

→ Pueden operar

- ★ Entradas de un PLC o DCS
- ★ Pequeñas válvulas solenoide
- ★ Señalizaciones luminosas
- ★ Relés
- ★ Alarmas

→ Ejemplo

- ★ Operados por levas

→ Tipos

- ★ de ca
- ★ de cc

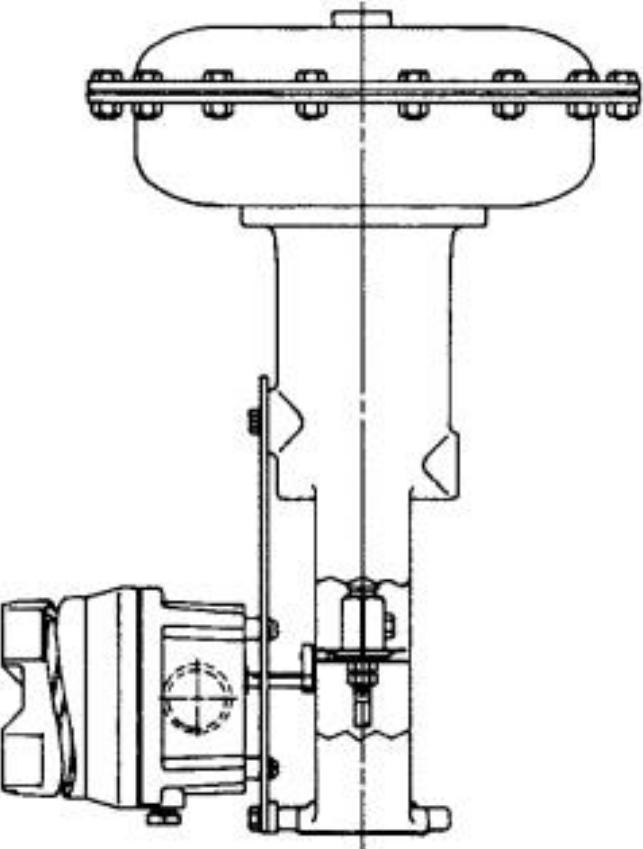


Figure 4-7. Cam-Operated Limit Switches

Válvulas: accesorios

* Válvulas Solenoide

- Utilizadas en
 - ★ Pistones de doble acción
 - ★ Diafragmas de acción simple
- para acción on-off

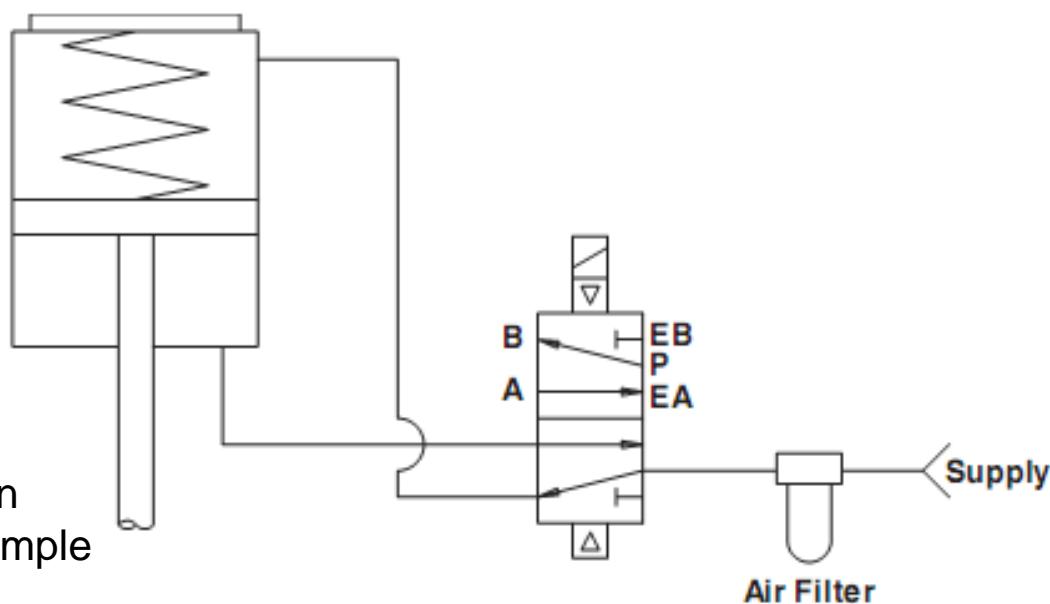


Figure 5.56. Deenergized-to-close, fail-closed four-way solenoid schematic. (Courtesy of Valtek International)

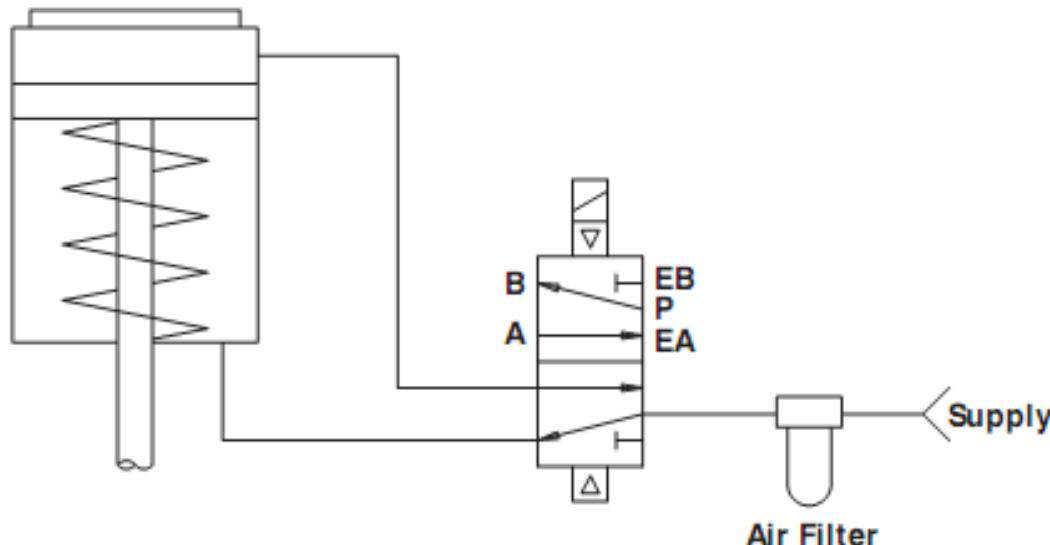


Figure 5.57. Deenergized-to-open, fail-open four-way solenoid schematic. (Courtesy of Valtek International)

Válvulas: accesorios

Reguladores de presión de alimentación (airsets)

- Regulan 20, 35 ó 60psig al actuador
- Necesarios en actuadores de acción simple (D-R)
- Raras veces en doble-acción (pistones)

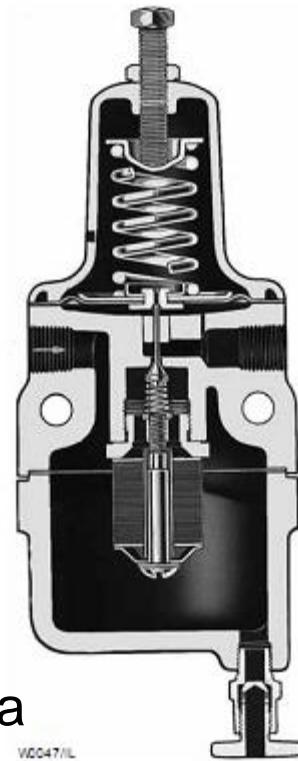
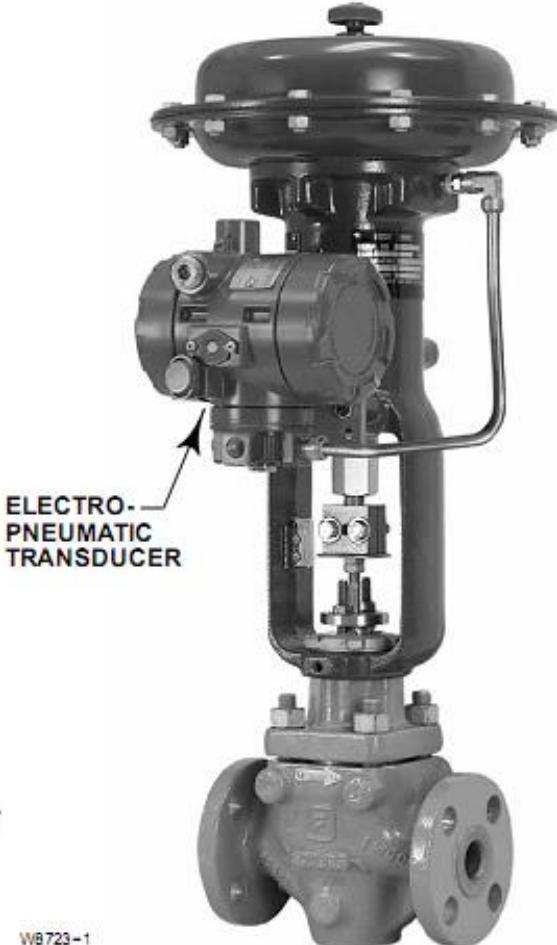


Figure 4-9. Supply Pressure Regulator with Filter and Moisture Trap

Transductor Electro-Neumático

- Recibe señal de corriente
- usa conversor I/P, tobera-aleta y relé neumático
- para generar la señal neumática de salida
- puede montarse directamente sobre la válvula y operarla sin booster ni posicionador



WB723-1

Figure 4-12. Electro-Pneumatic Transducer Mounted on a Diaphragm-Actuated Control Valve

Válvulas: accesorios

★ Filtros

→ Protege a un actuador, posicionador u otro elemento de

- ★ partículas
- ★ humedad
- ★ condensación
- ★ crecimiento bacteriano

→ Características

- ★ típicamente remueve indeseables de más de $5\mu\text{m}$
- ★ válvula inferior para drenaje

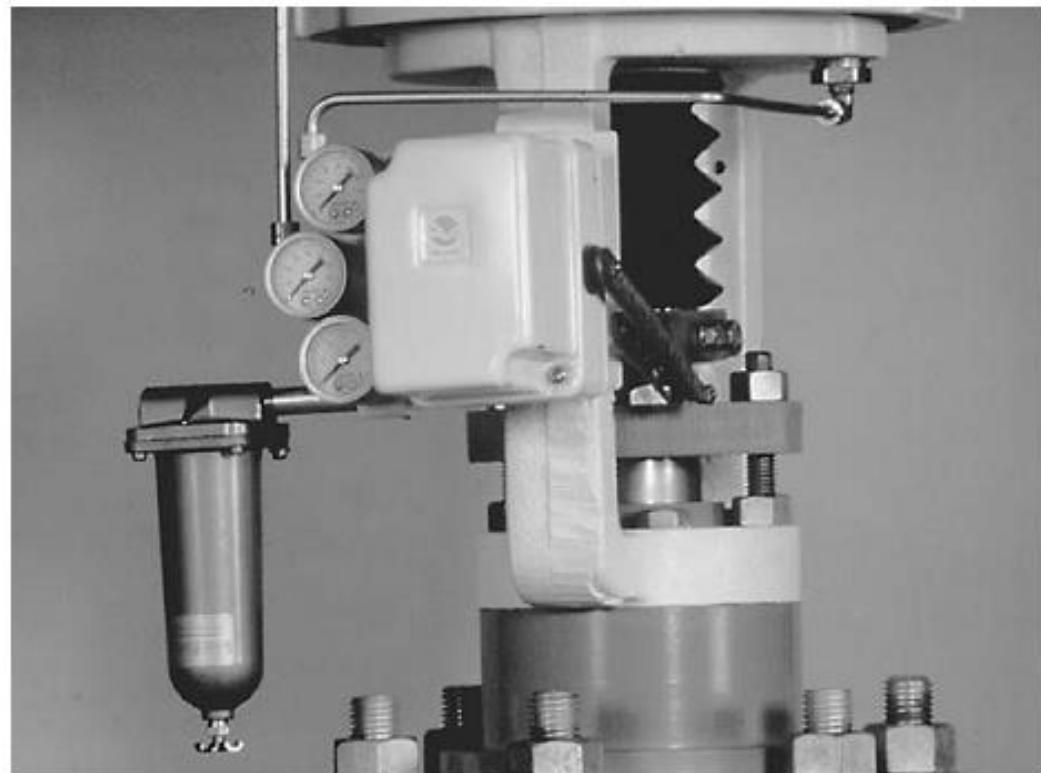


Figure 5.48. Air filter installed before a pneumatic positioner.
(Courtesy of Valtek International)

Dimensionamiento de Válvulas: Razones para hacerlo

★ Economía

- ➔ Válvula demasiado pequeña para una aplicación
 - ★ No dejará pasar el caudal requerido
 - ★ Deberá ser reemplazada por una de mayor tamaño
- ➔ Válvula demasiado grande para una aplicación
 - ★ Dejará pasar el caudal requerido
 - ★ Será más cara que lo necesario

★ Control

- ➔ Válvula demasiado pequeña para una aplicación
 - ★ No entregará jamás el caudal requerido
 - ★ Reducirá sensiblemente el rango de caudales controlables
- ➔ Válvula sobredimensionada
 - ★ Trabajará muy cerrada
 - ★ Eso provoca elevadas velocidades muy cerca del asiento que pueden causar erosión
 - ★ El rango pleno que es capaz de controlar jamás será utilizado
 - ★ Su control será más dificultoso

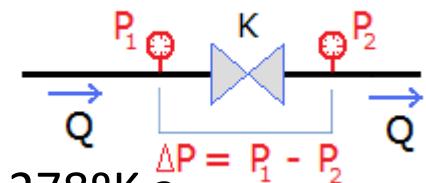
★ Válvula ideal

- ➔ Funciona entre el 30 y el 70% de apertura
- ➔ Lejos de los extremos abierto y cerrado

Dimensionamiento - Coeficiente Kv

* Se define el coeficiente Kv como el caudal Q medido en m³/h que circula a través de la válvula en las siguientes condiciones:

- El ΔP en la valvula es constante e igual a 1 bar
- La valvula tiene apertura del 100%
- El fluido es agua en un rango de temperaturas que va de 278ºK a 315ºK (5 a 40ºC)



* En el sistema inglés existe un coeficiente similar denominado Cv. Dicho coeficiente se define como el caudal Q medido en gpm que circula a través de la válvula en las siguientes condiciones:

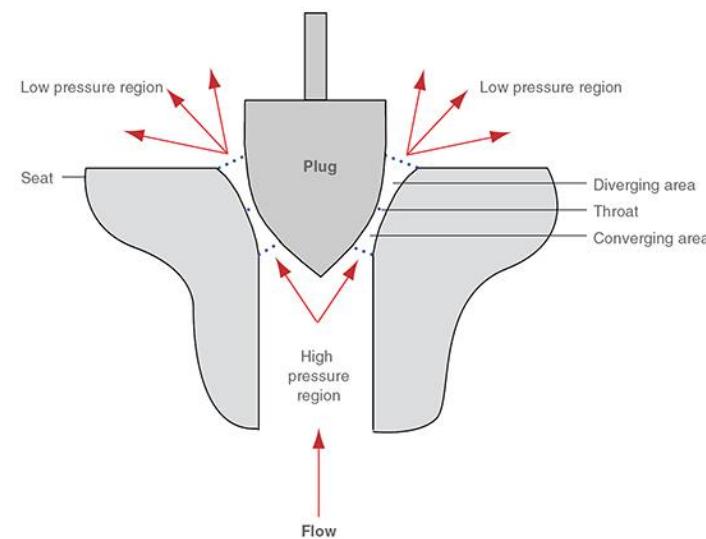
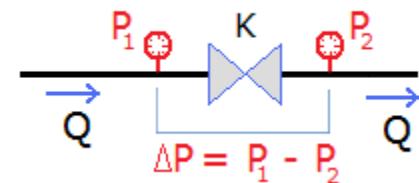
- El ΔP en la valvula es constante e igual a 1 psi
- La valvula tiene apertura del 100%
- El fluido es agua a 60ºF

* Existe la siguiente relación entre ellos:

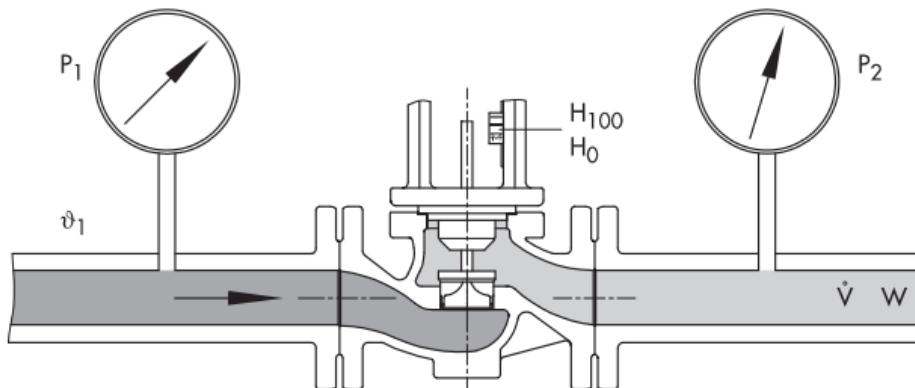
- $Kv = 0.865 \cdot Cv$
- $Cv = 1,156 \cdot Kv$

Dimensionamiento - Coeficiente Kv

- El flujo másico de vapor que pasa a través de la válvula aumentará en línea con la presión diferencial hasta que se alcance una condición conocida como "presión crítica".
 - A la presión critica la velocidad del fluido será igual a la del sonido.
 - Cuando la caída de presión a través de una válvula es mayor que la crítica, se puede generar ruido por el gran intercambio instantáneo de energía cinética a energía térmica en la región de baja presión, a veces exacerbada por la presencia de vapor supersónico.
-
- La caída de presión será sub-critica si se cumple:
 - $\Delta P < 0,5P_1$ o bien $P_2 > 0,5P_1$
 - La caída de presión será super-critica si se cumple:
 - $\Delta P > 0,5P_1$ o bien $P_2 < 0,5P_1$



Dimensionamiento - Coeficiente Kv



- P_1 Upstream pressure
 P_2 Downstream pressure
 H Travel
 \dot{V} Volume flow rate in m^3/h (gases)
 W Mass flow rate in kg/h (liquids, steam)
 ρ Density in kg/m^3
 (general, also in liquids)
 ρ_1 Density upstream of the valve in kg/m^3
 (in gases and vapors)
 ϑ_1 Temperature in $^{\circ}C$ upstream of the valve

Medium \ Pressure drop	Liquids		Gases		Steam
	m^3/h	kg/h	m^3/h	kg/h	kg/h
$P_2 > \frac{p_1}{2}$			$K_V = \frac{\dot{V}_G}{519} \sqrt{\frac{\rho_G T_1}{\Delta p \ p_2}}$	$K_V = \frac{W}{519} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_G \Delta p \ p_2}}$	$K_V = \frac{W}{31.62} \sqrt{\frac{v_2}{\Delta p}}$
$\Delta p < \frac{p_1}{2}$	$K_V = \dot{V} \sqrt{\frac{\rho}{1000 \Delta p}}$	$K_V = \frac{W}{\sqrt{1000 \rho \Delta p}}$	$K_V = \frac{\dot{V}_G}{259.5 \ p_1} \sqrt{\rho_G \ T_1}$	$K_V = \frac{W}{259.5 \ p_1} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_G}}$	$K_V = \frac{W}{31.62} \sqrt{\frac{2v^*}{p_1}}$
$P_2 < \frac{p_1}{2}$					
$\Delta p > \frac{p_1}{2}$					

where:

p_1 [bar] Absolute pressure p_{abs}

ρ [kg/m^3] Density of liquids

p_2 [bar] Absolute pressure p_{abs}

ρ_G [kg/m^3] Density of gases at $0^{\circ}C$ and 1013 mbar

Δp [bar] Absolute pressure p_{abs} (differential pressure $p_1 - p_2$)

v_1 [m^3/kg] Specific volume (v' found in the steam table) for p_1 and ϑ_1

T_1 [K] $273 + \vartheta_1$

v_2 [m^3/kg] Specific volume (v' found in the steam table) for p_2 and ϑ_1

\dot{V}_G [m^3/h] Flow rate of gases,
related to $0^{\circ}C$ and 1013 mbar

v^* [m^3/kg] Specific volume (v' found in the steam table) for $\frac{p_1}{2}$ and ϑ_1

Dimensionamiento de Válvulas: Características Operativas

- ★ Al valor de Kv de la válvula seleccionada se lo denomina Kvs y debe ser mayor que el valor de Kv calculado.
- ★ Esto asegura que la válvula sea capaz de controlar el proceso, aun ante desviaciones en las condiciones de operación previstas.
- ★ Normalmente se utiliza la siguiente ecuación:
 - ➡ KV requerido = Kv calculado / 0.7
- ★ Luego se elige el Kvs analizando las hojas de datos del fabricante, asegurándonos de superar al Kv requerido.
- ★ *Ejemplo: Dimensione una válvula para un líquido con densidad=1000kg/m3 , Q=30m3/h y ΔP=0,5bar.*

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{1000 \Delta P}} = 30 \text{ m}^3/\text{h} \sqrt{\frac{1000 \text{ Kg/m}^3}{1000 * 0,5 \text{ bar}}} = 42,5 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$K_{vs} = \frac{K_v}{0,7} = \frac{42,5}{0,7} = 60$$

Cálculo de caudal en líquidos para la válvula seleccionada

* Una vez seleccionada la válvula y su K_{vs} , podemos calcular el caudal o ΔP en la misma de la siguiente forma:

► Para líquidos:

$$\dot{V} = K_{vs} \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Δp	Perdida de presión en bar
ρ	Densidad en kg/m^3
\dot{V}	Caudal volumétrico (flujo) en m^3/h
K_V	Valor de K_V en m^3/h
K_{VS}	Coeficiente de caudal de la válvula en m^3/h

* La ecuación anterior corresponde a una apertura de la válvula del 100% dado que utiliza el factor K_{vs} . Para una apertura diferente, la ecuación cambia y dependerá de la característica de flujo de la válvula (lineal, igual porcentaje o apertura rápida).

Ejemplos de cálculo en líquidos

Ejemplo 1

Cálculo del caudal para una válvula conocida

Incógnita: Caudal (caudal volumétrico) de acetona (m^3/h) con la válvula 100 % abierta

Datos: Válvula de control neumática Tipo 3241-1 · DN 40
Perdida presión $\Delta p = p_1 - p_2$ · Densidad acetona en kg/m^3

Solución: Cálculo con la ecuación (2):

$$K_{VS} = 25 \text{ m}^3/\text{h}^1$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,5 \text{ bar}$$

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V} = 25 \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot 0,5}{800}} = 19,76 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V} = K_{VS} \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

¹⁾ El valor de K_{VS} tiene una tolerancia de $\pm 10\%$ y por eso también el caudal \dot{V} calculado.

Ejemplo 2

Válvula reductora de presión sin energía auxiliar para agua

Incógnita: Reductora de presión Tipo ..., K_V y DN de la válvula

Datos: Caudal de agua (caudal volumétrico) · Perdida presión Δp
Densidad agua ρ en kg/m^3

Solución: Cálculo del valor de K_V con la ecuación (3) que deriva de la ecuación (1):

$$\dot{V} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 2,1 \text{ bar}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$K_V = \dot{V} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{1000 \cdot \Delta p}} \quad (3)$$

$$K_V = 12 \cdot \sqrt{\frac{1000}{1000 \cdot 2,1}} = 8,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Después de calcular el valor de K_V se selecciona el valor de K_{VS} de la válvula.

Por lo general se cumple: $K_{VS} \approx 1,3 \cdot K_V$

$$K_{VS} = 1,3 \cdot K_V = 1,3 \cdot 8,2 = 10,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Selección: Tipo 41-23, DN 40, $K_{VS} = 20$

Ejemplos de cálculo en líquidos

Ejemplo 4

Determinación de la perdida de presión para agua

Incógnita: Perdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$ con válvula 100% abierta

Datos: Regulador de temperatura sin energía auxiliar

$$K_{VS} = 32 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tipo 4 · DN 50 · caudal de agua \dot{V} (caudal volumétrico)
densidad agua ρ en kg/m^3

$$\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$$

Solución: Cálculo de la pérdida de presión con la ecuación (5)
derivada de la ecuación (1):

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = \left(\frac{10}{32} \right)^2 \cdot \frac{1000}{1000} = 0,097 \text{ bar} \approx 0,1 \text{ bar}$$

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{V}}{K_{VS}} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{1000} \quad (5)$$

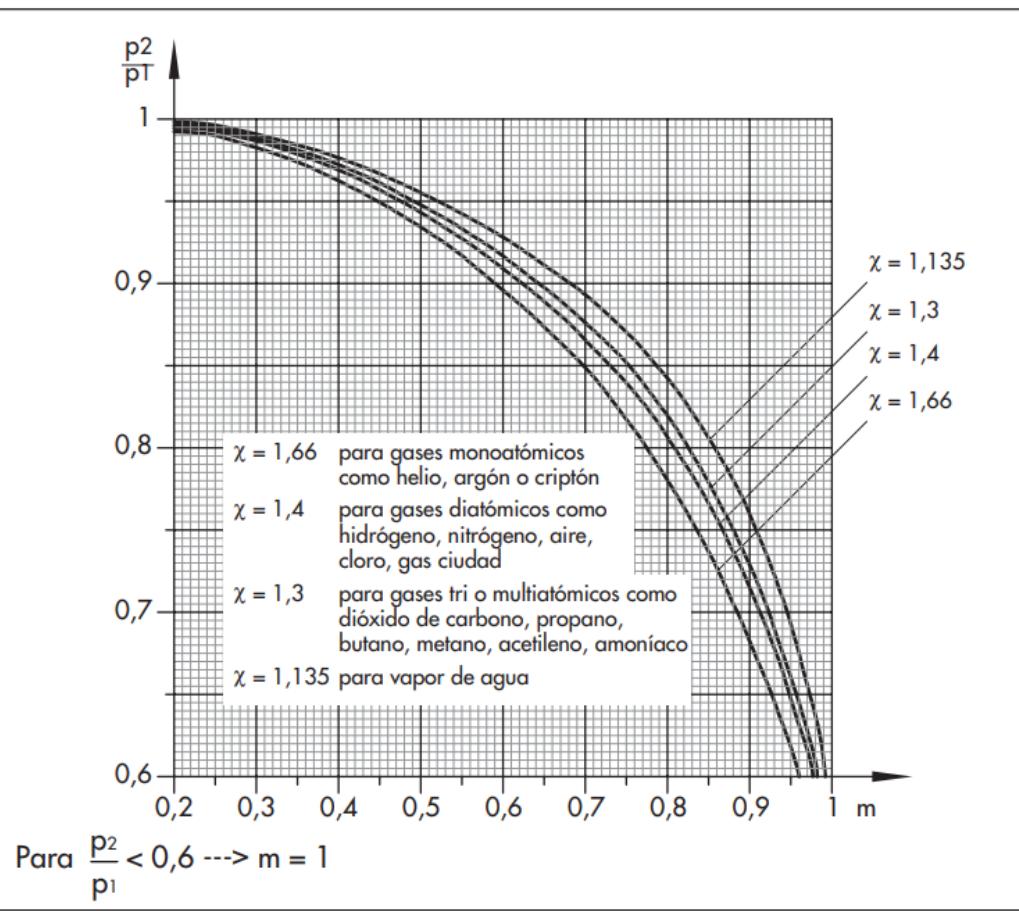
Cálculo de caudal en gases y vapor para la válvula seleccionada

* Una vez seleccionada la válvula y su K_{vs} , podemos calcular el caudal en la misma de la siguiente forma:

→ Para gases y vapores:



Gráfico 3



Magnitudes y unidades

p_1	Presiones absolutas
p_2	en bar
Δp	Pérdida de presión en bar (presión diferencial)
W	Caudal másico en kg/h
K_V	Valor de K_V en m^3/h
ρ_1	Densidad en kg/m^3

El método de cálculo se basa en un proceso de aproximación contrastado con valores experimentales.

$$W = 14,2 \cdot K_V \cdot m \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2} \quad (9)$$

Los valores para m y p_1 se obtienen de los gráficos 2 y 3.

Gráfico 2 . Coeficiente de pérdida de presión m en función de $\frac{p_2}{p_1}$

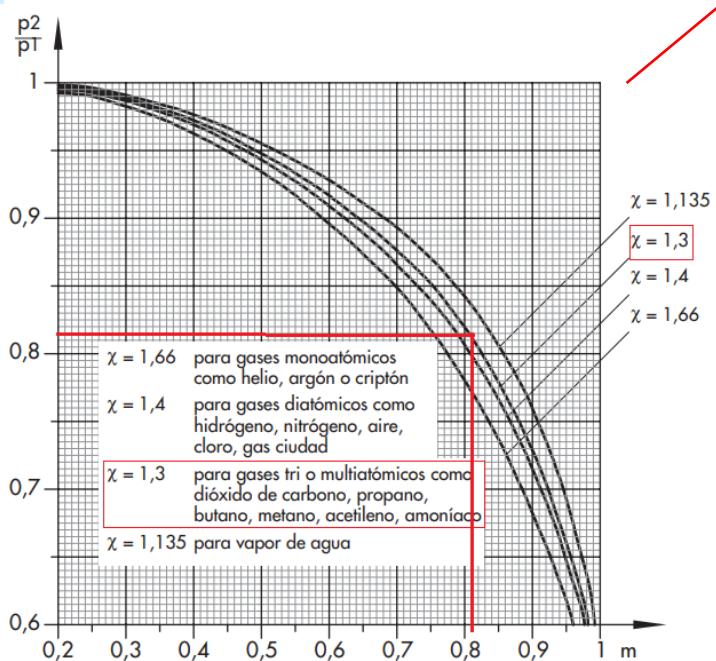
Ejemplos de cálculo en gases

Ejemplo 8

Caudal de gas

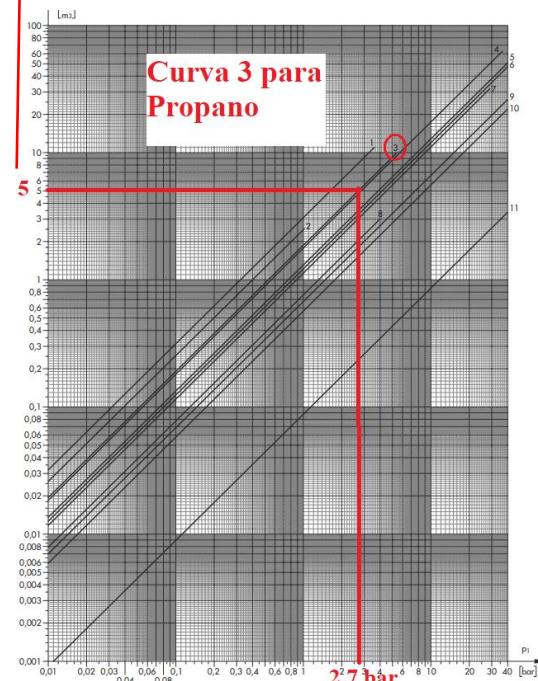
Incógnita: Caudal de propano W en kg/h con válvula 100 % abierta
 Datos: Válvula de control neumática Tipo 3241-1, DN 50
 Presión en la entrada y salida de la válvula
 Solución: Buscar la densidad ρ_1 en la entrada en el gráfico 3, formar $\frac{p_2}{p_1}$. Buscar m en el gráfico 2 para la relación $\frac{p_2}{p_1}$
 $y \chi = 1,3$

$$W = 14,2 \cdot K_{VS} \cdot m \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_1} \quad (9)$$



$$\begin{aligned} K_{VS} &= 40 \text{ m}^3/\text{h}^1 \\ p_1 &= 2,7 \text{ bar} \quad p_2 = 2,2 \text{ bar} \\ \rho_1 &= 5 \text{ kg/m}^3 \\ \frac{p_2}{p_1} &= \frac{2,2}{2,7} = 0,815 \\ m &= 0,805 \\ W &= 14,2 \cdot 40 \cdot 0,805 \cdot \sqrt{2,7 \cdot 5} = 1680 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

1) El valor de K_{VS} tiene una tolerancia de $\pm 10\%$ y por eso también el caudal de vapor W calculado.



Ejemplos de cálculo en gases

Ejemplo 9

Reductora de presión sin energía auxiliar para nitrógeno

Incógnita: Reductora de presión Tipo ..., valor K_{VS} y DN válvula
Datos: Nitrógeno · Caudal · Presión en la entrada y en la salida
Solución: Formar $\frac{p_2}{p_1}$ · Buscar m en el gráfico 2 ($\chi = 1,4$) · Buscar ρ_1 para $p_1 = 5$ bar en el gráfico 3

$$K_V = \frac{W}{14,2 \cdot m \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2}} \quad (10)$$

Después de calcular el K_V , calcular el valor de K_{VS} de la válvula. Por lo general se cumple: $K_{VS} \approx 1,3 \cdot K_V$

$$\begin{aligned} p_1 &= 5 \text{ bar} & p_2 &= 3 \text{ bar} \\ W &= 230 \text{ kg/h} \\ \frac{p_2}{p_1} &= \frac{3}{5} = 0,6 \\ m &= 0,97 \\ \rho_1 &= 6,2 \text{ kg/m}^3 \\ K_V &= \frac{230}{14,2 \cdot 0,97 \cdot \sqrt{5 \cdot 6,2}} = 3,00 \text{ m}^3/\text{h} \\ K_{VS} &= 1,3 \cdot K_V = 1,3 \cdot 3,00 = 3,90 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Selección: Reductora **Tipo 44-1, G ¾, $K_{VS} = 4$**

Ejemplo 10

Determinación de la pérdida de presión del nitrógeno

Incógnita: Pérdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$ con válvula 100 % abierta
Datos: Válvula de control eléctrica Tipo 3241-2, DN 20
Solución: Nitrogeno · Caudal de nitrógeno · Presión entrada válvula
Buscar ρ_1 en el gráfico 3 para una $p_1 = 5$ bar

$$m = \frac{W}{14,2 \cdot K_{VS} \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2}} \quad (11)$$

Buscar la relación $\frac{p_2}{p_1}$ a partir de $m = 0,791$ en el gráfico 2
 $p_2 = 0,815 \cdot p_1 \rightarrow$ Pérdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$

$$\begin{aligned} K_{VS} &= 4 \text{ m}^3/\text{h} \\ p_1 &= 5 \text{ bar} \\ W &= 250 \text{ kg/h} \\ \rho_1 &= 6,2 \text{ kg/m}^3 \\ m &= \frac{250}{14,2 \cdot 4 \cdot \sqrt{5 \cdot 6,2}} = 0,791 \\ \frac{p_2}{p_1} &= 0,815 \\ p_2 &= 0,815 \cdot 5 = 4,08 \text{ bar} \\ \Delta p &= 5 - 4,08 = 0,92 \text{ bar} \end{aligned}$$

Cálculo de caudal en vapor de agua

Vapor de agua

Para vapor de agua se utiliza la ecuación (9) modificada:

$$W = K_V \cdot m \cdot Z \quad (6)$$

Factor de compresibilidad Z El factor Z adimensional incluye $14,2 \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2}$
El factor Z se obtiene de la tabla 2 a partir de la presión p_1 en la entrada de la válvula. Para ello es necesario diferenciar entre vapor saturado y sobrecalentado.

Coeficiente m pérdida de presión El factor m adimensional se obtiene de la tabla 1 o para valores intermedios del gráfico 2 con la curva $\chi = 1,135$.

Magnitudes y unidades

p_1	Presiones absolutas en bar
p_2	
Δp	Pérdida de presión en bar (presión diferencial)
W	Caudal másico en kg/h
K_V	Valor K_V en m^3/h
m	Coeficiente de pérdida de presión, adimensional
Z	$14,2 \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2}$, factor de compresibilidad adimensional



Tablas 1 y 2 -
Vapor de Agua

Ejemplo de cálculo en vapor de agua

Ejemplo 5

Determinación del caudal que fluye por válvula conocida

Incógnita:

Caudal de vapor en kg/h con válvula 100 % abierta

$$K_{VS} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$$

Datos:

Válvula de control eléctrica Tipo 3241-2 · Temperatura vapor · Presión en la entrada y salida de la válvula

$$t = 200^\circ\text{C}$$

Solución:

$$\text{Formar } \frac{p_2}{p_1}$$

$$p_1 = 4 \text{ bar} \quad p_2 = 3 \text{ bar}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{3}{4} = 0,75$$

Buscar m en la tabla 1 o el gráfico 2

$$m = 0,92$$

Buscar el factor de compresibilidad Z en la tabla 2 según la presión y temperatura en la entrada.

$$Z = 38,5$$

$$W = 40 \cdot 0,92 \cdot 38,5 = 1417 \text{ kg/h}$$

$$W = K_{VS} \cdot m \cdot Z \quad (6)$$

¹⁾ El valor de K_{VS} tiene una tolerancia de ± 10 % y por eso también el caudal de vapor W calculado.

Ejemplo 7

Determinación de la pérdida de presión en vapor de agua

Incógnita:

Pérdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$ con válvula 100 % abierta

$$K_{VS} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

Datos:

Regulador de temperatura sin energía auxiliar Tipo 4

$$W = 1000 \text{ kg/h}$$

Caudal de vapor · Temperatura vapor · Presión de entrada

t = correspondiente al vapor saturado

Solución:

Seleccionar el factor de compresibilidad Z en la tabla 2 según la presión y temperatura en la entrada de la válvula

$$p_1 = 7 \text{ bar}$$

$$Z = 71,3$$

$$m = \frac{1000}{71,3 \cdot 20} = 0,701$$

$$m = \frac{W}{Z \cdot K_{VS}} \quad (8)$$

Buscar la relación $\frac{p_2}{p_1}$ en el gráfico 2 para $m = 0,701$

$$\frac{p_2}{p_1} = 0,89$$

$$p_2 = 0,89 \cdot p_1 \rightarrow \text{Pérdida de presión } \Delta p = p_1 - p_2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 7 - 6,23 = 0,77 \text{ bar}$$

Cálculo de caudal en aire comprimido

Aire

El método de cálculo se basa en un proceso de aproximación contrastado con valores experimentales. La ecuación simplificada para el aire seco es:

$$W = 15,3 \cdot m \cdot K_V \cdot \sqrt{p_1 \cdot p_2} \quad (12)$$

La ecuación (6) se puede escribir de la forma siguiente:

$$W = K_V \cdot m \cdot Z \quad (13)$$

El valor Z se obtiene de la tabla 4 a partir de la presión p_1 y el de m de la tabla 3 (los valores intermedios se obtienen en el gráfico 2 para $\chi = 1,4$).



Tablas 3 y 4 - Aire
Comprimido

Magnitudes y unidades

p_1	Presiones absolutas
p_2	en bar
Δp	Pérdida de presión en bar
W	Caudal másico con kg/h
K_V	Valor de K_V en m^3/h
ρ	Densidad en kg/m^3
m	Coeficiente de pérdida de presión, adimensional
Z	Factor de compresibilidad, adimensional

Ejemplo de cálculo en aire comprimido

Ejemplo 11

Caudal de aire

Incógnita:

Caudal W en kg/h con la válvula 100 % abierta

$$K_{VS} = 32 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t = 20^\circ\text{C}$$

Datos:
Regulador de presión sin energía auxiliar Tipo 41-23,
DN 50 · Presión de entrada y salida · Temperatura

$$p_1 = 4 \text{ bar} \quad p_2 = 3 \text{ bar}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{3}{4} = 0,75$$

$$m = 0,884$$

$$Z = 66$$

$$W = 32 \cdot 0,884 \cdot 66 = 1867 \text{ kg/h}$$

Solución:

$$\text{Formar } \frac{p_2}{p_1}$$

Buscar m en la tabla 3 o en el gráfico 2

Buscar el valor de Z en la tabla 4 según la presión y temperatura en la entrada de la válvula

$$W = K_{VS} \cdot m \cdot Z \quad (13)$$

1) El valor de K_{VS} tiene una tolerancia de $\pm 10\%$ y por eso también el caudal de aire W calculado

Ejemplo 13

Determinación de la pérdida de presión de aire

Incógnita:

Pérdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$ con válvula 100 % abierta

$$K_{VS} = 32 \text{ m}^3/\text{h}$$

Datos:

Regulador de presión diferencial Tipo 42-24, DN 50

$$W = 3270 \text{ kg/h}$$

Caudal de aire · Presión de entrada · Temperatura

$$t = 20^\circ\text{C}$$

Solución:

Seleccionar el valor Z en la tabla 4 según la presión y temperatura en la entrada de la válvula

$$Z = 115,6$$

$$m = \frac{W}{Z \cdot K_{VS}} \quad (15)$$

Buscar la relación $\frac{p_2}{p_1}$ en el gráfico 2 o en la tabla 3

$$m = \frac{3270}{115,6 \cdot 32} = 0,884$$

para $m = 0,884$

$$\frac{p_2}{p_1} = 0,75$$

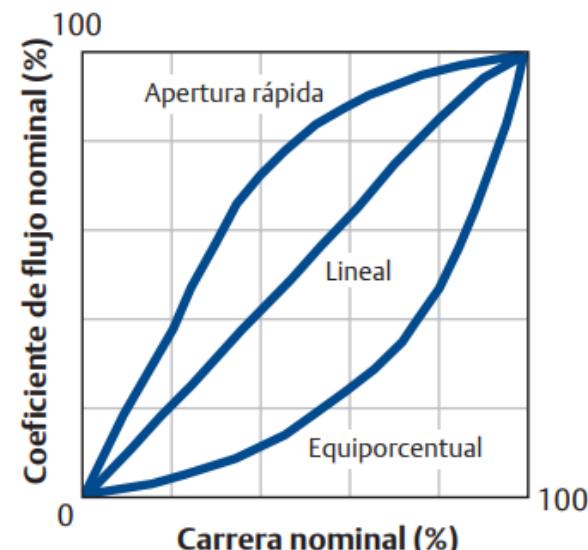
$p_2 = 0,75 \cdot p_1 \rightarrow$ Pérdida de presión $\Delta p = p_1 - p_2$

$$p_2 = 0,75 \cdot 7 = 5,25 \text{ bar}$$

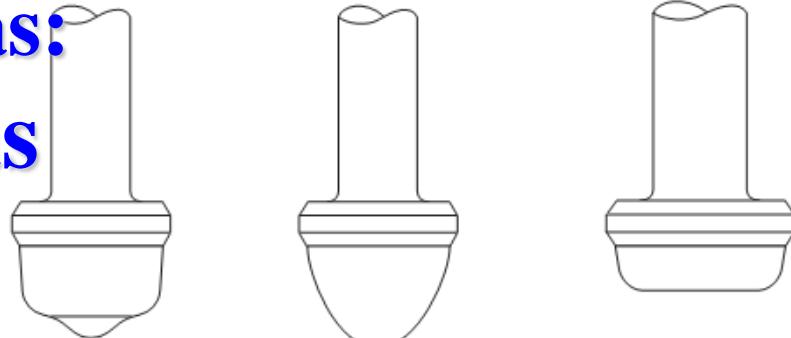
$$\Delta p = p_1 - p_2 = 7 - 5,25 = 1,75 \text{ bar}$$

Dimensionamiento de Válvulas: Características Operativas

- ★ La característica de flujo de una válvula de control es la relación entre el caudal que pasa por la válvula y la variación en la posición de la carrera de la válvula de 0 a 100%.
- ★ La característica de flujo inherente designa la característica observada con una caída de presión constante en la válvula.
 - ➔ Las válvulas lineales se utilizan habitualmente para el control de nivel de líquido y algunas aplicaciones de control de flujo que requieren una ganancia constante.
 - ➔ Las válvulas igual porcentaje se utilizan habitualmente para aplicaciones de control de presión y otras aplicaciones donde un amplio porcentaje de la caída de presión es habitualmente absorbida por el sistema mismo, con solo un porcentaje bajo disponible en la válvula de control.
- ★ La característica de flujo instalada designa el obtenido durante el servicio cuando se producen variaciones en la caída de presión debido al flujo y otras variaciones en el sistema.



Dimensionamiento de Válvulas: Características Operativas



Equal
Percentage

Linear

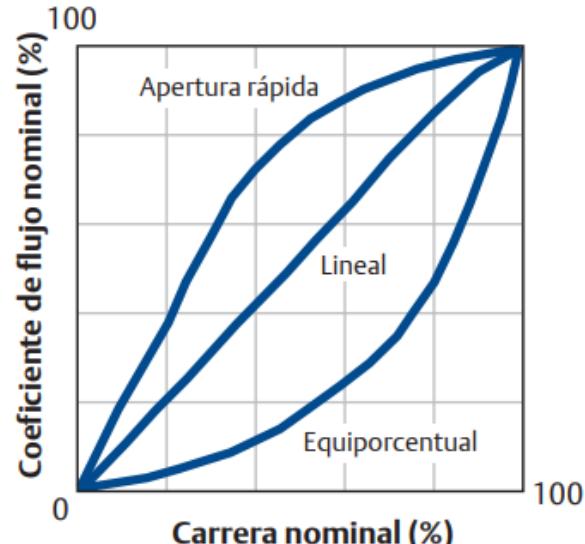
Quick-Open

* Característica Inherente

- Determinada x forma del obturador
- Apertura rápida
- Lineal
- Igual porcentaje

* Objetivo:

- la Característica Inherente debe seleccionarse de modo que la característica instalada produzca el **sistema** más lineal posible



Dimensionamiento de Válvulas: Características Operativas

- ★ La selección del tipo de obturador dependerá de la caída de presión ΔP en la válvula al máximo caudal y a su vez de la máxima caída de presión en la planta.
- ★ Regla de selección:
 - ➡ Un obturador con característica de flujo lineal se utilizará si más del 30% de la caída de presión de la planta es causada por la válvula de control. Un ejemplo típico es el control de nivel.
 - ➡ Un obturador con característica de flujo de igual porcentaje se utilizará si menos del 30% de la caída de presión de la planta es causada por la válvula de control. Este caso es el mas frecuente.
 - ➡ Los obturadores con característica de flujo de apertura rápida por lo general son utilizados en válvulas de aislación (On/Off) y no tanto en válvulas de control.

Dimensionamiento de Válvulas: Características Operativas

* CO Inherente: Modelado Matemático

→ Apertura rápida

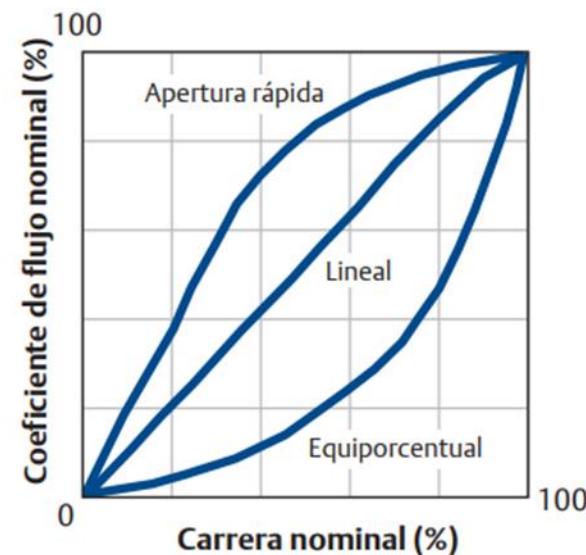
- ★ No existe un modelo aceptado universalmente
- ★ No es muy utilizada para control debido a su acotado rango útil

→ Lineal

$$K_{V(\text{lineal})} = \frac{A[\%]}{100} K_{VS}$$

→ Igual porcentaje

$$K_{V(= \%)} = R^{\frac{A[\%]}{100} - 1} K_{VS}$$

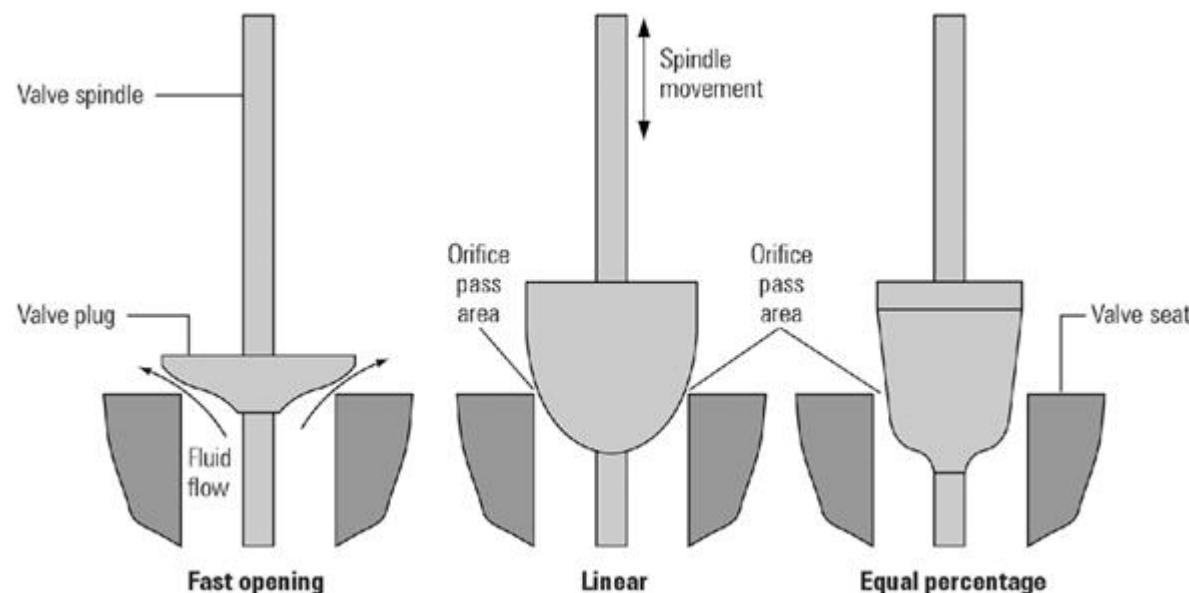


Dimensionamiento de Válvulas

* Característica Operativa en formato de Tablas



Coeficientes
Válvulas Samson



Característica Operativa: Selección de la más apropiada

* Válvula de igual porcentaje para control de

- ➔ caudales cuando las mediciones son no-lineales
- ➔ caudal, temperatura o nivel, cuando la medición es lineal pero ΔP (adoptada para dimensionamiento) < 0.3 ΔP (sistema)
- ➔ presión cuando el proceso varía más rápido que la válvula

* Válvula lineal para control de

- ➔ caudal, temperatura o nivel, cuando la medición es lineal pero ΔP (adoptada para dimensionamiento) > 0.3 ΔP (sistema)
- ➔ válvulas de tres vías
- ➔ válvulas de dos vías en servicio de tres vías
- ➔ nivel

* Válvula de apertura rápida para control de

- ➔ casi todas las aplicaciones on-off
- ➔ válvulas conectadas directamente: gobernadoras de bombas, reguladoras de retro-presión, reguladores reductores de alta capacidad
- ➔ en reemplazo de una válvula lineal

Característica Operativa: Algunos Criterios de Selección

Liquid Level Systems

Control Valve Pressure Drop	Best Inherent Characteristic
Constant ΔP	Linear
Decreasing ΔP with Increasing Load, ΔP at Maximum Load > 20% of Minimum Load ΔP	Linear
Decreasing ΔP with Increasing Load, ΔP at Maximum Load < 20% of Minimum Load ΔP	Equal Percentage
Increasing ΔP with Increasing Load, ΔP at Maximum Load < 200% of Minimum Load ΔP	Linear
Increasing ΔP with Increasing Load, ΔP at Maximum Load > 200% of Minimum Load ΔP	Quick Opening

Flow Control Processes

FLOW MEASUREMENT SIGNAL TO CONTROLLER	LOCATION OF CONTROL VALVE IN RELATION TO MEASURING ELEMENT	BEST INHERENT CHARACTERISTIC	
		Wide Range of Flow Set Point	Small Range of Flow but Large ΔP Change at Valve with Increasing Load
Proportional To Flow	In Series	Linear	Equal Percentage
	In Bypass ⁽¹⁾	Linear	Equal Percentage
Proportional To Flow Squared	In Series	Linear	Equal Percentage
	In Bypass ⁽¹⁾	Equal Percentage	Equal Percentage

1. When control valve closes, flow rate increases in measuring element.

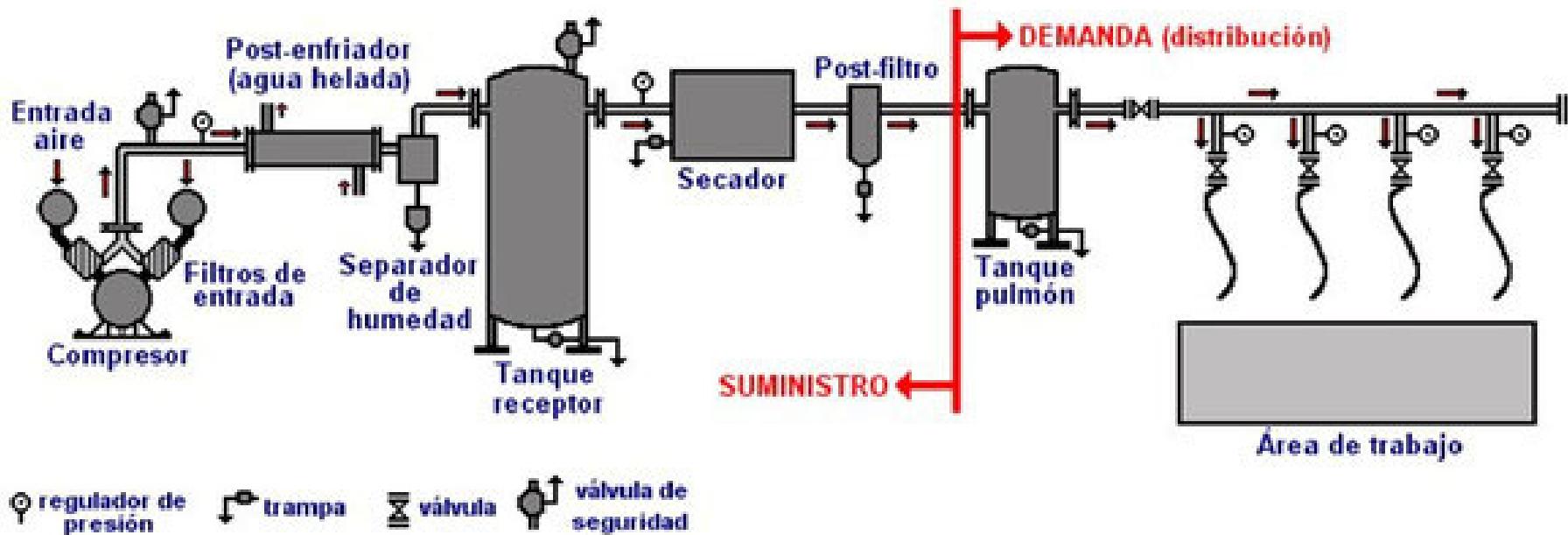


Sensores y Actuadores 22.88

Neumática e Hidráulica

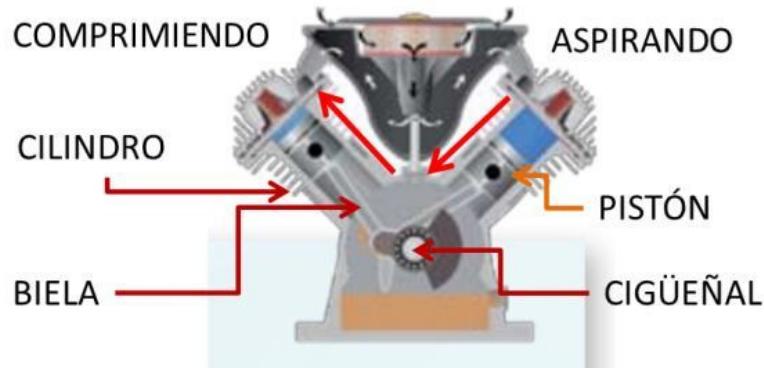
Esquema básico

La siguiente figura muestra un esquema básico de generación y distribución de aire comprimido:



Compresores de Pistón

- En sistemas pequeños suelen utilizarse compresores a pistón de simple o doble efecto.



- Los compresores de pistón pueden ser lubricados o exentos de aceite. En el caso de los compresores exentos, la cámara de aspiración y compresión queda aislada de cualquier contacto con el lubricante del compresor, trabajando en seco y evitando que el aire comprimido se contamine con los lubricantes del equipo.

Compresor de Tornillo

- En sistemas mas grandes se suelen utilizar compresores de tornillo.

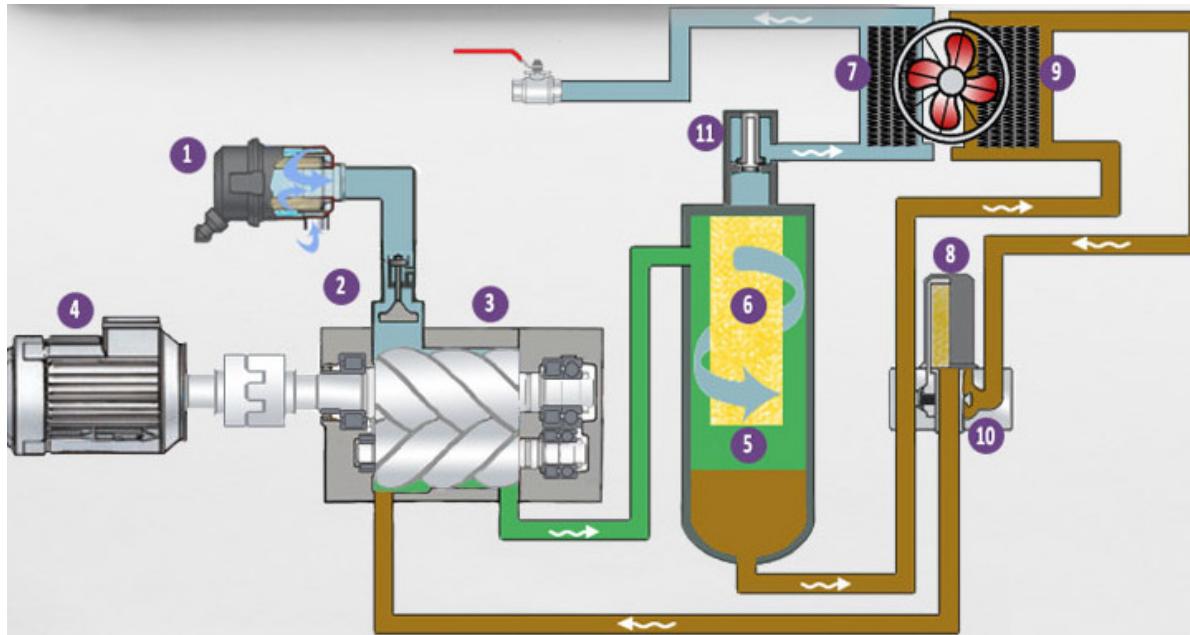


- El aire llena los espacios creados entre ambos tornillos, aumentando la presión según se va reduciendo el volumen en las citadas cámaras.

Compresor de Tornillo

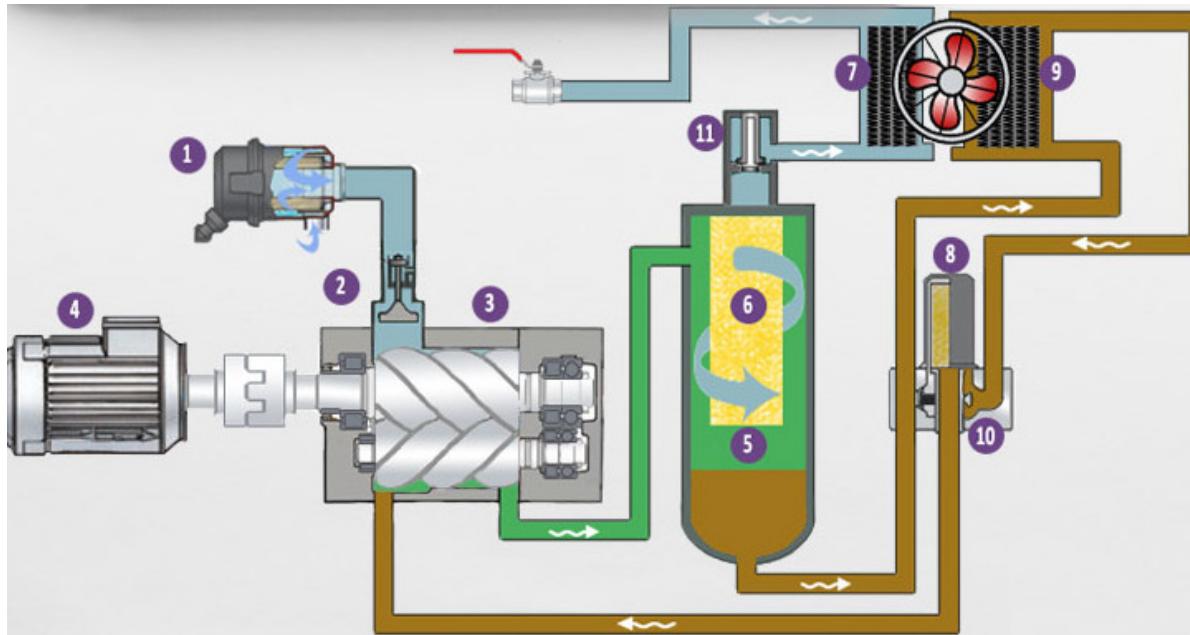
- Este tipo de tecnología se fabrica en dos ejecuciones diferentes:
 - Compresores de tornillo lubricado
 - En el compresor de tornillo lubricado, se inyecta aceite en los rotores para lubricar, sellar y refrigerar.
 - Este tipo de compresor es el más habitual en la industria, debido a que en la mayoría de las aplicaciones, el residual de aceite en el aire comprimido no es un obstáculo para el proceso.
 - Compresores de tornillo exentos de aceite
 - El diseño de los compresores exentos es mas complejo dado que entre los rotores no se inyecta lubricante alguno, haciendo que estos elementos trabajen en seco.

Compresor de Tornillo Lubricado



- El aire es aspirado por el compresor a través de la válvula de aspiración (2) y el filtro (1), entrando en el tornillo (3) por la zona de aspiración.
- El aire circula a través de los dos tornillos y es comprimido sobre el recipiente de separación aire/aceite (5). Donde el aire comprimido entra forzado a realizar un giro brusco, con la idea de conseguir que se desprenda de la mayor cantidad de aceite posible.
- Para mejorar la eficiencia de esa separación, el aire comprimido pasa a través de un filtro (6) que elimina los restos de aceite en el aire hasta un residual muy pequeño.
- Los intercambiadores de calor (7) bajan la temperatura del aire comprimido a la adecuada para su uso seguro. Estos intercambiadores pueden ser Aire/Aire o Aire/Agua.

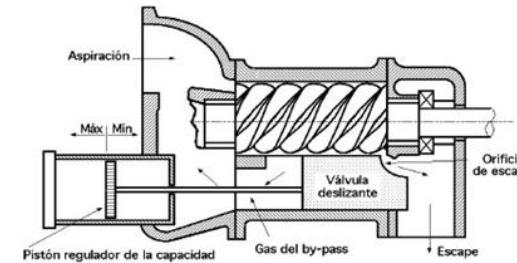
Compresor de Tornillo Lubricado



- Antes de llegar el aire comprimido al intercambiador, pasa por la válvula de retención y mínima presión (**11**). Esta válvula por un lado mantiene la presión interna del circuito de aire a los valores mínimos especificados por el fabricante y por otro, evita el retroceso de aire desde la red.
- La lubricación de estos compresores se realiza con un aceite especialmente formulado para este trabajo. Una vez separado el aceite en el recipiente (**5**), es conducido por un circuito cerrado que incluye un sistema de filtrado (**8**) para eliminar las impurezas que ha podido recoger del aire, y un **refrigerador** (**9**) para reducir su temperatura. Una vez limpio y a la temperatura adecuada, el aceite es inyectado nuevamente en el tornillo.
- Pero el aceite de estos compresores no debe estar frío ni excesivamente caliente. Por ese motivo, dentro del circuito de lubricación, una válvula termostática (**10**) determina si el aceite fluye hacia el refrigerador o retorna directamente al tornillo, en función de la temperatura.

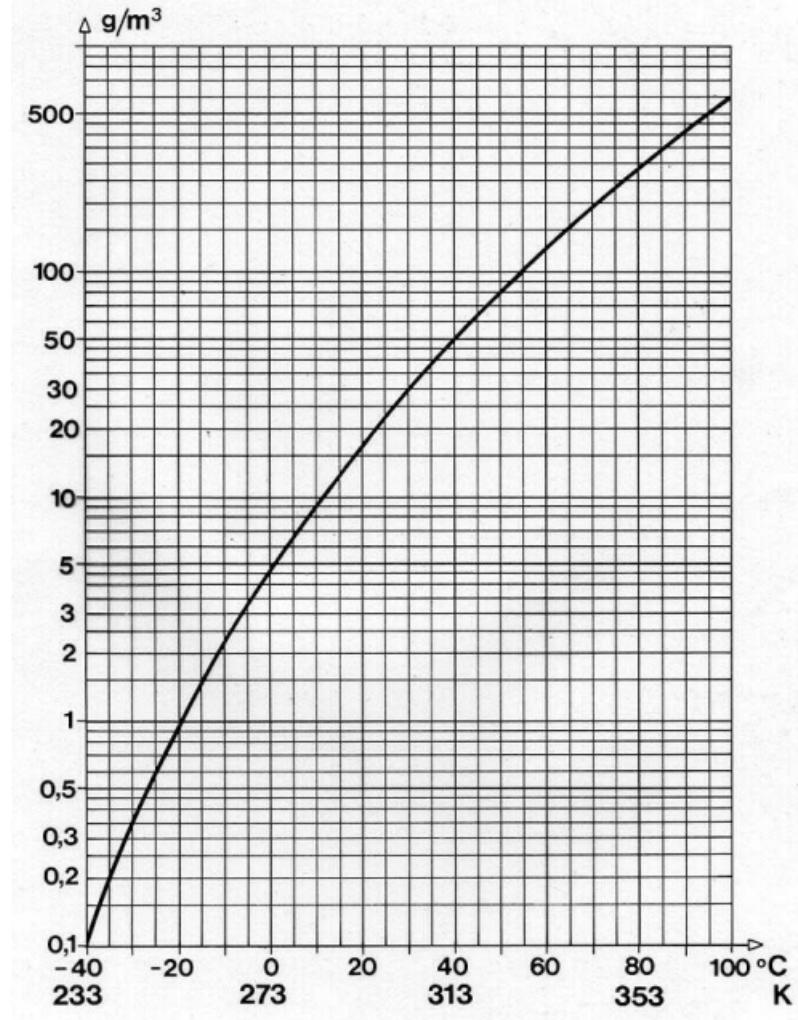
Regulación del Compresor

- Los compresores de tornillo trabajan entre una presión máxima y mínima para regular su funcionamiento. Existen varias formas de hacerlo lograr esto:
 - Arranque y Paro:
 - El compresor arranca poniendo en marcha su motor principal cuando la presión del sistema ha llegado a su valor mínimo, parando dicho motor cuando la presión llegue a su valor máximo.
 - Este sistema es poco habitual en los compresores de tornillo lubricado, siendo utilizado únicamente en algunas aplicaciones especiales y con equipos de baja potencia.
 - Carga y Descarga:
 - Cuando el sistema llega al valor de presión mínima, la válvula de aspiración (2) abre y el tornillo aspira el aire exterior. Con esta maniobra se dice que el compresor ha entrado en carga.
 - Cuando en el sistema se llega a la presión máxima, la válvula de aspiración (2) se cierra y el compresor deja de suministrar aire. En este momento se dice que el compresor está en descarga.
 - Este es el sistema más habitual.
 - Carga y Descarga con regulación proporcional:
 - Similar al anterior pero la válvula tiene apertura variable.
 - Velocidad Variable:
 - Este es el sistema más avanzado en el control del caudal del compresor y no sustituido al anterior por su eficiencia en la regulación del caudal y el ahorro de energía.
 - Se basa en la propiedad de estos compresores al ser de desplazamiento positivo, es decir que por cada revolución desplazan un volumen determinado de aire.

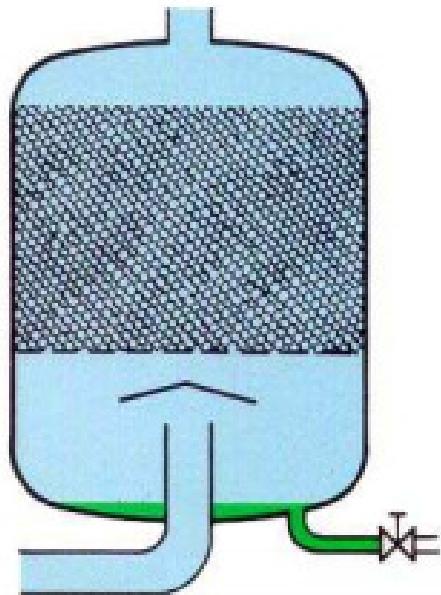


Humedad Contenida en el Aire

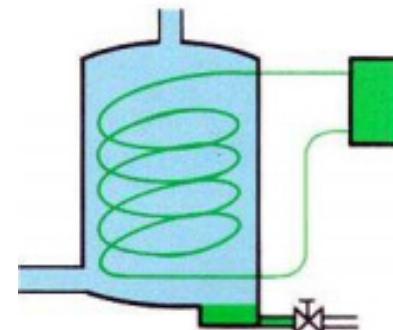
- Cuando la temperatura aumenta, el aire es capaz de tener más agua en suspensión.
- El gráfico da los valores para una humedad ambiente relativa del 100% (caso extremo).
- Ejemplo:
 - Consideramos que la temperatura absoluta del aire en condiciones “ambiente” sea de 293º K (20º C) y en condiciones de “comprimido”, sea de 303º K (30º C).
 - Para una presión de 800 kPa (8 bar), un volumen aspirado es de 8 m³ y humedad relativa de 50%. El gráfico nos muestra:
 - A 293º K (20º C) tenemos 16 g de agua por m³ al 100%.
 - A 50% que es nuestro caso, tendremos 8 g de agua por m³.
 - Entonces, para 8 m³ la cantidad de agua será de $8 \times 8 = 64$ g.



Tanque Receptor

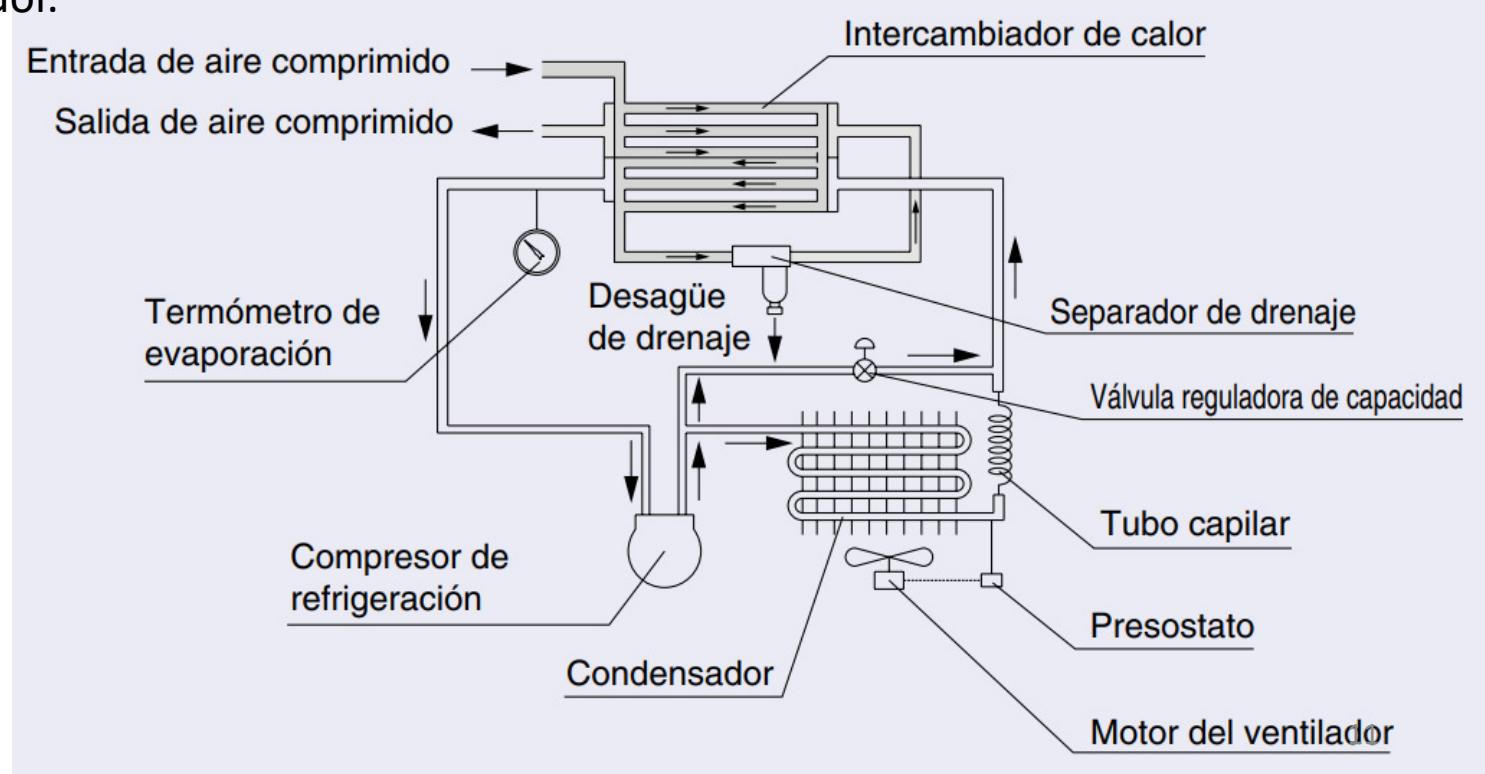


- El aire ingresa con una gran cantidad de agua
- El aire llega por debajo y choca con una placa desviadora que realiza una primera separación abriendo una válvula de purga cuando el nivel de agua alcanza un determinado valor.
- Este es una primera etapa de separación del agua.
- El tanque podría estar refrigerado para mejorar la condensación del agua en su interior.



Secado de Aire por Refrigeración

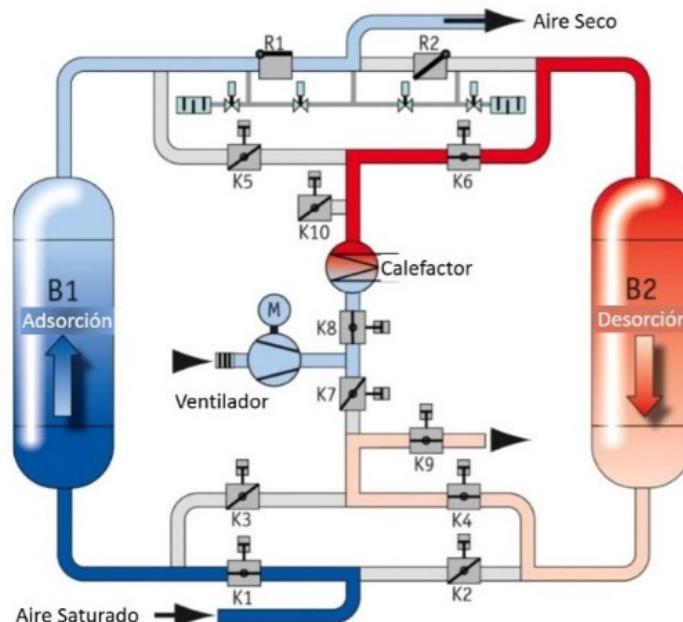
- El aire comprimido saturado entra en el intercambiador de calor aire-aire.
- Primero, el aire entrante se enfria por la acción del aire frío del secador.
- Seguidamente, el aire atraviesa el evaporador, donde se enfria hasta alcanzar 3°C de punto de rocío.
- Mientras el aire se enfria, el vapor se condensa y se expulsa por la purga automática.
- El aire seco vuelve a atravesar el intercambiador de calor aire-aire donde se recalienta antes de salir del secador.



Secado de Aire por Adsorción



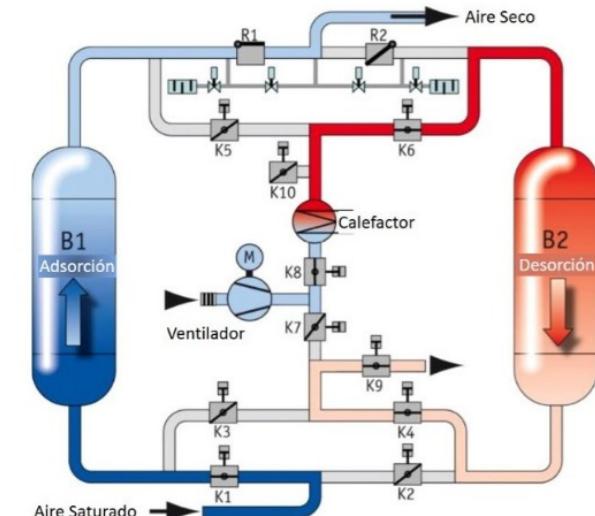
- El efecto de la adsorción se consigue por la atracción de la molécula del agua a su paso por un lecho de desecante.
- Este desecante suele presentarse en forma de bolitas muy porosas que retienen las gotas del agua en su superficie, dejando pasar el aire comprimido y consiguiendo con ello un determinado grado de sequedad.
- Mientras el aire comprimido se seca en el recipiente de adsorción B1, se regenera el recipiente de adsorción B2, que antes se había saturado de humedad.
 - Antes del comienzo de la regeneración, la presión en el recipiente de adsorción B2 se reduce suavemente hasta la presión atmosférica.
 - La desorción se realiza por aire ambiente aspirado y calentado a la temperatura requerida
 - La humedad adsorbida por el desecante se vaporiza y se libera en la atmósfera



Secado de Aire por Adsorción

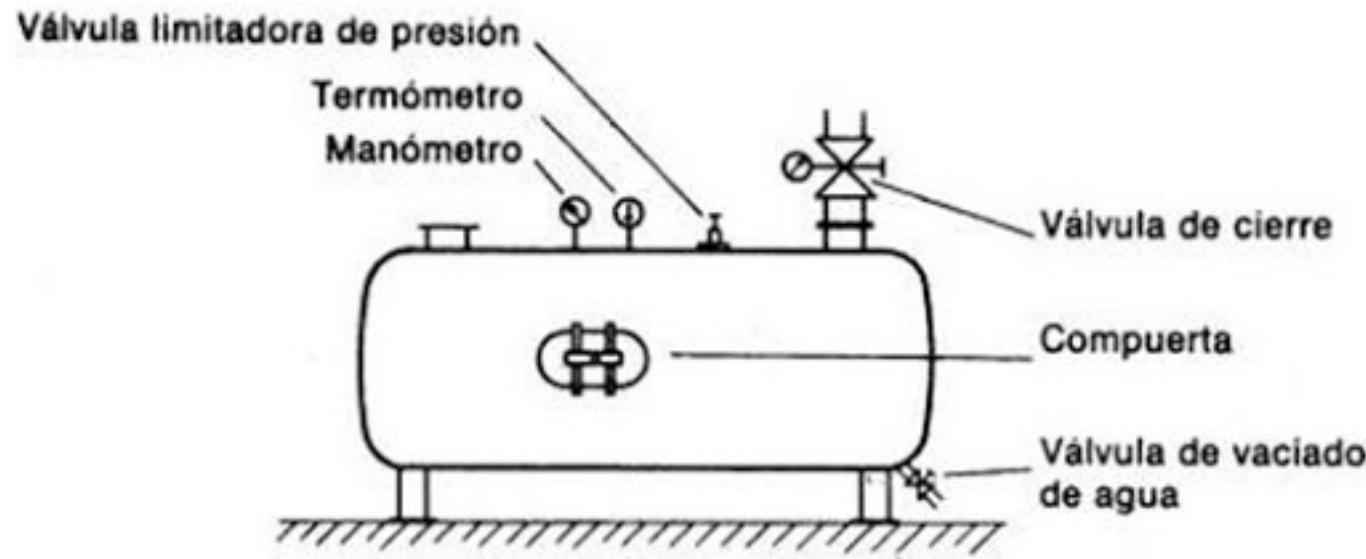
- Ciclo de funcionamiento del secador:

Ciclo total	Ciclo alternante			B1	B2
	Adsorción	Despresurización	Desorción	Enfriamiento	Formación de presión
	Adsorción				Reserva
	Adsorción				Adsorción
Comutación					
				Despresurización	Adsorción
				Desorción	Adsorción
				Enfriamiento	Adsorción
				Formación de presión	Adsorción
				Reserva	Adsorción
				Adsorción	Adsorción

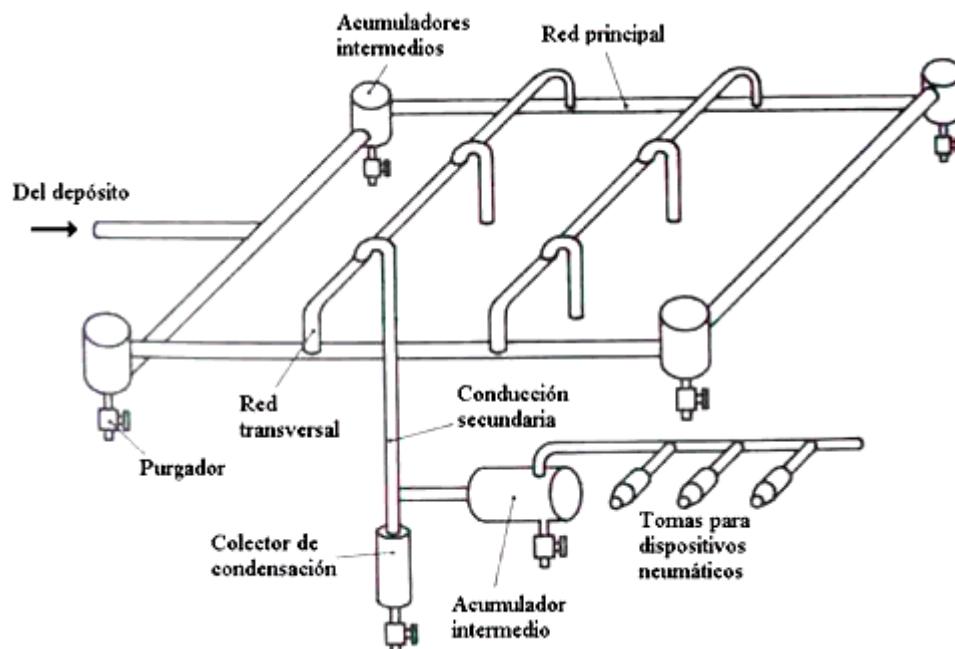
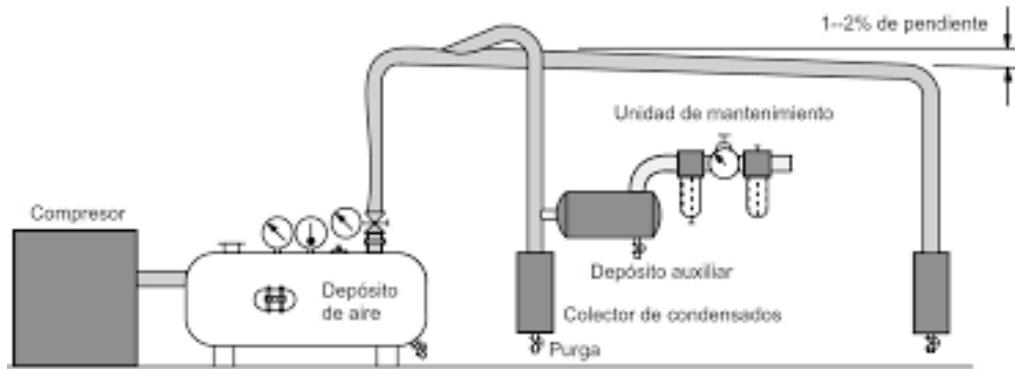


Acumulador

- Similar al Tanque Receptor
- Tiene la finalidad de almacenar el aire comprimido que proporciona el compresor y el secador.
- Su fin principal consiste en adaptar el caudal del compresor al consumo de la red.
- Puede colocarse horizontal o verticalmente.



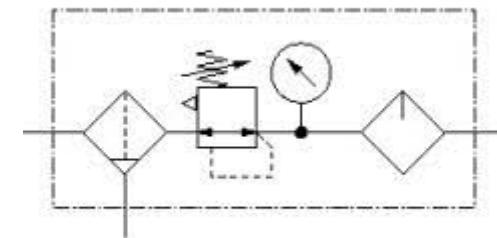
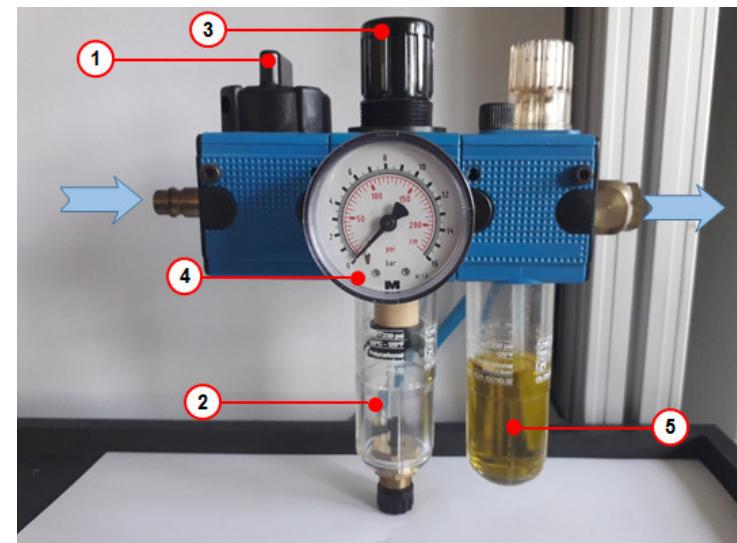
Cañerías de Distribución



- Se utilizan distintas estrategias en función del tamaño de la instalación.
- Las tomas de aire siempre son desde la parte superior del caño para evitar el ingreso de agua a los consumidores.
- En sistemas medianos a grandes se suele hacer un colector principal circular para disminuir las perdidas.

Unidad de mantenimiento

- Su objetivo es acondicionar el aire para el sector al cual van a abastecer.
- Suelen estar compuestas por:
 1. Una válvula de bloqueo ON/OFF
 2. Un filtro con separador de agua
 3. Regulador de presión con manómetro
 5. Unidad de lubricación
- Pueden agregarse otros elementos como:
 - Electroválvula de bloqueo de aire
 - Separadores de agua con purga automática



Distribución de aire comprimido

- Una vez acondicionado el aire en la unidad de mantenimiento, es necesario distribuir el mismo hasta los elementos de control (electroválvulas) y luego hasta los actuadores.
- Para la distribución existen diversos equipos:
 - Bloques de distribución →



Distribución de aire comprimido

- Mangueras flexibles:



- T con acople rápido:



- Acoples rápidos:



- Racores para tubos plásticos:

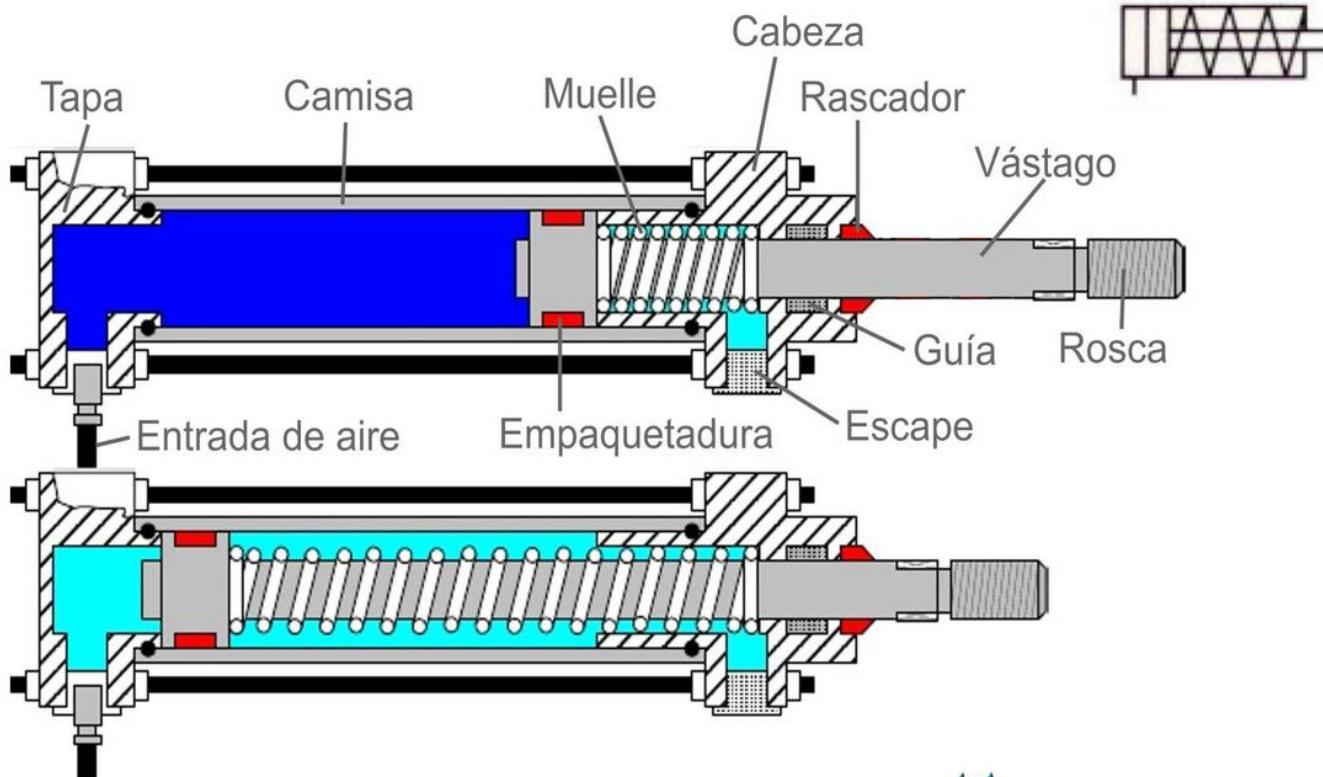


- Pasamuros:



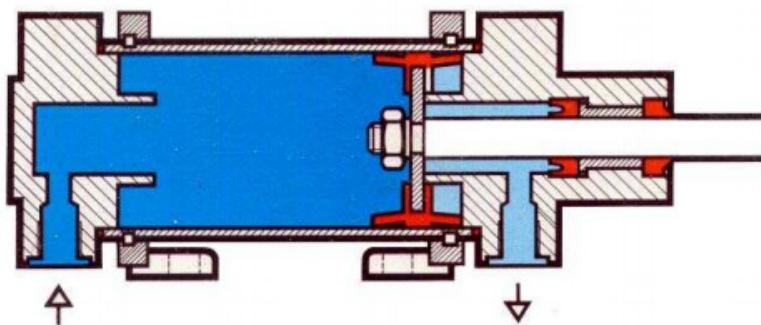
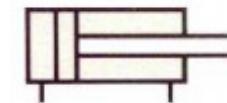
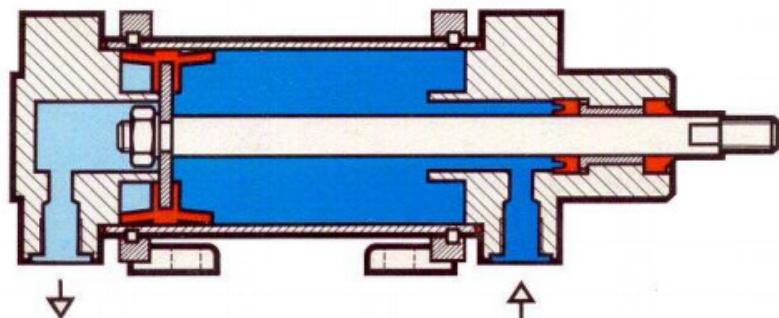
Cilindros neumáticos de simple efecto

- Al aplicar el aire comprimido a la parte posterior del émbolo avanza el vástago.
- Al efectuarse la purga del aire el resorte lleva al émbolo a su posición inicial.
- Debido a la longitud del resorte se utilizan cilindros de simple efecto hasta carreras de 100 mm aprox.
- **Aplicación:** Estos cilindros sólo pueden efectuar trabajo en una dirección, por lo tanto es apropiado para tensar, expulsar, introducir, sujetar, etc.



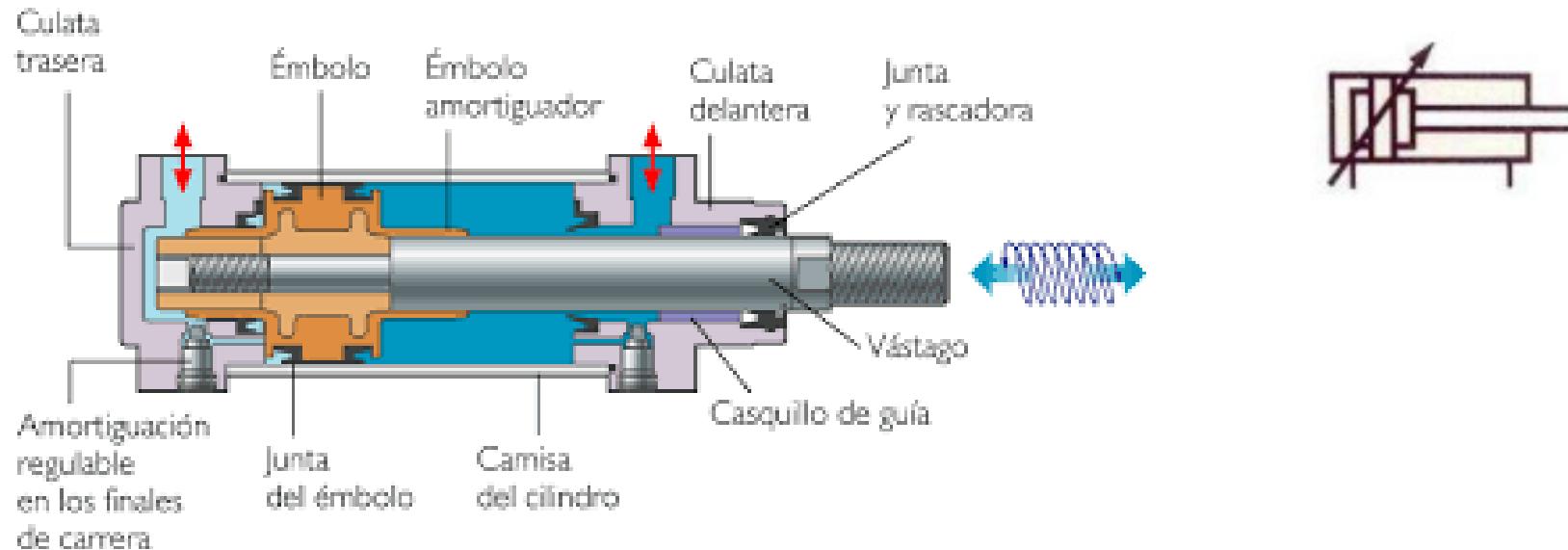
Cilindros neumáticos doble efecto

- A igualdad de presión, la fuerza del émbolo es mayor en el avance que en el retroceso debido a la mayor sección posterior sobre la anterior.
- Aplicación: En los casos en que el trabajo sea en las dos direcciones además las carreras que pueden obtenerse son mayores a la de los cilindros de simple efecto.

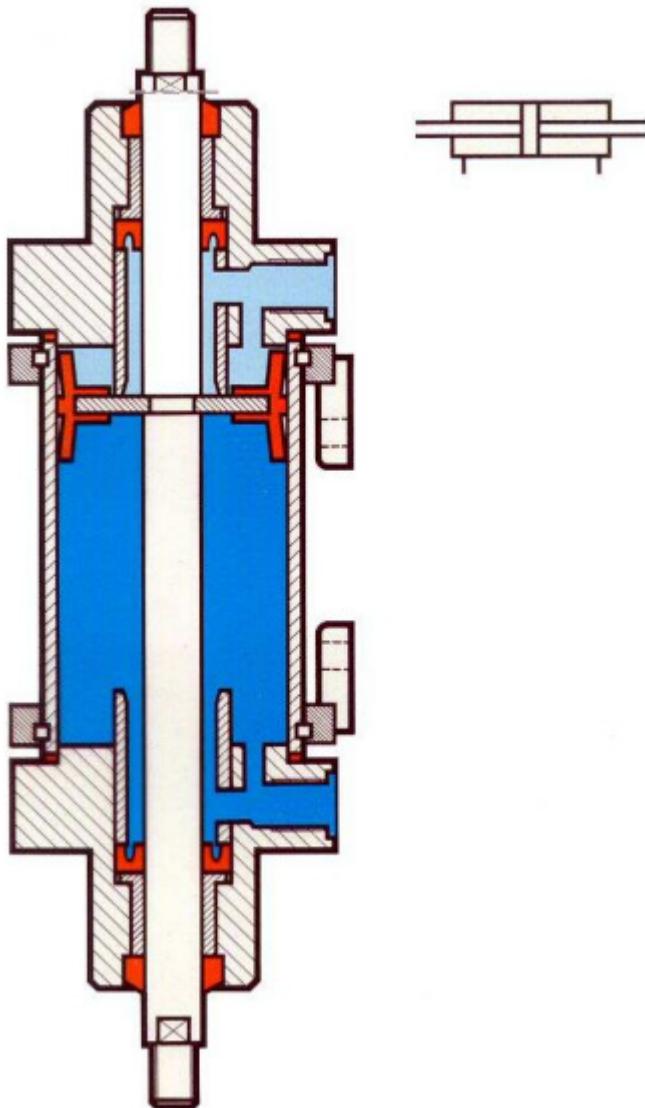


Cilindros neumáticos doble efecto con amortiguación interna

- Ante de alcanzar la posición final, el émbolo de amortiguación interrumpe la salida directa del aire hacia el exterior.
- Se constituye una almohada neumática, debida a la sobre-presión, en el espacio remanente del cilindro: la energía cinética se convierte en presión, debido a que el aire solo puede salir a través de una pequeña sección.
- En la inversión del aire penetra libremente a través de la válvula de retención y el émbolo sale de nuevo con toda fuerza y velocidad.

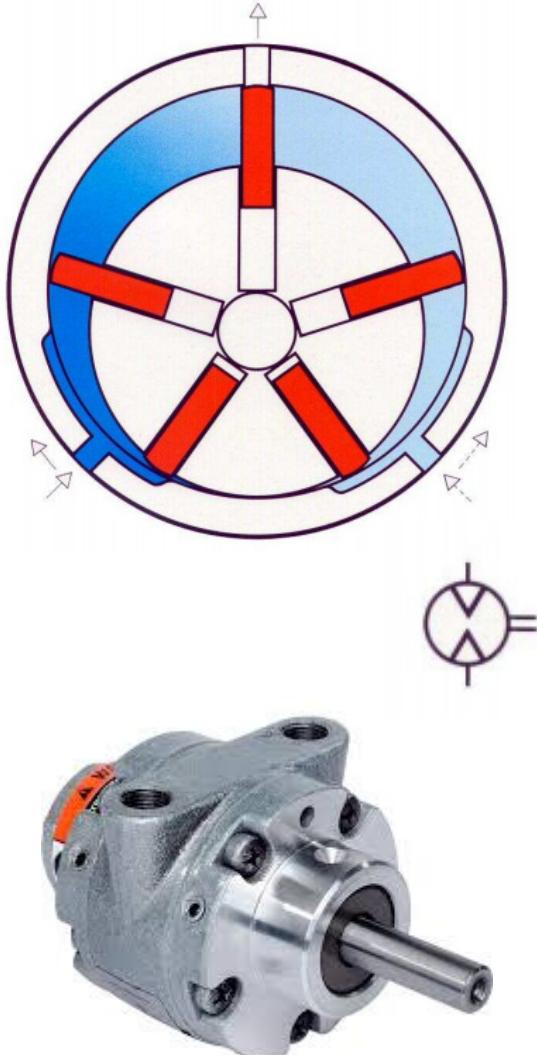


Cilindro de doble efecto con doble vástago



- Este tipo constructivo puede soportar mayores fuerzas transversales y momentos de flexión que el cilindro de doble efecto normal, debido a que el vástago esta doblemente poyado.
- Ambas superficies del embolo son iguales y con ella las fuerzas resultantes.
- Cuando el espacio es reducido pueden fijarse las levas de accionamiento para los órganos de mando y señal en el extremo del vástago libre.

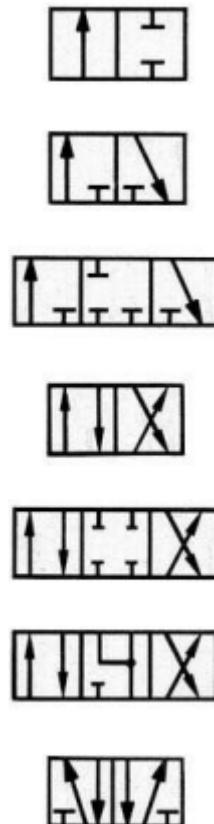
Motor neumático de paletas



- Este motor de paletas está compuesto esencialmente de un rotor, cilindro y dos tapas con cojinetes.
- En el rotor existen ranuras, en las cuales se deslizan las láminas o paletas.
- El rotor está apoyado excéntricamente con respecto al eje del cilindro.
- Las paletas son apretadas contra la pared interior del cilindro, formando cámaras de trabajo de diferentes tamaños.
- Al introducir aire comprimido en la cámara menor, se produce un momento de giro debido a la diferencia de presión. Por el movimiento giratorio, la cámara se amplia, el aire se expande y sale.
- Los motores de paletas trabajan a velocidades relativamente elevadas, son reversibles y cubren una amplia gama de potencias.
- Otras ventajas: construcción sencilla, escaso peso por unidad de potencia, seguridad contra sobrecargas y regulable de manera continua.

Válvulas Neumáticas

- Las válvulas se clasifican en:
 - Válvulas distribuidoras (de vías).
 - Válvulas de anti-retorno.
 - Válvulas de estrangulación.
 - Válvulas limitadoras de presión.
 - Válvulas reguladoras de presión
- Los símbolos gráficos según ISO 1219 representan el funcionamiento, no la construcción de la válvula.
- En las válvulas distribuidoras cada posición de mando está representada por un cuadrado.
- Las flechas indican la dirección de paso, las rayas transversales los cierres. Las conducciones se conectan al cuadrado que representa la posición de reposo de la válvula.
- Las válvulas distribuidoras se denotan por **en número de vías / numero de posiciones**.

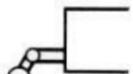
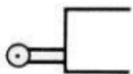
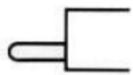
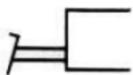
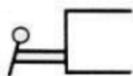
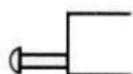
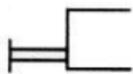


Accionamiento de Válvulas Neumáticas

Los diferentes modos de accionamiento se indican según ISO 1219:

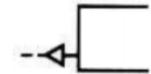
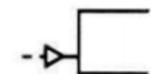
Mecánico:

- Pulsador (plano)
- Pulsador (hongo)
- Palanca
- Pedal
- Leva
- Rodillo
- Rodillo pivotante
- Resorte



Neumático:

- Positivo o presión
- Negativo o depresión

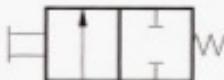
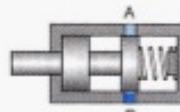
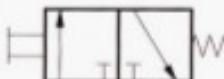
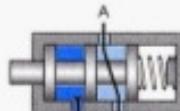
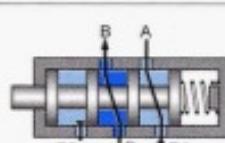


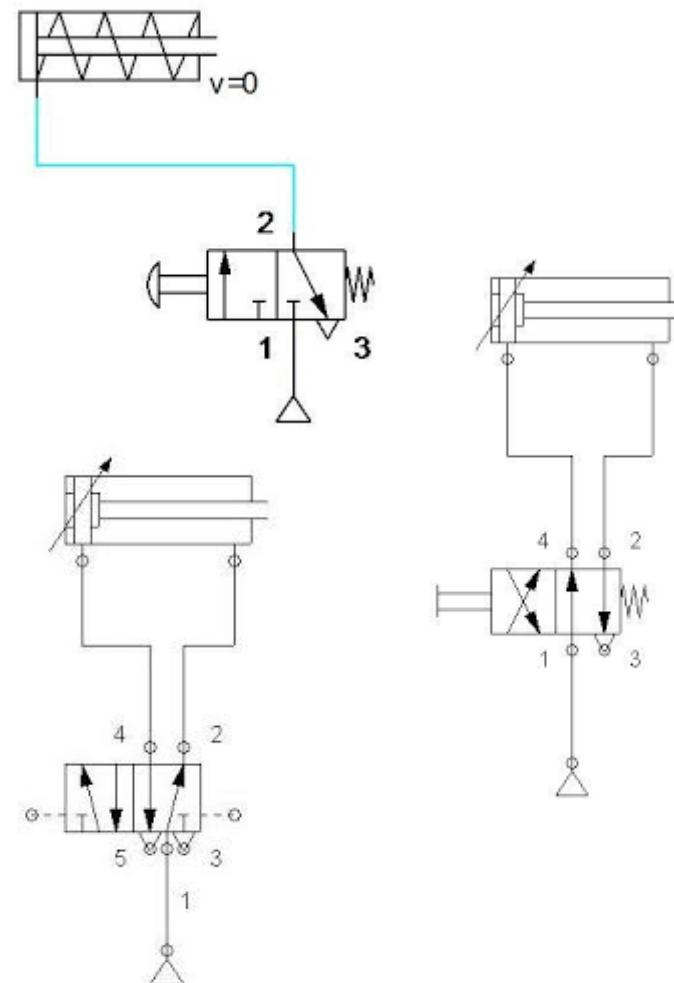
Eléctrico:

- Solenoide (un arrollamiento)
- Solenoide (dos arrollamientos en el mismo sentido)
- Solenoide (dos arrollamientos en sentido contrario)

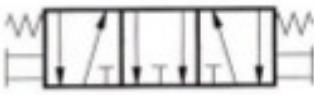
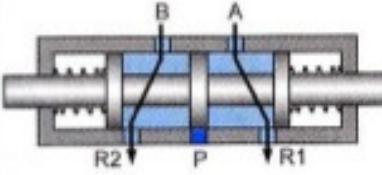
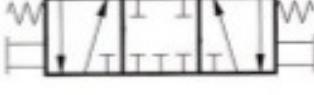
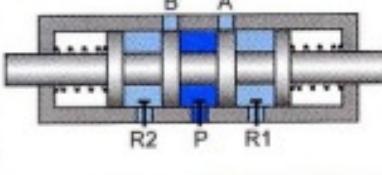
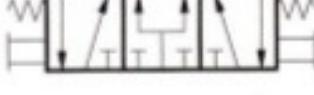
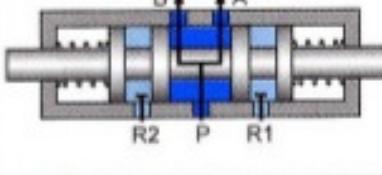


Válvulas Distribuidoras

Símbolo	Forma constructiva	Función	Aplicación
		Función de conexión 2/2 ON/OFF sin escape.	Motores de aire y sopladores neumáticos.
		3/2 Normalmente cerrada. NC	Cilindros de simple efecto y señales neumáticas.
		3/2 Normalmente abierta. NO	Cilindros de simple efecto y señales neumáticas inversas.
		4/2 Conexión entre utilizaciones A y B con escape común.	Cilindros de doble efecto.
		5/2 Conexión entre utilizaciones A y B con escapes separados.	Cilindros de doble efecto.



Válvulas Distribuidoras

Símbolo	Forma constructiva	Función	Aplicación
		5/3 Centro abierto. Como 5/2, pero con utilizaciones A y B a escape en posición central.	Cilindro de doble efecto, con posibilidad de ser despresurizado.
		5/3 Centro cerrado. Como 5/2, pero con todas las vías cerradas en posición central.	Cilindro de doble efecto, que se ha de detener en cualquier posición.
		5/3 Centro presurizado. Como 5/2, pero con presión en las vías de utilización en posición central.	Aplicaciones especiales. Cilindros con unidad de bloqueo.

Electroválvulas

- Se suele denominar electroválvulas a aquellas válvulas distribuidoras que tienen accionamiento eléctrico (simple o doble efecto).
- Estos equipos son utilizados para comandar actuadores neumáticos como cilindros o bien actuadores de válvulas vistos en clases anteriores.
- Las electroválvulas que cumplen con la norma Namur poseen salidas laterales a una medida normalizada para ser colocada directamente sobre un actuador tipo piñon y cremallera. El sellado se realiza mediante o'rings.



Islas de Electroválvulas

- Cuando se utilizan muchas electroválvulas se las suele combinar en un mismo bloque que las provee de aire comprimido y salida de escape.
- Tienen acoplos rápidos para conectar mangas a sus salidas.
- Dada la agrupación de señales, suele ser común que cuenten con un cabezal con comunicación por bus de campo.

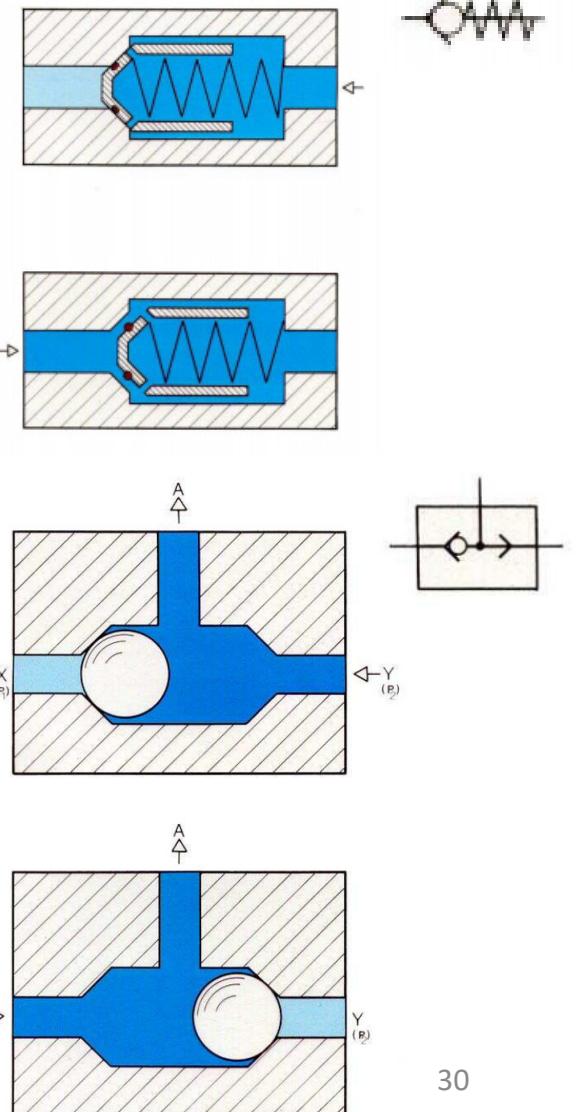


IO-Link



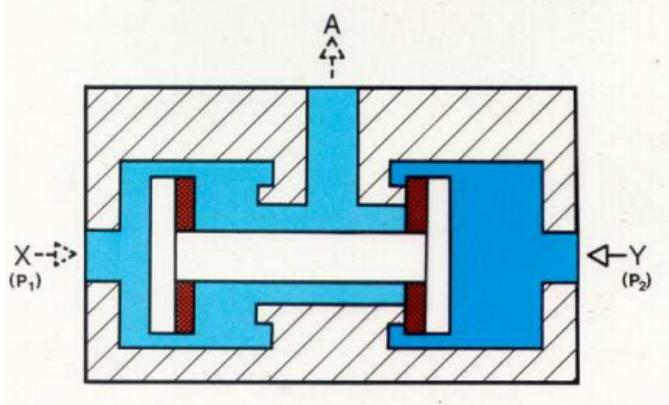
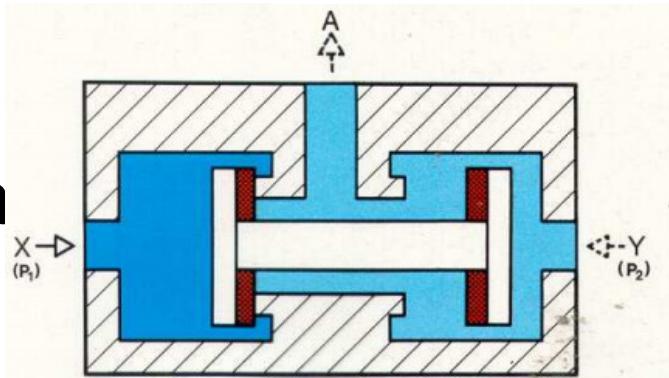
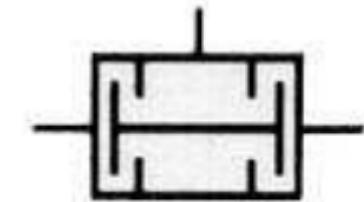
Otras válvulas

- Válvula anti-retorno: permiten el paso del aire únicamente en una dirección.
- Válvula selectora: Deja fluir el aire desde X (P_1) o Y (P_2) hasta A. Es una OR neumática.



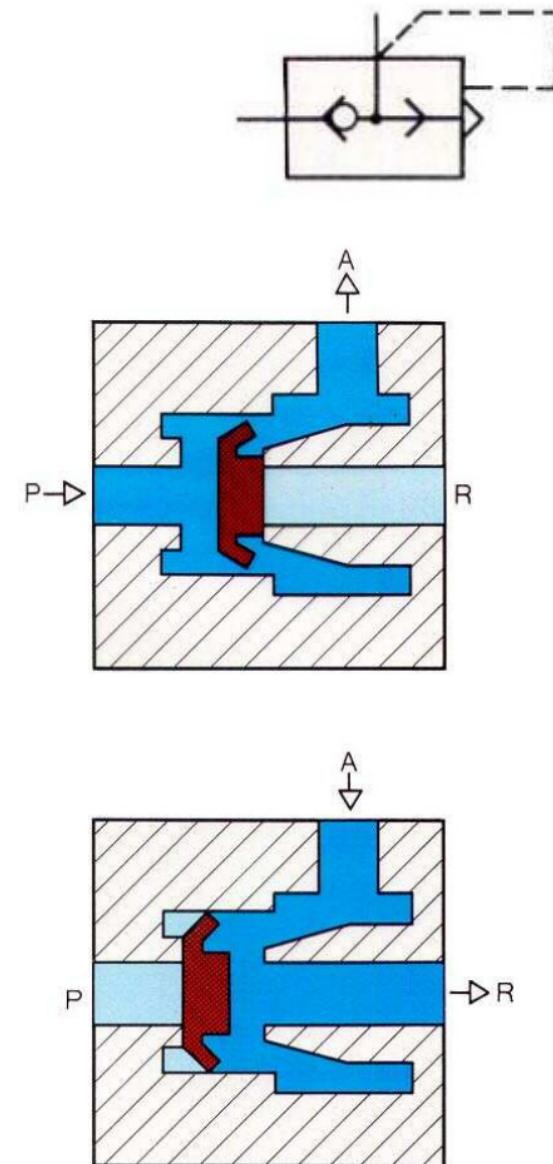
Otras válvulas

- Válvula de simultaneidad:
Tiene dos entradas de presión X (P_1), Y (P_2) una salida A. En A sólo habrá salida cuando ambas entradas reciban aire comprimido. Es una AND neumática.



Otras válvulas

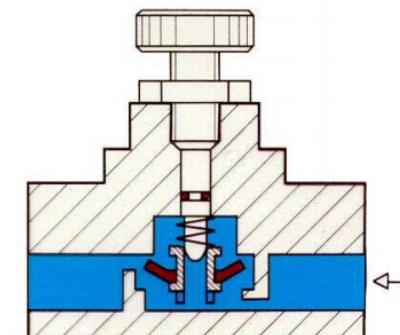
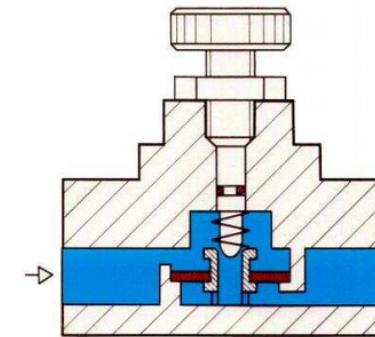
- Válvula de escape rápido:
 - Estas válvulas sirven para la rápida purga de cilindros, la velocidad del embolo puede ser aumentada de manera apreciable.
 - Se colocan entre las válvulas distribuidoras y los cilindros.
- La junta obstruye la salida R cuando el aire fluye de P hacia A.
- Al pulsar el aire, desciende la presión en P, el aire comprimido de A impulsa la junta hasta P, fluyendo todo el aire directamente por R hacia la atmósfera.



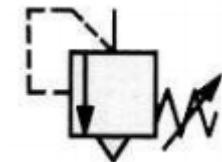
Otras válvulas



- Válvula de estrangulamiento con anti-retorno:
 - Estas válvulas con anti-retorno y estrangulación regulable franquean el aire comprimido solo en una dirección.
 - La sección transversal de paso puede variar de cero hasta el diámetro nominal de la válvula.
 - En dirección contraria la membrana se levanta de su asiento y el aire comprimido tiene paso libre.

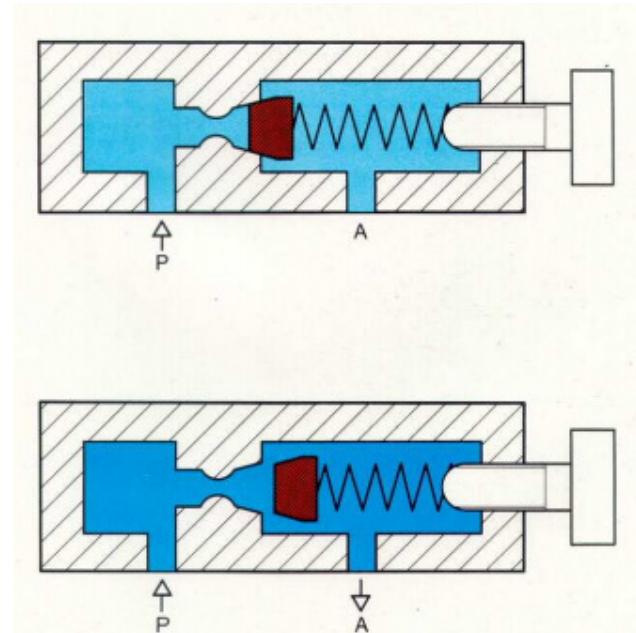


Otras válvulas

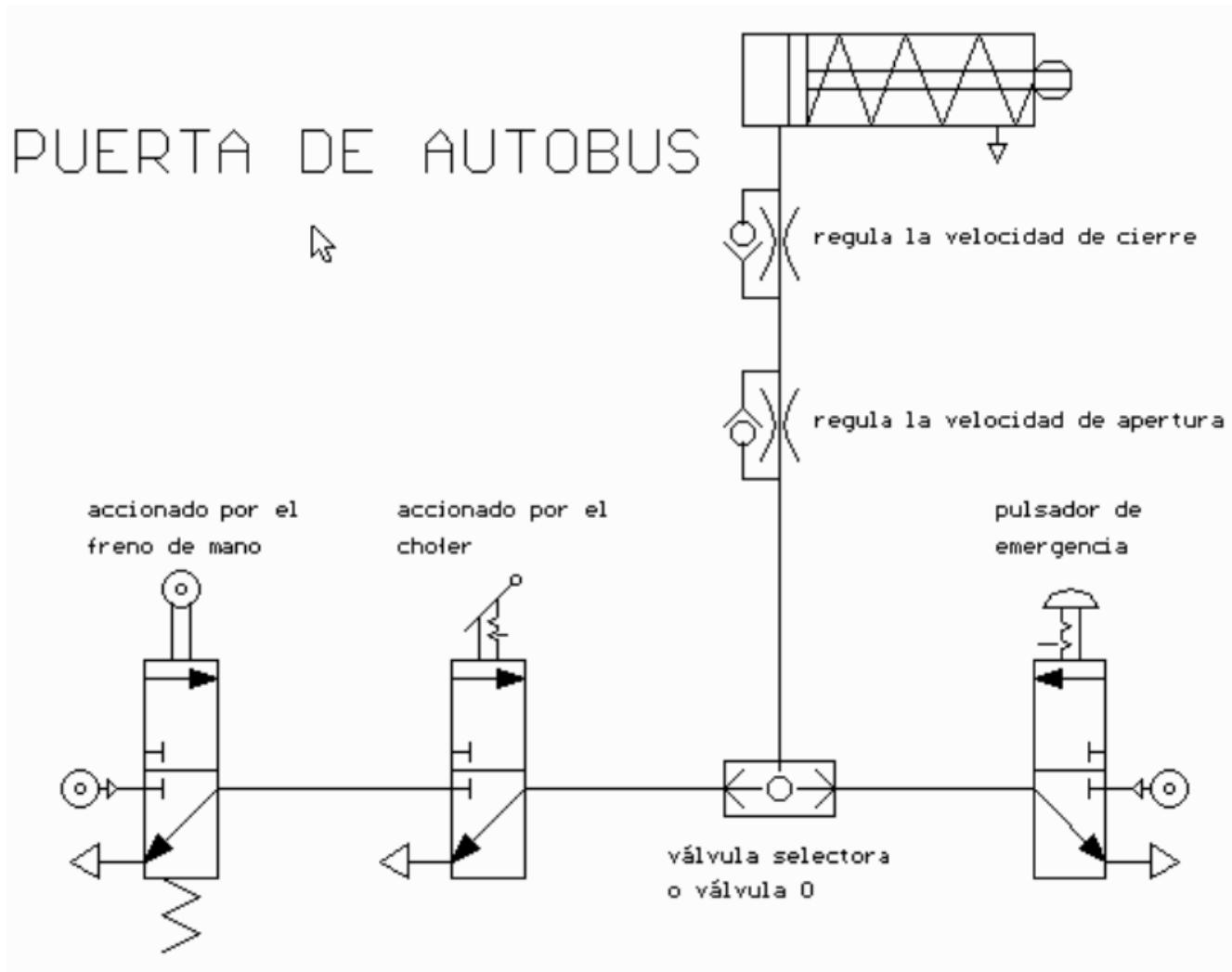


- Válvula de limitación de presión:

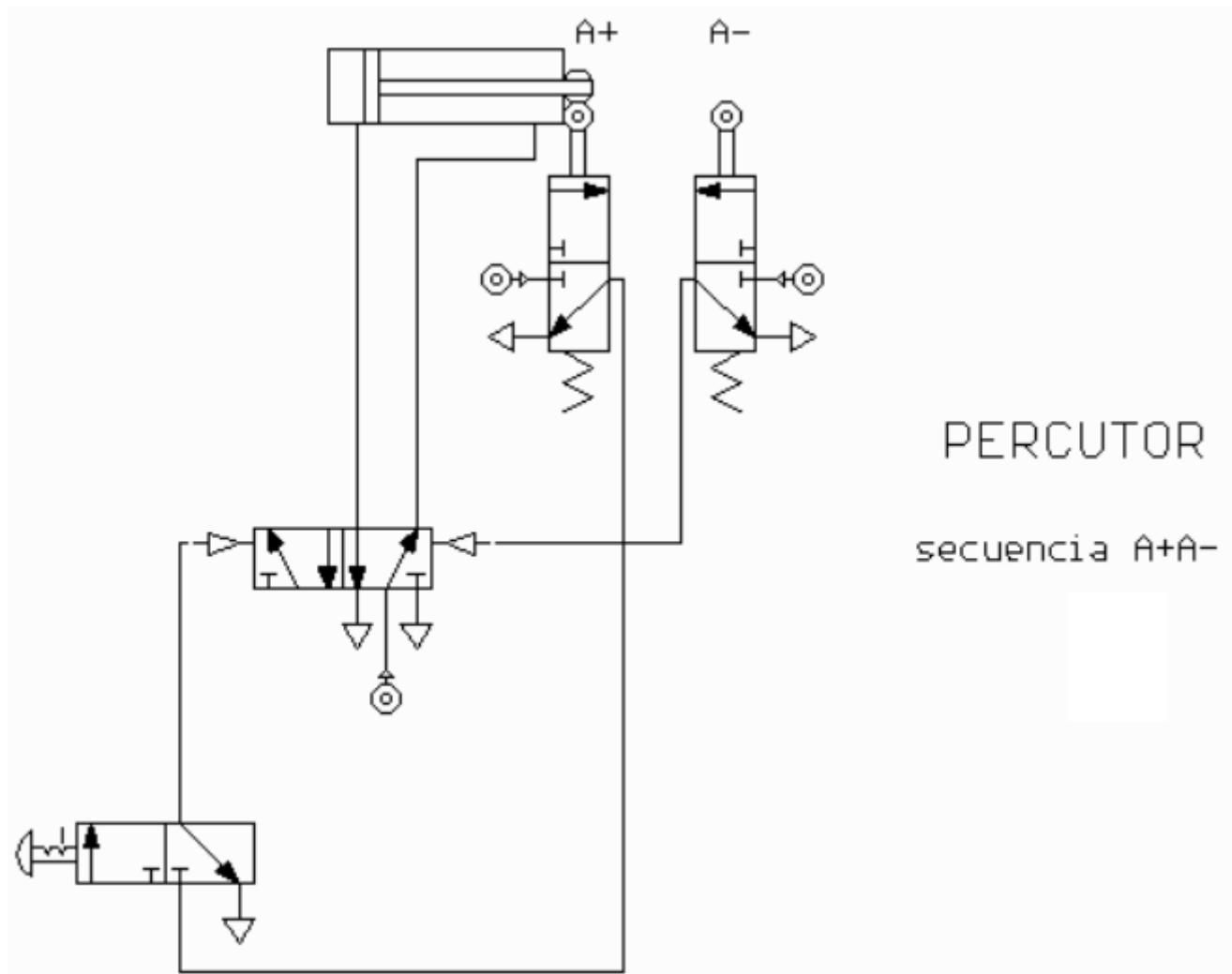
- Esta válvula está constituida por una junta de asiento cónica, un resorte de compresión y un tornillo de ajuste.
- Cuando la presión en P alcance un valor que corresponde al pretensado del resorte, el cono se levanta de su asiento y libera la vía hacia la purga de aire.



Ejemplos

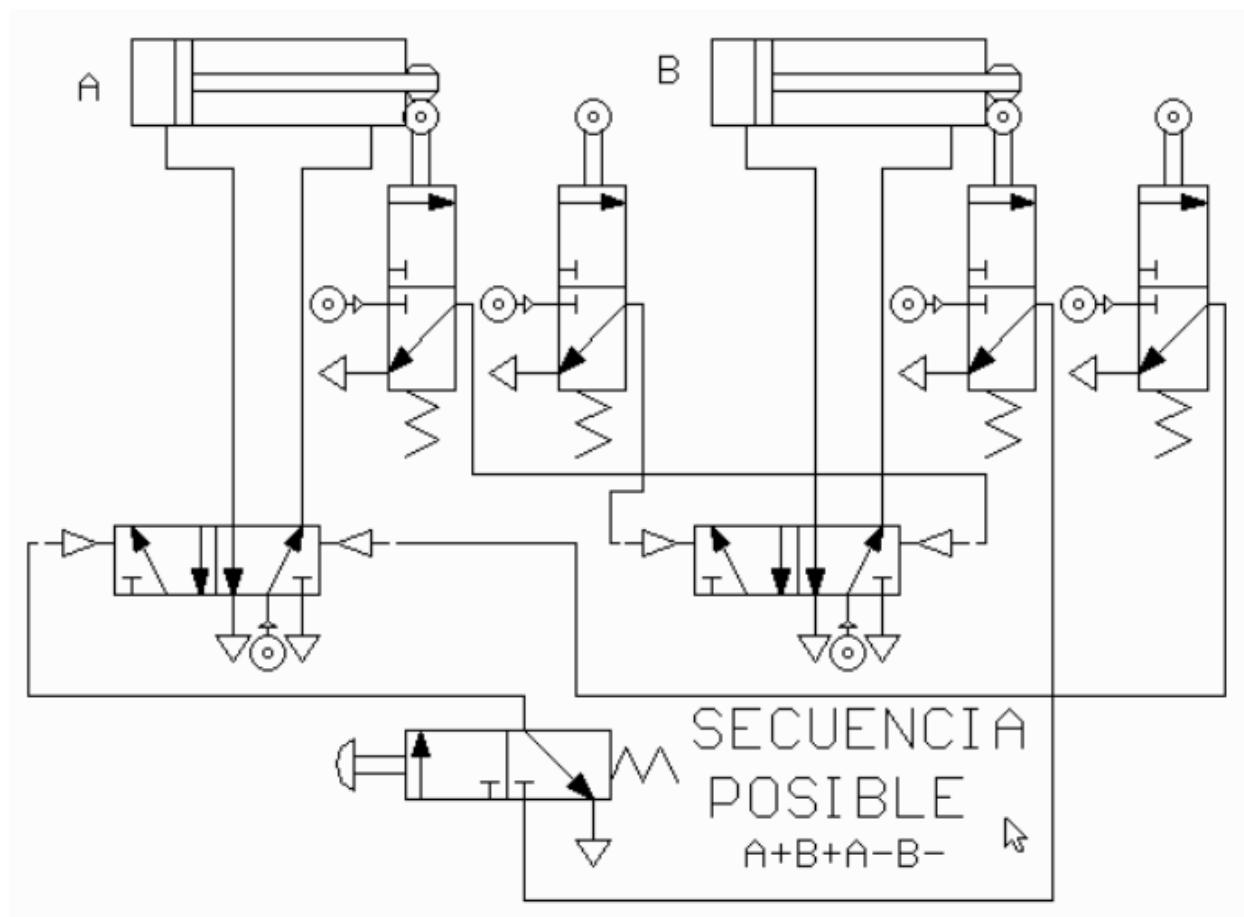


Ejemplos



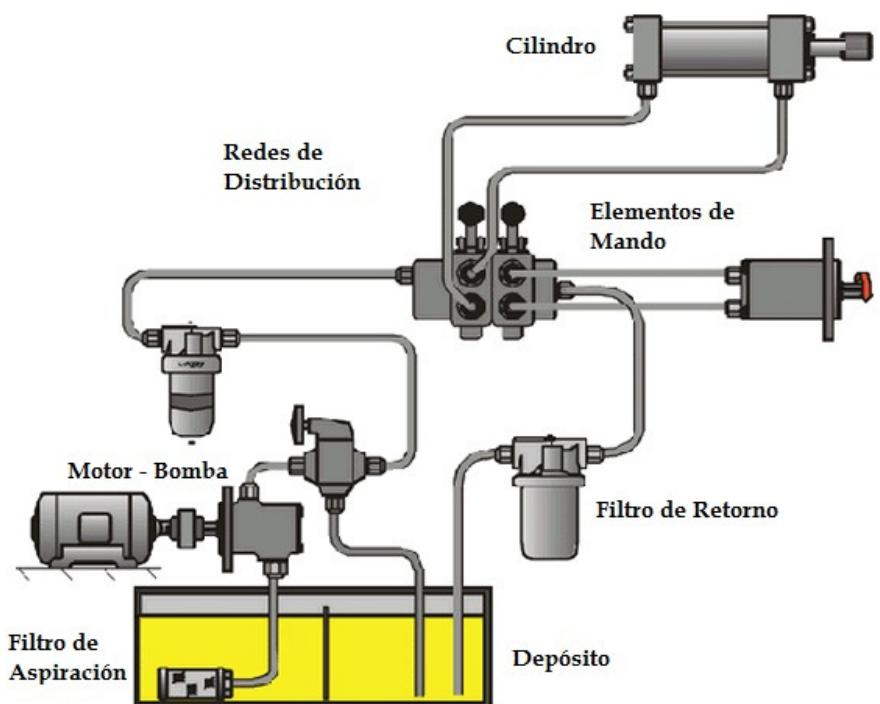
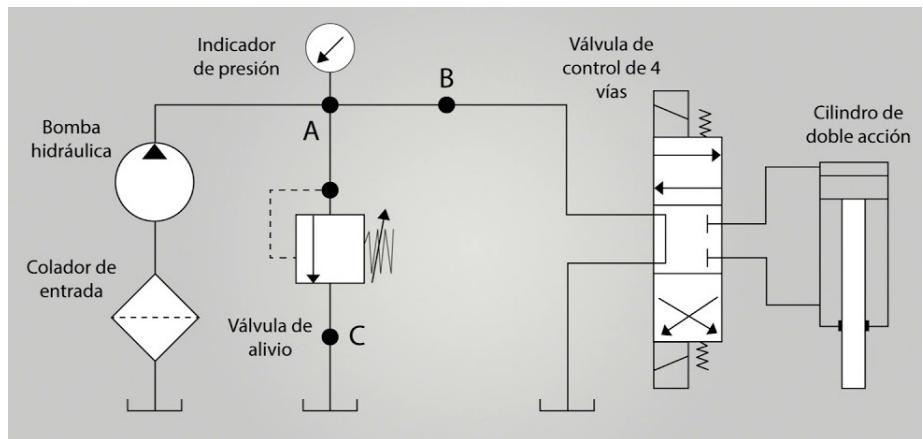
Ejemplos

Con dos cilindros de doble efecto A y B pretendemos hacer la secuencia A+B+A-B-. Puede ser una operación de taladrado: la pieza a taladrar avanza por una cinta transportadora de forma que el cilindro A la sujeta mientras que el B baja con la herramienta y la taladra; concluida la operación se retira la sujeción y sube la broca



Sistemas Hidráulicos

- Son utilizados cuando se requieren fuerzas muy elevadas y velocidades lentas.
- Alcanza presiones del orden de los 250 bar.
- Es similar a la neumática solo que el fluido utilizado es un aceite y se trabaja en circuito cerrado en lugar de tener un venteo como en neumática.
- A diferencia del aire comprimido, el fluido hidráulico no es un servicio habitual en una planta, sino que se utilizan centrales hidráulicas específicas para cada actuador en particular.
- Las mangueras y acoplos rápidos utilizados son especialmente diseñados para soportar las altas presiones.



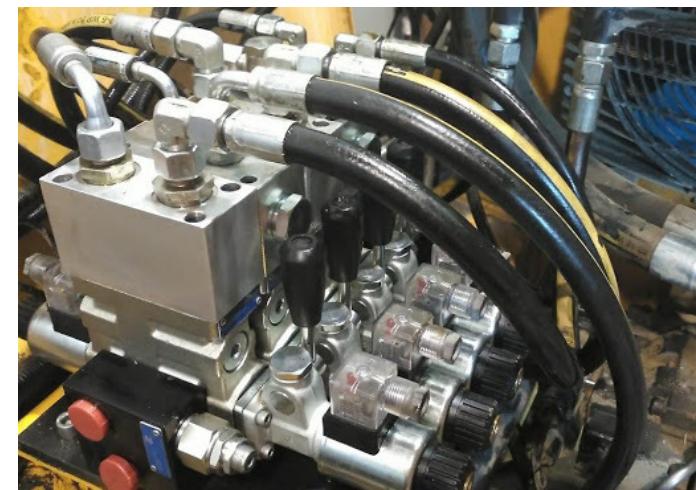
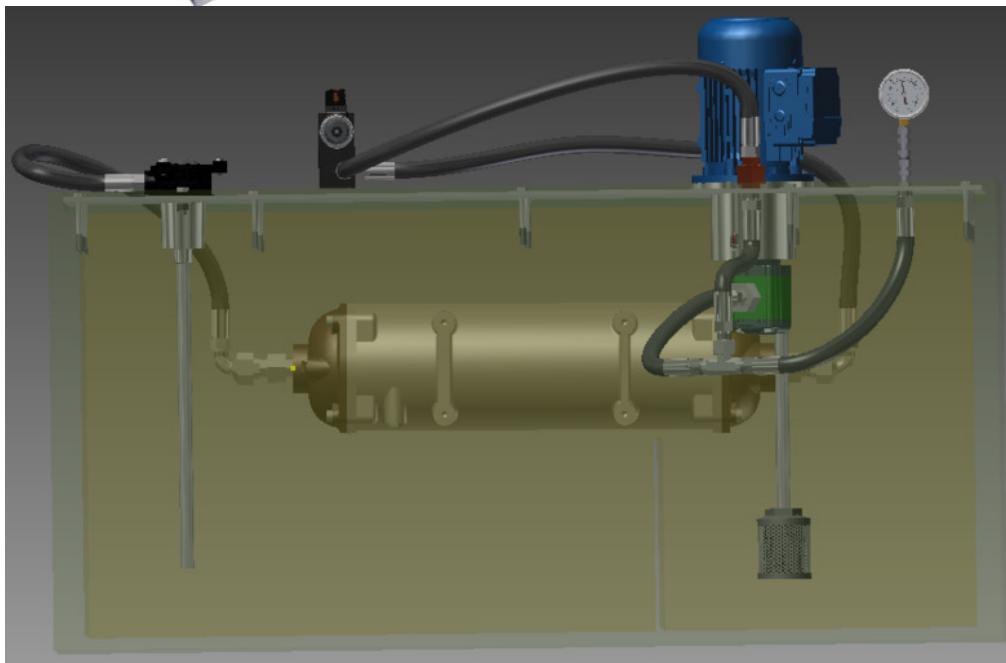
Centrales Hidráulicas



Agrupan todos los elementos salvo las mangas hasta el actuador y el actuador, es decir:

- Reservorio
- Filtro de succión y retorno
- Bomba de engranajes con motor electrico
- Válvulas de control direccional

Se comercializan en diversas presiones y caudales en función de la necesidad.



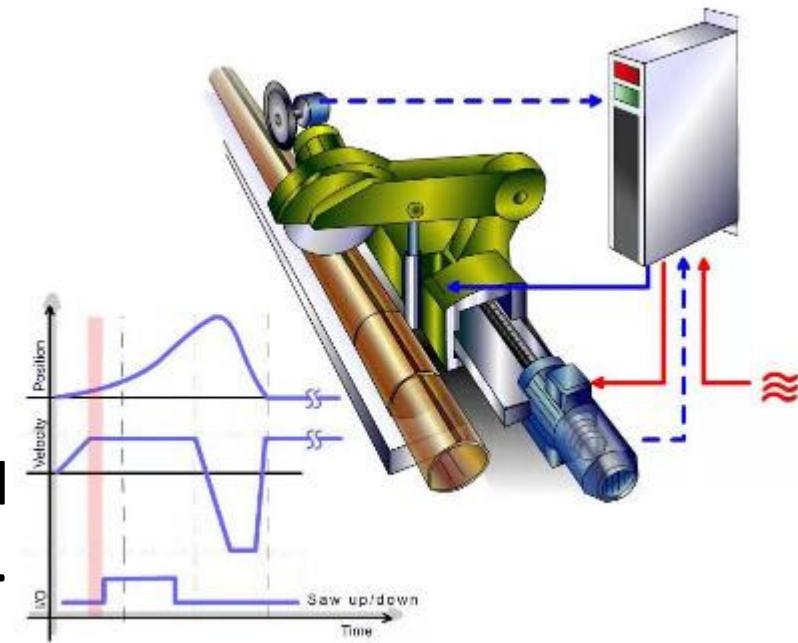


Sensores y Actuadores 22.88

Variadores de velocidad y Servomecanismos

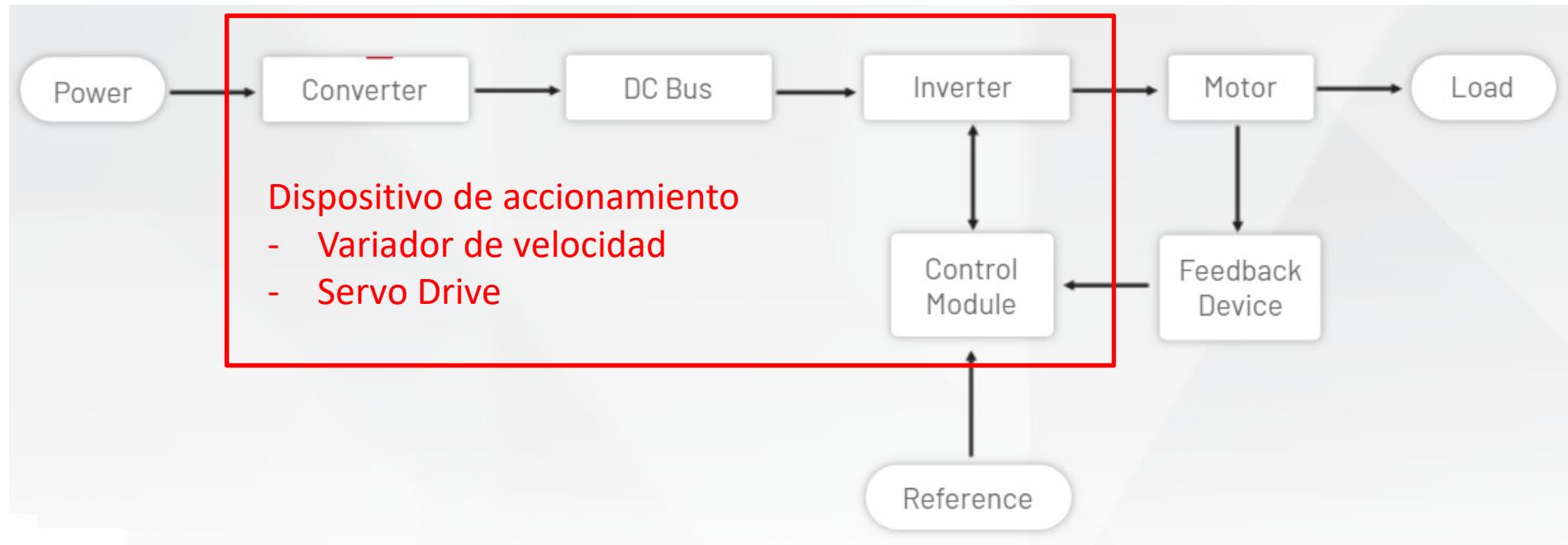
Servomecanismos

- Objetivo:
- Control preciso de ejes
 - Posición, Velocidad, Aceleración o Fuerza/Torque
 - Lineal o Rotacional.
- Basado en un sistema de control por realimentación de un motor.



<https://www.youtube.com/watch?v=2HUDWykabco>

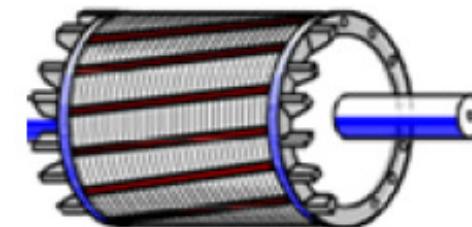
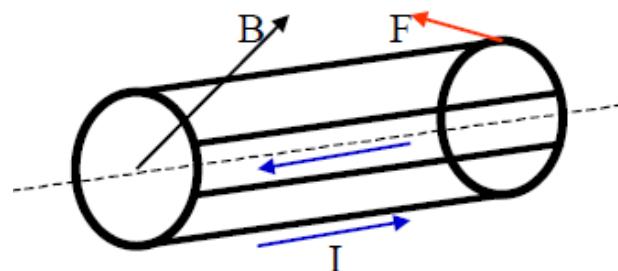
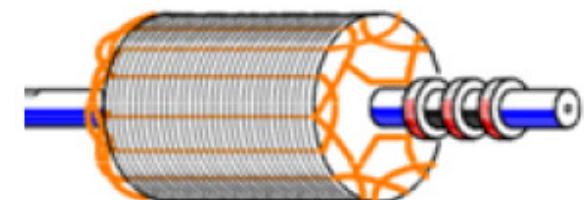
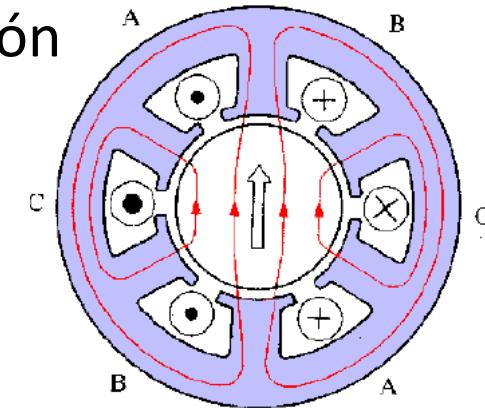
Servomecanismos



Motores

Motor asincrónico o inducción

- Consiste de:
 - Estator bobinado.
 - Rotor bobinado o “jaula de ardilla”.
- Al aplicar alterna en el estator.
 - Se produce un campo magnético rotatorio.
 - El rotor, sometido a un campo variable, genera una FEM.
 - Esta FEM genera una corriente en el rotor.
 - La interacción entre el campo magnético y la corriente del rotor produce un torque, que impulsa al eje.
- Torque => $\omega_{campo\ mag} \neq \omega_{eje}$.
- No tiene torque de frenado.

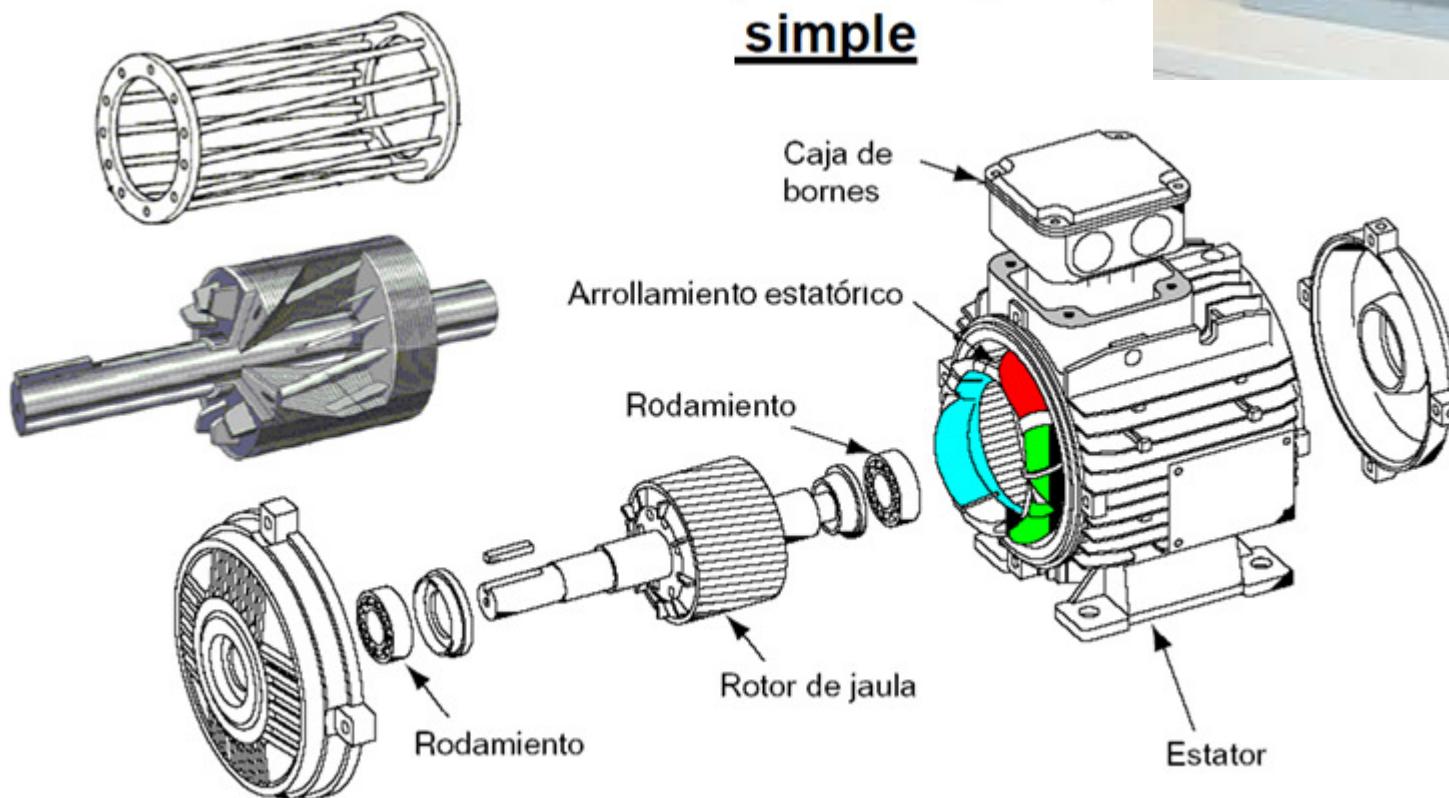


Motores

Motor asincrónico o inducción



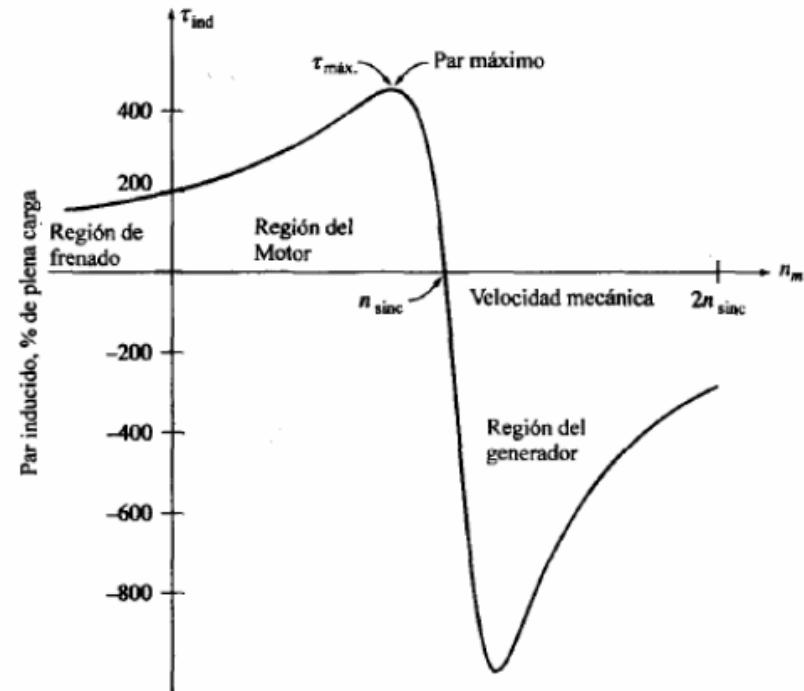
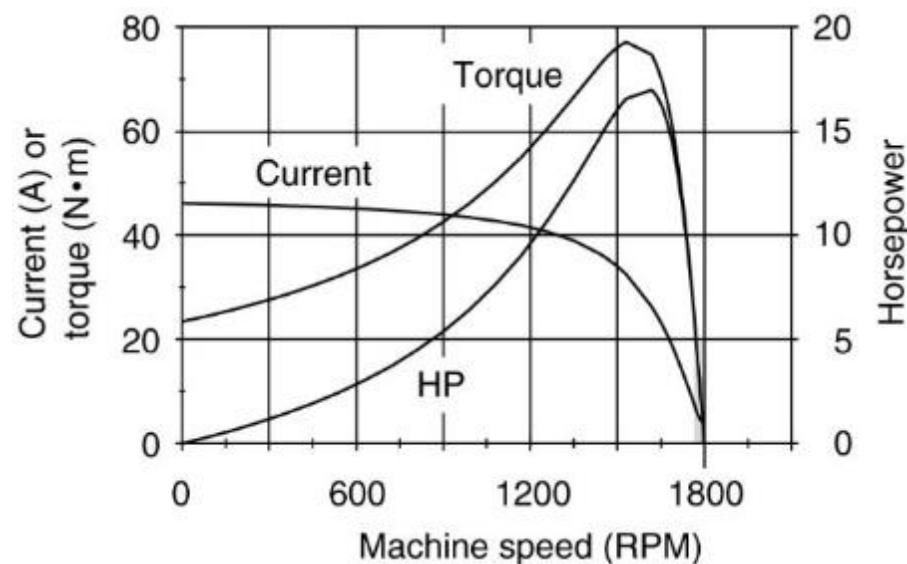
Rotor de jaula simple



Motores

Motor asincrónico o inducción

- $\omega_s [rpm] = \frac{60 f_{alim} [Hz]}{pp}$; pp=Pares de polos / fase
- Deslizamiento $s = \frac{\omega_s - \omega_{eje}}{\omega_s}$
- Torque $\leftrightarrow I = \frac{V}{j2\pi f * L_{motor}}$

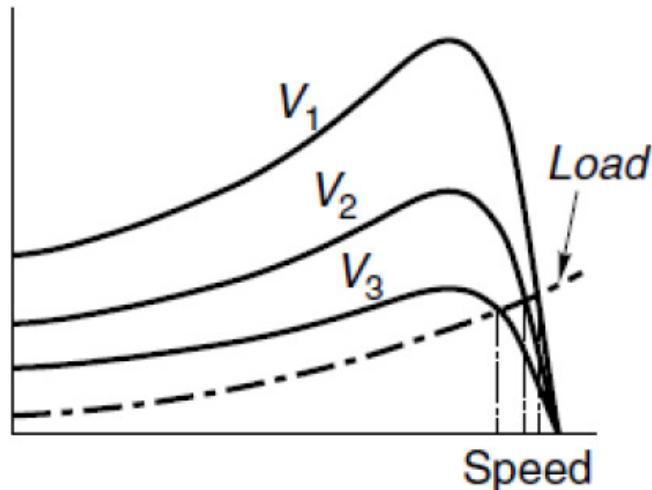


Motores

Motor asincrónico o inducción

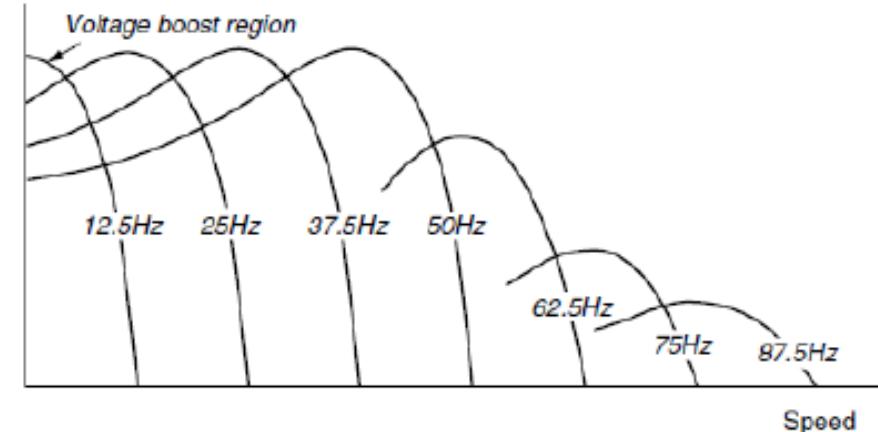
- Torque $\leftrightarrow I = \frac{V}{j2\pi f * L_{motor}}$ $\omega_s [rpm] = \frac{60 f_{alim} [Hz]}{pp}$

Torque



Variando V

Torque



Variando f, manteniendo V/f constante

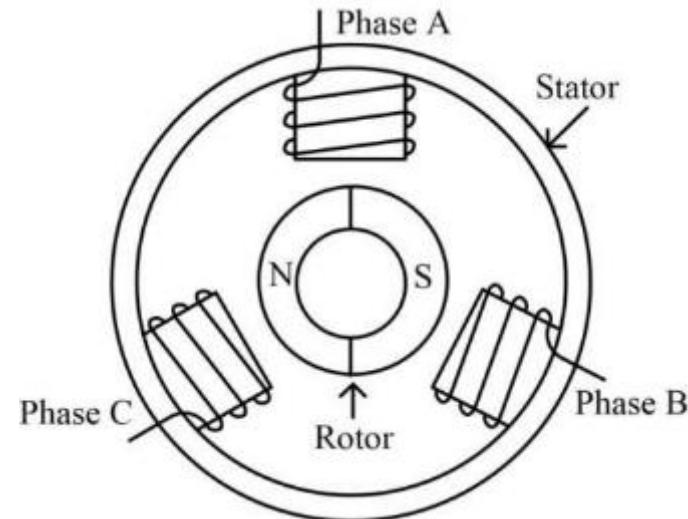
Motores

Motor sincrónico de imán permanente (PMSM)

- Un campo giratorio en el estator.
- Imán permanente en el rotor.
- El imán se alinea con el campo.

- Mejor torque a bajas velocidades.
- Mejor eficiencia.

- Máximo torque cuando campo magnético y rotor alineado
 - Comutador para alinear la señal de excitación.

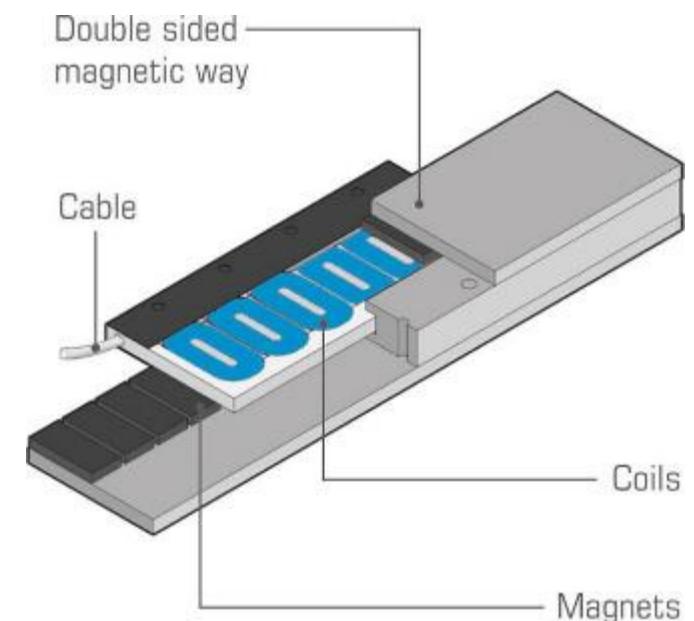
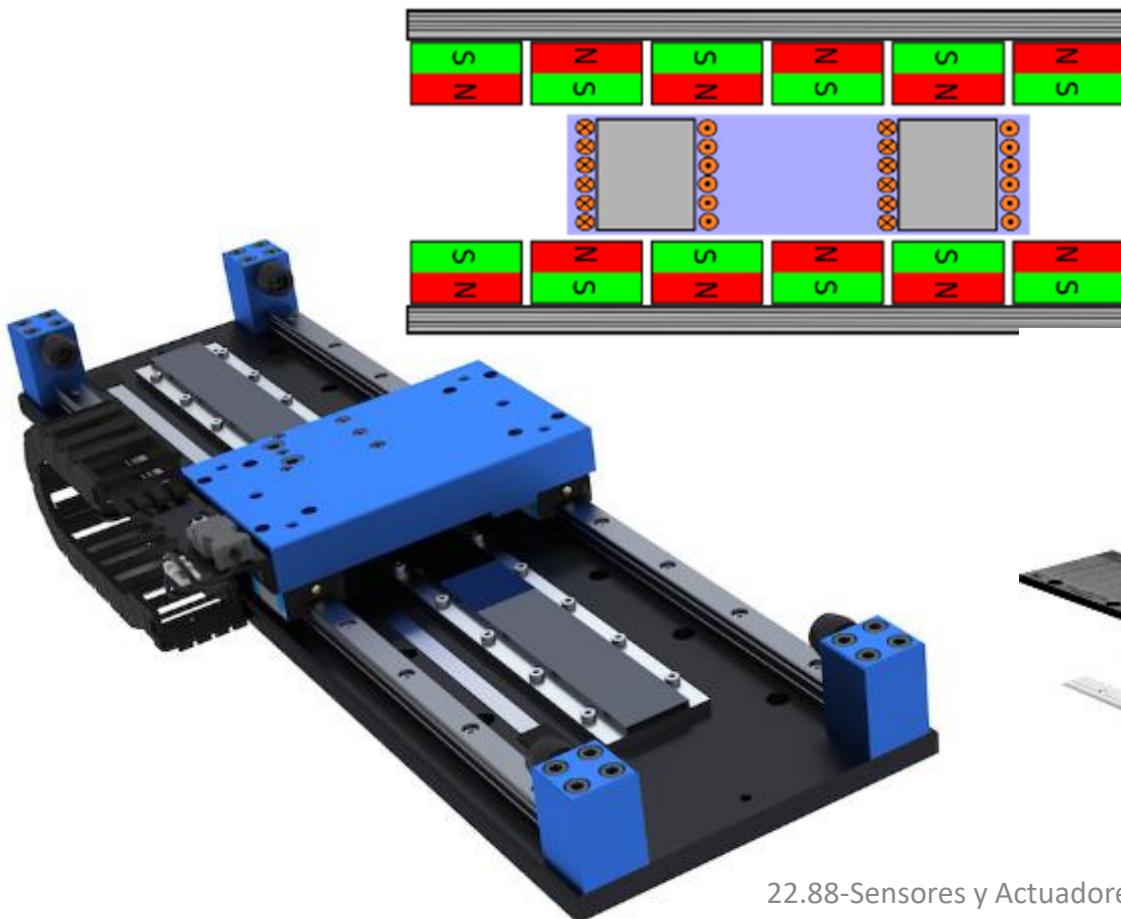


Ej: Kinetix VPC: <https://www.youtube.com/watch?v=ZKussUdD4dk>

Motores

Motor Lineal

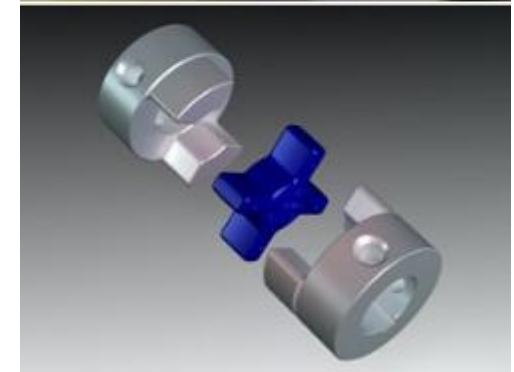
- PMSM “desenrollado”.
- La parte móvil: bobinada o imanes.
 - Depende de construcción física.



Acoples a la carga

Acople directo

- Acoplan directamente el eje del motor a la carga.
- Relación 1:1.
- Tipos.
 - Rígido
 - No permite ejes desalineados
 - Flexible
 - Permite una pequeña desalineación.
 - La desalineación afecta performance y vida útil.



Quijada (Jaw)



Fuelle (Bellow)



Helicoidal (Beam)

Acoples a la carga

Transmisión rotacional

- Transmiten el movimiento entre dos ejes.
- Relación distinta a 1:1.
- Pueden invertir el sentido de giro.
- Ej:
 - Correa de distribución.
 - Engranajes planetarios.
 - Engranaje sínfin.

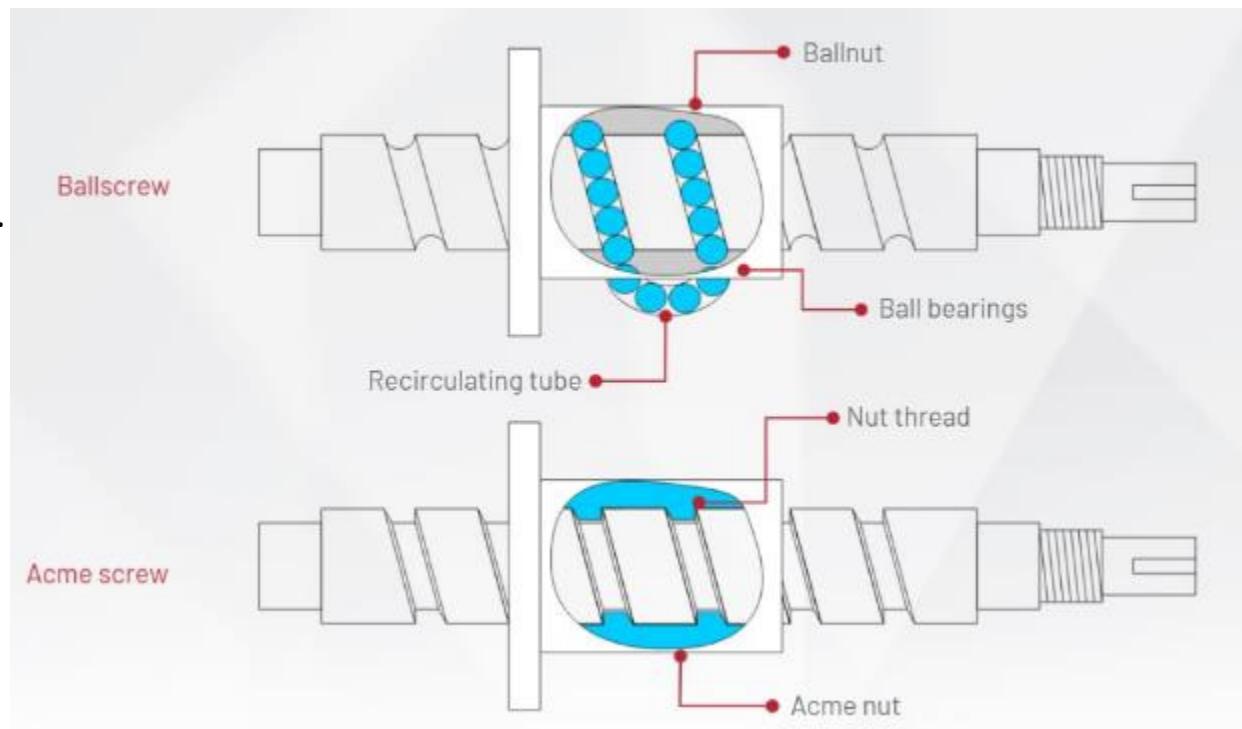


Acoples a la carga

Transmisión lineal

- Convierten movimiento rotacional a lineal.
- Factor de conversión en [distancia]/[ángulo/giro]

- Ej:
 - Cinta / correa.
 - Piñón - cremallera.
 - Tornillo.



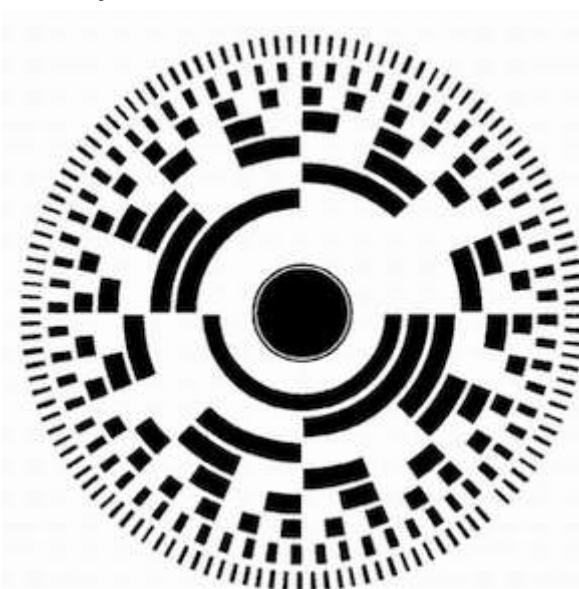
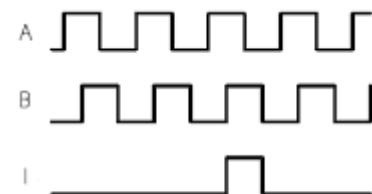
Sensores

- Tacómetros
- Encoders
 - Absoluto
 - Incremental
 - Lineal
- Resolver
- Sincro
- Posición
 - Efecto Hall
 - Magneto-Resistivo
 - Útil para controlar la conmutación en PMSM
- Torque
 - Se lo aproxima a través de la corriente del motor

Sensores

Encoder

- Utiliza un disco con ranuras para medir posición y velocidad.
- Puede ser óptico o magnético.
- Rotacional / lineal.



Incremental

- Requiere calcular posición.
- Requiere “homing”.
- Información en tiempo real.

Absolute

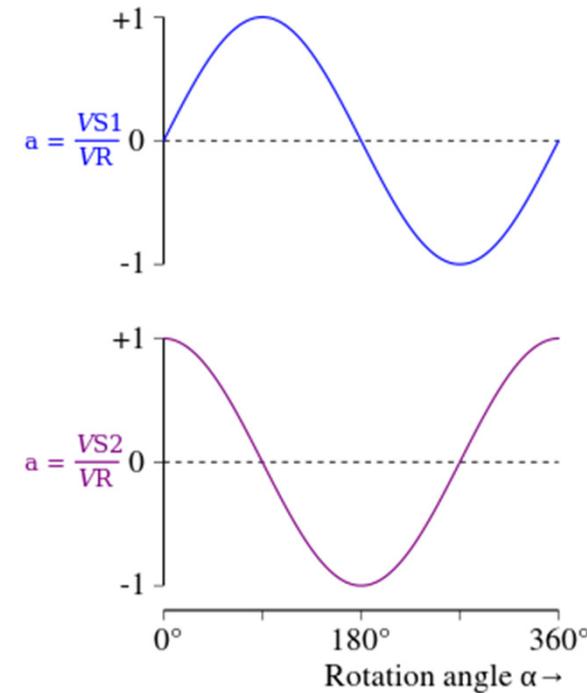
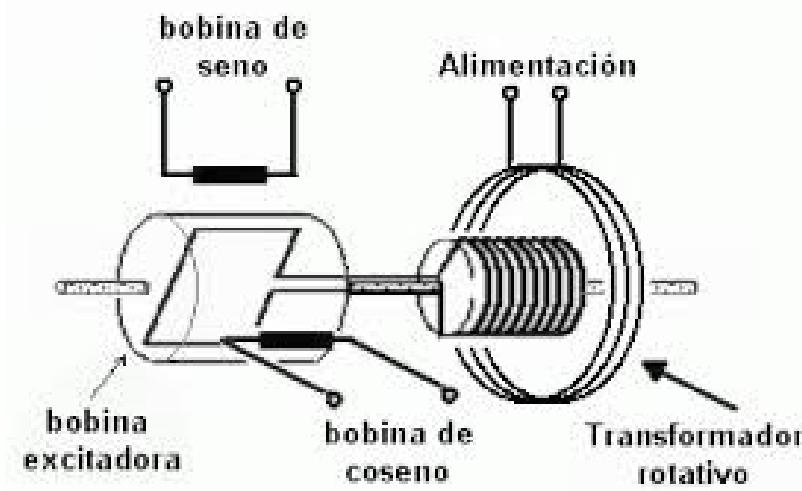
- Salida serie (puede causar demoras).
- Posición directa.
- Puede ser multi-vuelta

Comunicación: EnDat, Hiperface, SSI protocol, BiSS protocol

Sensores

Resolver

- Un resolver es una maquina electromecánica con un bobinado monofásico en el rotor y un dos arrollamientos en el estator, separados 90° .
- Al excitar al bobinado del rotor, y dependiendo de la orientación del mismo, la amplitud inducida en el estator varía con una relación seno/coseno.

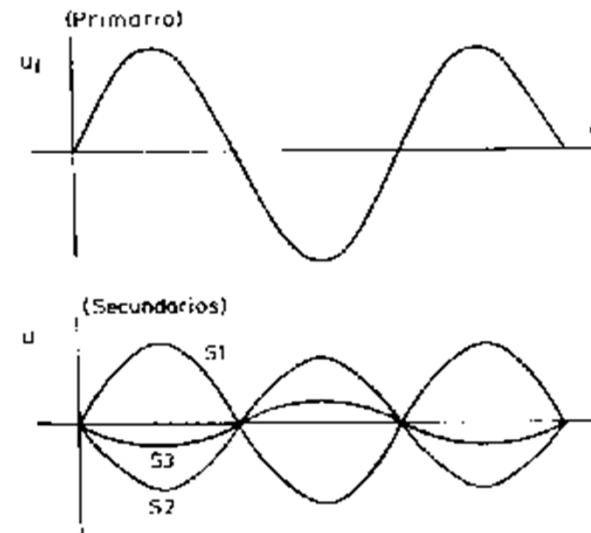
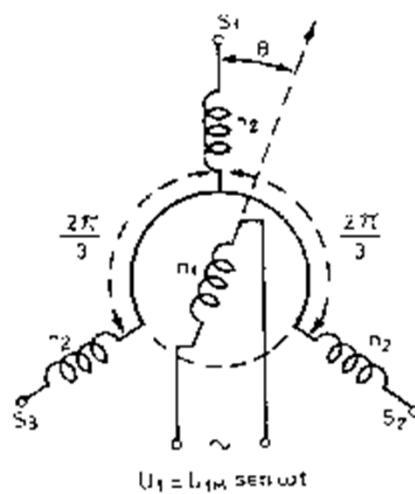


Cómo funciona un Resolver: <https://www.youtube.com/watch?v=7PKJ52b1Qvs>

Sensores

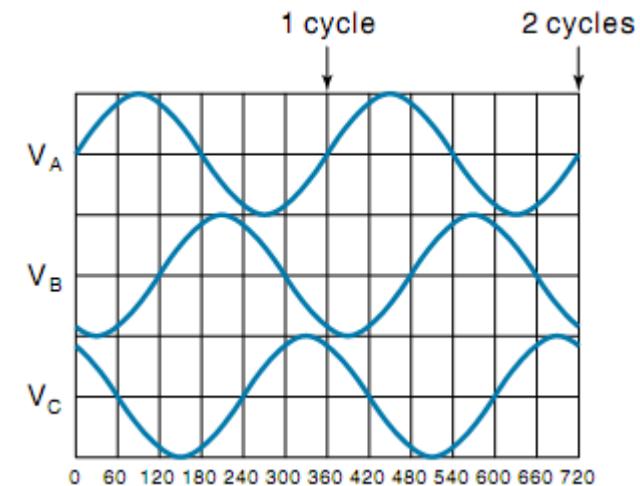
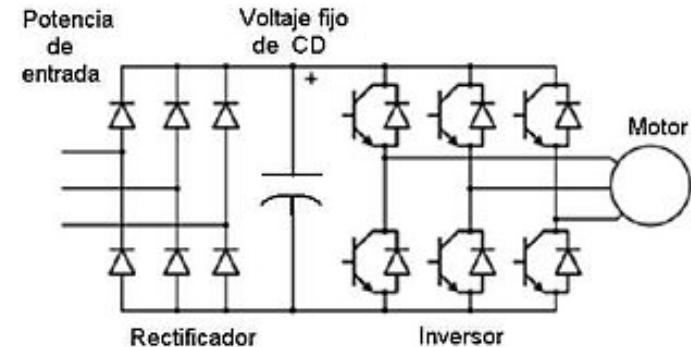
Sincro

- Un sincro es una maquina electromecánica con un bobinado monofásico en el rotor y un arrollamiento trifásico en el estator.
- El sincro-transmisor (CX) recibe una señal eléctrica de referencia en el rotor y según la posición del eje, se altera la orientación del campo magnético generado por el rotor del CX. Esto a su vez altera la relación entre las amplitudes de las señales trifásicas captadas por el estator del CX.

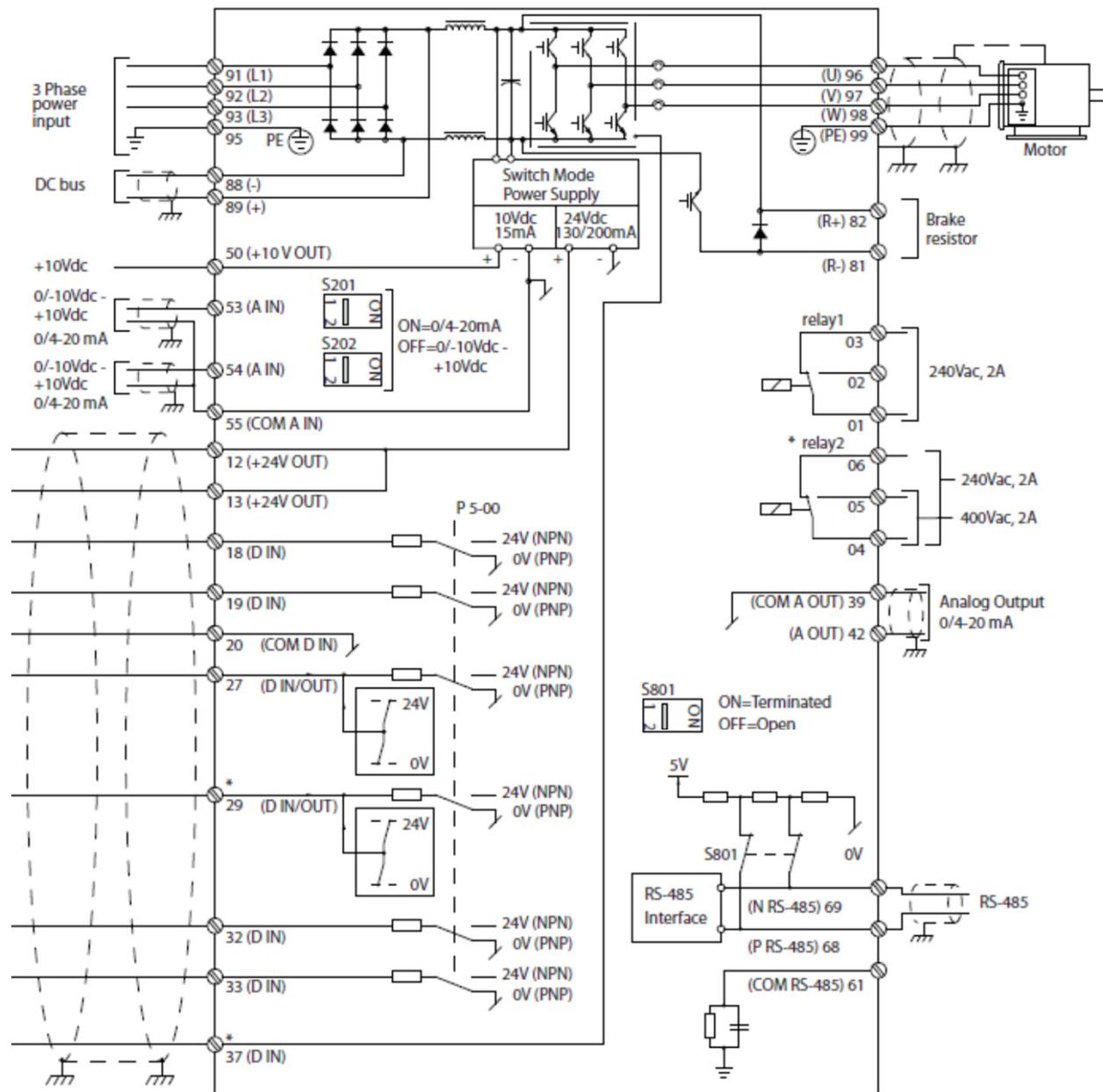


Variador de frecuencia

- Motor de inducción:
 - Frecuencia => Velocidad
 - Tensión => Torque
- Rectificador + Inverter: Señal senoidal variables desde una alimentación de línea.
- Características:
 - Disponibles en baja y media tensión
 - Monofásicos y Trifásicos
 - Respuesta inmediata
 - Comunicación convencional (4-20mA) y por buses de campo
 - Capacidad de frenado (común o regenerativo según el modelo)
 - Filtro de armónicos opcional
 - Control PID integrado
 - Feedback opcional (solo velocidad)

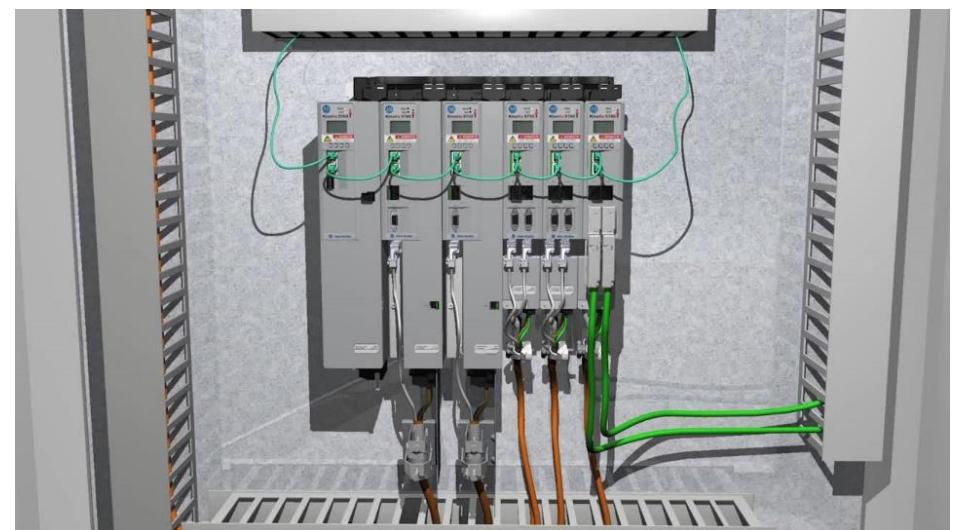


Variador de frecuencia



Servo Drive

- Variador pensado para servomecanismos.
 - Orientado a PMSM.
- Diseñado para la escalabilidad del movimiento integrado.
- Convertidor, bus DC e inverter (con módulo de control).
 - Pueden ser módulos separados.
 - 1 Convertidor + bus DC => Varios inverter.
- Comunicación
 - Analógica / Bus de campo / Protocolo especializado para servo.



Servo Drive vs VF

Servo Drive



Variable Frequency Drive



- Control de posición (precisa)
- Motor sincrónico de imán permanente
- Gran ancho de banda
- Lazo de posición: Siempre
- Resistencia frenado: Siempre
- Feedback obligatorio
- 30HP o menos

- Control de velocidad
- Motor asincrónico
- Menor ancho de banda
- Lazo de posición: Según modelo
- Resistencia frenado: Opcional
- Feedback opcional (no control posición)
- 2000HP o más

Como establecer la referencia del servo drive

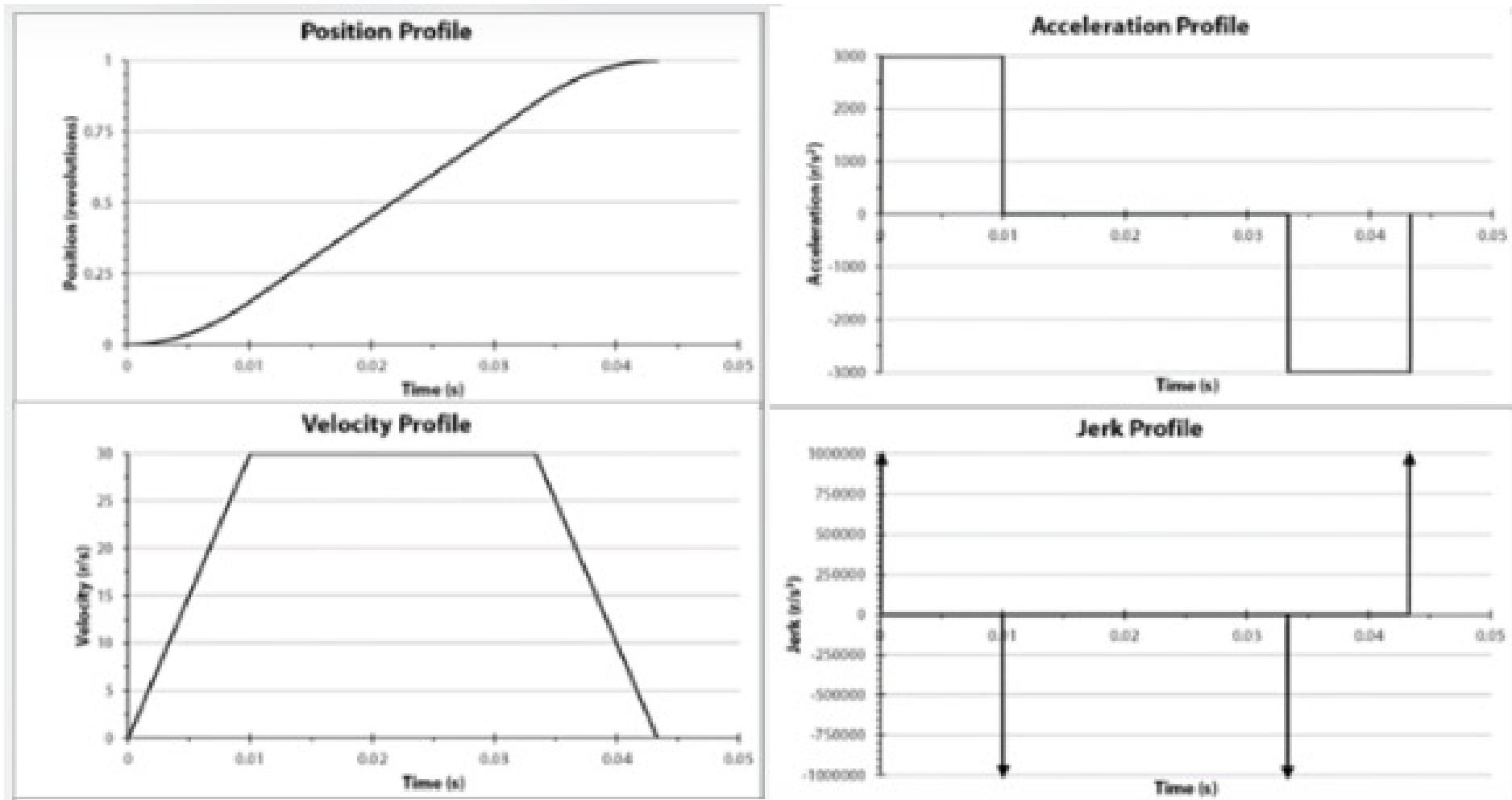
- Preestablecer perfiles + una entrada digital.
- Serie de pulsos => valor de referencia.
- Señal analógica => valor de referencia.
- SERCOS (protocolo especializado) .
[https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz SERCOS](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_SERCOS)
- Bus de campo (pensado para manejar movimiento).

Controlador de movimiento

- Módulo + programa del PLC.
- Guarda y ejecuta los programas de movimiento.
- Guarda los parámetros del sistema.
- Controla el movimiento.
- Establece las referencias de los accionamientos (drives).

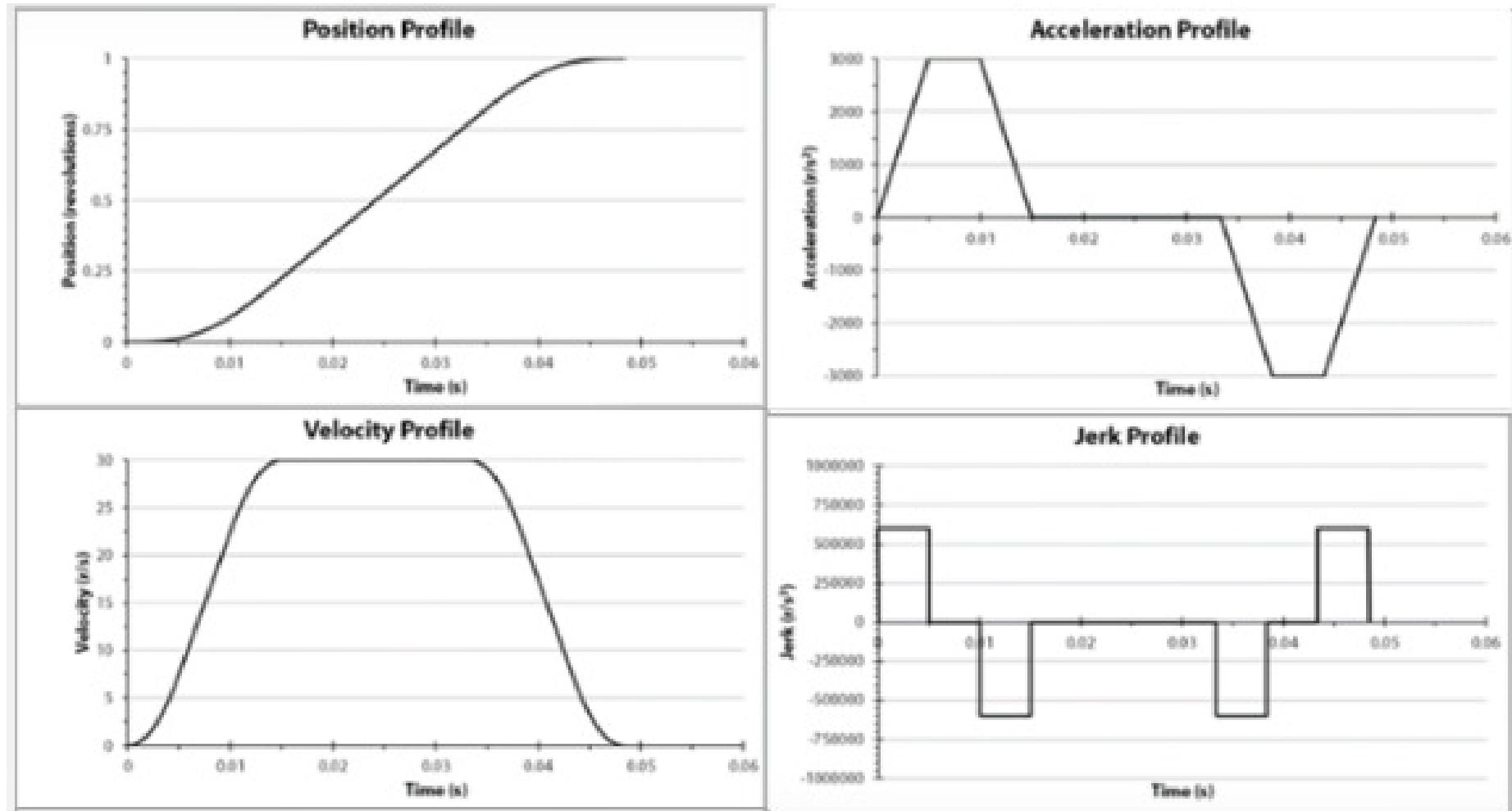
Planificación de movimiento (motion profile)

- Trapezoidal

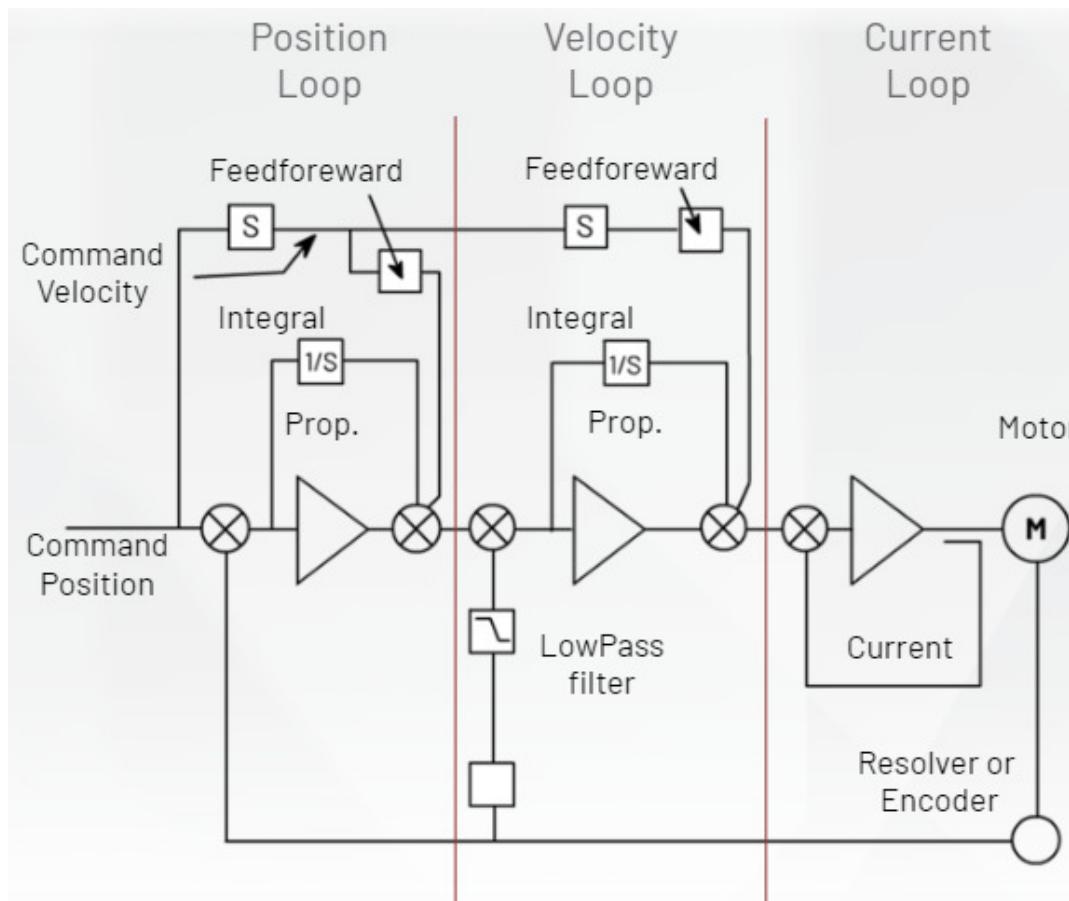


Planificación de movimiento (motion profile)

- S-curve



Lazos de control



- Corriente: Siempre en el Servo Drive.
- Velocidad y Posición: Depende de comunicación y tipo de Servo Drive.

Compensación de alinealidades

- Fricción estática
 - Fuerza de roce entre dos cuerpos sin desplazamiento relativo.
 - Compensación: torque extra si se parte desde una posición estacionaria.
- Gravedad
 - En cargas verticales, la fuerza al ascender o descender no es pareja.
 - Compensación: torque constante de compensación.
- Backlash
 - Perdida de movimiento al invertir un giro en engranajes.
 - Compensación: Reducción del torque al invertir el giro.

Ejecución del movimiento

- Instrucción de movimiento => planificar la trayectoria
- 2 planificadores
- Grueso
 - Define los puntos a un intervalo temporal fijo.
 - Se ejecuta en el controlador.
- Fino
 - Completa el camino entre los puntos gruesos.
 - Interpolación lineal.
 - Comunicación analógica => se ejecuta en módulo PLC.
 - Comunicación digital => Se ejecuta en Servo Drive.

Software para diseño

- Algunas compañía ofrecen software para
 - Dimensionamiento y selección de componentes.
 - Diseño de trayectorias.
 - Contemplar diseños multiejes.
- Estos software facilitan el diseño y análisis de servomecanismos.

Programación en PLC

- Las librerías de movimiento de los PLC incluyen instrucciones para:
 - Creación de ejes y grupos de ejes.
 - Encendido / apagado / habilitación de eje.
 - Diagnóstico de eje.
 - Movimiento el eje.
- Existen librerías estandarizadas, compatibles con diversas marcas.
 - Definen estructuras y bloques funcionales independientes del HW.
 - Ej: PLCopen motion control (<https://plcopen.org/technical-activities/motion-control>)

Referencias

- Rockwell CCN132 Motion Control Fundamentals using Kinetix 5700 (CIP) Servo Drives (curso online)
- PLCTopen.org

MEDICIÓN DE CAUDAL

22.88



Fluidos

★ Definición

★ Todo material que fluye

★ Ejemplos

- ➡ Sólidos a granel
- ➡ Líquidos
- ➡ Gases

★ Propiedades

- ➡ Tipos de Caudales
- ➡ Temperatura
- ➡ Presión
- ➡ Densidad y Expansión
- ➡ Diámetro de Cañería
- ➡ Viscosidad
- ➡ Número de Reynolds y Perfil de Velocidad
- ➡ Fenómenos Hidráulicos

Propiedades de los Fluidos: Tipos de Caudales

Definiciones

→ Caudal Volumétrico

$$Q \equiv \frac{dV}{dt} \cong \frac{\Delta V}{\Delta t} = A \cdot v$$

→ Unidades

★ m³/s

★ gpm

★ lpm

★ lph

★ m³/hora

★ ft³/s

★ ccm

Ejemplo 14-2: por una tubería de 4 cm de diámetro interno circula agua a una velocidad de 1 m/s, que ocupa sólo la mitad de la cañería.

a) Calcular el caudal y el flujo másico.

b) Ver cómo se modifican esos valores, si el agua ocupa toda la sección de la tubería.

El área sobre la que circula el flujo es,

$$A = 0.5 \pi d^2 / 4 = \pi 0.04^2 / 8 \text{ m}^2 = 0.000628 \text{ m}^2$$

Por lo tanto,

$$Q = v A = 1 \text{ m/s} \cdot 0.000628 \text{ m}^2 = 0.000628 \text{ m}^3/\text{s} = 0.628 \text{ lts/seg} = 37.7 \text{ lpm}$$

$$Q_m = \rho Q = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.000628 \text{ m}^3/\text{seg} = 0.628 \text{ kg/s}$$

Si el agua ocupase toda la tubería, el área A se duplicaría, pasando a $A = 0.001256 \text{ m}^2$, y entonces,

$$Q = v A = 1 \text{ m/s} \cdot 0.001256 \text{ m}^2 = 0.001256 \text{ m}^3/\text{s} = 1.256 \text{ lts/seg} = 75.4 \text{ lpm}$$

$$Q_m = \rho Q = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.001256 \text{ m}^3/\text{seg} = 1.256 \text{ kg/s}$$

→ Velocidad de Flujo = $v = Q / A$

→ Caudal Másico = $Q_m = \rho Q$

$$Q_m \equiv \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \rho V = \rho \frac{dV}{dt} = \rho Q = \rho A v$$

Propiedades de los Fluidos

Temperatura

- Visto en clases anteriores
- En fluidos interesa la Temperatura ABSOLUTA

Presión

- Visto en clases anteriores
- En fluidos interesa la Presión ABSOLUTA

Densidad

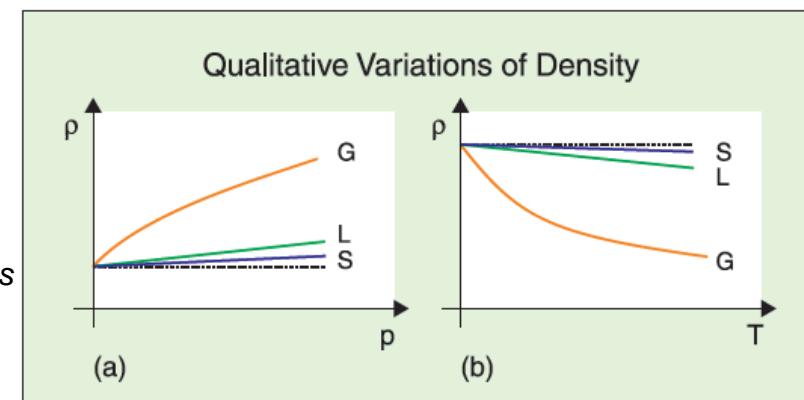
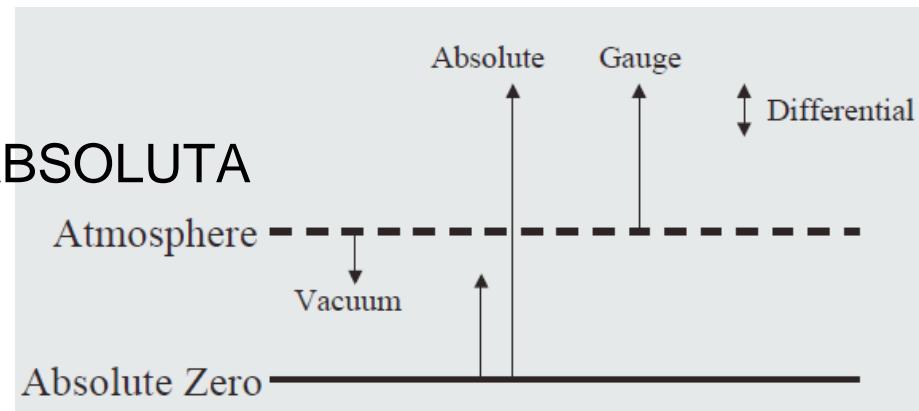
Definiciones

★ Densidad
(líquidos, gases,
sólidos)

$$\Rightarrow \rho = m/V$$

★ Gravedad Específica (sólo líquidos):

$$\Rightarrow SG = \rho_{liquid} / \rho_{water \text{ at standard conditions}}$$



Propiedades de los Fluidos

★ Expansión de un Líquido

→ La densidad de la mayoría de los líquidos no depende de la presión

→ $V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)$

★ V = volumen a temperatura T

★ V_0 = volumen a temperatura T_0

★ β = coeficiente cúbico de expansión

★ $\Delta T = T - T_0$ cambio de temperatura

→ Problema – Ejemplo

★ Cuál es el cambio de densidad de un líquido ocasionado por un aumento de temperatura de 10° C ? El coeficiente cúbico de expansión β es de $0.0009 / {}^\circ \text{C}$?

★ Nuevo volumen tras la expansión: $V = V_0(1 + 0.0009 \cdot 10) = 1.009 V_0$

★ Nueva densidad resulta $1/1.009$ o 0.991 veces la vieja densidad

Propiedades de los Fluidos

* Expansión de un Sólido

$$\rightarrow V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)$$

- ★ V = volumen a temperatura T
- ★ V_0 = volumen a temperatura T_0
- ★ $\beta = 3\alpha$ coeficiente cúbico de expansión térmica
- ★ α coeficiente lineal de expansión térmica
- ★ $\alpha(\text{acero}) = 0.5\% / 100^\circ \text{ C}$
- ★ $\Delta T = T - T_0$ cambio de temperatura

→ Problema – Ejemplo

- ★ Cuál es el cambio de longitud de una barra de acero, ocasionado por un aumento de temperatura de 50° C ?
- ★ Nueva longitud tras la expansión: $L = L_0(1 + 0.5/100/100 \cdot 50) = 1.0025 L_0$
- ★ Nueva longitud resulta un 0.25% superior a la vieja longitud

→ Los metales pueden exhibir expansiones importantes

Propiedades de los Fluidos

* Expansión de un GAS Ideal

- Efecto mucho más notable que en líquidos y sólidos
- Lo modelaremos con la Ley de los Gases Ideales: $PV = nRT$
- En condiciones de referencia: $P_0 V_0 = nRT_0$
- Dividiendo:

$$V/V_0 = (P_0/P) \cdot (T/T_0)$$

→ Problema – Ejemplo

★ Cuál es el cambio de volumen de un gas ideal, ocasionado por una disminución del 10.5% en la temperatura y a un aumento del 3.5% en la presión absoluta?

★ $P = 1.035 \cdot P_0 \rightarrow P_0/P = 0.966$

★ $T = (1-0.105) \cdot T_0 = 0.895 \cdot T_0 \rightarrow T/T_0 = 0.895$

★ $V/V_0 = (P_0/P) \cdot (T/T_0) = 0.966 \cdot 0.895 = 0.865$

★ Nuevo volumen: $V = 0.864 V_0$

★ El volumen decrece un 13.6%

Propiedades de los Fluidos

* Expansión de un GAS NO-Ideal

- Efecto mucho más notable que en líquidos y sólidos
- Lo modelaremos con la Ley de los Gases Ideales modificada:

$$PV = nRTZ$$

- En condiciones de referencia: $P_0 V_0 = nRT_0 Z_0$

- Dividiendo:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{P_0}{P}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right) \cdot \left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

Propiedades de los Fluidos

Viscosidad

- ➔ Es la habilidad de un fluido de fluir sobre si mismo
- ➔ Unidades
 - ★ cP
 - ★ cSt
 - ★ Saybolt Universal (at 100°F, 210 °F)
 - ★ Saybolt Furol (at 122°F, 210 °F)
- ➔ Depende fuertemente de la temperatura
- ➔ Ejemplos
 - ★ Agua
 - ★ Miel a 40° F, 80° F, y 120° F
 - ★ Manteca de maní

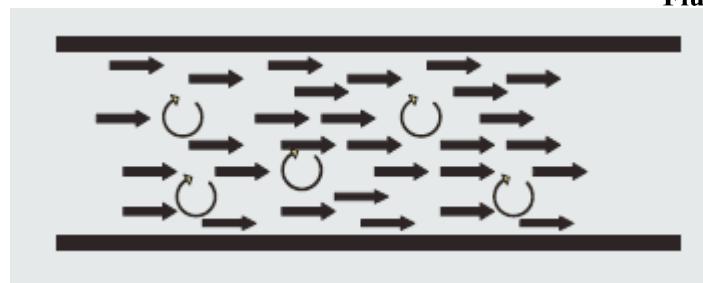
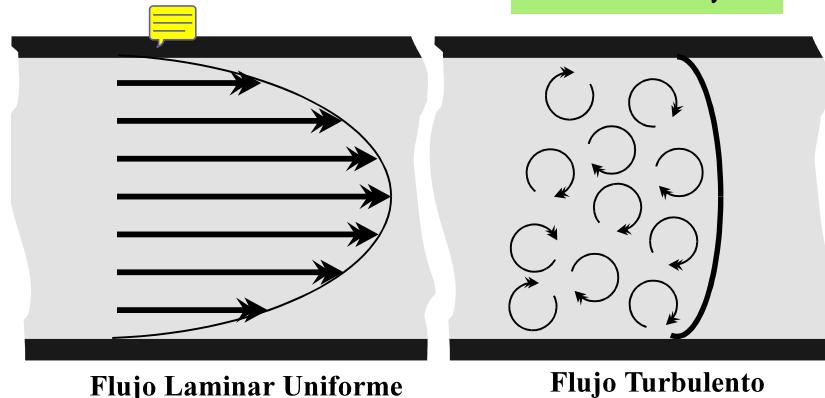
Propiedades de los Fluidos

* Perfil de Velocidades y Número de Reynolds

- El grado de turbulencia del flujo depende del caudal y puede medirse como,

$$Re \equiv \frac{\rho Q D}{A \mu}$$

- Flujo Laminar
 - ★ $Re < 2000$
- Flujo Turbulento
 - ★ $Re > 3500$ ó 4000
- Flujo Transicional
 - ★ $2000 < Re < 4000$

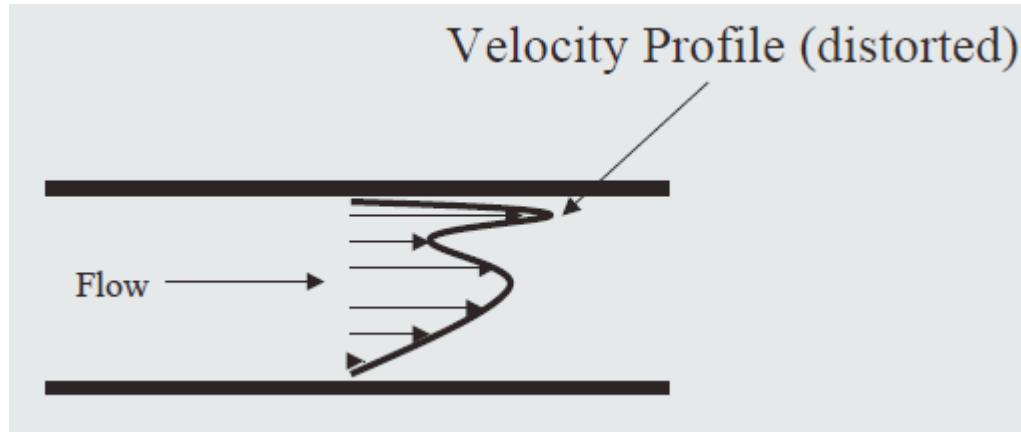


- Muchos caudalímetros exigen un buen perfil de velocidad para dar resultados de baja incerteza

Propiedades de los Fluidos

★ Perfil de Velocidades y Número de Reynolds

- ➡ Las obstrucciones, como codos, tees, válvulas, etc., distorsionan el perfil de velocidad



- ➡ Para lograr un buen perfil de velocidad

- ★ Tramos rectos de cañería aguas arriba y abajo del sensor de caudal
- ★ Acondicionadores de flujo
- ★ Ubicar válvulas de control aguas abajo del caudalímetro

Propiedades de los Fluidos

* Fenómenos Hidráulicos

→ Presión de Vapor

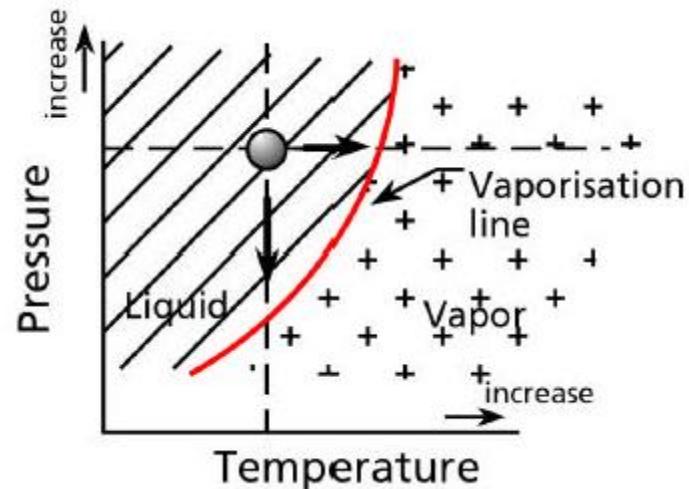
- ★ Presión y temperatura a la cual coexisten en equilibrio un líquido y su vapor
- ★ La presión de vapor del agua a 100° C es la presión atmosférica
- ★ Se dice que en estas condiciones el vapor está “saturado”
- ★ Si un vapor está a temperatura superior a la de saturación, para un valor dado de su presión, se dice que está sobrecalentado
- ★ El vapor de agua a presión atmosférica y a una temperatura de 150° C se dice que está sobrecalentado con un sobrecalentamiento de 50° C

→ Flasheado

- ★ Es la formación de burbujas de gas en un líquido cuando la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor, para un valor especificado de su temperatura.
- ★ Reducir la presión de una muestra de agua mantenida a 100° C , por debajo de la presión atmosférica, p ej a 0.7bar (abs) hará que el agua entre en ebullición

→ Cavitación

- ★ Formación y subseciente colapso de burbujas de gas en un líquido cuando su presión cae por debajo de su presión de vapor y luego se recupera y pasa por arriba de ella
- ★ Puede causar severos daños a bombas y válvulas



Medición de Caudales

Fluidos Compresibles: Gases

- Para gases ideales: $PV = nRT$
- Única variable que no cambia con cond's ambientales: masa
 - Caudal de gas = masa / u. de tiempo [kg/s]

Habitual:

- utilizar métodos volumétricos

$$\begin{cases} Q_{vs} \approx Q_{vm} P_m / P_s \cdot T_s / T_m \\ Q_m = \rho(P_s, T_s) Q_{vs} = \rho_s Q_{vs} \end{cases} \quad o \quad Q_m = \rho(P_m, T_m) Q_{vm} = \rho_m Q_{vm}$$

Unidades del sistema inglés

- Q_{vm} = caudal volumétrico medido [ACFM = Actual Cubic Feet per Minute]
- Q_{vs} = caudal vol normalizado [SCFM = Standard Cubic Feet per Minute]
- Q_m = caudal másico [lb/min = pound per minute]

Condiciones ambientales estándar:

- $T = 20^\circ \text{ C}$
- $P = 1 \text{ atm}$

Ejemplo 14-1: determinar el flujo másico resultante de una medición de un caudal de aire de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, si el aire se encuentra a una presión relativa de 2000 kPa, y a una temperatura de 200°C .

El dato es un flujo volumétrico medido en condiciones no-standard, Q_{vm} , entonces, utilizando las ecuaciones anteriores:

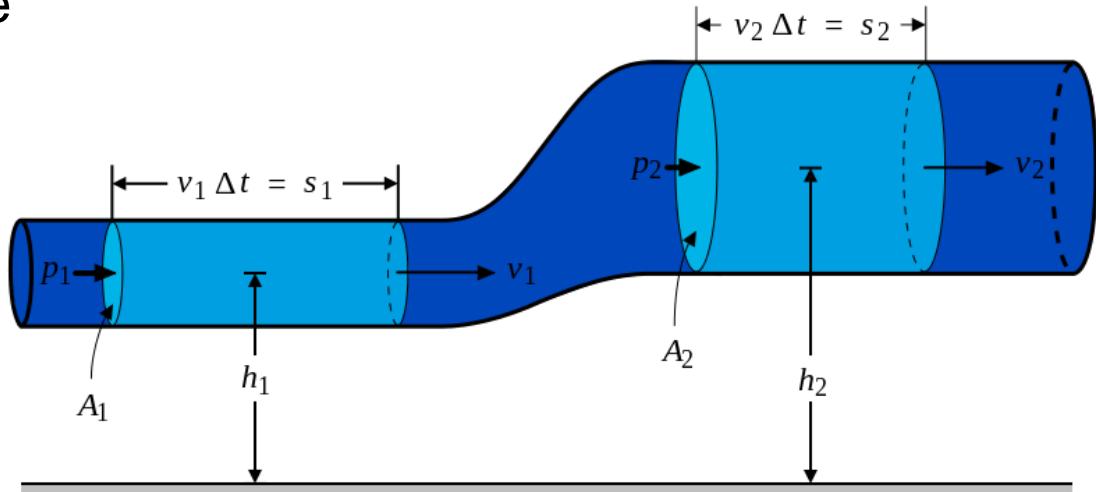
$$Q_{vs} = 100 \text{ m}^3/\text{s} ((101.32 + 2000)/101.32) (293/(273+200)) = 1284 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$Q_m = \rho_s Q_{vs} = 1.225 \text{ kg/m}^3 1284 \text{ m}^3/\text{seg} = 1574 \text{ kg/seg}$$

Principio de Bernoulli

- ★ Expresa que en un fluido ideal (*sin viscosidad ni rozamiento*) en circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.
- ★ La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:
 - cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido
 - potencial: es la energía debido a la altitud que un fluido posea
 - energía de presión: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$



Principio de Bernoulli

★ Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

- Viscosidad (fricción interna) = 0 → Es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
- Caudal constante.
- Flujo incompresible, donde ρ es constante.
- La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente o en un flujo laminar.

★ También se puede reescribir este principio en forma de suma de presiones multiplicando toda la ecuación por el peso específico.

- De esta forma el término relativo a la velocidad se llamará presión dinámica, los términos de presión y altura se agrupan en la presión estática.

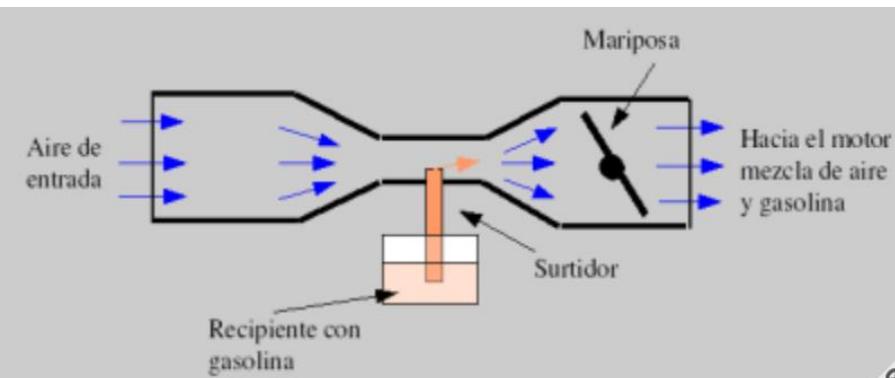
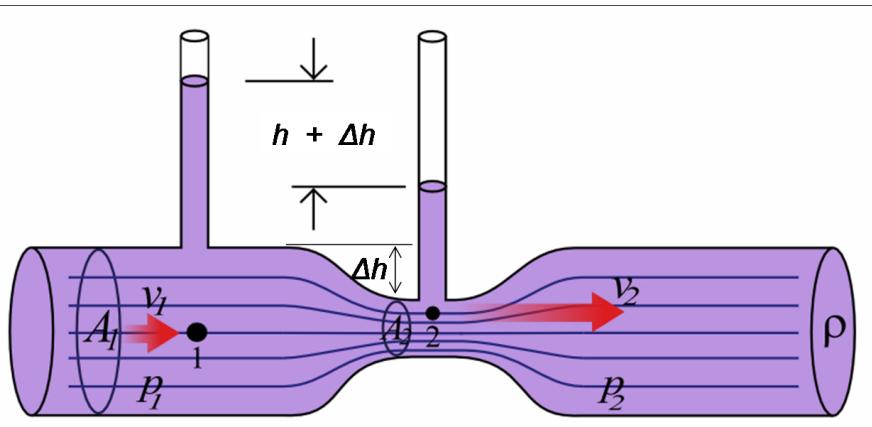
$$\gamma = \frac{w}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

$$\underbrace{\frac{\rho V^2}{2}}_{\text{presión dinámica}} + \overbrace{P + \gamma z}^{\text{presión estática}} = \text{constante}$$

Efecto Venturi

★ Consiste en un fenómeno en el que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor.

→ En ciertas condiciones, cuando el aumento de velocidad es muy grande, se llegan a producir grandes diferencias de presión y entonces, si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido de este conducto, que se mezclará con el que circula por el primer conducto.



Carburador elemental

Medición de Caudales

¿Volumétrico o Másico?

✳ Depende de la aplicación

✳ Ejemplo

→ Medición de fluidos energéticos como GNC

- ★ La energía es proporcional a la masa de fluido
- ★ No es proporcional a su volumen
- ★ Suele interesar el caudal másico

→ de medirse con un caudalímetro volumétrico es necesario compensar

- ★ al menos presión y temperatura
- ★ porque la densidad cambia con estos dos parámetros
- ★ en particular para gases

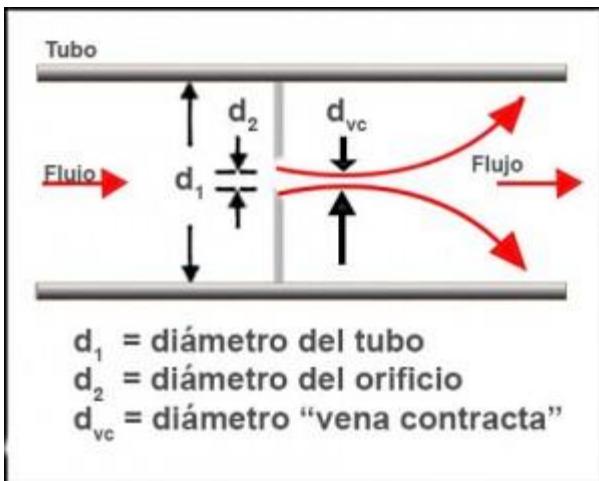
✳ Contraejemplo

→ Medición del consumo de agua domiciliario

- ★ Interesa más el volumen que la masa consumidos

Caudalímetros de Presión Diferencial: Placa-Orificio

* Cuando el fluido pasa a través de la placa de orificio, disminuye su presión hasta que alcanza su mínimo en un área denominada “vena contracta”. En este punto se obtiene el valor mínimo de presión y la máxima velocidad. Luego la presión vuelve a incrementarse pero ya no recupera su valor anterior debido a pérdidas causadas por turbulencias y fricciones. La diferencia de presión que ocasiona la placa de orificio permite calcular el caudal.



$$Q_M = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

Caudalímetros de Presión Diferencial

Principios Físicos

★ Resumiendo, en una tubería con una restricción,

→ Bernoulli

- ★ que expresa la conservación de las distintas formas de energía presentes en un fluido

→ nos permitió encontrar que para todo fluido, utilizando

- ★ Continuidad de la masa

$$\star A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$$

- ★ La definición de Caudal MÁSICO,

$$\star A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2 = Q_m$$

- ★ la de Caudal Volumétrico

$$\star Q_m = \rho Q$$

- ★ y suponiendo cañería horizontal

$$\star y_1 = y_2$$

→ En general se obtiene que

★ Consecuencia

→ Rango dinámico pequeño.

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

$$Q_m = \sqrt{\frac{1}{\frac{\rho_1}{\rho_2} - (\beta)^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho_1 (p_1 - p_2)}$$

$$Q_2 = \frac{Q_m}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_1} \sqrt{\frac{1}{\frac{\rho_1}{\rho_2} - (\beta)^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho_1 (p_1 - p_2)}$$

$$Q = k \sqrt{p_1 - p_2}$$

Caudalímetros de Presión Diferencial

Principios Físicos

★ En una tubería horizontal con una restricción

→ Se obtiene la siguiente ecuación a partir de un análisis teórico utilizando

- ★ conservación de la energía
- ★ conservación de la masa
- ★ despreciando efectos de flujo turbulento y de energía termodinámica

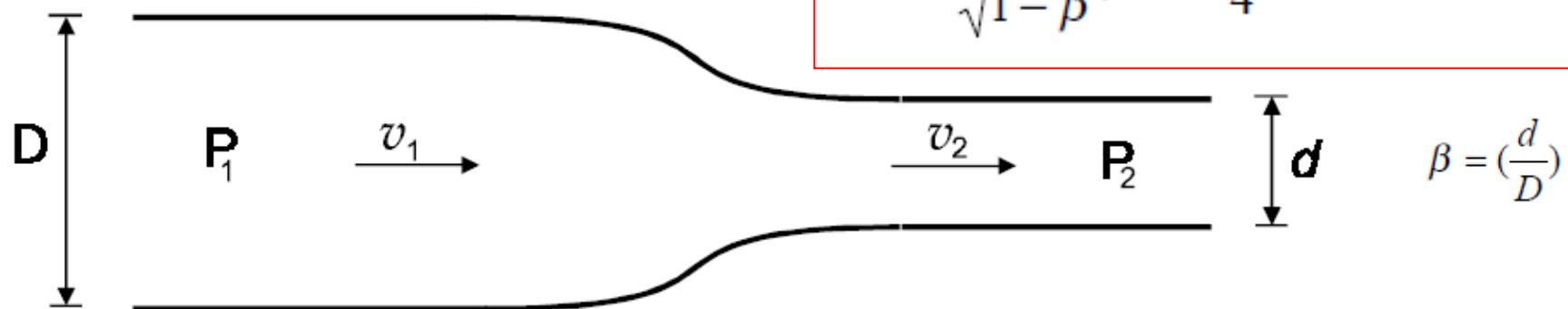
$$Q_M = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) - \beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2) \cdot \rho_1}$$

→ Fija la relación entre caudal másico y el ΔP en la restricción

→ Un análisis teórico más profundo y la experimentación llevaron a la **norma ISO-5167** que establece para el cálculo del caudal másico

- ★ Si el fluido es incompresible

$$\rho_1 = \rho_2$$



$$Q_M = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

Caudalímetros de Presión Diferencial

Principios Físicos

* El caudal másico depende de

→ Propiedades del fluido

- ★ Densidad o viscosidad
- ★ A la temperatura y presión de operación

$$Q_M = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

→ Parámetros del dispositivo primario

- ★ Diámetros de cañería
- ★ Coeficiente de expansión térmica del material

→ Condiciones del flujo

- ★ Presión
- ★ Presión diferencial
- ★ Temperatura

→ Cualquier diferencia de altura entre las tomas de presión aguas arriba y debajo de la restricción debe ser tomada en cuenta

→ Factor de Expansión ε_1

- ★ Evaluado aguas arriba de la restricción
- ★ Toma en cuenta la compresibilidad del fluido
- ★ Para líquidos siempre vale $\varepsilon_1 = 1$
- ★ Para fluidos compresibles (gases, vapores) resulta $\varepsilon_1 < 1$

Caudalímetros de Presión Diferencial

Principios Físicos

★ El caudal másico depende de

→ Factor de Expansión, ε_1

- ★ La norma ISO-5167 establece cómo debe calcularse para los distintos casos prácticos

$$Q_M = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

→ Coeficiente de Descarga, C

- ★ Es el valor de ajuste entre la teoría y la práctica

- ★ Nuevamente la norma ISO-5167 establece cómo debe calcularse para los distintos casos prácticos, en función de

- ⇒ la geometría del dispositivo sensor

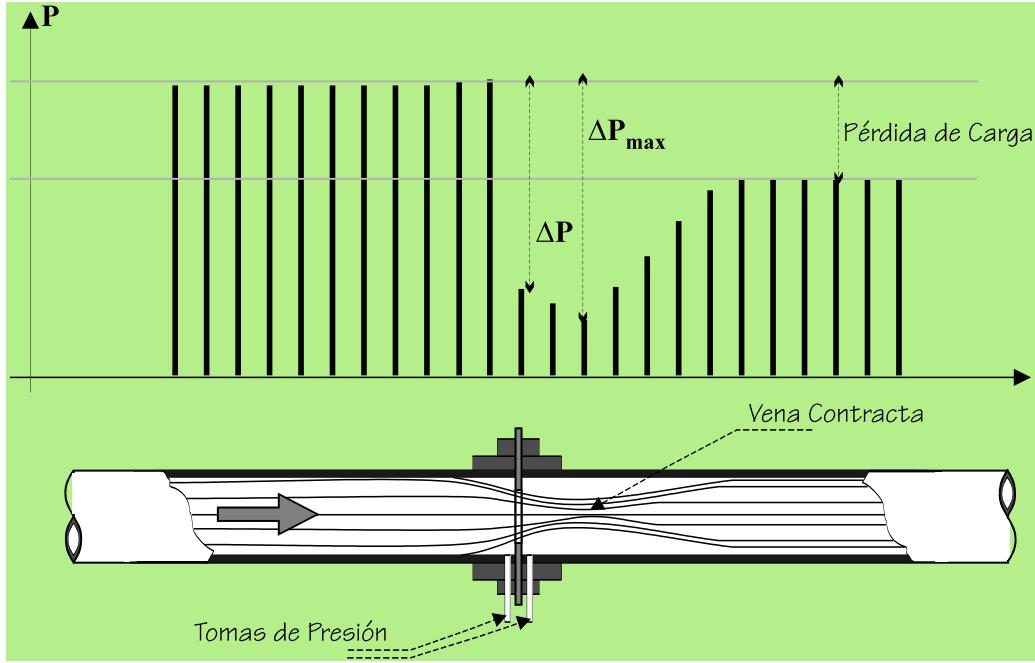
- ⇒ el Reynolds

- ⇒ velocidad aguas arriba de la restricción

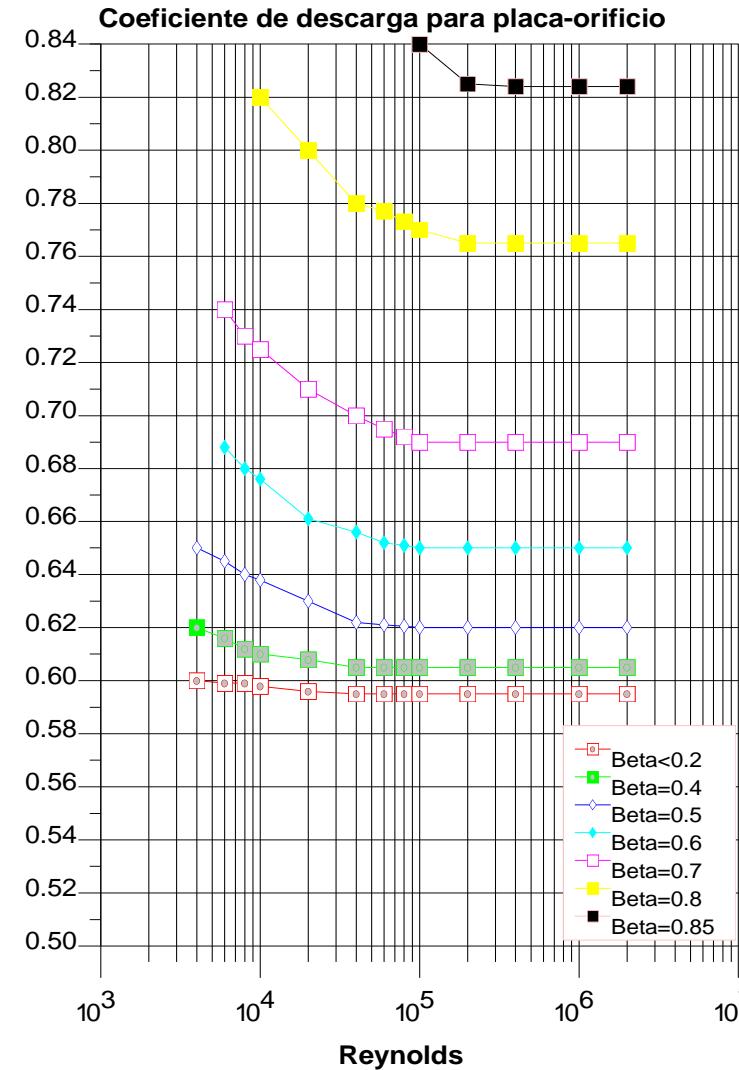
- ⇒ viscosidad aguas arriba de la restricción (dependiente de la presión y la temperatura)

→ Son ecuaciones complejas, por lo que suelen calcularse en alguna forma de “computadora de caudal”

Caudalímetros de Presión Diferencial: Placa-Orificio

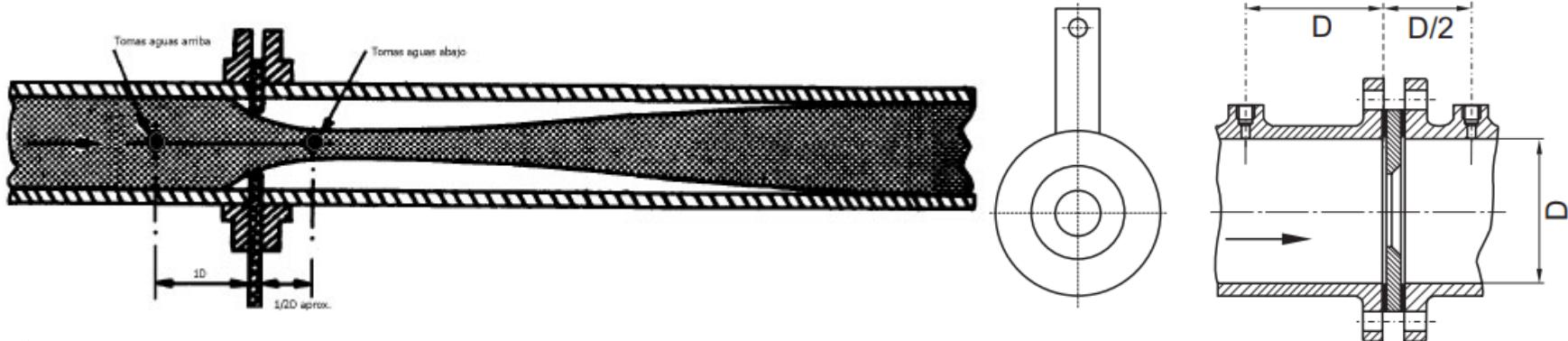


- ★ $p_d \equiv p_2 - p_1$
- ★ $\beta \equiv d_1/d_2$
- ★ C : coef. de descarga (de la figura)
- ★ F_a : corr. x expansión térmica
- ★ Y : corr. para gases o vapores



Instalación: Tomas en la Vena Contracta

★ Instalación de tomas en D-D/2



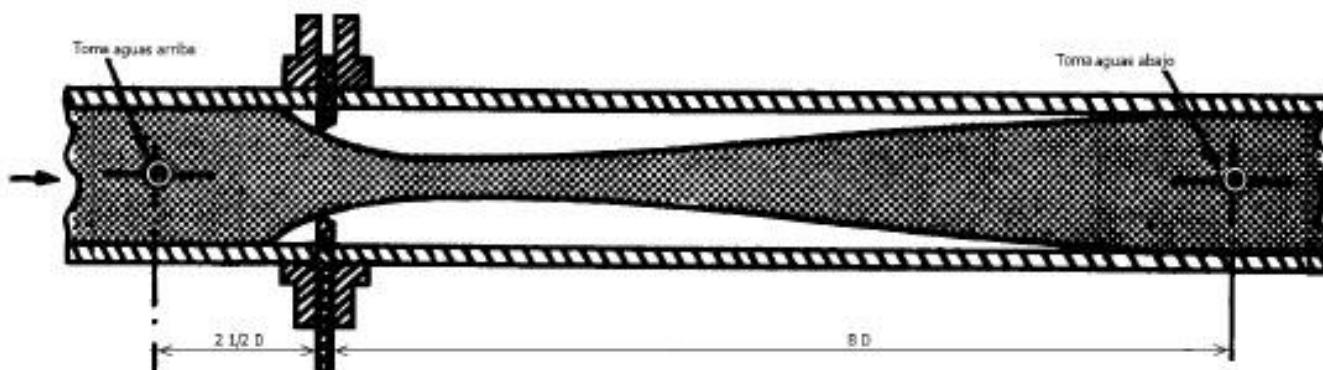
★ El punto de la vena contracta varia levemente con la relación d/D , con lo cual este montaje es sensible a variaciones en el orificio

★ De acuerdo a la DIN19214

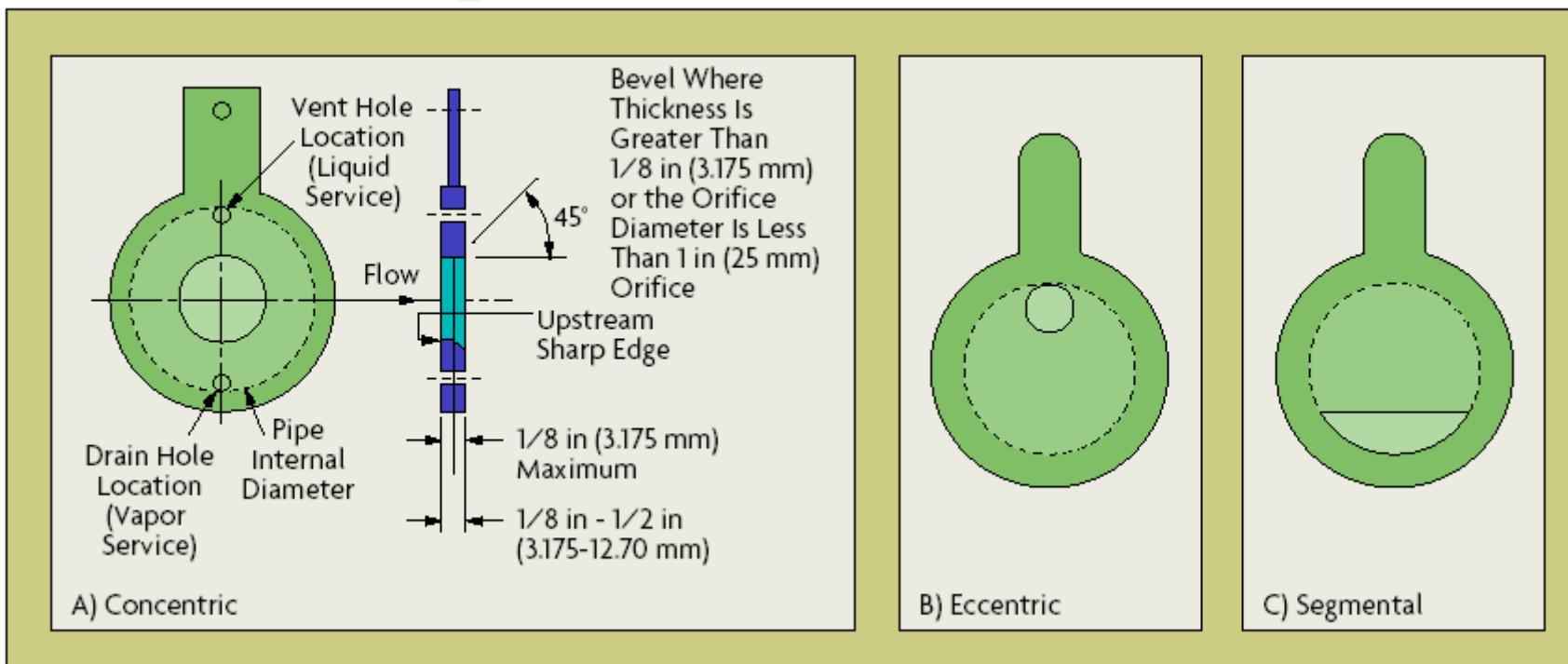
- ➡ Distancia entre la placa orificio y la toma "+":
 - ★ $0,9D \dots 1,1D$
- ➡ Distancia entre la placa orificio y la toma "-" :
 - ★ $0,48D \dots 0,52D$ para $\beta \leq 0,6$
 - ★ $0,49D \dots 0,51D$ para $\beta > 0,6$
- ➡ Ambas distancias son medidas desde la cara aguas arriba de la placa orificio.

Instalación: Tomas en la tubería

- ✿ Mide la perdida de presión permanente
 - ➔ Requiere mayor cantidad de tramos rectos de tuberías
 - ➔ 2,5 D para la toma +
 - ➔ 8D para la toma -



Tipos de Placa-Orificio



- La placa concéntrica para líquidos limpios y de baja velocidad; gases y vapor a baja velocidad
- Excentrico y segmentado en aplicaciones con fluidos que contienen materiales en suspensión o condensado de vapor.

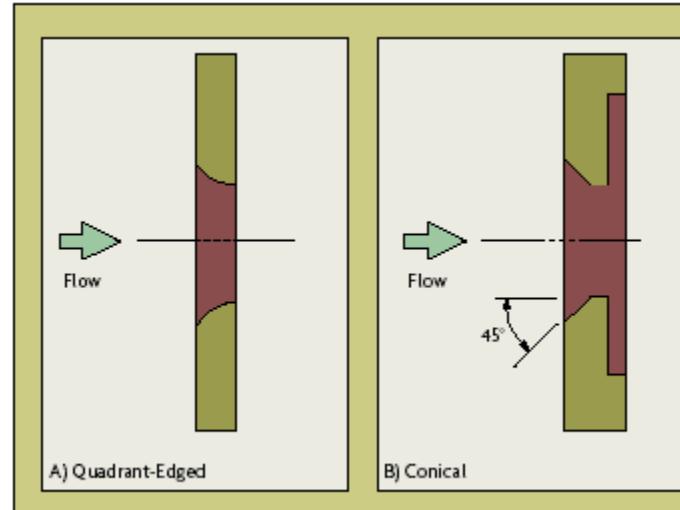


Figure 2-5: Orifices for Viscous Flows

Diseño de un Caudalímetro Placa-Orificio

Ejemplo 14-3: diseñar un caudalímetro placa/orificio capaz de medir un caudal de kerosene estimado en $0.0115 \text{ m}^3/\text{seg}$ (690 lpm), circulando por una tubería de 7.8 cm de diámetro interno. La densidad del kerosene es de 800 kg/m^3 y su viscosidad es de 1.3 cp.

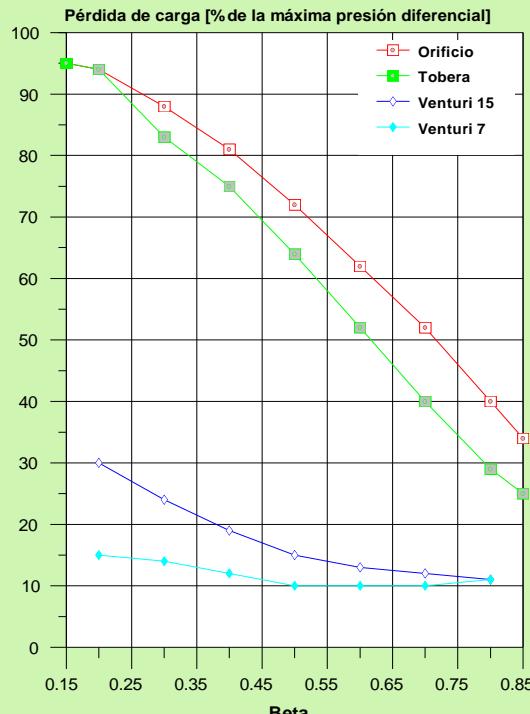
Se puede comenzar tomando como valores iniciales de diseño, los factores de ajuste $F_a = Y = 1$, y el valor de β como 0.7, pues da una pérdida de carga razonablemente baja.

El número de Reynolds se calcula como:

$$Re = \frac{\rho Q D}{A \mu} = \frac{800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 0.0115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} 0.078\text{m}}{\frac{\pi}{4} (0.078\text{m})^2 1.3 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} = 115579$$

Para $Re=115579$, y $\beta=0.7$, se obtiene $C = 0.69$, y con esos valores se puede encontrar la presión diferencial que generará el sensor, despejando de la ecuación para el caudal :

$$p_d = \frac{\rho(1 - \beta^4)Q^2}{1.21\beta^4 d_2^4 C^2} = \frac{800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (1 - 0.7^4)(0.0115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}})^2}{1.21 * 0.7^4 (0.078\text{m})^4 0.69^2} = 15.7 \text{ kPa} = 2.28 \text{ psi}$$



por lo tanto, podría hacerse la medición con un orificio de diámetro

$$d_1 = \beta d_2 = 0.7 * 7.8 \text{ cm} = 5.46 \text{ cm}$$

instrumentado con un sensor de presión capaz de medir hasta 5 psi aunque la medición quedaría en un entorno de 2.3 psi. La pérdida de carga (Figura 14-6) sería de

$$\Delta P = 0.52 p_d = 0.52 * 2.28 \text{ psi} = 1.2 \text{ psi}$$

$$\Delta P = 8174 \text{ Pa}$$

y el consumo de energía del caudalímetro,

$$W = Q \Delta P = 8174 \text{ Pa} * 0.0115 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W = 94 \text{ Watts}$$

Caudalímetros de Presión Diferencial: Placa-Orificio

★ Instalación

- ★ Presión suficientemente alta para evitar vaporizaciones
- ★ $Re > 20000$ para que el caudalímetro sea preciso
- ★ Tramos de cañería recta
- ★ Instalación horizontal: fluidos limpios, gases o aire seco
- ★ Instalación vertical: vapor saturado, gases, aire húmedo
- ★ Posición de las tomas de presión

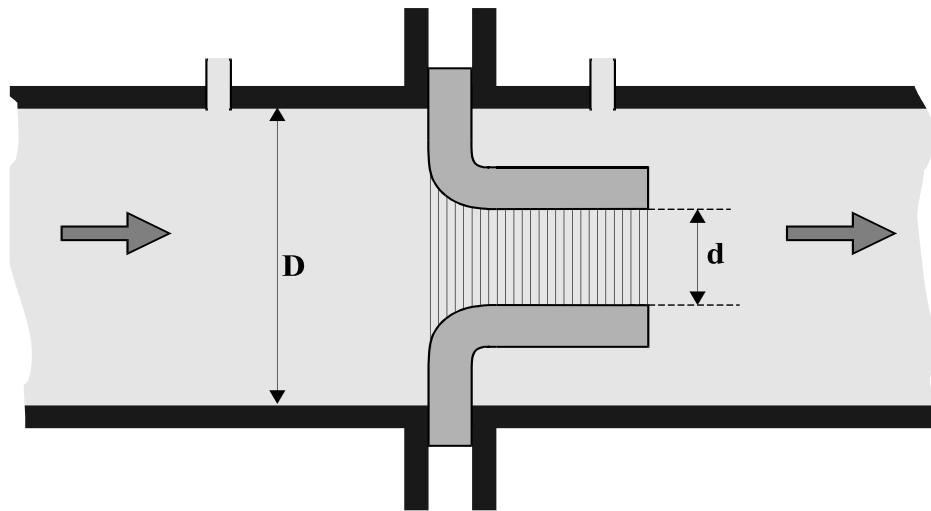
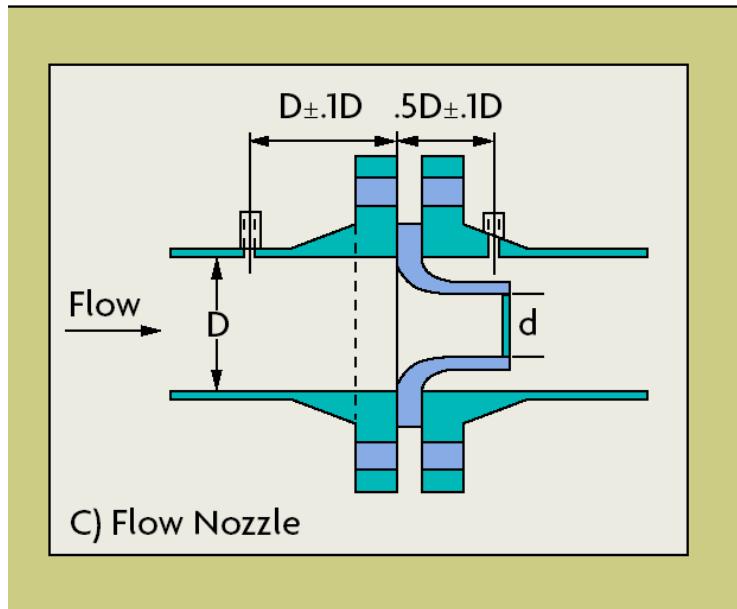
★ Ventajas

- ★ No tiene partes móviles, por lo que su confiabilidad es muy alta
- ★ Su costo inicial aumenta poco con el diámetro de la tubería
- ★ Ampliamente comprobado en las más variadas aplicaciones

★ Desventajas

- ★ El rango puede variar poco (3:1), no apto para caudales muy variables
- ★ Costo operativo significativo, por la potencia de bombeo que se pierde
- ★ El fluido puede vaporizarse al cruzar el orificio
- ★ El orificio es proclive a verse afectado por la erosión
- ★ Aplicaciones con alto contenido de sólidos taponan el orificio
- ★ Es inadecuada en la medición de fluidos con sólidos en suspensión.
- ★ No conviene su uso en medición de vapores, se necesita perforar la parte inferior.
- ★ El comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático ya que la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada.
- ★ Produce las mayores pérdidas de presión en comparación con otros elementos primarios de medición de flujos.

Caudalímetros de Presión Diferencial: Tobera



* Ventajas

- ➔ Tiene mayor caudal y menores exigencias de tubería recta que la placa/orificio
- ➔ Maneja líquidos de alta viscosidad y con mayor nivel de sólidos en suspensión.
- ➔ Es adecuada para servicio de altas presiones y temperaturas
- ➔ Aplicable en cañerías de menor diámetro que los placa/orificio
- ➔ Pérdida de carga menor a la del orificio y rango levemente superior (3.5:1)

* Desventajas

- ➔ Es más costoso que la placa/orificio (8 a 15 veces)
- ➔ Es más difícil de montar y mantener que la placa/orificio
- ➔ No apto para fluidos con alto contenido de sólidos pegajosos o alta viscosidad

Caudalímetros de Presión Diferencial: Tubo de Venturi

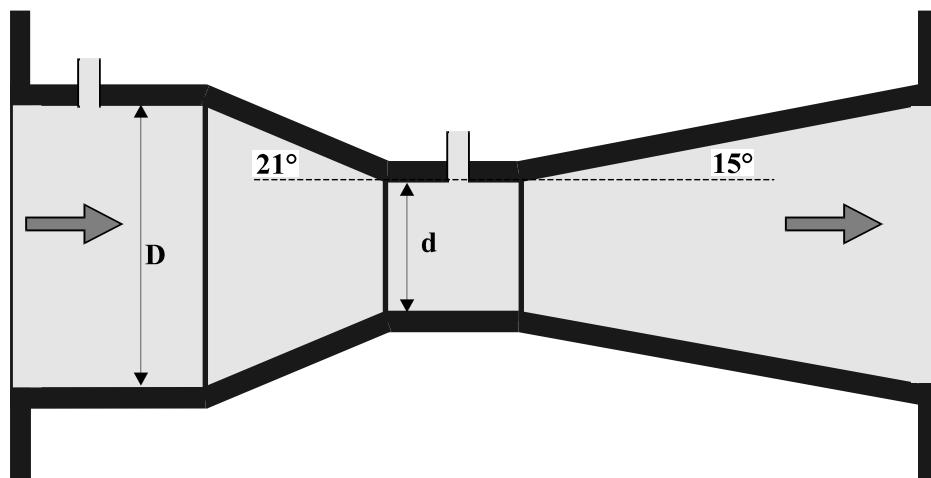
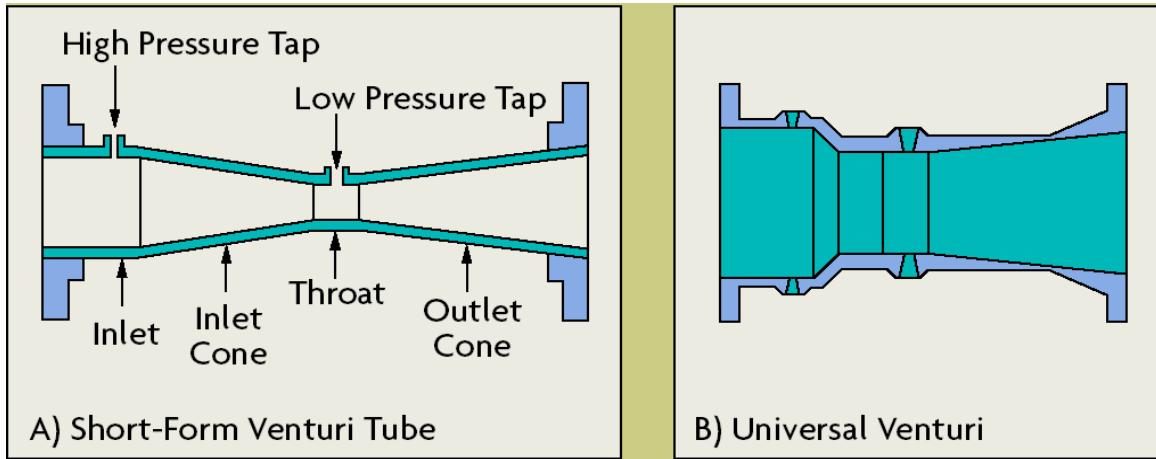
* Valor óptimo para diseño
→ $\beta = 0.5$

* Ventajas

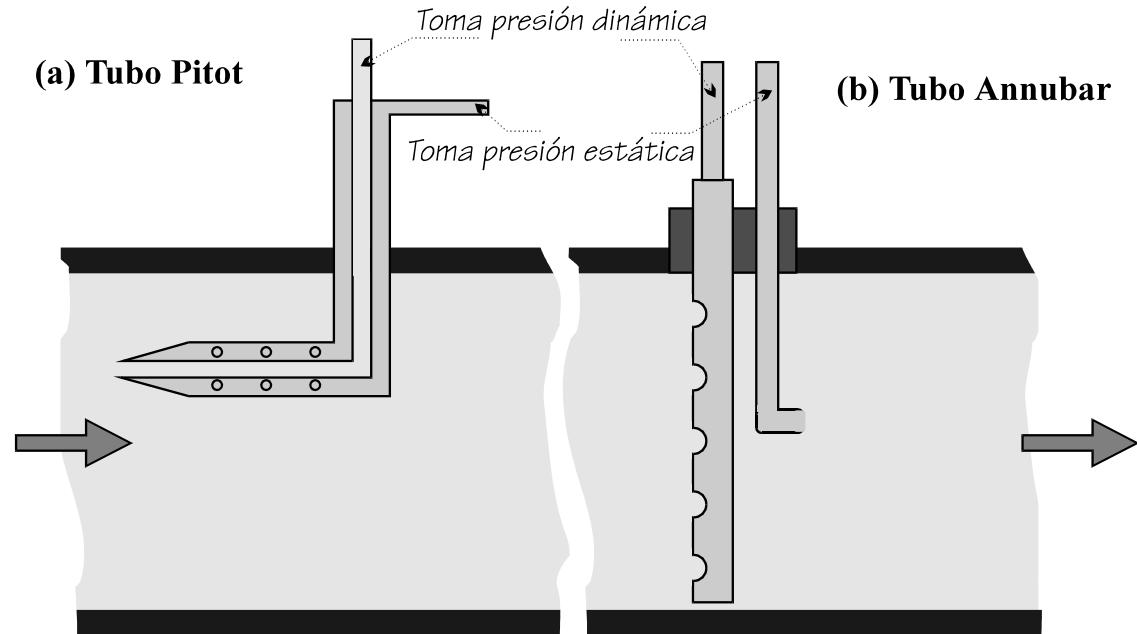
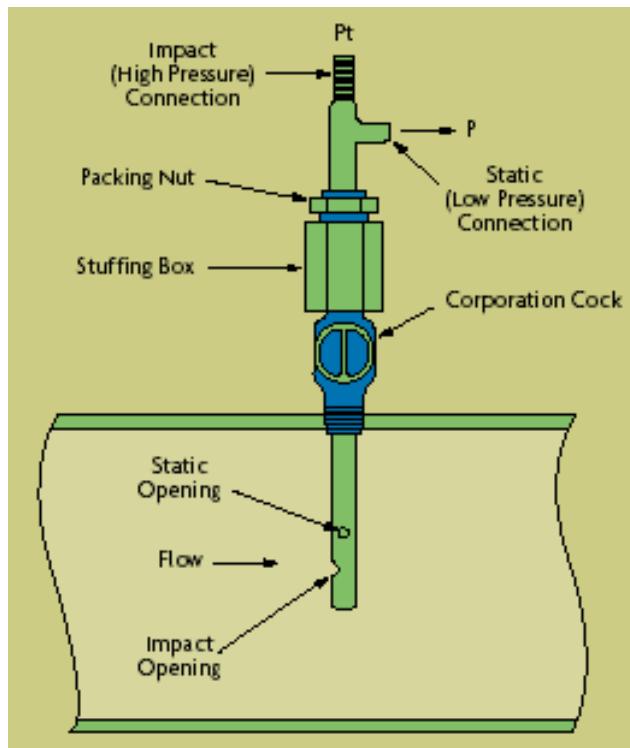
- Coeficiente de descarga insensible al Reynolds → amplio rango de caudales
- Pérdida de carga permanente muy inferior, a placa/orificio y a tobera
- Instalable en casi cualquier cañería en que el Venturi esté siempre lleno
- Requiere menos tubería recta que otros caudalímetros.
- No tiene partes móviles.
- Permite la instalación de múltiples tomas en una tubería para promediar

* Desventajas

- Alto costo (20 veces superior al de la placa/orificio), crece con el diámetro
- No recomendable en fluidos abrasivos, la deformación afecta su exactitud



Caudalímetros de Presión Diferencial: Tubos Pitot y Annubar



* Ventajas

- ➡ Bajísima pérdida de carga, permite medir sin gasto de energía
- ➡ Muy bajo costo comparado con los restantes medidores de presión diferencial.
- ➡ No tiene partes móviles
- ➡ Resulta muy fácil de instalar.
- ➡ Excelente para mediciones en líneas de gas.

* Desventajas

- ➡ Requiere consideraciones especiales si el Reynolds es menor de 10000.
- ➡ Es fácilmente taponado por material en suspensión
- ➡ Su precisión es baja, orden 2 al 4% para el Pitot, y 1 a 3% para el Annubar.

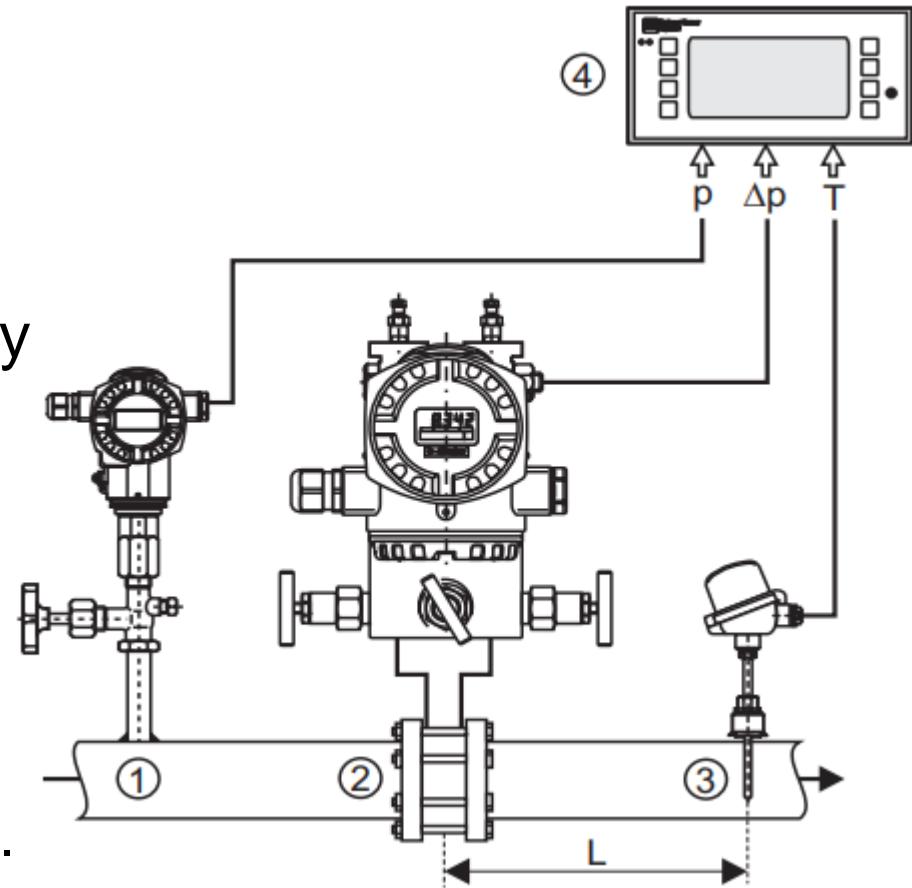
Medición de Caudales Fluidos Compresibles: Gases

* Computadora de Caudal

- Utilizada para Gases
- Permite calcular el caudal masico

* Consiste en una compensación por presión y temperatura

- De acuerdo a la ISO 5167, el sensor de presión absoluta debe estar colocado siempre antes de la placa orificio.
- El sensor de temperatura deberá estar colocado luego del placa orificio para evitar disturbios en el perfil del flujo. Una mínima distancia L deberá ser garantizada.



Computadora de Caudal

Detalles del Cálculo

AGA 3 takes meter settings, compressibilities, a differential pressure, static pressure and temperature, and calculates base volume, base volume flow rate or volume correction factor. It requires flowing and base pressure, temperature and compressibility.

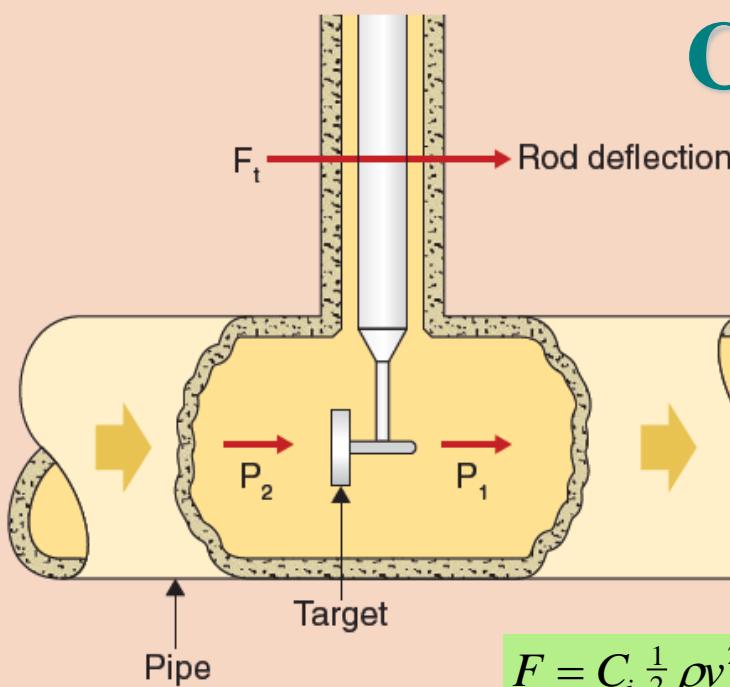
AGA3: Enter a flowing temperature, pressure and compressibility, a base temperature, pressure and compressibility, a flowing volume and a meter factor, then press Calculate.

Value Units ?	Input SI <input checked="" type="radio"/> US <input type="radio"/>	SI units SI	US units US
Diff Press =	10.0	kPa	in WC @ 60F
Flowing Pressure =	4101.325	kPaA	PSIA
Flowing Temp =	10.0	Deg C	Deg F
Downstream Pressure Tap?	<input type="checkbox"/>		
Orifice diameter =	50.8	mm	in
Pipe diameter =	102.26	mm	in
Flowing Compressibility =	0.904351	-	-
Base Compressibility =	0.997761	Deg C	Deg F
Ideal specific gravity =	0.607527	-	-
Base Pressure =	101.325	kPaA	PSIA
Base Temp =	15	Deg C	Deg F
Orifice diameter temp =	20	Deg C	Deg F
Orifice therm exp. coeff. =	1.665e-5	mm/(mm Deg C)	in/(in Deg F)
Pipe diameter temp =	20	Deg C	Deg F
Pipe therm exp. coeff. =	1.116e-5	mm/(mm Deg C)	in/(in Deg F)

de www.squinch.org

Calculate

Caudalímetro por impacto o Target Flowmeter



$$F = C_i \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

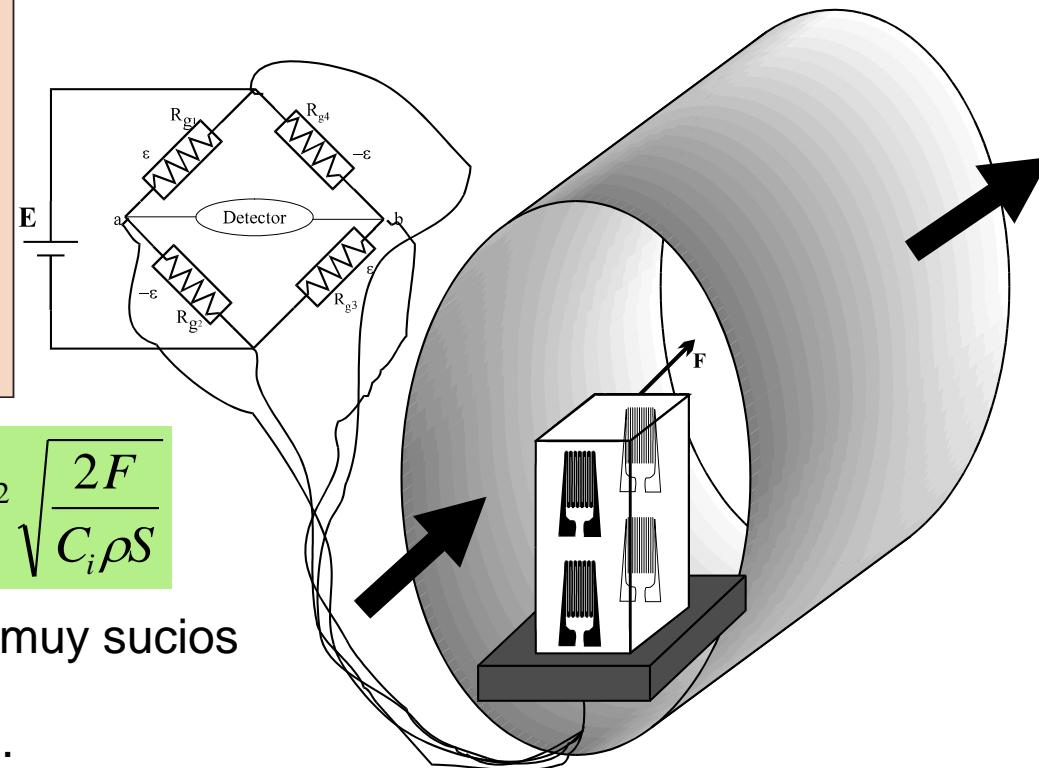
* Ventajas

- Bajo costo
- Se puede utilizar en fluidos muy sucios o corrosivos
- Facilidad para la instalación.
- Amplia flexibilidad para el diseño.
- Mediciones relativamente precisas, Incertezas del orden del 1%.

$$Q = A \cdot v = \frac{1}{4} \pi D^2 \sqrt{\frac{2F}{C_i \rho S}}$$

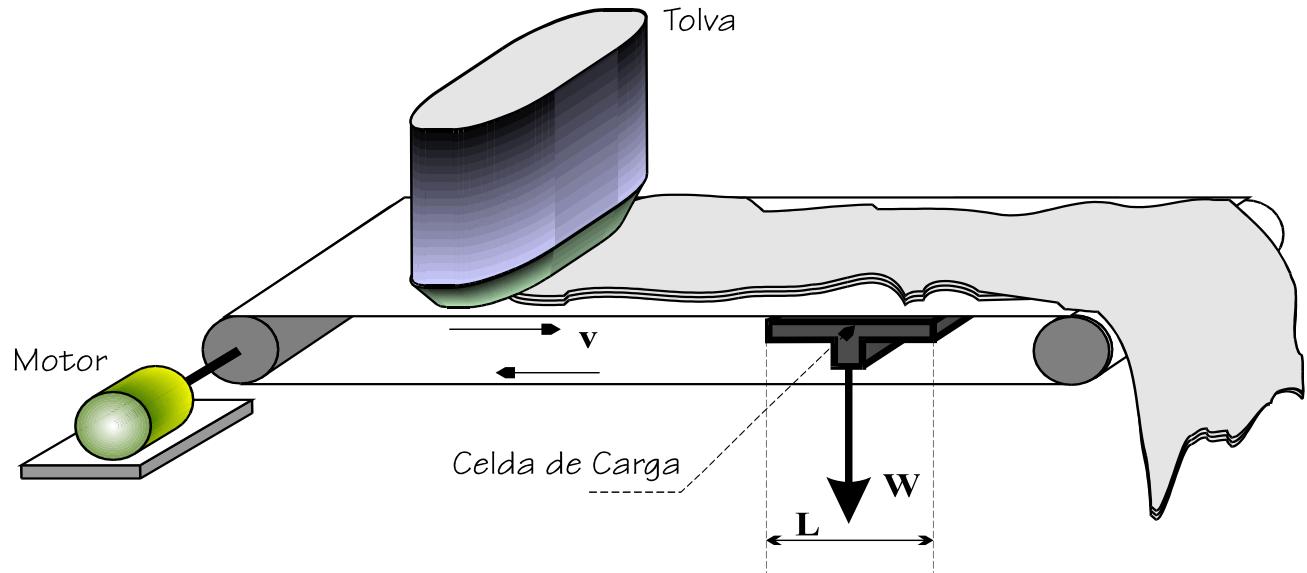
* Desventajas

- El fluido y las condiciones del proceso deben ser compatibles con una instalación de bandas extensométricas.



Medición de Caudales

Fluidos Incompresibles: Sólidos a granel



Definición

→ Habitualmente como masa o peso por u. de tiempo

→ En el caso de la cinta transportadora

→ Métodos

★ Celda de carga

⇒ Caudal → Peso → Deformación → Resistencia → Tensión

★ Vía flecha de la cinta mediante p.ej., un LVDT, para obtener el caudal.

$$Q_m = \frac{Wv}{gL}$$

Caudalímetros para Canales Abiertos: Vertedero

Aplicación

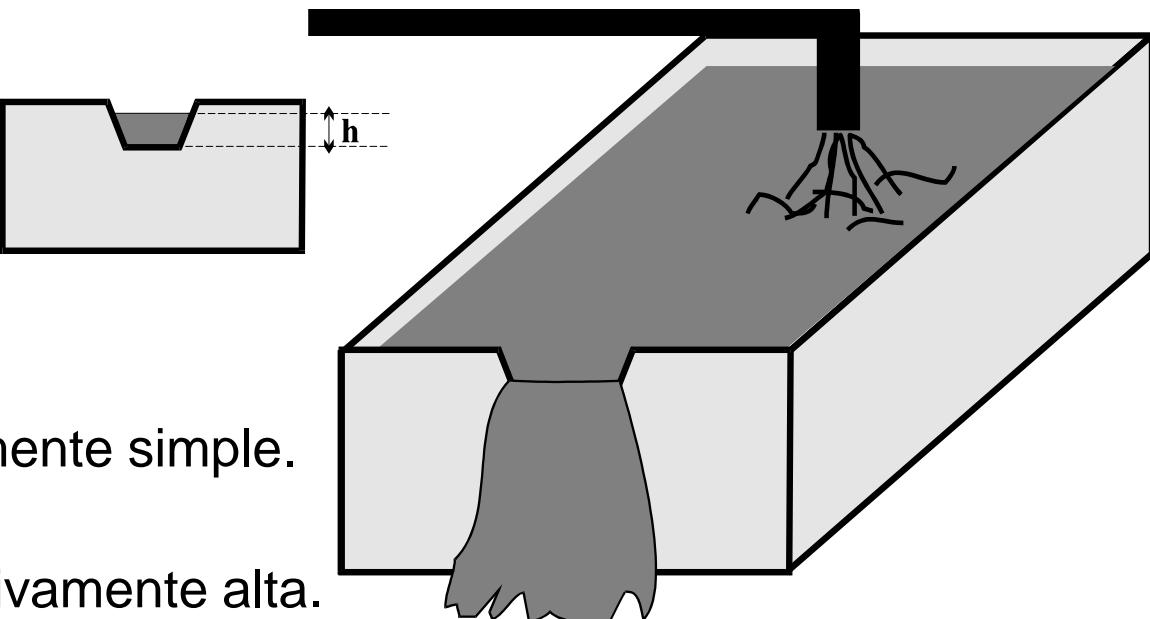
- Cuando el líquido fluye dejando una superficie libre
 - ★ Ejemplos: túneles, canales cloacales, canales de riego, ríos, arroyos, etc.

Tecnología

- Inducir cambio de nivel mediante obstáculo o angostamiento.
- $Q = k w (\Delta h)^n$

Formas constructivas

- Triangular
- Rectangular
- Trapezoidal (Cipolletti)



Ventajas

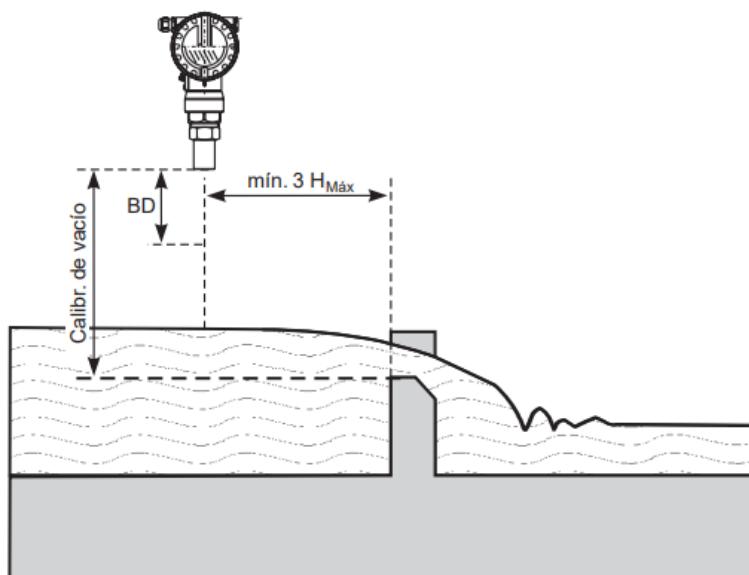
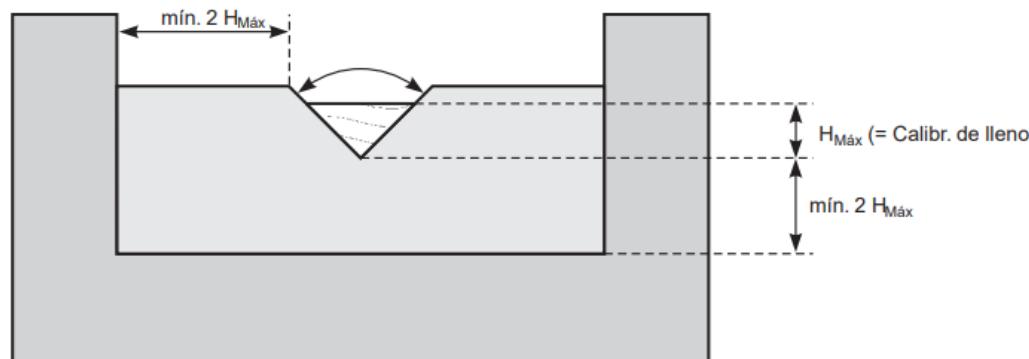
- Construcción relativamente simple.

Desventajas

- Pérdida de carga relativamente alta.
- No permite la medición de caudales de líquidos con alto nivel de sólidos en suspensión por las acumulaciones que provoca.

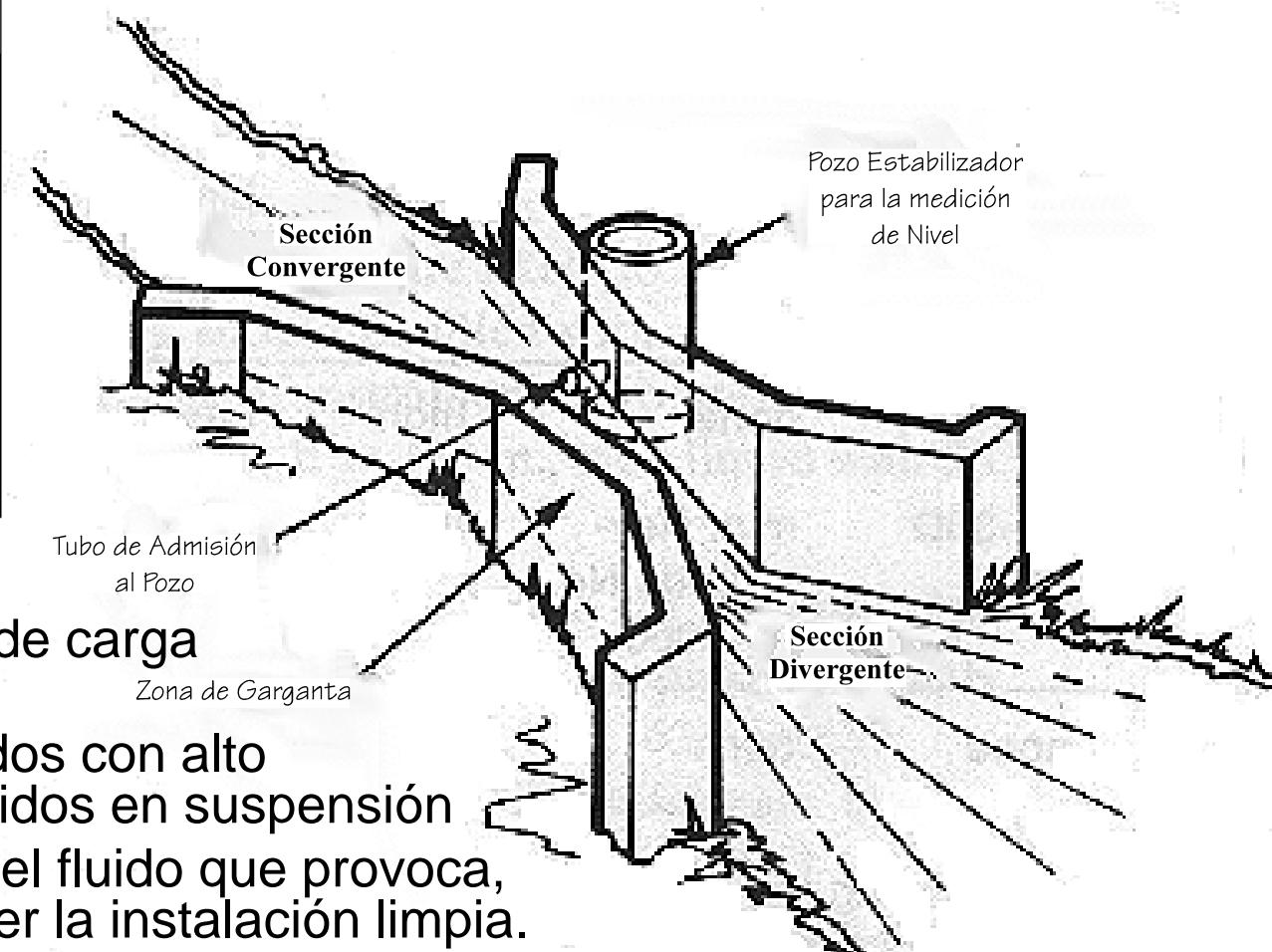
Caudalímetros para Canales Abiertos: Vertedero

★ Ejemplo vertedero triangular con sensor ultrasónico.



Caudalímetros para Canales Abiertos: Canal de Parshall

Ancho de Garganta W		Caudal Q (l/s)	
pulg	cm	Mínimo	Máximo
3"	7.6	0.85	53.8
6"	15.2	1.52	110.4
9"	22.9	2.55	251.9
1'	30.5	3.11	455.6
1 1/2'	45.7	4.25	696.2
2'	61.0	11.89	936.7
3'	91.5	17.26	1426.3
4'	122.0	36.79	1921.5
5'	152.5	62.8	2422.0
6'	183.0	74.4	2929.0
7'	213.5	115.4	3440.0
8'	244.0	130.7	3950.0
10'	305.0	200.0	5660.0



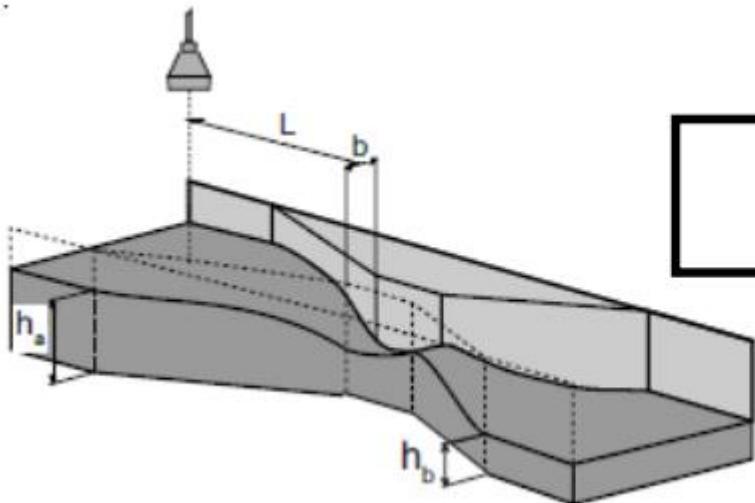
Ventajas

- Mínima pérdida de carga
- Permite la medición de fluidos con alto contenido de sólidos en suspensión
- La aceleración del fluido que provoca, ayuda a mantener la instalación limpia.

Desventajas

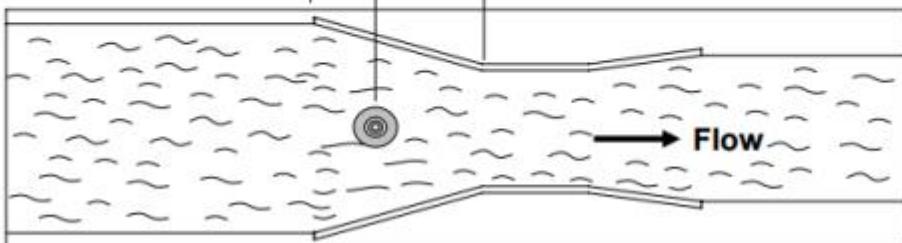
- Su diseño y construcción son más complejos que los de un vertedero.

Caudalímetros para Canales Abiertos: Canal de Parshall



$$Q = C \times h_a^n$$

- * C y n constantes en función del canal
- * h_a es la altura del líquido en la zona de convergencia



Caudalímetros de Área Variable: Rotámetros

$$\star P = E + F_A$$

$$\star \rho_f g V_f = \rho_{lg} g V_f + \frac{1}{2} \rho_{lg} A_f v^2$$

$$\star v = \sqrt{\frac{gV_f(\rho_f - \rho_{lg})}{\frac{1}{2}\rho_{lg}A_f}}$$

$$\star Q = CA_a v = CA_a \sqrt{\frac{gV_f(\rho_f - \rho_{lg})}{\frac{1}{2}\rho_{lg}A_f}} = kA_a$$

→ Efecto de la viscosidad sobre la indicación

★ Despreciable

→ Efecto del tipo de fluido

★ Notable, debe ser calibrado

$$\star Q_{vs} = Q_{vm} \left(\frac{P_m}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{T_m} \right)$$

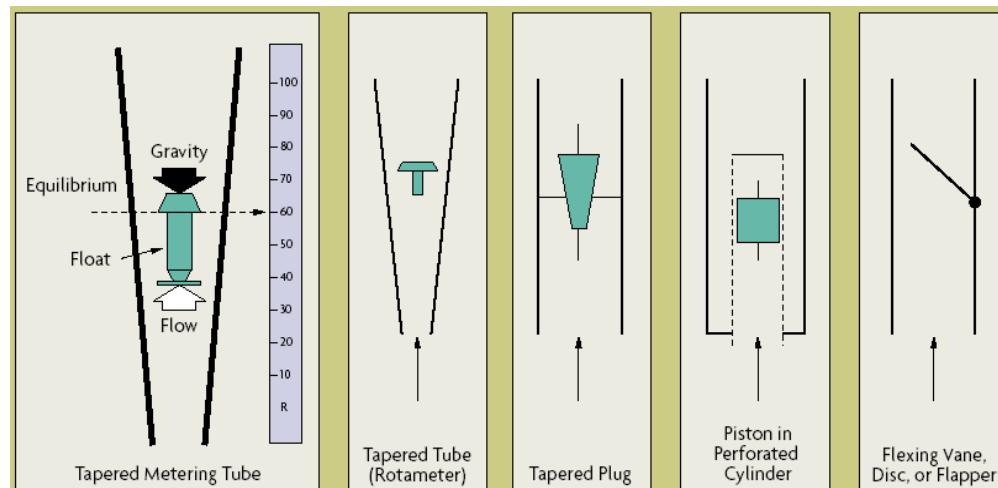
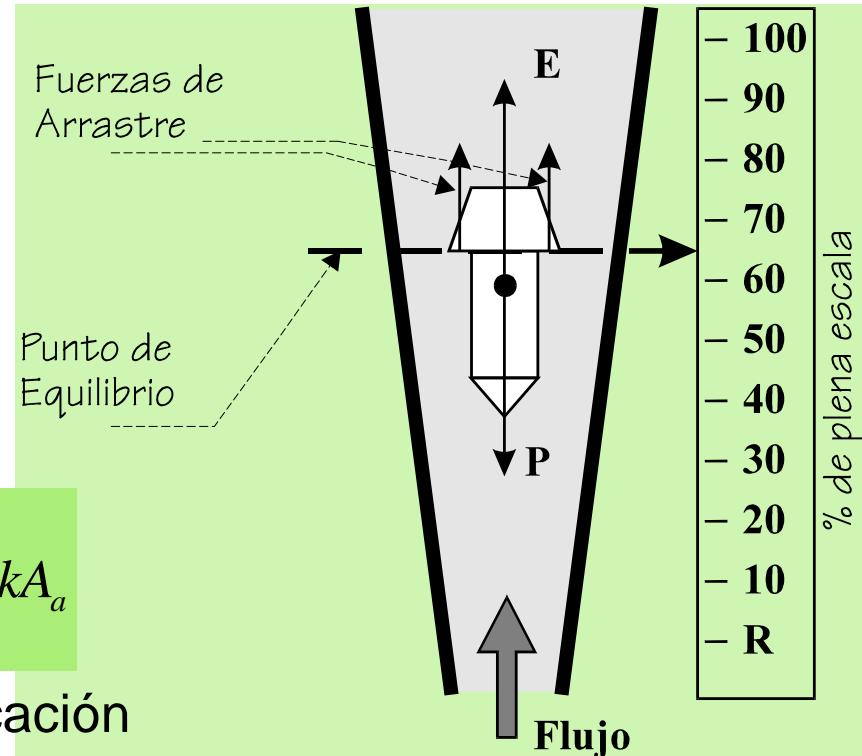
→ Puede ser calibrado en

★ caudal [m³/s, lpm, lph, gpm, etc.]

★ velocidad [m/s, ft/s, etc.]

★ concentración

★ densidad o viscosidad, etc.



Caudalímetros de Área Variable: Rotámetros (cont.)

★ Método para grandes caudales

- rotámetro entre tomas de presión de caudalímetro placa-orificio

★ Costos

- desde algunas decenas de dólares hasta algunos centenares de dólares

★ Ventajas

- Económico para caudales bajos y tuberías con diámetros menores que 2"
 - ★ No se consiguen rotámetros para tuberías de diámetro superior a 3"
 - ★ Incrementa mucho su costo para tuberías de diámetro grande
- Cubre un rango relativamente amplio de caudales (10:1)
- Sirve tanto para líquidos como para gases
- Provee una información visual directa
 - ★ Pero no es sencillo ni económico obtener señal eléctrica a partir de la indicación.
- La caída de presión que introduce en la línea es baja
- Instalación y mantenimiento muy simples
 - ★ Sin requerimientos especiales sobre el piping alrededor del instrumento

★ Desventajas

- Es relativamente impreciso (incerteza del orden del 2%)
- Debe instalarse en sentido vertical de modo que el caudal sea ascendente.

★ Caudalímetros de Área Variable o Rotámetros

→ Dispositivos prácticos



Fig. 5. Two rotameters with different measurement ranges (manufacturer Fischer & Porter: left side, model 10A6131, 0–1100 NLT/h; right side, model NLPHAir, 0–145 NLT/h).

Caudalímetros de Paletas

Costo

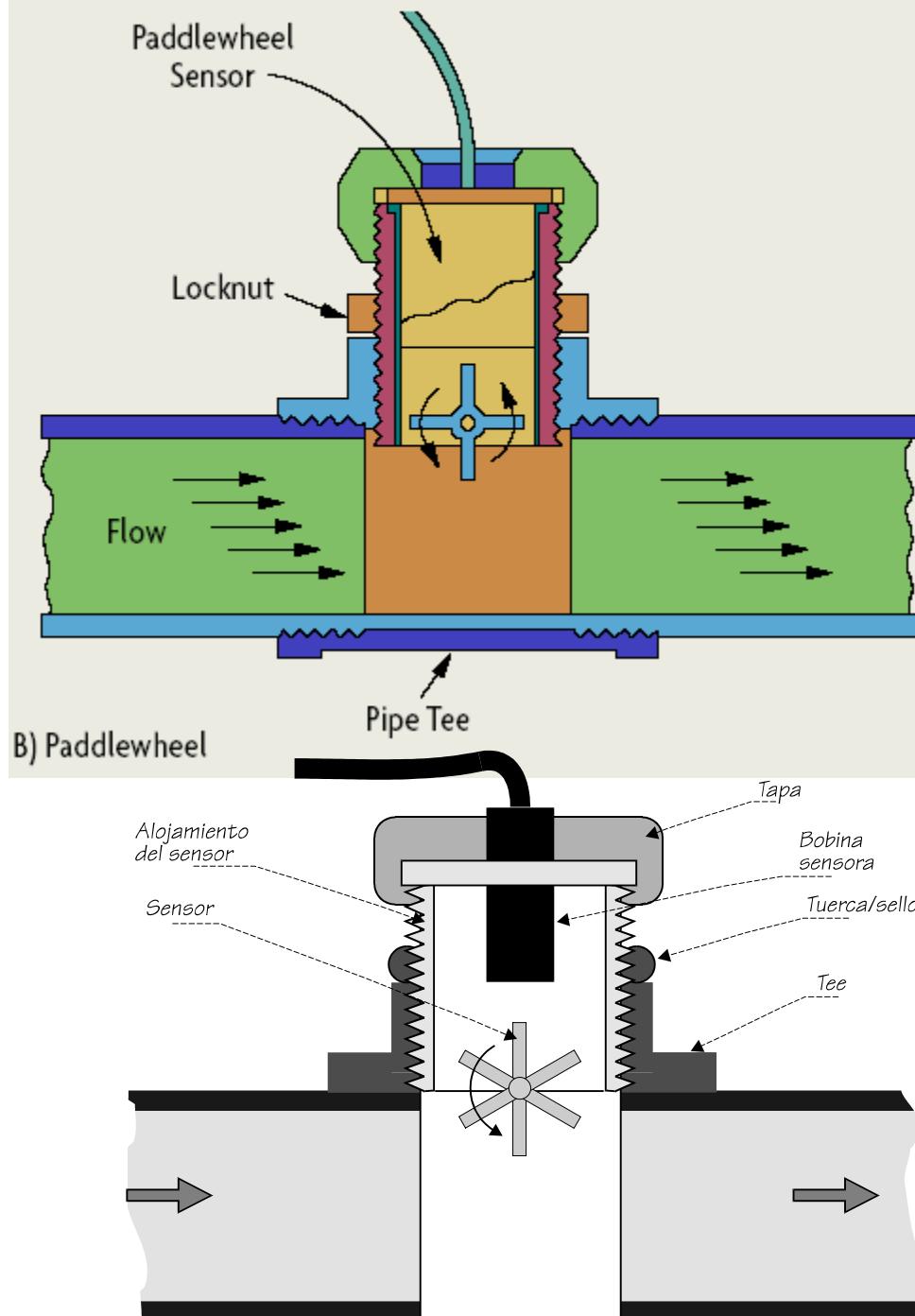
- desde aprox. 200 dólares para los modelos más simples, pero,
- debe sumarse el costo de los accesorios de instalación

Ventajas

- Costo muy inferior al de una turbina equivalente
- El costo no se altera al aumentar el diámetro de la tubería, excepto por el accesorio de instalación
- Buena tolerancia a sólidos en suspensión
- No induce turbulencias
- No ocasiona pérdida de carga

Desventajas

- Mayor incertezza que la turbina
- Calibración sensible al perfil de velocidades en la sección transversal de la tubería



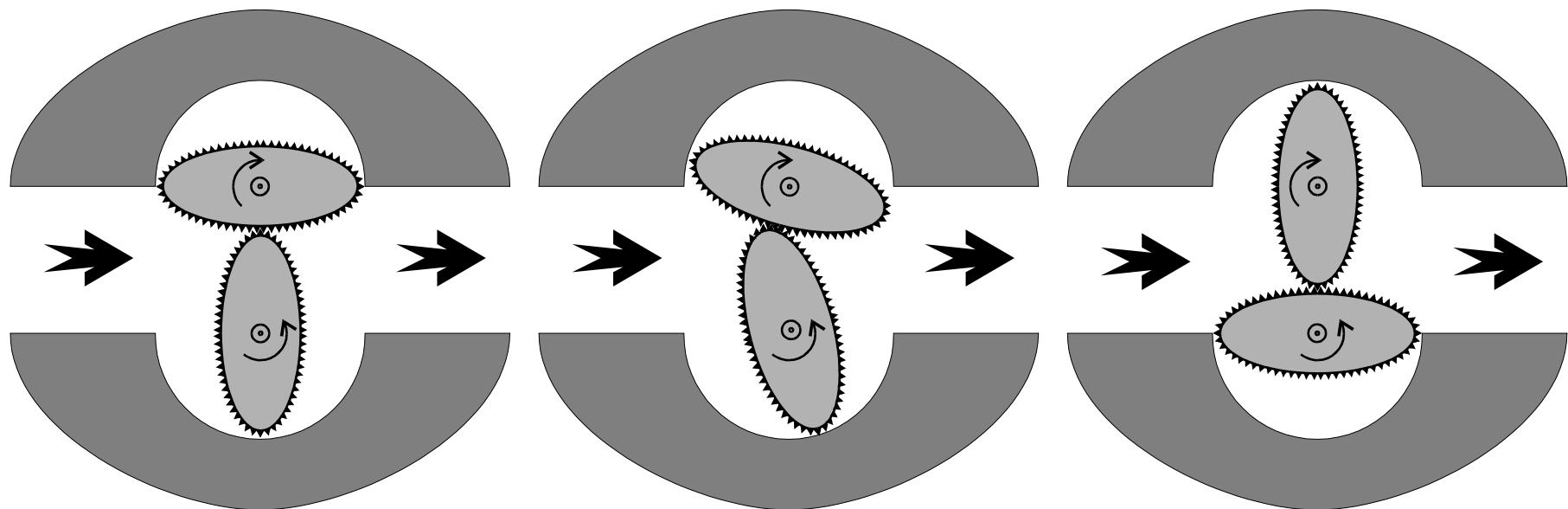
Caudalímetros de Desplazamiento Positivo: Medidor a Engranajes Ovalados

* Ventajas

- Buena precisión para pequeños caudales

* Desventajas

- Alto costo originado en las estrictas tolerancias mecánicas
- Muy sensible a la presencia de sólidos en suspensión



Caudalímetros a Turbina

Precios

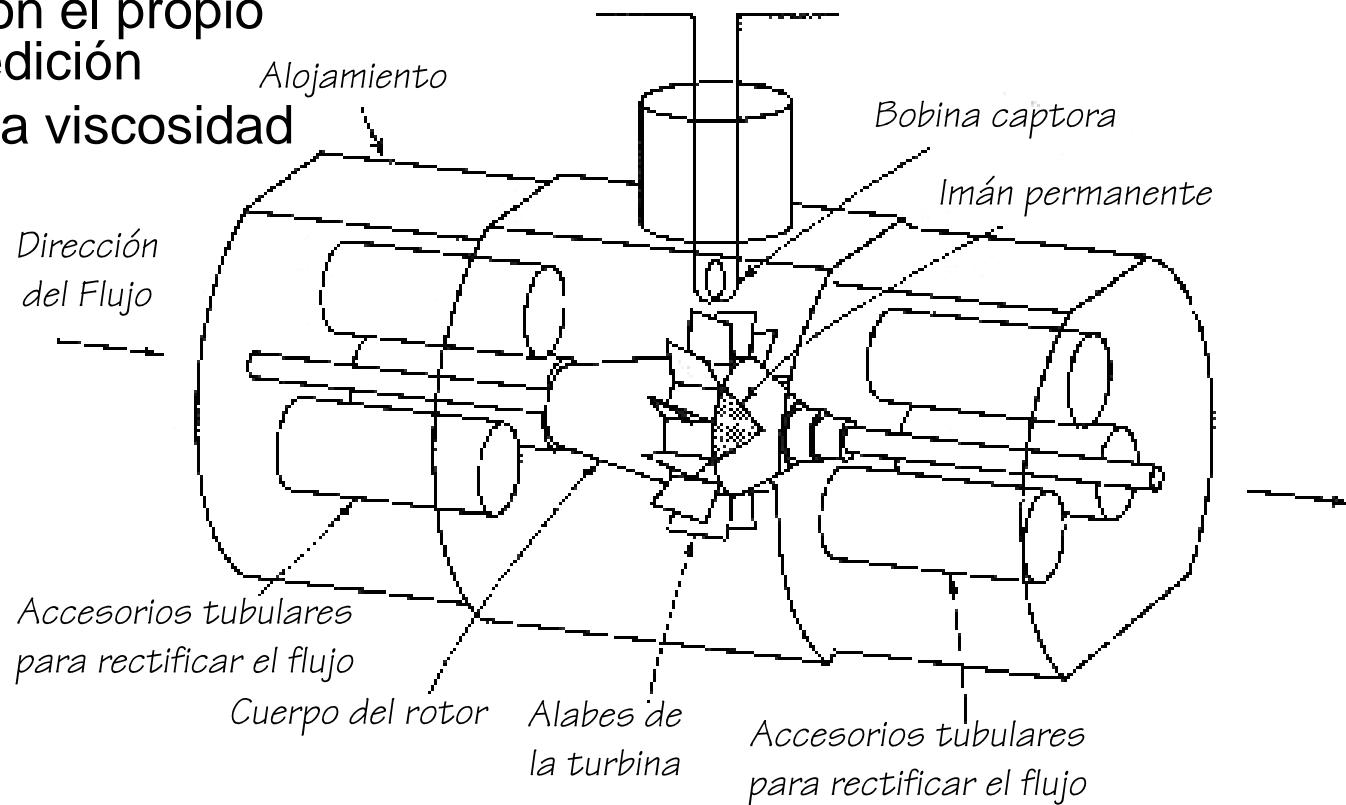
- entre varios centenares y algunos miles de dólares

Características

- Preferencia por los modelos con rotores precalibrados
- Lubricación con el propio fluido bajo medición
- Influencia de la viscosidad
- Necesidad de prefiltro

Aplicaciones

- alta precisión
- cuando se sabe que en aplicaciones similares ha tenido éxito



Caudalímetros a Turbina (cont.)

★ Instalación

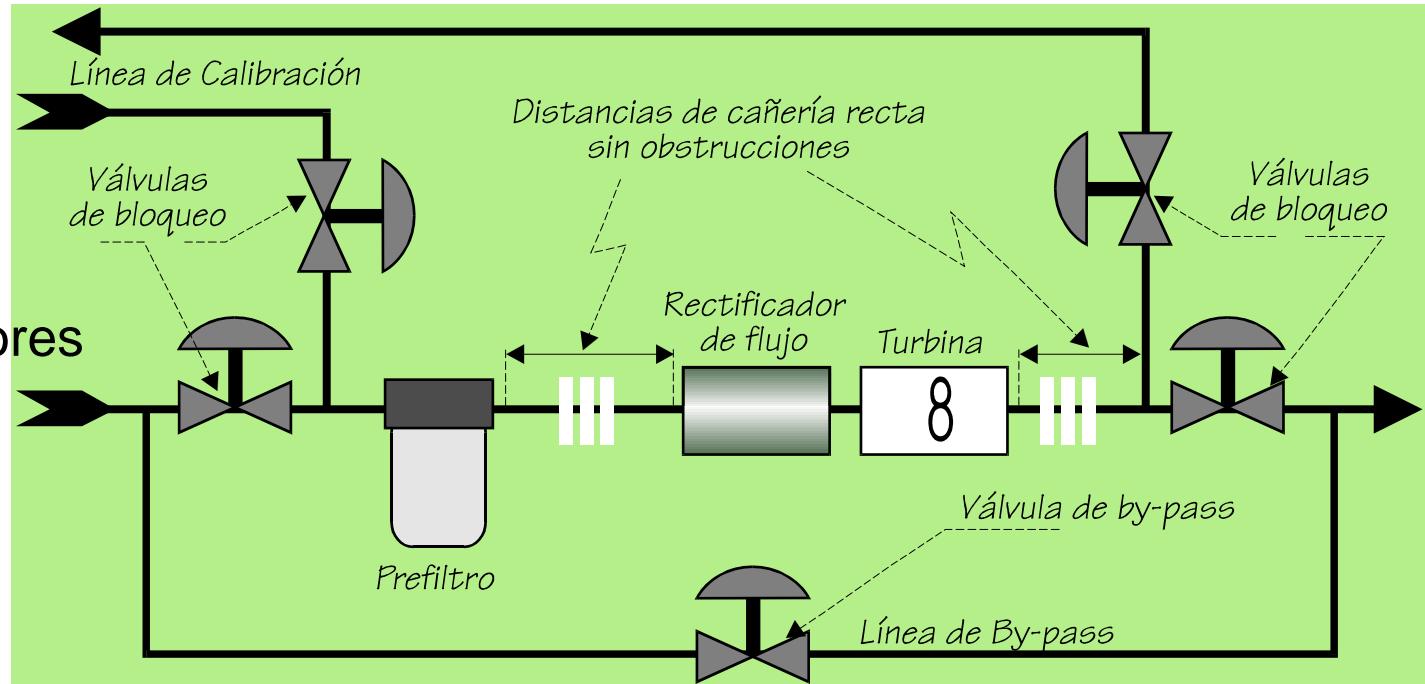
→ Necesario compensar variaciones en las condiciones de proceso:

$$\star \Delta P_2 = \Delta P_1 (\rho_2/\rho_1)^{0.81} (\mu_2/\mu_1)^{0.27} (Q_2/Q_1)^{1.82}$$

→ debe preverse presión suficiente, aguas arriba de la turbina:

$$\star P_{\min} = 1.25 * \text{Presión de vapor} + 2 \Delta P_2$$

→ necesidad de prever de-aereadores para evitar excesos de velocidad



Caudalímetros a Turbina (cont.)

★ Acondicionamiento

→ Señal de salida

- ★ frecuencia proporcional a la velocidad de giro
- ★ amplitud entre decenas de mV y varios voltios, función del caudal

→ Factor-K

$$\star K [lt/seg] \equiv 60 f / Q$$

★ Tabla de calibración

Caudal [lpm]	K [pulsos/lt]
23.8	248.7
60.2	248.4
121	247.6
182	247.2
243	246.9

Caudalímetros a Turbina (cont.)

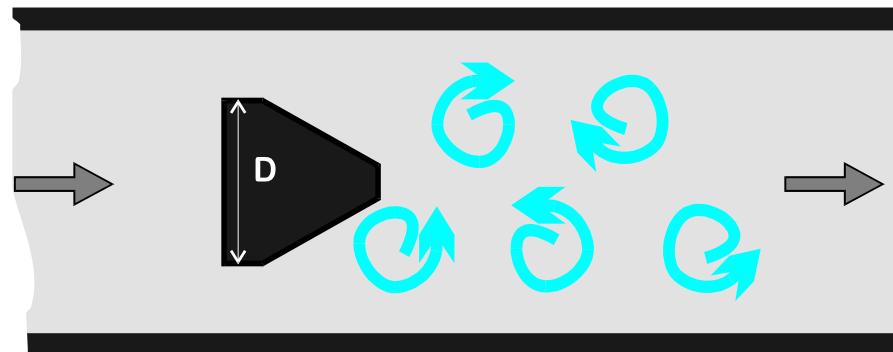
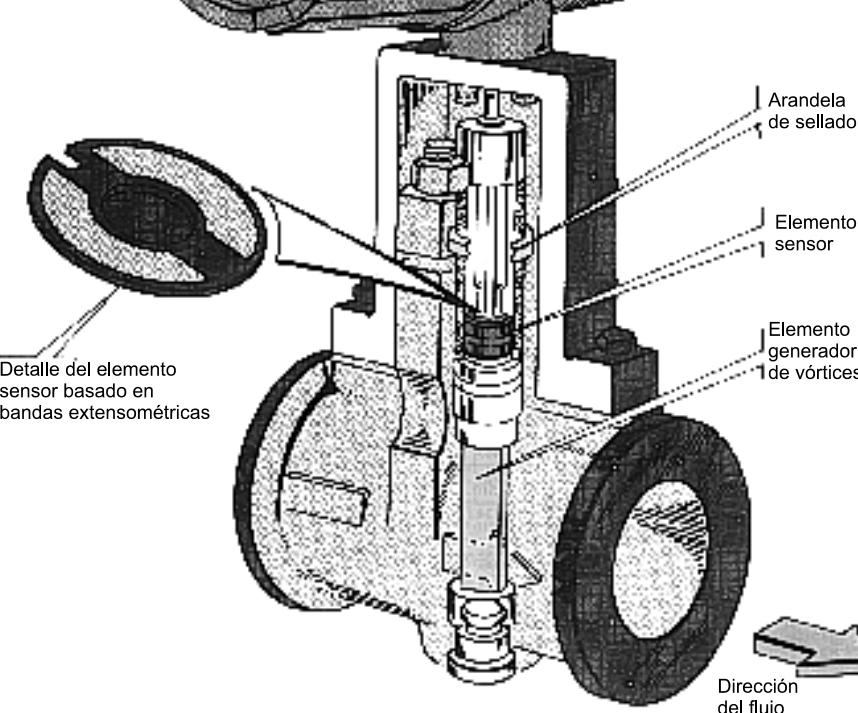
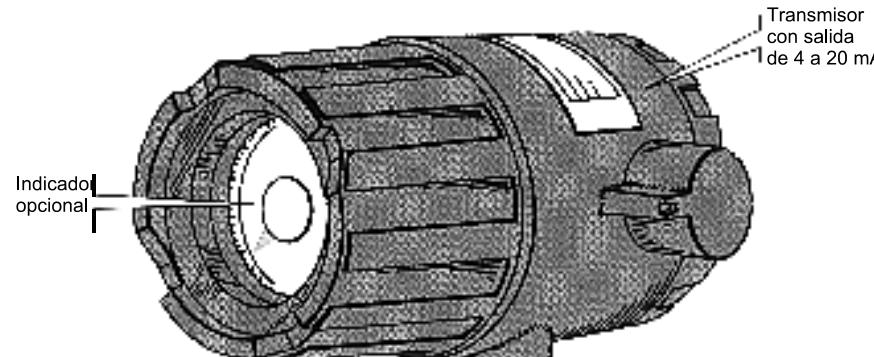
★ Ventajas

- ➔ Rápida respuesta y excelente repetibilidad.
- ➔ Fácil interfaz a sistemas de computación
- ➔ Es lineal sobre un muy amplio rango de caudales.
- ➔ Es el instrumento más preciso disponible para medir caudal.
- ➔ Operación sobre un muy amplio rango de temperaturas y presiones.

★ Desventajas

- ➔ Al tener piezas móviles que giran sobre rodamientos, el desgaste de éstos suele ser el problema principal de la turbina.
- ➔ Es un instrumento delicado en comparación con otros caudalímetros.
- ➔ Cualquier exceso de velocidad puede dañar sus rodamientos.
- ➔ Es caro
 - ★ Su costo aumenta desmedidamente con el tamaño de la tubería, p.ej., en una cañería de 3", cuesta dos a tres veces más que una placa/orificio; en líneas de mayor tamaño, el factor de aumento crece exponencialmente.
- ➔ Requiere fluido a medir limpio y con propiedades lubricantes
- ➔ Alto costo de mantenimiento.
- ➔ No es utilizable en fluidos de alta viscosidad.

Caudalímetro a Torbellinos o Vórtices



$$\Rightarrow f = St * v/D$$

→ Ventajas

- ★ Amplísimo rango dinámico (100:1)
- ★ Muy buena tolerancia a duras condiciones de proceso.
- ★ Sin partes móviles, confiable, muy bajo mantenimiento
- ★ Salida digital, conveniente para interfase digital
- ★ Esencialmente independiente de la temperatura, la densidad y la viscosidad del fluido.

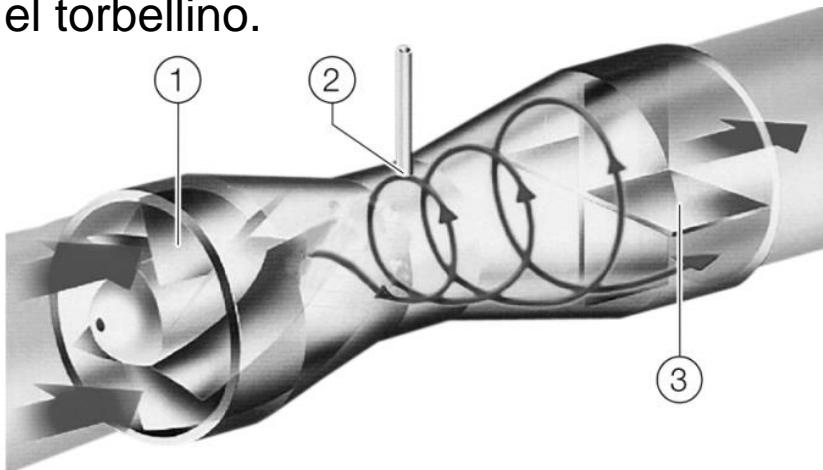
→ Desventajas

- ★ Es afectado por fluidos abrasivos que puedan deformar el generador de torbellinos.
- ★ También lo afectan los fluidos capaces de generar depósitos en la obstrucción
- ★ Su costo es relativamente alto, aunque competitivo, p.ej., con el de un orificio.

$$\Rightarrow 10 < f < 1000 \text{ hz}$$

Caudalímetro Swirl

- ★ El caudalímetro Swirl opera bajo el mismo principio que el Vortex.
- ★ Adicionalmente el swirl agrega un "giro" en el acondicionando el fluido, lo que resulta en la reducción consideraciones de instalación y mejora el rendimiento.
- ★ El swirl fuerza al fluido entrante a pasar por un elemento fijo que induce un remolino y a su vez aumenta su velocidad al reducir el tamaño de la cañería.
- ★ Este remolino al avanzar genera zonas de alta y baja presión que son captadas por un sensor piezo-resistivo al igual que en un vortex. Se mide la frecuencia de oscilación para calcular el caudal.
- ★ Luego del sensor se vuelve el fluido a su velocidad original y se rompe el torbellino.



① Swirler

② Piezo sensor

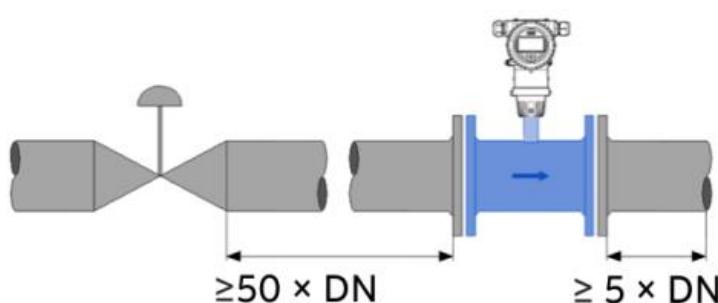
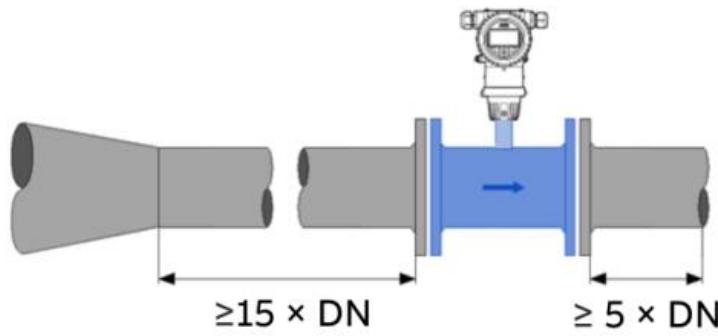
③ Deswirler

➡ Ventajas

- ★ Funcionan a velocidades de flujo más bajas y por lo general no es necesario utilizar reducciones en la cañería para su instalación, lo cual.
- ★ Los swirl ofrecen una mayor precisión, hasta 0,5%, superando a los Vortex.

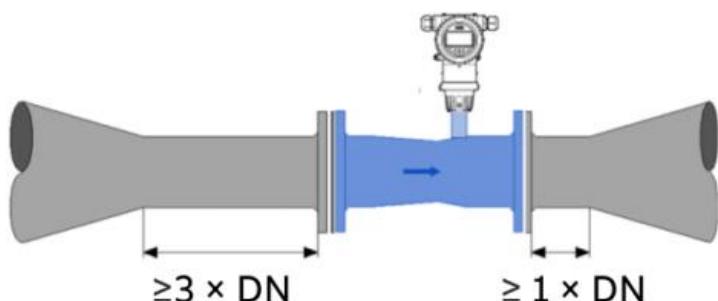
Montaje Swirl y Vortex

(A)



- Si bien el swirl es mas costoso que el vortex, el mismo requiere menor longitud de cañerías rectas lo cual puede en algunos casos compensar la diferencia. Lo mismo ocurre con las reducciones.
- Si el fluido esta a mas de 150°C el caudalimetro se debe montar de costado o hacia abajo.

(B)

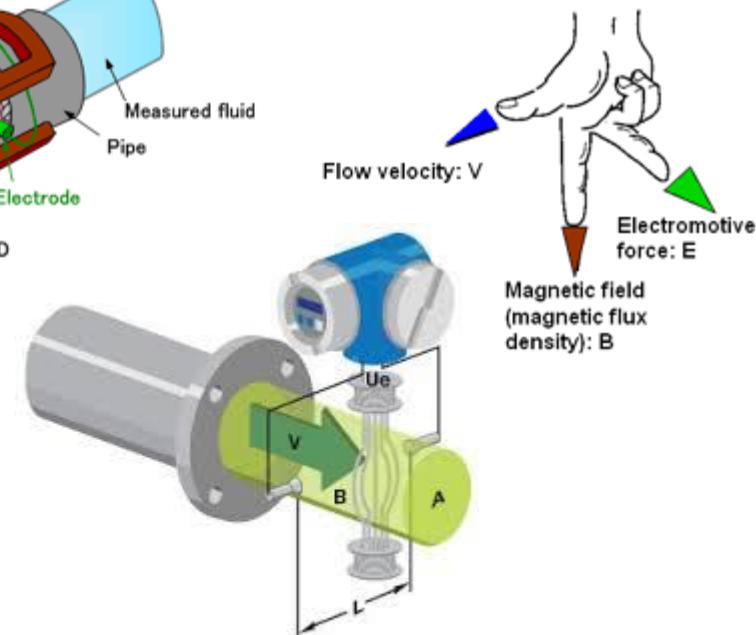
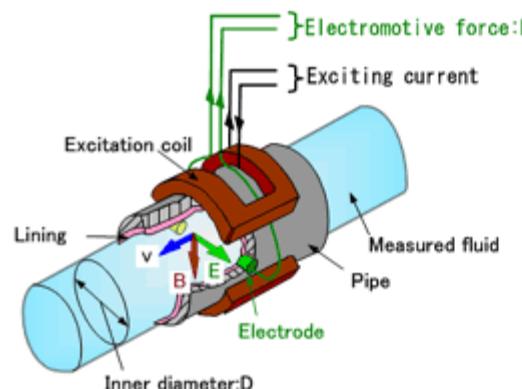
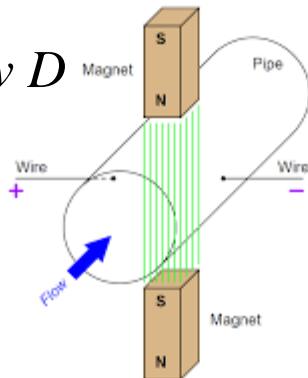


(A) Vortex flowmeter

(B) Swirl flowmeter

Caudalímetro Electromagnético

$$E = k B l v = k B v D$$



Ventajas

- ★ Como no presenta obstrucciones, no genera pérdida de carga \Rightarrow aplicable en procesos que fluyen por gravedad o en fluidos cercanos a su punto de vaporización.
- ★ El parámetro sensado es la velocidad promedio a través de toda la sección transversal de la tubería, se aplica a flujo laminar como turbulento y no depende de la viscosidad ni la densidad.
- ★ Mientras no sea conductora, la sección de tubería con que se hace el medidor puede ser de cualquier material, lo que permite darle buena resistencia a la corrosión.
- ★ Apto para medición de barros, suspensiones, efluentes, líquidos corrosivos y muy sucios.
- ★ Permite la medición de caudales bi-direccionales.
- ★ No tiene partes móviles, por lo que es confiable y de bajo mantenimiento.
- ★ Su incertidumbre es relativamente baja y su salida lineal con el caudal.

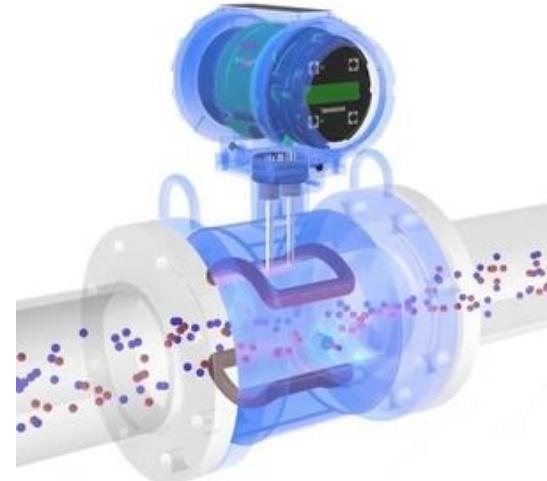
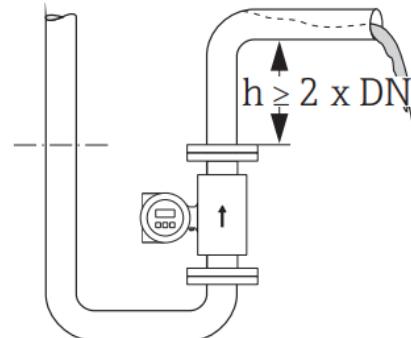
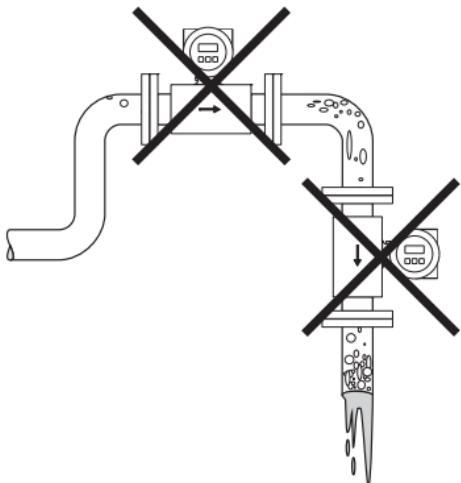
Desventajas

- ★ Si el fluido a medir produce depósitos sobre los electrodos, la medición será errónea.
- ★ Su costo es relativamente alto.
- ★ Hasta hace poco tenía alto consumo de energía y necesidad de compensar su cero, pero la nueva tecnología de transductores de corriente continua pulsada se solucionó.
- ★ No es utilizable en gases por la baja conductividad de éstos.

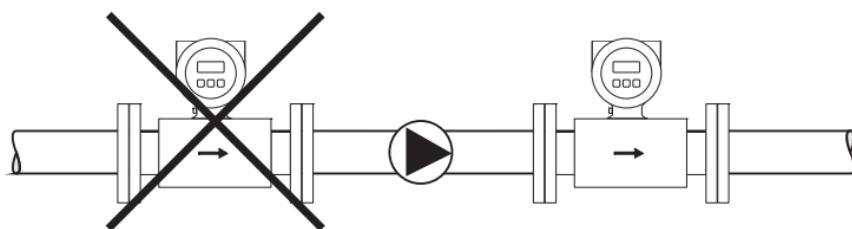
Caudalímetro Electromagnético

- * La acumulación de aire o formación de burbujas de aire en el tubo de medición pueden aumentar el error en la medición. Por esta razón evite:

- ➔ En el punto más alto de la tubería. Riesgo de acumulación de aire.
- ➔ Justo por encima de una boca de salida abierta de una tubería descendente.



- * No instale el sensor en el lado de aspiración de una bomba. Esta precaución evita la aparición de presiones bajas y el consiguiente riesgo de dañar el revestimiento del tubo de medición.

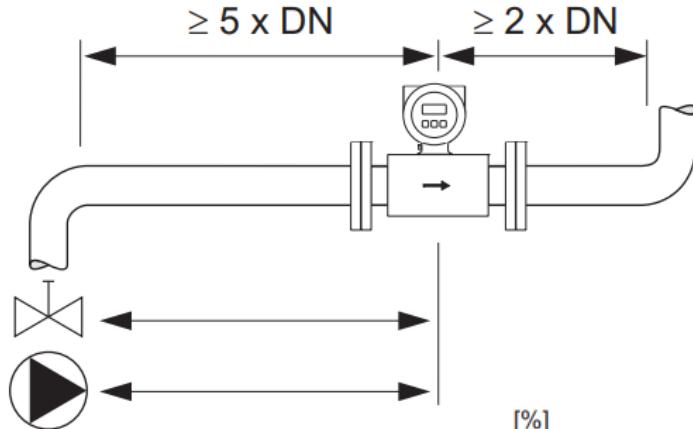


Caudalímetro Electromagnético



★ Tramos rectos de entrada y salida

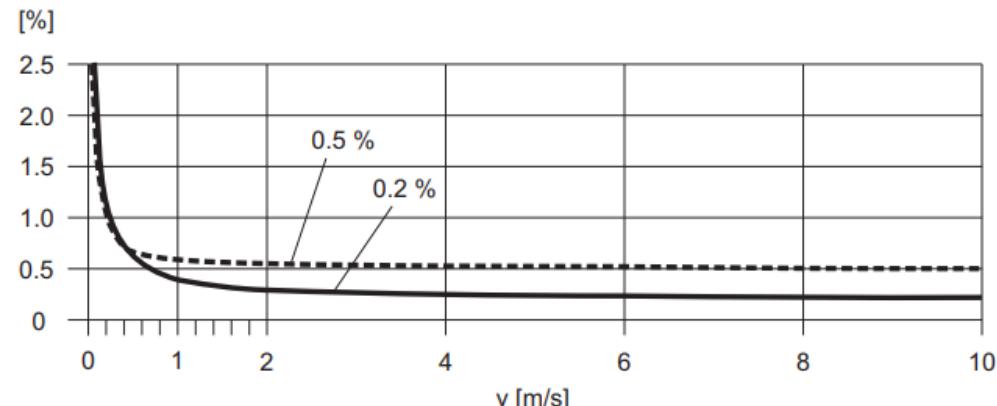
- ➡ Siempre que sea posible, instale el sensor aguas arriba de piezas de conexión como válvulas, uniones en T, tubos acodados, etc.



Deben observarse los siguientes tramos rectos de entrada y salida para que se cumplan las especificaciones relativas a la precisión:

- Tramo recto de entrada: $\geq 5 \times DN$
- Tramo recto de salida: $\geq 2 \times DN$

★ Error de medición típico:



Caudalímetro Ultrasónico

[Mostrar video 3D-Animation of the Ultrasonic Flow Measuring Principle.wmv](#)

Por transmisión

$$\frac{1}{T_A} = \frac{Y + V \cos \alpha}{X} \quad \frac{1}{T_B} = \frac{Y - V \cos \alpha}{X}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{\pi D^3}{4 \sin 2\alpha} \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right)$$

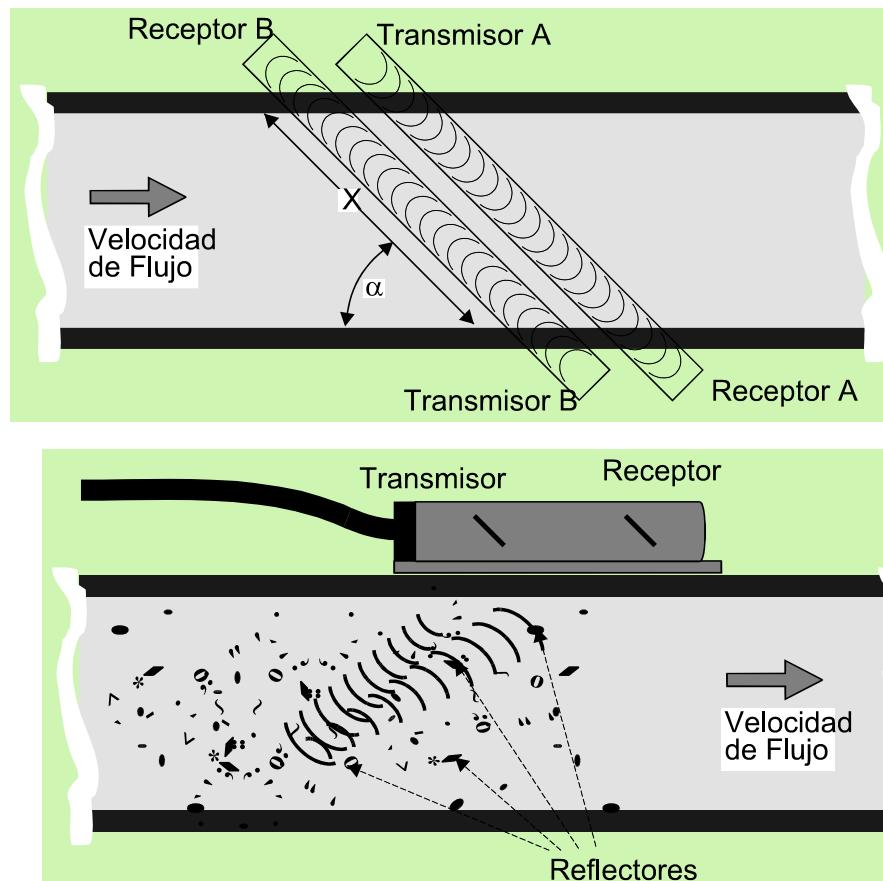
Por reflexión

Ventajas

- ★ No ocasiona pérdida de carga
- ★ Gran portabilidad: instalación muy simple y económica.
- ★ No tiene partes móviles
- ★ No influye el diámetro de la tubería, ni en su costo, ni en su rendimiento.
- ★ En modo no-contactante \Rightarrow ideal en materiales tóxicos o peligrosos
- ★ Su salida es lineal con el caudal.
- ★ Su rango de medición es muy amplio.
- ★ En tuberías de gran diámetro es el más económico, y en ciertos casos, el único!!

Desventajas

- ★ Su incertidumbre no es muy baja, estando normalmente en el orden del $\pm 0.5\%$ al $\pm 2\%$
- ★ Su costo es relativamente alto para tuberías de bajo diámetro



Caudalímetro Ultrasónico Doppler comercial

FD610 Series
\$720
 Basic Model


- ✓ Non-Invasive Clamp-On Transducer
- ✓ Microprocessor-Based Signal Conditioning Electronics
- ✓ Large Character Display
- ✓ User Selected Velocity Units (FPS or MPS)
- ✓ Measures Fluid Velocities from 0.3 to 30.0 FPS (0.10 to 9.00 MPS)
- ✓ 100:1 Turndown Ratio
- ✓ Pipe Sizes from 6.3 mm (0.25")
- ✓ CE Approval Optional
- ✓ Batteries Included

The FD610 Series flowmeter features advanced Trans-Phase measuring technology, providing accurate and reliable flow velocity assessments in closed piping systems. The FD610 Series utilizes a non-invasive clamp-on transducer which is placed on the outside of a pipe. Within seconds, the large 18 mm (0.7") LCD provides stable flowrate readings in feet per second or meters per second. This product operates on metal or plastic pipes containing liquids with more than 25 ppm of 100 micron or larger suspended solids or entrained gases.

PRINCIPLE OF OPERATION

The FD610 Series flowmeter utilizes an advanced Trans-Phase measuring technique, providing accurate, non-invasive fluid velocity assessment without opening the pipe. The FD610 Series utilizes two piezoelectric crystals contained within one transducer to transmit ultrasonic energy into the fluid stream and receive back energy reflected off discontinuities (suspended particles or entrained gases) within the moving liquid.



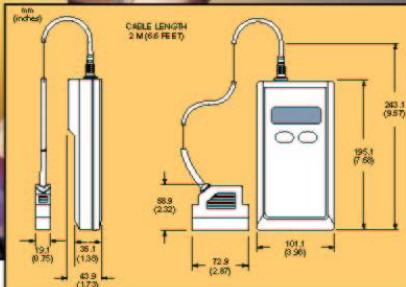
Transformations that result from the energy reflections are processed and converted to a measurement of fluid velocity by the sophisticated software algorithm. The processor also controls all operations of the instrument from its ultra-efficient battery management circuitry to a proprietary FIR (Finite Impulse Response) filtration program.

SPECIFICATIONS

Supply Voltage: Battery powered, non-rechargeable alkaline, four AA cells, providing over 30 hours of continuous operation, included

Flow Range: 0.30 to 30.0 FPS (0.10 to 9.00 MPS)

Display: Single line – four-digit LCD readout of velocity (18 mm [0.7"] digits).



signal strength, measuring units, and low battery indication

Temperature:

-20 to 60°C (-28 to 140°F)

Enclosure Rating/Dimensions:

NEMA-12X ABS plastic;
200 H x 100 W x 38 mm H
(7.76 x 4 x 1.5")

Weight: 0.7 kg (1.5 lb)
Accuracy: ±2% full scale
Transducer

Transducer Material: Plated body; ULTEM 1000 sensor material

Cable: 2 m (6.6') cable and connector

Temperature: -40 to 82°C (-40 to 180°F)

Humidity: 0 to 95% non-condensing

Mounting Method: Clamp-on style

with DOW 111 coupling compound

IN STOCK FOR FAST DELIVERY!

To Order (Specify Model Number)

Model No.	Price	Range
FD613	\$720	Handheld Readout, Carrying Case, Silicone Couplant, and 4 AA Batteries; Sensor sold separately
FD614-CE	1405	FD613 kit with CE approval with sensor for pipes 1" dia. and larger
Required Accessory Sensor for FD613 only		
FD613-S1	450	Clamp-on sensor for 1/4" to 1" diameter pipe
FD613-S2	375	Clamp-on sensor for pipes 1" dia. and larger

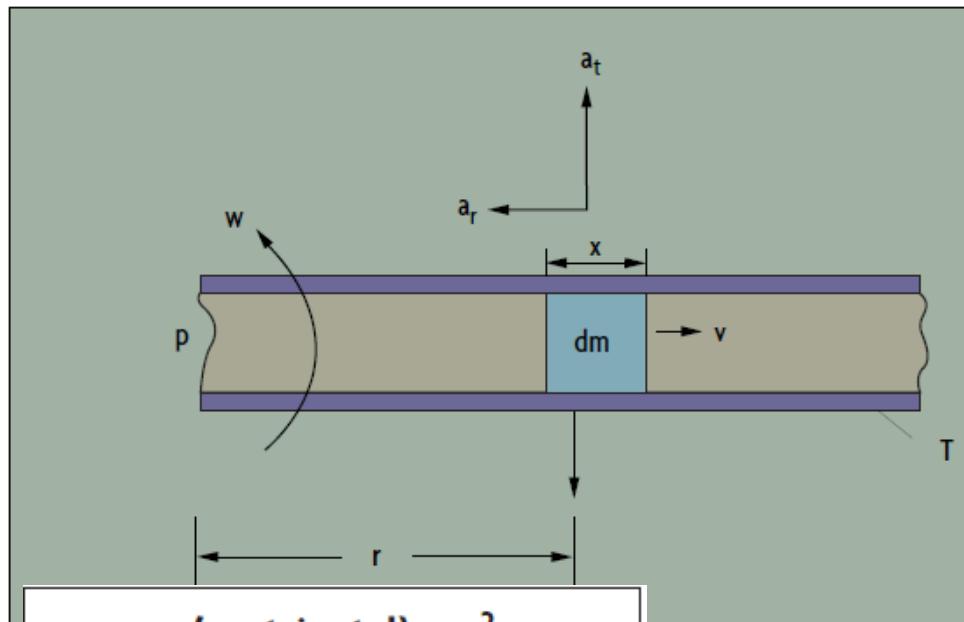
Ordering Example: FD613 flowmeter and FD613-S1, clamp-on sensor for 1/4" to 1" pipe, \$720 + 450 = \$1170.

Caudalímetros Máticos

Método por Coriolis

[Mostrar video 3D-Animation of the Coriolis Flow Measuring Principle.wmv](#)

Principio de Operación



$$a_r \text{ (centripetal)} = \omega^2 r$$

$$a_t \text{ (Coriolis)} = 2\omega v$$

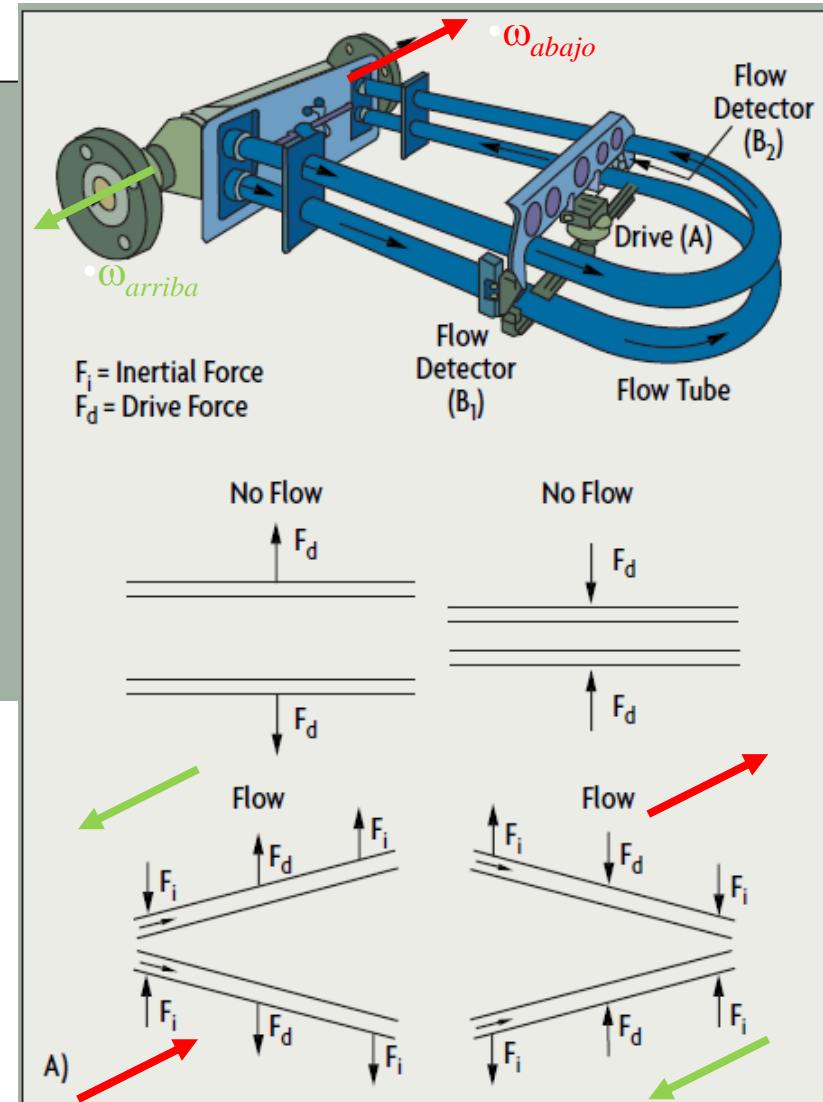
$$F_c = a_t(dm) = 2\omega v(dm)$$

$$F_c = 2\omega v D A x$$

$$\text{Mass Flow} = F_c / (2\omega x)$$

$$\vec{F}_C \propto \vec{v} \wedge \vec{\omega}$$

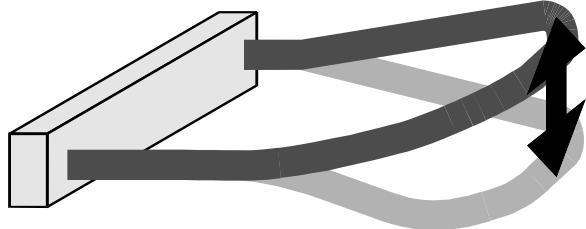
$$Q \propto F_C$$



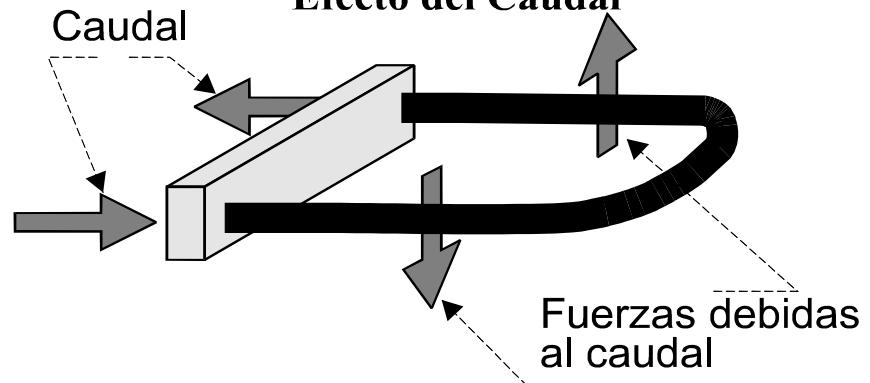
Caudalímetros Másicos

Método por Coriolis

Vibración del Tubo-U



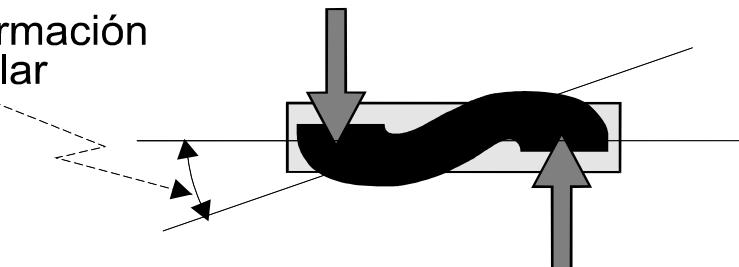
Efecto del Caudal



* Oscilación mecánica

- ➡ Amplitud
 - ★ 0.2 a 0.3 mm
- ➡ 80 á 100 hz

Deformación angular



Vista de frente mostrando la deformación

* Desventajas

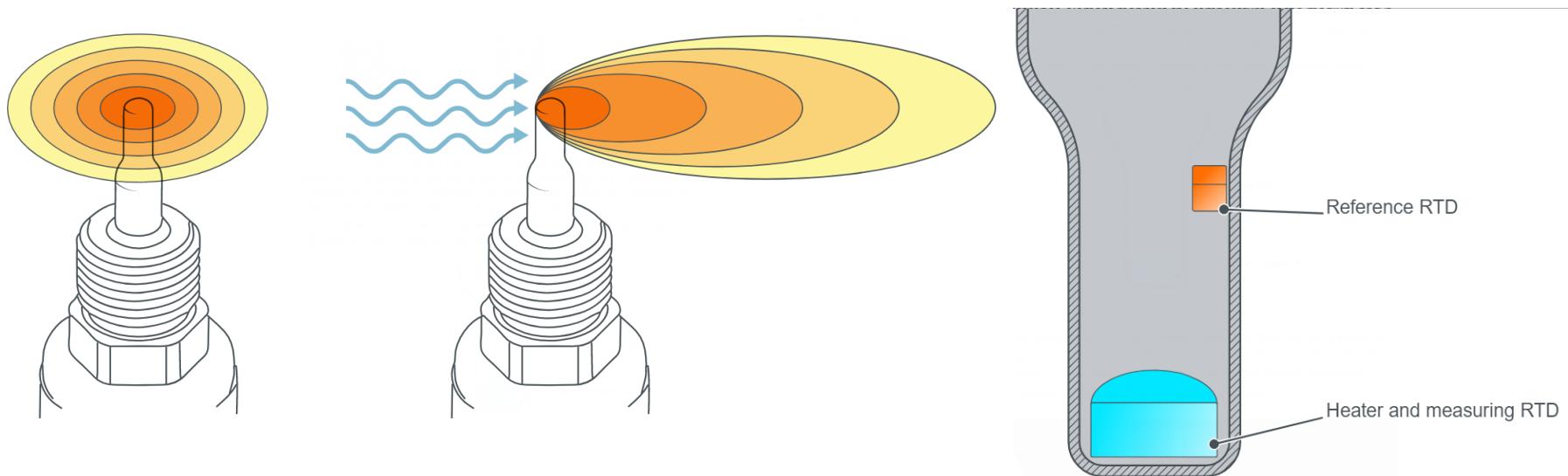
- ➡ No es fácil utilizarlo en gases
- ➡ No apto para caudales elevados
- ➡ Por lo general resulta voluminoso

* Ventajas

- ➡ Su salida es lineal con el flujo másico.
- ➡ No requiere compensación por variaciones de temperatura y presión.
- ➡ Es específicamente adecuado para casos de viscosidad variable.
- ➡ Permite medición de caudales másicos de líquidos muy difíciles de medir: adhesivos, nitrógeno líquido, fluidos negros, etc.

Caudalímetros Másicos

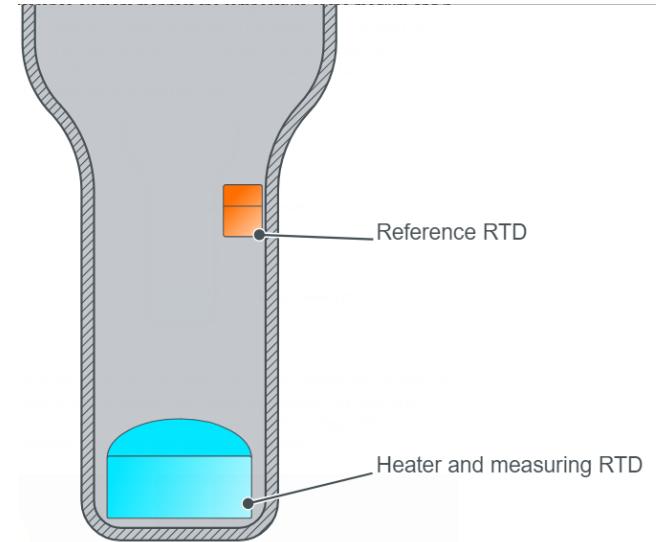
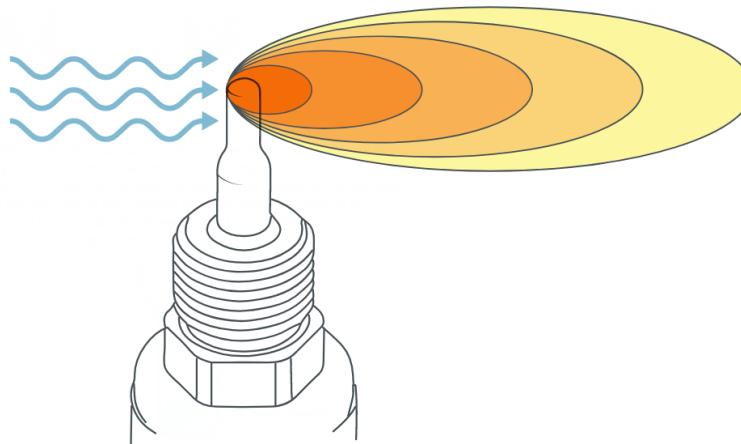
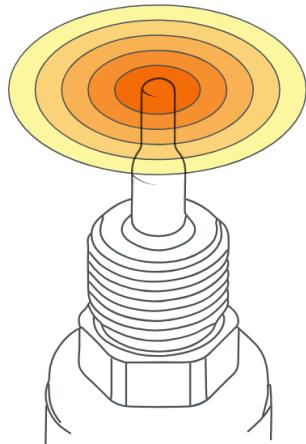
Métodos Térmicos



- ★ Se basa en el efecto de enfriamiento de los líquidos que fluyen, incluidos los gases. Una velocidad de flujo más alta da como resultado un mayor efecto de enfriamiento y esto se puede medir de manera confiable.
- ★ Hay dos elementos RTD de platino y un calentador en la punta del sensor. El elemento de referencia controla la temperatura del medio y se encuentra a 10-15 mm del fondo de la punta. La diferencia de temperatura entre los dos RTD se mantiene constante (4° C) variando la cantidad de energía aplicada al calentador. La potencia requerida para mantener la diferencia de temperatura es directamente proporcional al caudal.

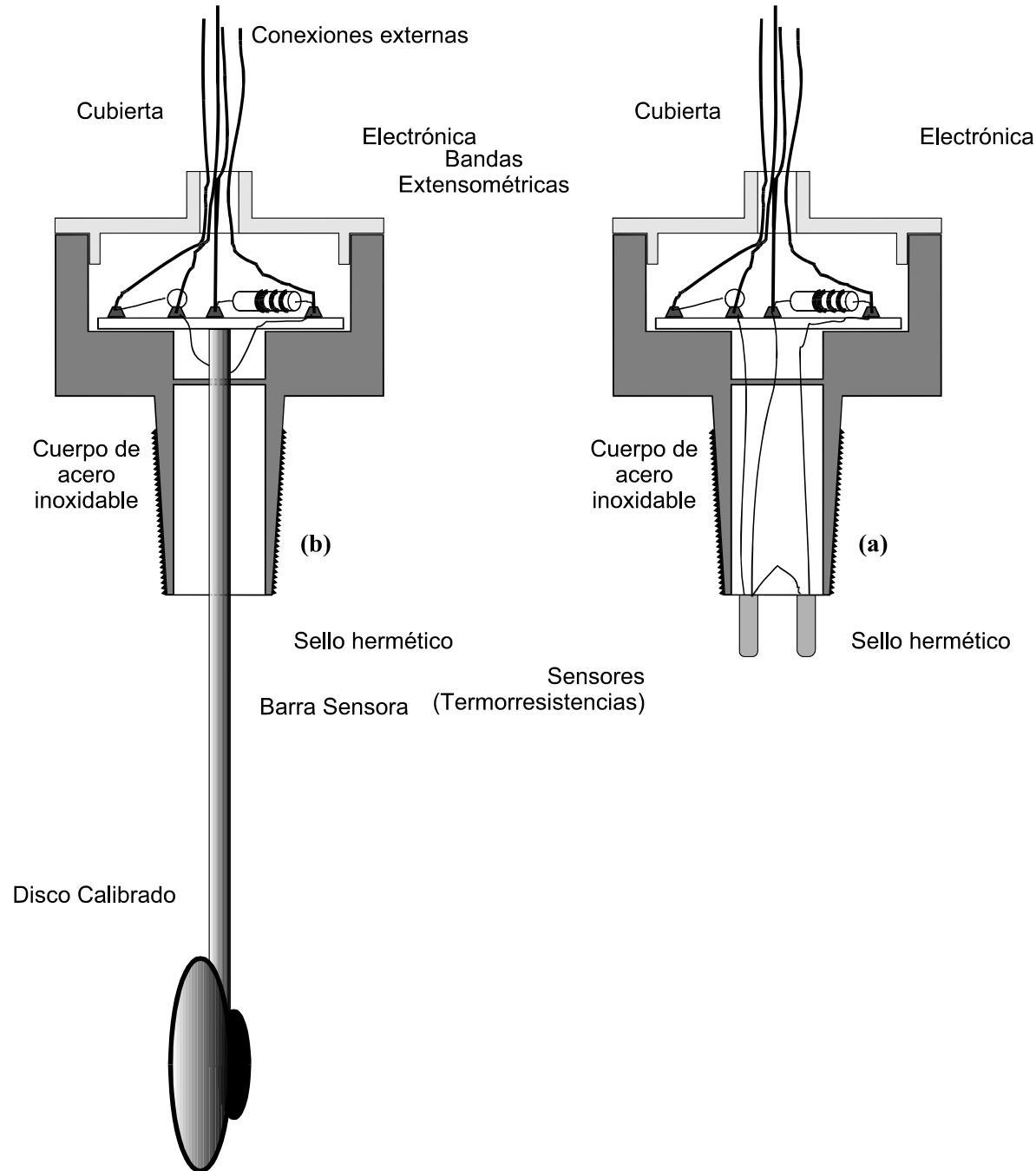
Caudalímetros Másicos

Métodos Térmicos



- ✿ Es una tecnología económica
- ✿ Funciona muy bien para gases
- ✿ No apta cuando el medio tiene cambios rápidos de temperatura
- ✿ No es muy precisa

Flujostatos (Flow switches)



Criterios para la Selección

★ Parámetros, condiciones y factores a considerar

- ➡ Rango de caudales a cubrir
- ➡ Precisión requerida
 - ⇒ debe especificarse para todo el rango de caudales a medir
- ➡ Repetibilidad requerida
- ➡ Tipo de salida eléctrica requerida
- ➡ Ambiente en que se realizará la medición
- ➡ Tipo de piping donde debe instalarse
- ➡ Pérdida de carga aceptable
- ➡ Presupuesto
 - ★ Debe considerarse no sólo el costo de adquisición del instrumento sino el costo del sistema, a lo largo del tiempo de vida útil de la planta:
 - ⇒ costo del instrumento en sí
 - ⇒ costo de la energía necesaria para operarlo
 - ⇒ costo de la instalación (piping, adaptación de sistemas de control y paneles, etc.)
 - ⇒ costo de mantenimiento
 - ⇒ costo de la instrumentación asociada (p.ej., medidor de presión diferencial para un orificio)
 - ⇒ costo de mano de obra calificada necesaria, etc.
- ➡ Tipo de fluido a medir
- ➡ Linealidad
- ➡ Velocidad de respuesta

Instalación, Calibración y Mantenimiento

★ Instalación

- ★ Tramos de tubería recta aguas arriba y aguas abajo
- ★ Sentido de la instalación para instrumentos no-reversibles
- ★ Normas de seguridad

★ Calibración

- ★ Adecuación del instrumento al fluido y condiciones a medir
- ★ Para casos en que es necesaria la recalibración frecuente, el taller de instrumental en planta debe disponer de medios adecuados para su tarea. Básicamente recipientes tarados y cronómetro.
- ★ En gases, la única alternativa disponible es por comparación con instrumento patrón

★ Mantenimiento

- ★ Los instrumentos resultantes de un pobre proceso de selección, inevitablemente fallarán en fecha temprana.
- ★ Caudalímetros sin partes móviles, requerirán menos atención que aquellos con partes móviles.
- ★ Cuanto más complicado sea el piping, mayores serán los requerimientos de mantenimiento, del instrumento en sí, y del sistema de medición en general.
- ★ La inspección periódica es una necesidad en los casos en que el fluido a medir sea viscoso o muy sucio. Lo mismo vale para los sensores de presión diferencial asociados.
- ★ La instalación de filtros adecuados aguas arriba de un caudalímetro, extenderá su vida útil, minimizará el taponamiento y el desgaste, si los filtros son mantenidos adecuadamente.
- ★ Los fluidos capaces de producir depósitos interferirán con la correcta operación de instrumentos que no obstruyen el paso como el caudalímetro magnético o el ultrasónico. En algunos casos, directamente sacarán a la unidad de servicio, como p.ej. en un caudalímetro magnético en el que sus electrodos quedan aislados del fluido como consecuencia de los depósitos. Solución: limpieza periódica y mantenimiento preventivo.