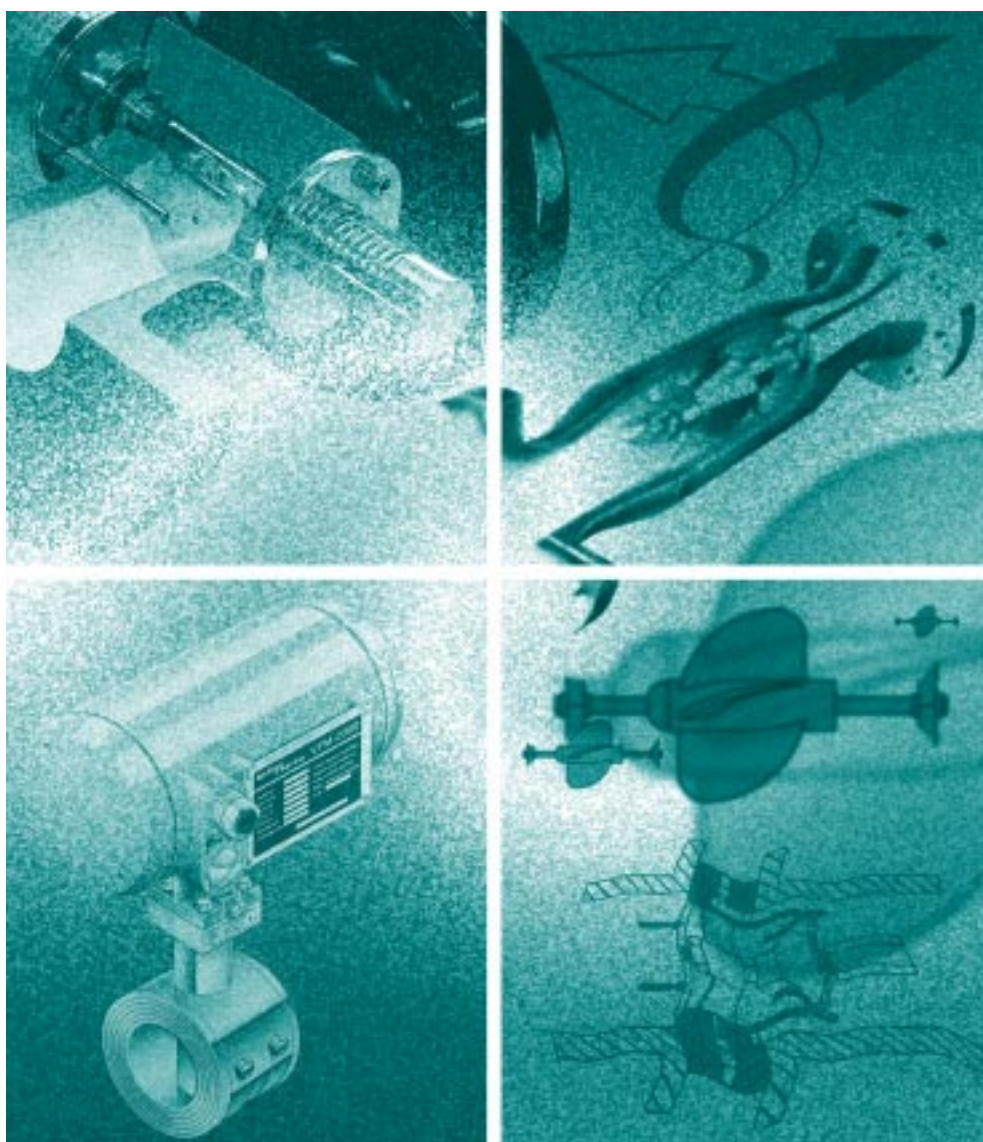


# MEDIDA DE CAUDAL DE VAPOR



# Contenido

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>¿Qué es el vapor ?</b>	<b>4</b>
<b>Conceptos básicos y datos</b>	<b>5</b>
¿Por qué medir el vapor ?	5
Eficiencia de la planta	5
Eficiencia de energía	5
Control de procesos	5
Coste	5
Calidad de vapor y volumen específico	5
Datos	6
<b>Flujo de fluidos en tuberías</b>	<b>7</b>
<b>Vapor como fluido</b>	<b>10</b>
Resumen	12
<b>Principios de medición de caudal</b>	<b>13</b>
Repetibilidad	14
Precisión	14
Rango	15
<b>Tipos de medidores de caudal de vapor</b>	<b>17</b>
Medidores de placa orificio	17
Medidores rotativos shunt	19
Medidores de area variable	20
Medidores de area variable con resorte	21
Tubos Pitot	24
Medidores de turbina	26
Medidores Vortex	28
<b>Instrumentación</b>	<b>30</b>
Transmisores DP Multivariable	32
Recopilación de datos	32
Análisis de datos	33
<b>Requerimientos especiales para mediciones precisas de caudal de vapor</b>	<b>36</b>
Compensación de densidad	36
Medidores de caudal de velocidad	36
Medidores de caudal de presión diferencial	38
Fracción seca	41
Conclusión	42
Vapor recalentado	42
<b>Otros métodos de medir el consumo de vapor</b>	<b>44</b>
Medición del condensado en una planta pequeña	44
Medición de condensado bombeado	45

<b>Instalación del medidor de caudal en sistemas de vapor</b>	<b>46</b>
Calidad del vapor	46
Recomendaciones para la instalación	48
<b>Consideraciones en el diseño del sistema</b>	<b>51</b>
Determinar la disposición de los medidores de caudal	52
<b>Selección del medidor de caudal de vapor</b>	<b>54</b>
Características	54
Mantenimiento	54
Coste	54
Otros	54
<b>Conclusión</b>	<b>57</b>
<b>Tablas de vapor</b>	<b>58</b>

# Introduction

El señor Kelvin dijo una vez,

*“Cuando usted está hablando de algo que se puede medir y expresar con números, entonces sabe algo sobre ello; pero cuando no puede medirlo, cuando no puede expresarlo con números, su conocimiento es escaso y poco satisfactorio.”*

Muchos negocios industriales y comerciales han reconocido el valor de contabilidad del coste de la energía, conservación de energía, ahora y técnicas de monitorización para lograr una mayor eficacia de energía y que sea más aprovechable.

El vapor, ‘la herramienta más maravillosa, flexible, adaptable de la industria’ no es medio más fácil de medir. El objeto de esta guía de referencia técnica es lograr una mayor comprensión de los requisitos para permitir la medida de caudal de vapor con precisión, con repetibilidad, y de manera fiable.

La mayoría de los medidores de caudal actualmente disponibles se han diseñado para medir el caudal de varios líquidos y gases. Muy pocos se ha desarrollado específicamente por medir el caudal de vapor.

Esta guía intentará proporcionar las razones de la necesidad de medir el vapor. Considerará sus principios fundamentales y los principios de funcionamiento de los diversos tipos de medidor de caudal de vapor. También proporcionará una guía de la importancia de una instalación correcta del medidor de caudal en los sistemas de vapor.

*Spirax Sarco desea agradecer al EEBPP (Programa de Buena Práctica en la Eficacia de Energía) de ETSU por contribuir a algunas partes de esta guía técnica.*

## ¿Qué es el vapor?

Cuando el agua se calienta, su temperatura subirá. Al calor añadido se le llama 'calor sensible' y al contenido de calor del agua se le llama su 'entalpía'. El punto de referencia normal para calcular la entalpía es 0°C.

Cuando el agua alcanza su punto de ebullición, cualquier nueva adición de energía provoca que parte del agua hierva y se convierta en estado gaseoso, es decir en vapor. A este calor se le llama 'entalpía de evaporación'. Al cambiar de estado no hay cambio de temperatura, el vapor estará en equilibrio con el agua y se dirá que hay 'condiciones de saturación'. Las condiciones de saturación pueden ocurrir a cualquier presión, aunque a cada presión sólo hay una temperatura en la que puede ocurrir la saturación.

Si se le añade más calor al vapor saturado, la temperatura subirá y el vapor se convertirá en 'recalentado'. A esto le sigue otro aumento en entalpía.

En las tablas de vapor se han documentado bien y se han clasificado las relaciones entre la presión de vapor, temperatura saturada, temperatura recalentada y las entalpías y densidades de agua y vapor.

Uno de los muchos beneficios del vapor es que su energía calorífica disponible es inmensa comparada con una masa similar de agua o, de hecho, la mayoría de las otras sustancias que se utilizan para el traslado de energía y le hace que sea un medio ideal para este propósito.

# Conceptos básicos y datos

## ¿Por qué medir el vapor ?

No se pueden evaluar los medidores de caudal de vapor de la misma manera que otros equipos o programas de ahorro energía. El medidor de caudal de vapor es muy importante para una buena administración del vapor - proporciona el conocimiento de la cantidad de vapor usado y el coste que es vital para que una planta o edificio trabajen eficazmente. Los principales beneficios de la medición de vapor son:

### Eficiencia de la planta

Un medidor de caudal de vapor indicará la eficacia del proceso cuando la maquinaria se para, cuando la planta se carga a su capacidad o cuando se está trabajando satisfactoriamente. Con el tiempo nos mostrará el deterioro de planta y permitirá que se calcule la limpieza o reposición óptima en la planta. También puede establecer los momentos de mayor uso de uso de vapor, identifica las secciones o partes de planta que son los principales usuarios de vapor. Esto puede llevar a un cambio en métodos de la producción para un uso de vapor más económico y para solucionar los problemas de cargas puntuales en la planta.

### Eficiencia de energía

Los medidores de caudal pueden usarse para supervisar los resultados de los planes de ahorro de energía y comparar la eficacia de una parte de planta con otra.

### Control de procesos

Los medidores de caudal de vapor pueden indicar si es correcta la cantidad de vapor que se está proporcionando a un proceso y si tiene la temperatura y presión correcta. También, al controlar el aumento de caudal en la puesta en marcha, pueden utilizarse como dispositivos lentos de calentamiento.

### Coste

Los medidores de caudal de vapor pueden medir el vapor utilizado y por tanto calcular centralmente el coste del vapor o en los principales centros usuarios de vapor. Se puede calcular el coste del vapor como una materia prima en las diferentes fases del proceso de producción permitiendo calcular el verdadero coste de las líneas individuales de producción.

### Calidad de vapor y volumen específico

En la práctica, el vapor saturado arrastra a menudo gotas diminutas de agua y no puede describirse como vapor seco. No obstante, es importante que el vapor que se use para el proceso o para calentar esté lo más seco posible. La calidad de vapor se expresa por su porcentaje de vapor seco - la proporción de vapor completamente seco presente en el de vapor. Normalmente se expresa como un valor decimal menor a 1, es decir 0,95 representa 95% de vapor seco. Las gotas pequeñas de agua en el vapor húmedo tienen masa pero ocupan un espacio inapreciable. Al volumen de 1 kg de vapor a una presión dada se le llama su volumen específico y el volumen ocupado por una unidad de masa de vapor disminuye según aumenta su presión.

**Datos** **Masa (M)** de una sustancia es una medida de la cantidad de materia que comprende la sustancia. (kg).

**Densidad ( $\rho$ )** de una sustancia es la masa (M) por la unidad de volumen (V) de la sustancia.

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

**Volumen específico (v)** es el volumen por la unidad de masa

$$v = \frac{V}{M} \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

Por tanto es la inversa de la densidad, por consiguiente:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{v}$$

**Presión** Presión es la fuerza ejercida por unidad de área. La presión atmosférica es la cantidad de presión ejercida por la atmósfera por encima de cero de presión absoluta. La presión atmosférica cambia según la elevación sobre el nivel del mar (la presión atmosférica disminuye según aumenta la altitud). La mayoría de los manómetros indican una presión relativa a la presión atmosférica, es decir, la presión atmosférica = 0 bar relativo (normalmente expresado como 0 bar r) al nivel del mar.

Para obtener presión absoluta, se debe añadir la presión atmosférica a la presión registrada. Al nivel del mar, la media de presión atmosférica absoluta = 1,013 bar. Presión absoluta a:

$$0 \text{ bar r} = 0 \text{ bar r} + 1,013 = 1,013 \text{ bar abs.}$$

$$2 \text{ bar r} = 2 \text{ bar r} + 1,013 = 3,013 \text{ bar abs etc.}$$

**Viscosidad** (dinámica) ( $\mu$ ) es la fricción molecular dentro de un fluido o la resistencia temporal al flujo de un fluido.

A la viscosidad se le llama a menudo viscosidad absoluta para distinguirla de viscosidad cinemática. Aunque la unidad de SI para viscosidad es el Pascal segundo (Pa s), en la práctica la viscosidad se expresa en centipoise (cP) ( $1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa s}$ ).

**Nota:** La viscosidad cinemática es la viscosidad absoluta dividida por la densidad del fluido y se expresa en (cSt).

La melaza es un líquido viscoso; su viscosidad es mucho mayor que la del agua. El petróleo es menos viscoso que el agua. En general, la viscosidad de la mayoría de los líquidos disminuye con el aumento de temperatura. Lo contrario ocurre con los gases. Es, quizás, más fácil pensar en la viscosidad como una medida del 'espesor' de un fluido - cuanto mayor la viscosidad, más espeso es el fluido. Por ejemplo, el aire tiene una viscosidad de aprox. 0,02 cP.

$$\mu \text{ agua} = 1 \text{ cP aprox.}$$

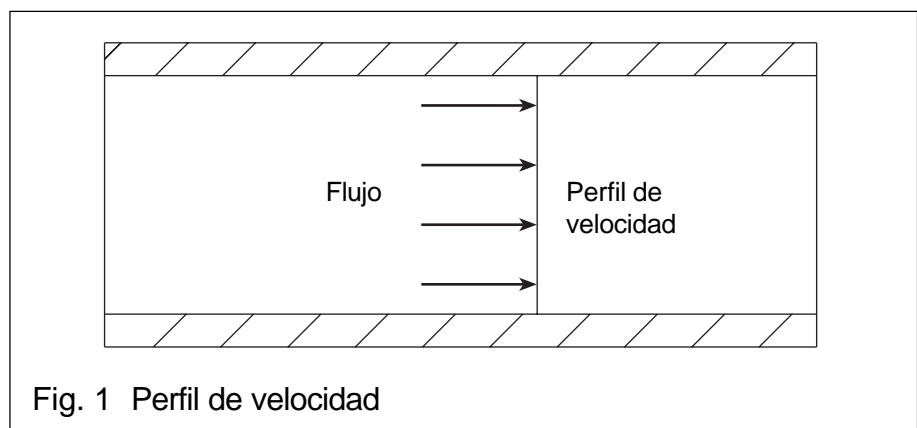
$$\mu \text{ aceite motor} = 1 \text{ 000 cP aprox.}$$

# Fluido en las tuberías

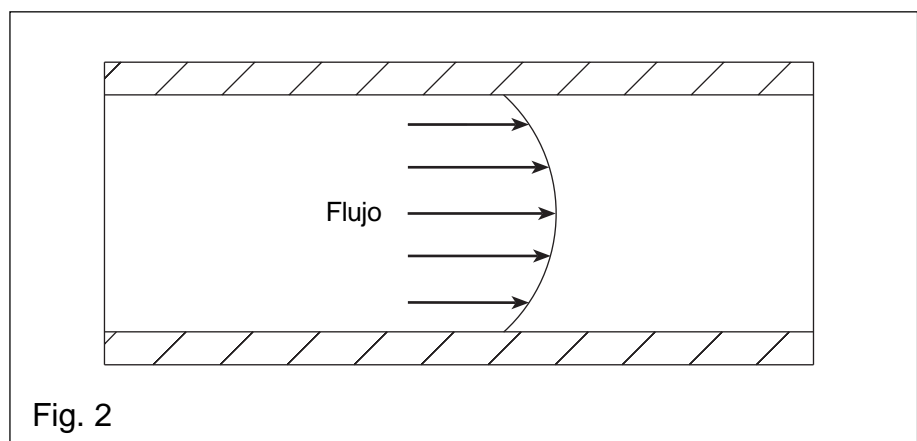
Los factores que afectan el flujo de un fluido en una tubería incluyen:

- Velocidad del fluido (velocidad media).
- Viscosidad del fluido.
- Densidad del fluido.
- Rozamiento del fluido con las tuberías.

En condiciones ideales, en que se pueden despreciar la viscosidad y el rozamiento, el perfil del flujo en la tubería es uniforme, es decir, en todos los puntos de una sección transversal de tubería la velocidad es la misma. El perfil de velocidad aparecería así:



En condiciones reales, sin embargo, la viscosidad afecta al caudal, el flujo de vapor cerca de la superficie de la tubería es menor que en el centro de la misma y el perfil se convierte en convexo. Se puede representar así:



La ecuación de Reynolds ( $Re$ ) tiene en cuenta todos los factores que afectan el flujo y genera un factor que expresa la relación entre las fuerzas dinámicas y las de viscosidad.



La ecuación de Reynolds,

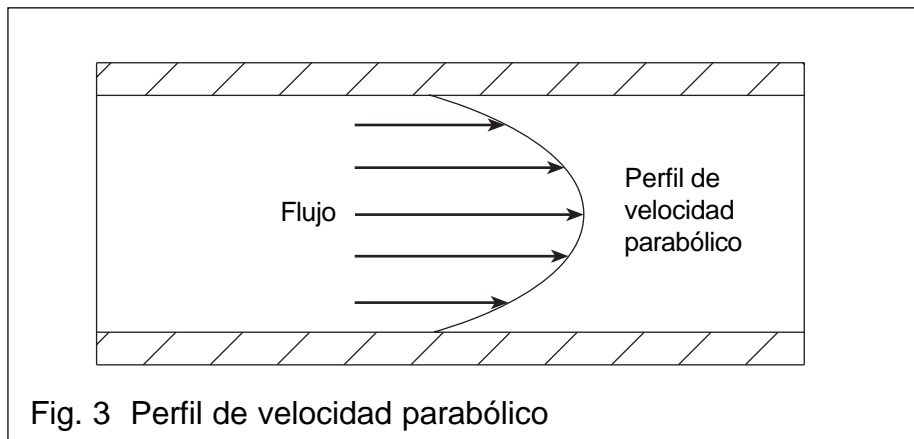
$$R_e = \frac{\rho V_d D}{\mu}$$

Donde  $\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)  
 $V_d$  = Velocidad media del fluido (m/s)  
 $D$  = Diámetro interior de la tubería (m)  
 $\mu$  = Viscosidad dinámica (kg/ms)

Debe tomarse en cuenta que el número Reynolds ( $R_e$ ) es sencillamente un número. En terminos sencillos:

$$(R_e) = \frac{\text{Fuerza dinámica}}{\text{Fuerza de viscosidad}}$$

Para velocidades muy bajas, la fuerza dinámica será baja y, por consiguiente, el número de Reynolds será bajo. De igual manera, un fluido de alta viscosidad producirá un número de Reynolds bajo. Las fuerzas de viscosidad reducen la velocidad en las paredes de la tubería y la velocidad mayor se encuentra en el centro de la misma. Es similar a la Figura 2 sólo que el perfil de velocidad es de forma parabólica (Figura 3). El flujo es laminar en el sentido del eje de la tubería y normalmente ocurre con números Reynolds menores a 2 000.



Para números de Reynolds mayores de 20 000, es decir altas velocidades y / o viscosidad baja, el flujo se convierte en turbulento (Figura 4). En el mundo de procesos, a menos que se lleven por tuberías fluidos muy viscosos, el flujo suele ser turbulento. Éste es el caso con el vapor con números Reynolds superiores a 20 000.

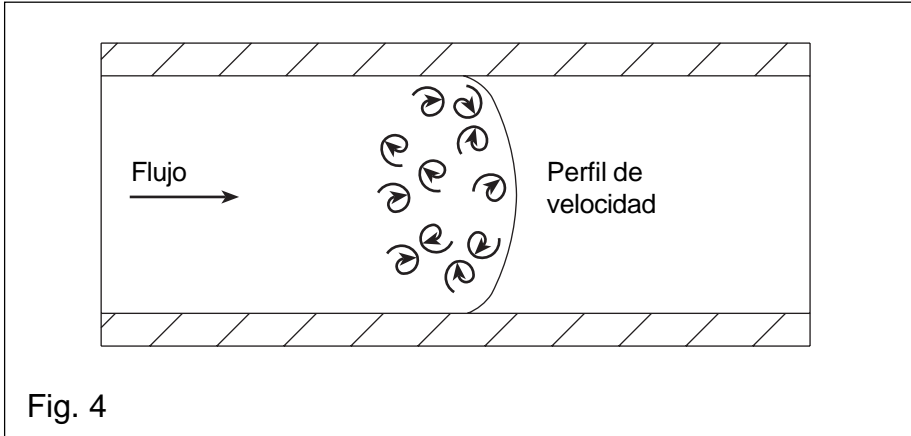


Fig. 4

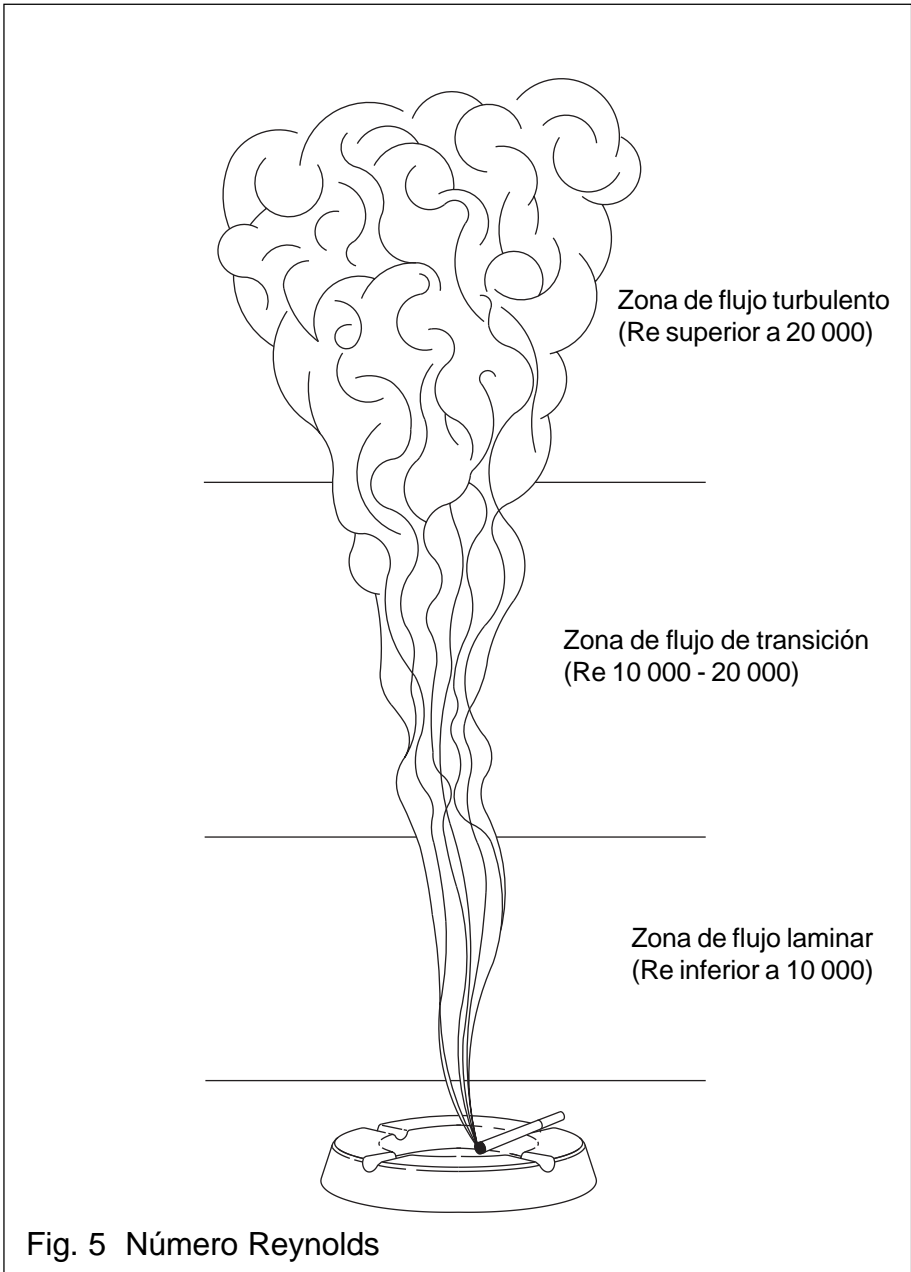
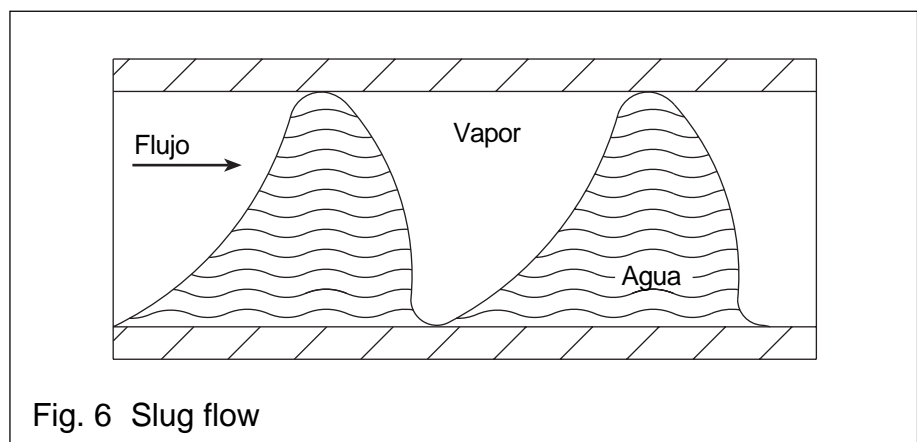


Fig. 5 Número Reynolds

# Vapor como fluido

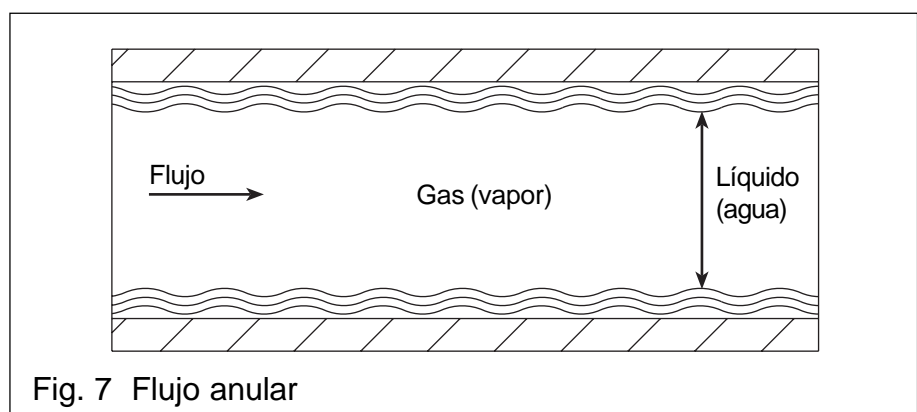
Generalmente se considera que el vapor saturado es un fluido de dos fases aunque homogéneo (tiene un origen común) ya que puede existir como gas (vapor) y líquido (agua) de forma simultánea en su estado saturado. El vapor recalentado puede tratarse como un verdadero gas porque se ha evaporado toda la humedad con las altas temperaturas.

Casi todo el vapor que se utiliza para procesos industriales y para calentar es vapor saturado. Al flujo en las tuberías con dos fases se le conoce como régimen y tenemos que considerar cuatro para la medición de vapor. El primero de éstos se le conoce como 'flujo con olas' (Figura 6).



En el flujo con olas, la característica es que se alterna el vapor y el agua. Las olas de agua viajan a la misma velocidad que el vapor y será perjudicial para cualquier tipo de medidor de vapor. Los golpes de ariete, aparte de dañar al medidor de caudal, provocarán estragos en cualquier válvula o accesorio que encuentren en su camino y puede tener consecuencias letales. Se deben evitar a toda costa y, ya que normalmente es debido a un mal diseño y / o instalación, se puede evitar fácilmente poniendo más atención en los detalles y buena práctica de ingeniería de vapor.

El segundo régimen es 'el flujo' anular (Figura 7).



El modelo de flujo consiste en una película de agua anular alrededor de la pared de la tubería con el centro de vapor. El centro de vapor se moverá a una velocidad superior a la película de agua. En una tubería horizontal, la película de agua en la parte inferior será generalmente más gruesa que la de la parte superior debido al efecto de gravedad.

El comportamiento más común del flujo de vapor húmedo es 'el anular disperso' (Figura 8).

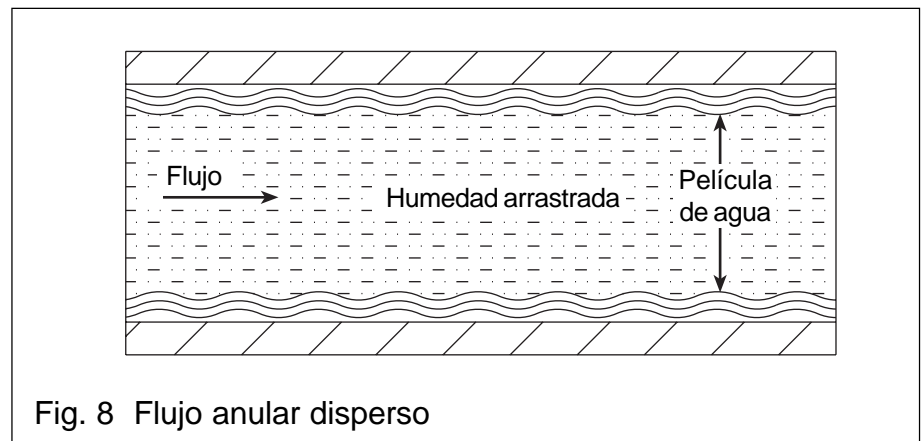


Fig. 8 Flujo anular disperso

Es similar al flujo anular sólo que también contiene humedad arrastrada en forma de una suspensión de gotas líquidas.

La ingeniería correcta de vapor y el purgado adecuado del vapor ayudarán a reducir la película anular de agua aunque la separación eficaz antes del medidor de caudal ayudará quitando muchas de las gotas de agua arrastradas para que el vapor esté lo más 'seco' posible en el punto de medición. Estos temas se estudiarán más tarde, el objetivo es lograr y mantener el flujo lo más disperso posible.

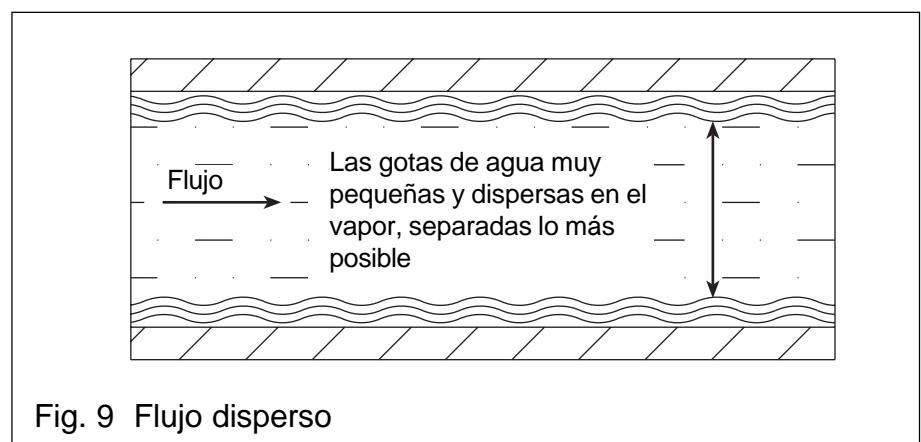


Fig. 9 Flujo disperso

## Resumen

Para resumir, hay tres categorías de vapor: -

- Vapor recalentado que se comporta similar a un gas.
- Vapor húmedo homogéneo con un porcentaje de vapor seco de 0,95 y superior.
- Mezclas de agua y vapor, con un porcentaje de vapor seco inferior a 0,95.

En la industria, generalmente se mide el vapor de categoría 2. A menudo, el vapor es de categoría 3 y puede dañar algunos tipos de medidores de vapor (y otras partes de planta o el sistema de tuberías) produciendo inexactitudes en las mediciones.

Acondicionando correctamente el vapor de categoría 3 mejorará su calidad a categoría 2. Esto debe empezar en el punto de generación siguiendo con atención los métodos correctos de funcionamiento de la caldera y el tratamiento del agua de alimentación, continuando con métodos correctos de distribución a los puntos de trabajo.

# Principios de medición de caudal

Si medimos la velocidad media ( $V_d$ ) de un fluido en una tubería y multiplicamos por el área transversal de la tubería ( $A$ ), nos dará un caudal volumétrico ( $Q_v$ ).

$$Q_v \text{ (m}^3\text{/s)} = V_d \text{ (m/s)} \times A \text{ (m}^2\text{)}$$

A este tipo de medidor se le conoce como medidor del caudal. Es importante comprender que este tipo de medidor de caudal indica sólo el caudal instantáneo. Con un uso fluctuante por tanto variaciones de caudal, la cifra  $Q_v$  cambiará segundo a segundo.

El volumen ( $v$ ) ( $\text{m}^3$ ) que pasa durante un tiempo específico, puede provenir de un medidor del caudal integrando su señal de salida durante un periodo de tiempo. Hay también medidores de caudal que indican el volumen total  $V$  ( $\text{m}^3$ ) y se les suele llamar 'medidores de masa total'. Cuando consideramos el vapor y medimos la proporción volumétrica o el volumen total, esta será de uso muy limitado por sí sola. Como normalmente se calcula el coste del vapor dependiendo de la cantidad másica (es decir el coste por 1 000 kg) un medidor de caudal másico o una lectura másica del caudal es más beneficioso para el usuario.

A menos que la presión de vapor se mantenga completamente constante en el punto de medición, la densidad de vapor variará con los cambios de presión. Por consiguiente, es necesario determinar la densidad de vapor para aplicar 'la compensación de densidad'. El medidor de caudal puede indicar caudal másico ( $Q_m$ ) o cantidad másica ( $M$ ). La cantidad másica es el total de vapor que pasa durante un periodo de tiempo específico. **Nota:** Algunos medidores de caudal también pueden mostrar valores de energía (kJ) o potencia (kW).

Para hacer esto, debe determinarse la presión y / o la temperatura del vapor. Si la presión es completamente constante, la densidad no variará. En realidad, esto no suele ocurrir por tanto es necesario medir la temperatura y / o presión y computar la densidad para que el caudal volumétrico se mida junto con la temperatura y / o presión del vapor. Entonces, se establecerá la densidad del vapor con la temperatura y / o la señal de presión, y la multiplicación de caudal volumétrico ( $Q_v$ ) por la densidad ( $\rho$ ) nos dará el caudal másico.

$$Q_m \text{ (kg/s)} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \times Q_v \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Si no se introdujera la compensación de densidad, la medida másica resultaría inevitablemente inexacta. Por ejemplo, una variación de 1°C temperatura puede producir un error de un 2% en la medida de caudal; una variación de 2% en presión puede producir un error de un 1% en el caudal. Los medidores de caudal pueden indicar 'velocidad' o 'cantidad' de caudal. Pueden expresarse en términos del volumen o masa del fluido que fluye. Para vapor se requiere la medida másica y por tanto es necesario determinar la densidad de vapor. En lugar de 'la cantidad de caudal' se usa a menudo la expresión 'caudal totalizado'.

## Repetibilidad

Describe la capacidad de indicar el mismo valor para un mismo flujo en dos o más ocasiones sucesivas. No debe confundirse con precisión, es decir su repetibilidad puede ser excelente porque muestra el mismo valor de un caudal idéntico en varias ocasiones, pero la lectura podría ser constantemente errónea (o inexacta). La buena repetibilidad es importante, sin embargo, para muchos procesos es tanto o más importante obtener valores repetitivos que muy exactos.

## Precisión

Describe la calidad del instrumento y la veracidad de las lecturas. Los fabricantes pueden expresar la precisión de sus medidores de dos maneras:-

### Valor que se mide en cada momento

Si un medidor tiene una precisión de  $\pm 3\%$  del valor medido y se está leyendo 1 000 kg/h, 'la incertidumbre de la medida' está comprendida entre 1 030 y 970 kg/h. Cuando el valor es 500 kg/h, el error sigue siendo  $\pm 3\%$ , el valor real está comprendido entre 515 y 485 kg/h.

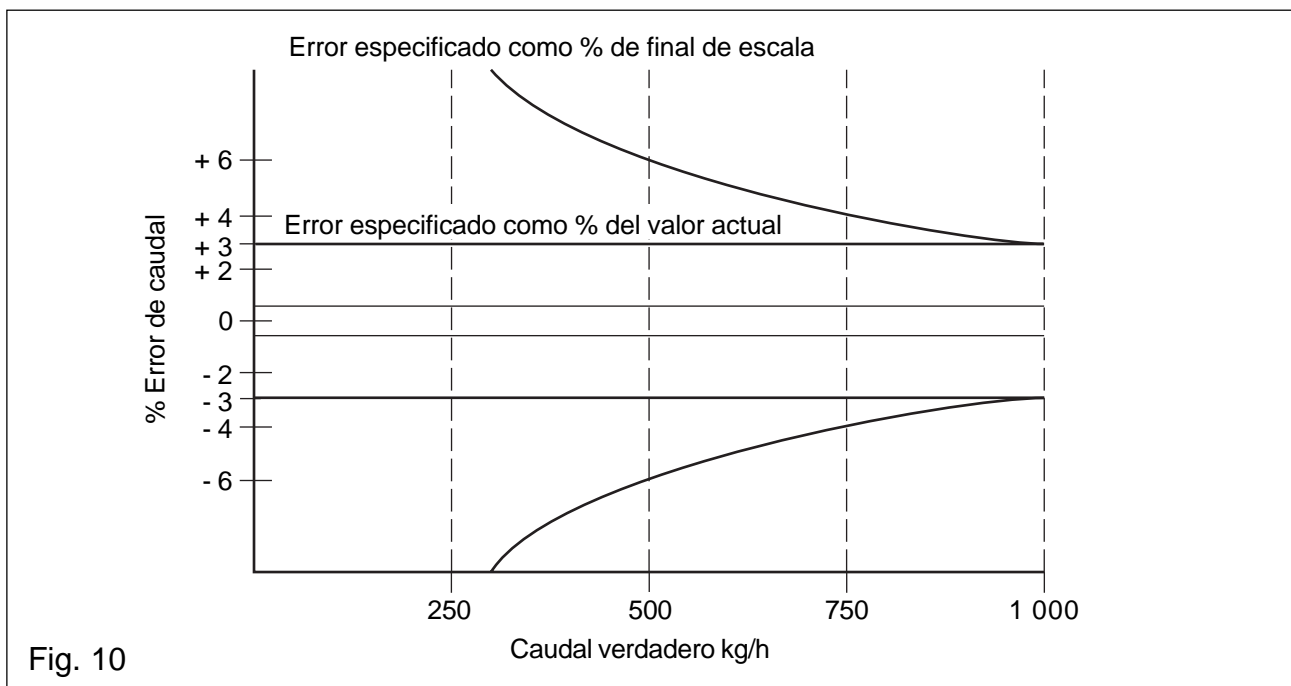


Fig. 10

### F.S.D. o valor de final de escala

Esencialmente significa que un error de medida se da como un porcentaje del caudal máximo que el medidor de caudal puede manejar. Si asumimos que 1 000 kg/h es el caudal máximo y consideramos un medidor de caudal con una precisión de  $\pm 3\%$  de **final de escala**, entonces a 500 kg/h 'la incertidumbre de la medida' está entre 530 (500 + 30) y 470 (500 - 30) kg/h. Esto es muy distinto y en términos del 'valor medido', representa una incertidumbre de la medida de  $\pm 6\%$  con el caudal mínimo. Según disminuye el caudal real, aumenta considerablemente 'la incertidumbre de la medida'.

## Rango

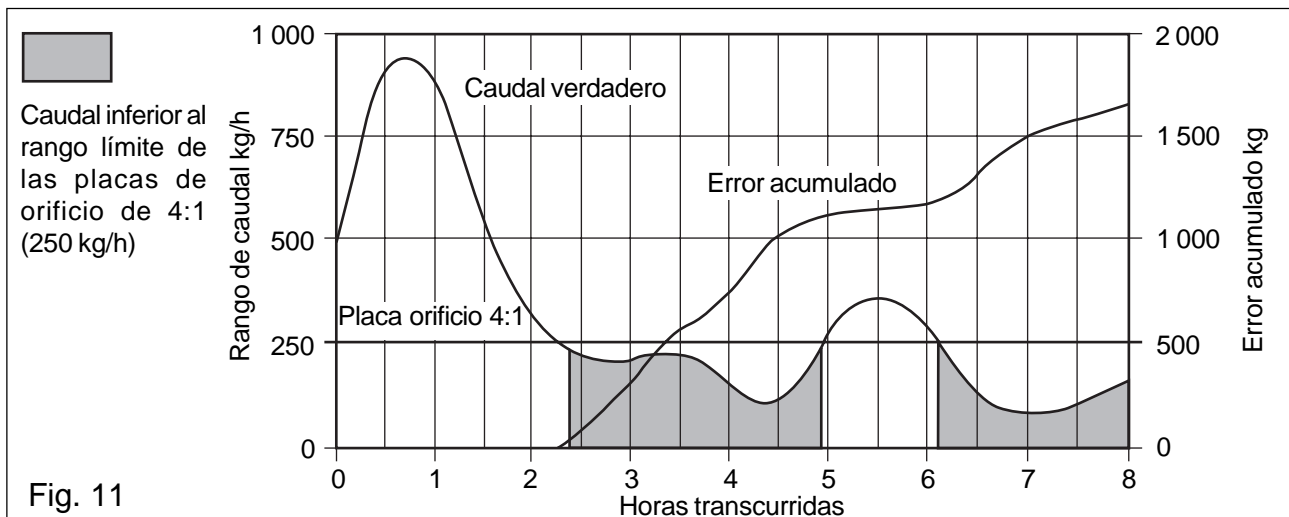
Cuando se especifica un medidor de caudal, la precisión es uno de los requerimientos básicos, pero también es esencial que el medidor de caudal se dimensione correctamente y lo más próximo posible a las necesidades del cliente. 'Rango' 'zona de reglaje' o 'alcance efectivo' son términos que describen el rango de caudales por los que el medidor de caudal trabajará dentro de las tolerancias dadas de precisión y de repetibilidad. Básicamente:

$$\text{Rango} = \frac{\text{Caudal máximo}}{\text{Caudal mínimo}}$$

## Ejemplo

En un sistema de vapor típico después de un pico en la demanda, los caudales varían con una demanda baja durante el periodo del almuerzo y hacia el final del día. Puesto que cada medidor de caudal **debe** dimensionarse con el caudal máximo que se espera que maneje, en este ejemplo está alrededor de 1 000 kg/h. El rango de una placa de orificio es generalmente de 4:1, es decir dimensionado con un caudal máximo de 1 000 kg/h puede tener la precisión exigida inferior a 1 000 kg/h dividido por 4, es decir 250 kg/h. Con caudales inferiores a este valor, el medidor de caudal no puede alcanzar su especificación, así que empiezan a intensificarse los errores de caudal. Con caudales inferiores a 250 kg/h puede que la medida se are imprecisa o puede llegar a 'perdersse'.

En este ejemplo, en el peor caso, el 'caudal perdido' es de 1 700 kg/h o aproximadamente el 30% del vapor total usado durante el día. Cuando las fluctuaciones de demanda son inferiores a la capacidad de rango de un medidor de caudal, el problema desaparece, pero con muchos procesos industriales las fluctuaciones a lo largo del día o de un lote a otro pueden ser muy grandes. Si hay que medir con precisión el consumo de vapor, hay que hacerlo correctamente y entender realmente cuál es la demanda. Esto sólo se puede hacer seleccionando un medidor de caudal con un rango lo suficientemente grande para que abarque todas las variaciones de caudal que se anticipen. La importancia de un rango alto se ve muy claramente a largo plazo: los aumentos o disminuciones en la demanda pueden manejarse con un medidor de caudal con rangos altos y se eliminaran completamente las lecturas falsas.





En la Tabla 1 vemos los rangos típicos de los medidores de caudal más comunes.

Tabla 1

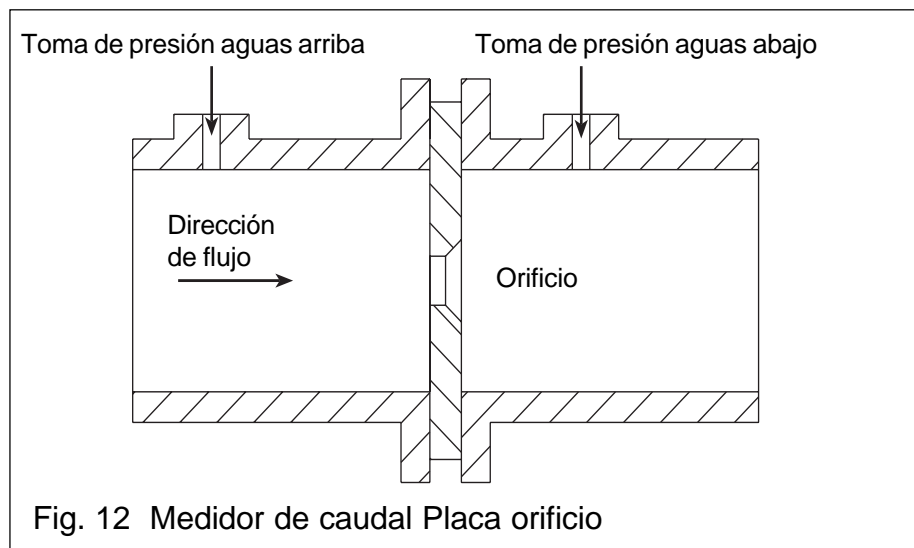
<b>Tipo de medidor</b>	<b>Rango</b>
Placa orificio	4:1
Rotativos Shunt	Típico 7:1
Vortex	4:1 hasta 25:1 según la aplicación
Spiraflo	25:1 Continuo / 40:1 Intermitente
Gilflo	Hasta 100:1

# Tipos de medidores de vapor

Hay muchos tipos de medidores de caudal de vapor:-

- Medidores de placa orificio.
- Medidores rotativos Shunt.
- Medidores de área variable.
- Medidores de área variable con resorte.
- Tubos pitot.
- Medidores de turbina.
- Medidores Vortex.

Todos estos medidores de caudal tienen sus ventajas e inconvenientes y a veces son más adecuados para alguna aplicación de medición de caudal específica. Sin embargo, todos ellos e pueden utilizar con vapor saturado y normalmente son los medidores de caudal más se usan. Esta sección describe brevemente cada uno junto con sus ventajas e inconvenientes.



## Medidores de caudal de placa orificio

La placa orificio pertenece al grupo de medidores de caudal de presión diferencial. Otros de este grupo son los venturi y toberas. La placa orificio es sencillamente una restricción en forma de placa con un orificio anular colocado en el paso del flujo. La velocidad del fluido al pasar por este orificio es proporcional a la presión diferencial.

La diferencia de presión a través del orificio, o presión diferencial, se utiliza para determinar el caudal volumétrico de acuerdo con la ecuación de Bernoulli.

$$Q_v = C_d A \sqrt{2g \Delta P}$$

Donde:

- $Q_v$  = Caudal volumétrico
- $C_d$  = Coeficiente de descarga
- $A$  = Area del orificio
- $g$  = Gravedad
- $\Delta P$  = Presión diferencial

El elemento primario es la placa orificio. Para medir la presión diferencial, deben conectarse líneas de impulso desde las tomas de presión aguas arriba y aguas abajo a un dispositivo secundario conocido como un Transmisor DP (de presión diferencial). Del Transmisor DP, la información puede pasar a un indicador de caudal o a un procesador de caudal junto con la temperatura y / o información de presión, para proporcionar una compensación de densidad.

En una línea horizontal debe haber un orificio de drenaje en el fondo de la placa para evitar que aguas arriba del orificio se acumule agua (o condensado). Debe tomarse en cuenta el efecto de este orificio cuando se determina el coeficiente de descarga.

Se puede variar considerable la geometría de placas orificio, sobre todo en el posicionamiento de las tomas de presión.

La instalación correcta es esencial y la aplicación de placa orificio para mediciones de caudal está documentada en las normativas Británica BS 1042 e Internacional ISO 5167.

### Ventajas

- Sencillo y robusto
- Buena precisión
- Bajo coste
- No necesita calibración o recalibración

### Inconvenientes

- El rango está limitado 4 o 5:1 por la relación de raíz cuadrada .
- Se pueden deformar con los golpes de ariete y tienden a acumular suciedad.
- El borde cuadrado del orificio puede desgastarse, especialmente si el vapor tiene agua, y puede alterar el  $C_d$  produciendo lecturas bajas, por consiguiente es necesario inspeccionar y reemplazar regularmente para asegurar la fiabilidad y precisión.
- Para una instalación correcta deberemos tener un tramo de longitud mínima equivalente a de 20 diámetros de tubería aguas arriba y 10 aguas abajo. En la práctica esto puede ser difícil de lograr cuando no se dispone de suficiente espacio sin restricciones.

## Medidores rotativos shunt

Son un tipo de medidores de turbina. Consisten en una placa orificio que se coloca en la tubería en el punto donde se injerta una derivación. En esta derivación se instala un sistema de tobera-turbina. El fluido que pasa por la derivación es proporcional al flujo total y se reconduce a la tubería principal en un punto posterior al de toma. Para que la turbina no gire a velocidad excesiva, se instala un cilindro de frenado inmerso en una cámara de aceite. La medida puede efectuarse mediante un totalizador arrastrado por el rotor o mediante la medida de la velocidad del rotor con sensor magnético.

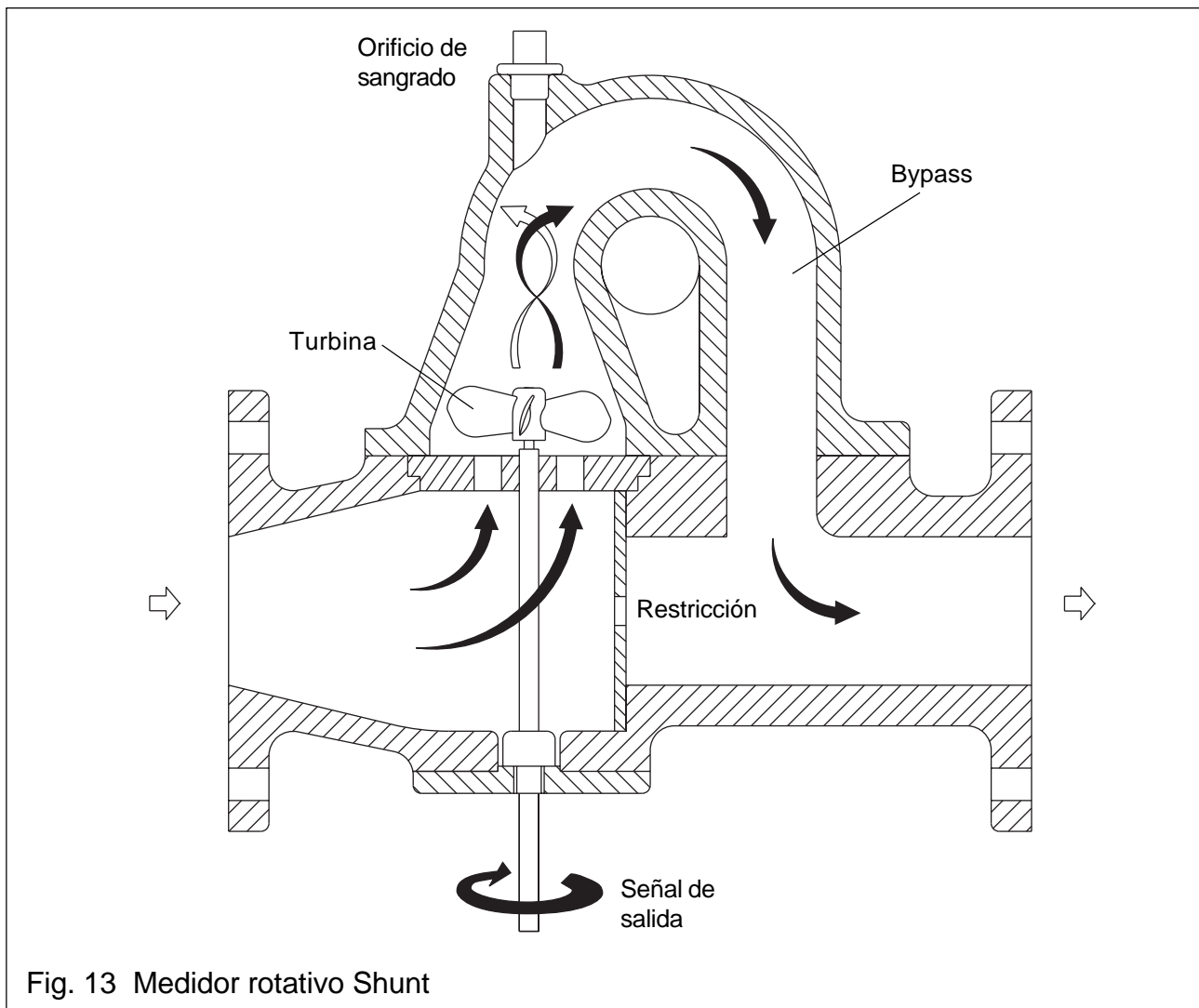


Fig. 13 Medidor rotativo Shunt

### Ventajas

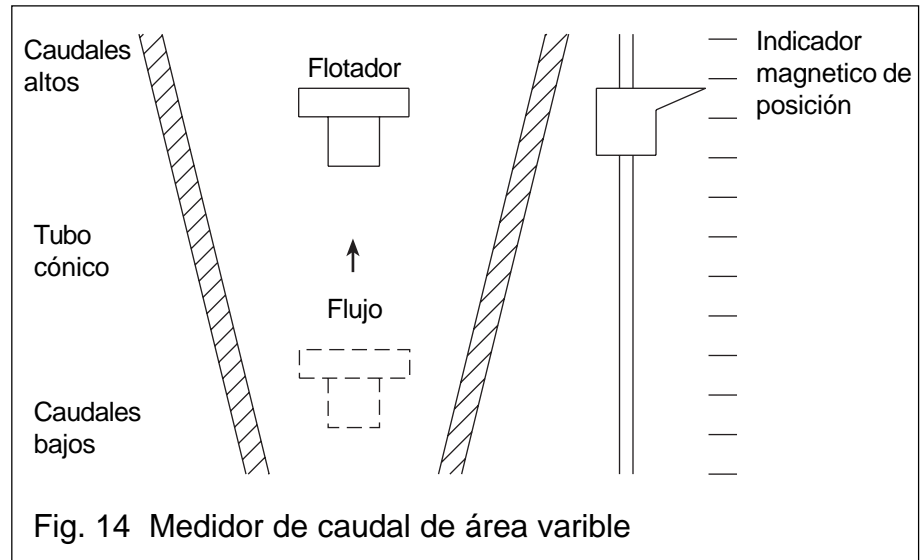
- Coste relativamente bajo proporcionando una manera sencilla de indicar el caudal total.

### Inconvenientes

- La precisión es moderada aunque generalmente no dispone de compensación de densidad.
- El medidor de caudal se calibra para una presión de línea específica, cualquier variación en la presión del vapor puede producir lecturas que no son precisas.
- Es difícil indicar el rango de caudal.

## Medidores de caudal de área variable

Este tipo de medidor de caudal consiste en un tubo cónico vertical con el orificio pequeño en el extremo inferior. Un flotador se mantiene en una posición vertical dentro del tubo por la fuerza que ejerce el caudal sobre él. La diferencia de presión a través del flotador es constante que significa que el área anular del paso alrededor del flotador, y de la altura del flotador, varía y depende del caudal. El tubo puede ser metálico para que se pueda usar con altas temperaturas y presiones.



### Ventajas

- Señal de salida lineal produciendo un rango más alto.
- Sencillo y robusto.

### Inconvenientes

- El tubo ha de montarse en plano vertical.
- Precisión moderada.
- Caudales limitados.

## Medidores de caudal de área variable con resorte

Cuando se describe este tipo de medidor de caudal debe recordarse los dos principios fundamentales de medición de caudal: -

**A.** El medidor de caudal de presión de diferencial (por ej. placa orificio) produce una diferencia de presión que varía dependiendo del caudal a través del medidor. Al aumentar el caudal aumenta la presión diferencial. Si medimos esta diferencia de presión se puede calcular el caudal a través del medidor. El área de restricción (por ej. el tamaño del orificio en la placa) permanece constante.

**B.** En el medidor de caudal del área variable ocurre lo inverso: porque está equilibrado por el peso del flotador, la presión del diferencial permanece constante según varía el caudal. Permite aumentar el área de la abertura por donde pasa el caudal. En la Figura 15 se comparan los dos principios.

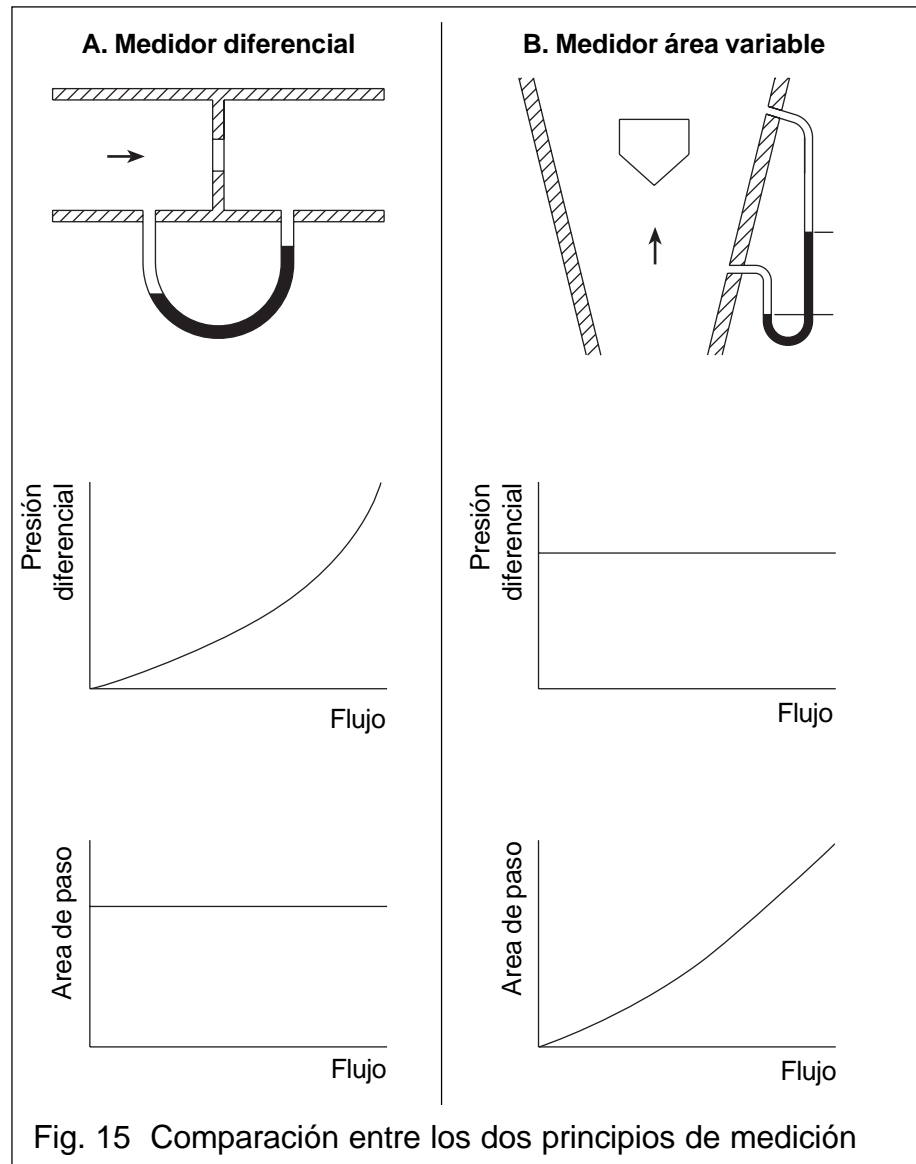
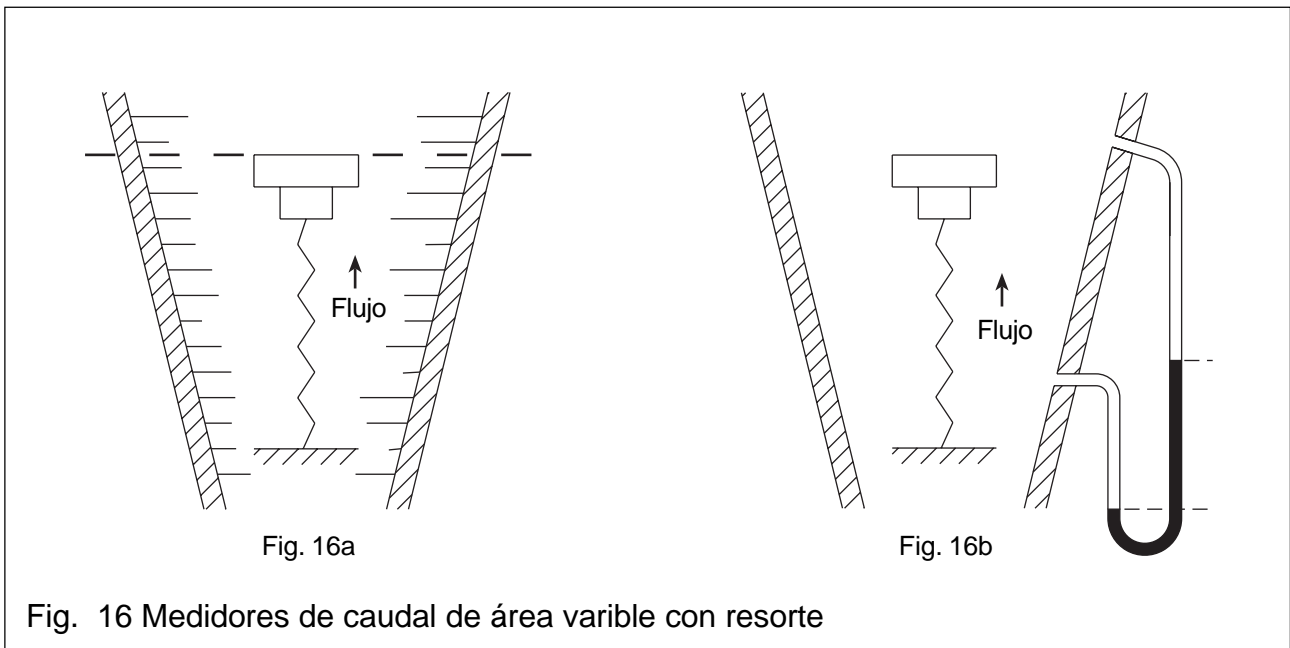


Fig. 15 Comparación entre los dos principios de medición

El principio del área variable con resorte es en realidad un híbrido entre estos dos. Mientras que todos los medidores detallados hasta ahora trabajan con el principio de área constante y presión diferencial variable, en los de área variable, varían tanto la presión diferencial como el área, la cual también aumenta cuando lo hace el caudal. En términos matemáticos significa que semejante medidor de caudal tiene dos grados de libertad y como consecuencia tiene un buen de rango.

La señal de salida de este tipo de medidor puede ser:

- La posición de la parte móvil (Figura 16a). Esta disposición lo utiliza Spirax Sarco en el medidor de caudal 'Spiraflo' donde la señal eléctrica de salida está relacionada con la posición de la parte móvil, ●
- Una señal de salida de presión de diferencial como mostrado por un Gilflo ILVA (Área Variable En Línea), un medidor de caudal de área de variable con resorte (Figura 16b).



El medidor de caudal ILVA usa un cono perfilado situado en el centro del orificio anular para perfeccionar la señal de salida de presión de diferencial. La fuerza aplicada al cono por el fluido actúa contra la precisión del resorte de precisión produciendo una presión del diferencial predecible a través del medidor de caudal. Esta diferencia de presión la detecta la célula de DP. Como consecuencia, el rango del medidor es mayor que para los otros tipos que miden la presión diferencial.

### Ventajas

- Las ventajas generales del medidor de área variable con resorte son que son robustos, proporcionan un rango alto con buena precisión y son menos sensibles a los cambios de viscosidad.

### Inconvenientes

- La única desventaja de este tipo de medidor de caudal es que es susceptible al desgaste cuando se usa durante periodos excepcionalmente largos con vapor sucio y húmedo. La instalación correcta usando filtros y separadores corregirán esto.

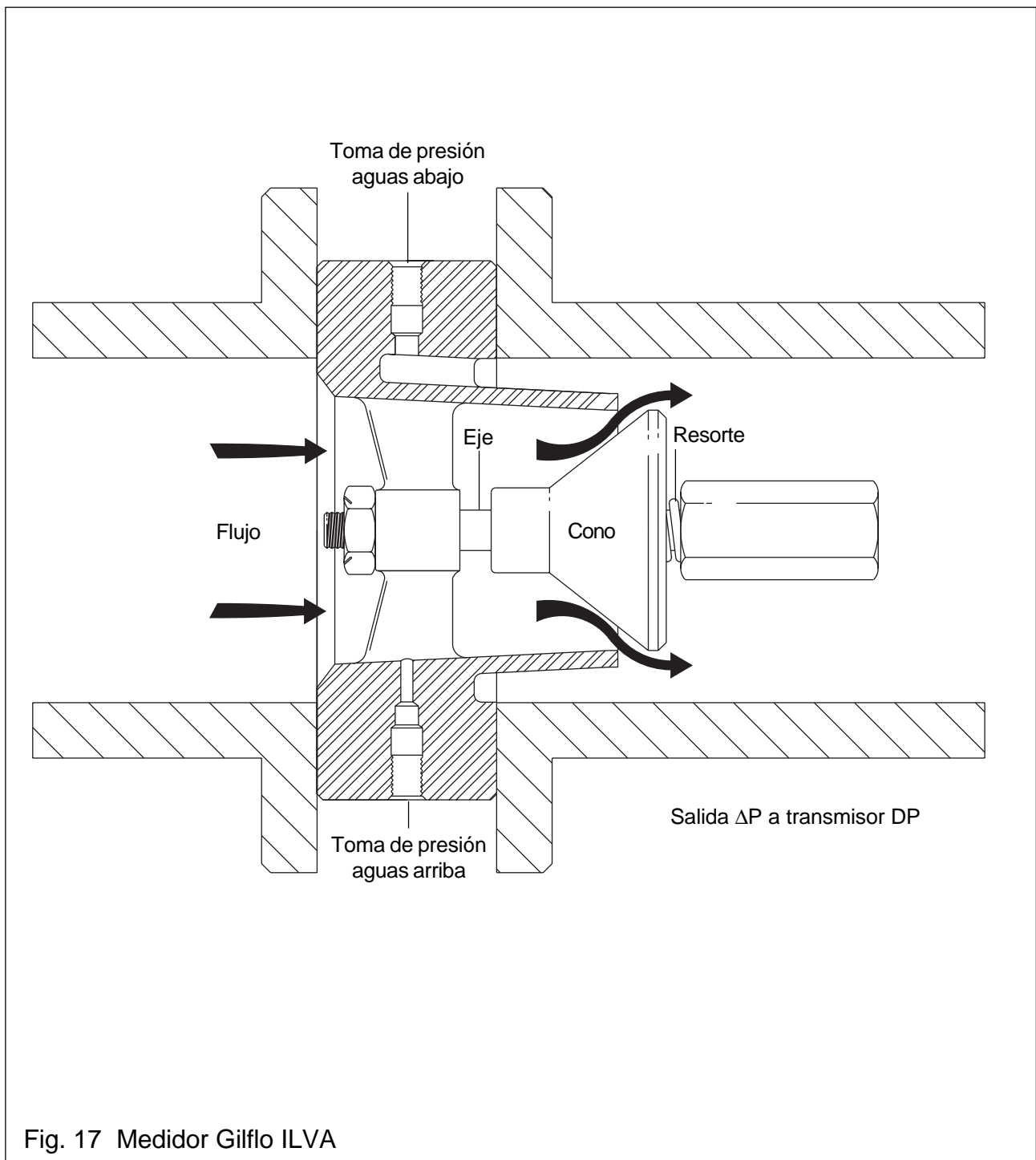
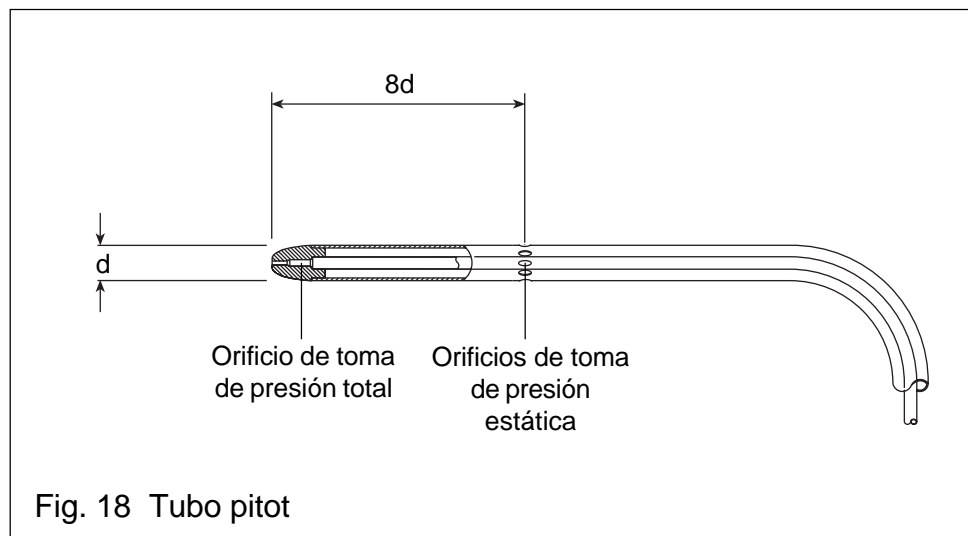


Fig. 17 Medidor Gilflo ILVA



## Tubos pitot

A diferencia de los otros medidores de momento que imponen una restricción del flujo y miden la consiguiente pérdida de presión, los tubos de pitot detectan la diferencia entre la presión de impacto (dinámica) y la presión estática del fluido que se mueve. En general consiste en un tubo con uno agujero que se sitúa de cara al flujo para detectar la presión de impacto y otro o más agujeros en la otra cara para medir la presión estática. El agujero de impacto sólo mide la velocidad en un punto localizado. Un solo tamaño será adecuado para una variedad de tamaños de tuberías y las ventajas económicas son evidentes. La colocación en el perfil del fluido es crítica.



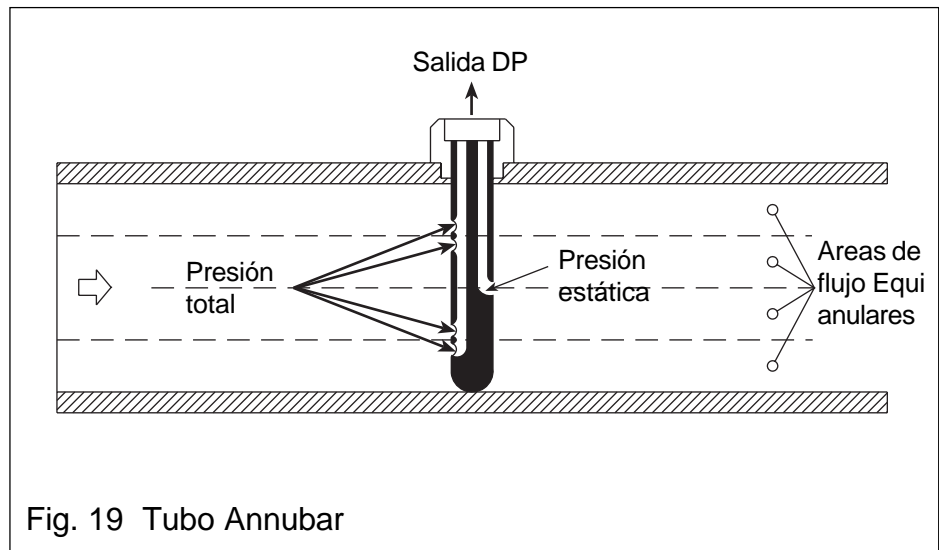
El tubo de pitot es sensible al ángulo de ataque y por tanto a los torbellinos. Por tanto, se recomienda que el flujo se estabilice en una longitud de tubería de unas quince veces el diámetro. Si esto no es posible, hay que utilizar estabilizadores de flujo. Una de las ventajas es que presenta muy poca resistencia al flujo. Cuando se utiliza para medir vapor, se debe garantizar que los agujeros inferiores no quedan bloqueados con agua, por lo que se debe eliminar todo el condensado que se forme. Existe una relación entre velocidad y caída de presión que limita sus valores de rango.

$$V_d = C \left[ \frac{2(p_o - p)}{\rho} \right]^{1/2}$$

Donde:

- $V_d$  = Velocidad media axial del fluido.
- $C$  = Coeficiente de caudal del tubo pitot.
- $p_o$  = Presión total.
- $p$  = Presión estática.
- $\rho$  = Densidad.

El tubo pitot tiene el inconveniente de que debe estar correctamente colocado para medir correctamente la media de caudal en el área de la sección transversal de la tubería.



El tubo Annubar es una innovación del tubo Pitot se desarrolló con numerosas diversos agujeros aguas arriba para obtener un valor más representativo de la velocidad media. La separación entre agujeros depende del número de éstos. Se debe pretender que cada uno cubra una zona anular de flujo equivalente.

#### Ventajas

- Presenta poca resistencia al flujo.
- Economicos.
- Se pueden utilizar en diferentes diámetros de tubería.

#### Inconvenientes

- Solo realiza medidas de velocidad del fluido en un punto localizado.
- Su rango se debe limitar a valores del orden 4:1 y si el vapor está humedo los agujeros se pueden taponar, aunque hay ciertos modelos que pueden instalarse horizontalmente.
- El tubo de pitot es sensible a los torbellinos y requiere una instalación y mantenimiento cuadadoso.
- Los  $\Delta P$  bajos incrementan la incertidumbre, especialmente con el uso con vapor.

## Medidores de turbina

El medidor de turbina consiste de un rotor de varias paletas o una hélice montada en un eje con cojinetes y soportes de centrado para que gire libremente. El fluido hace girar el rotor a una velocidad proporcional a la velocidad del fluido. Las puntas de las paletas pasan por una bobina captadora y cada impulso eléctrico representa un cierto caudal. Se requiere más instrumentación para convertir los impulsos en un caudal volumétrico.

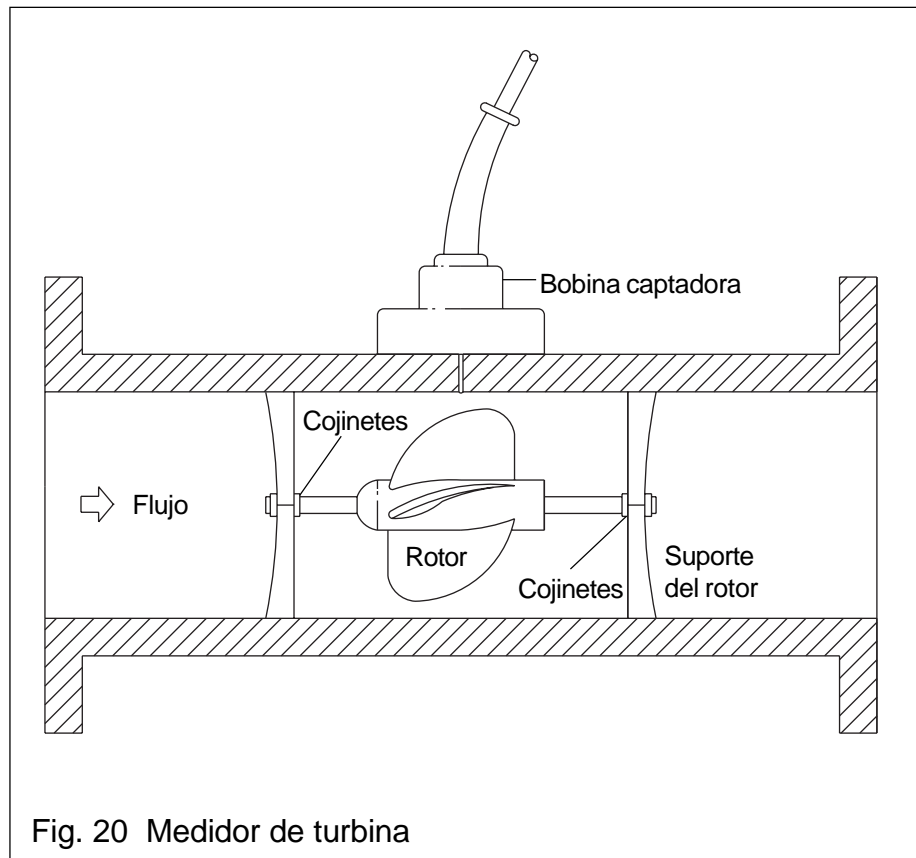


Fig. 20 Medidor de turbina

Ya que el medidor de turbina consiste en varias piezas móviles, deberemos tomar nota de ciertos factores que influyen en la medición

- Temperatura, presión y viscosidad del fluido a medir.
- Propiedades lubricantes del fluido.
- Desgaste y fricción del cojinete.
- Cambios en el estado y dimensional de las paletas.
- Perfil de velocidad de entrada y efectos de los torbellinos.
- Caída de presión a través del medidor.

Por estas razones la calibración de los medidores de turbina debe realizarse en condiciones de trabajo. Es muy importante mantener la incertidumbre de la calibración al nivel más bajo posible.

### **Ventajas**

- Preciso sobre un amplio rango.

### **Inconvenientes**

- Desgaste o suciedad en las superficies hace que se requieran recalibraciones. Pero el mayor de los inconvenientes es que los cojinetes deben permitir que el rotor gire a alta velocidad y trabajar con temperaturas bastante altas. Por tanto la vida del cojinete es el factor que más puede influenciar.
- Susceptible a los efectos de los torbellinos.

## Medidores Vortex

Estos medidores operan con el principio de que cuando un fluido contornea un obstáculo, efectos relacionados con la viscosidad producen secuencialmente torbellinos después del mismo. Se pueden detectar, contar y visualizar estos torbellinos. Poseen una frecuencia proporcional a la velocidad del fluido dividida por la anchura del obstáculo. En realidad, se está midiendo la velocidad.

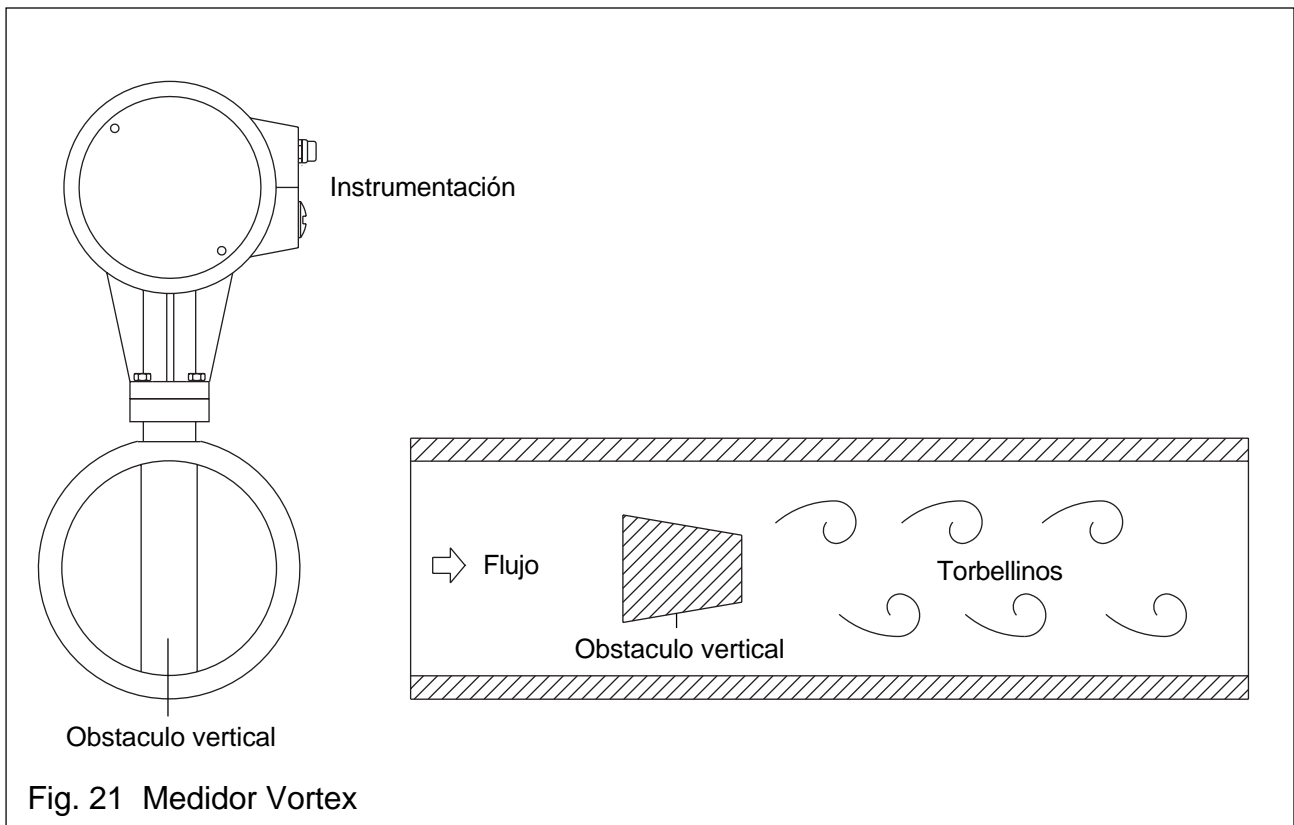


Fig. 21 Medidor Vortex

El obstaculo está colocado para que cause un bloqueo al fluido que tiene que contornear el obstaculo. Al forzar al fluido alrededor del obstaculo, la velocidad del fluido experimenta un cambio. El fluido cercano al obstaculo experimenta fricción de la superficie del obstaculo y reduce su velocidad. Debido a la reducción del área, se acelera el fluido que está más alejado del obstaculo para que pueda pasar la suficiente cantidad de fluido por el obstaculo. Una vez que el fluido ha pasado el cuerpo, se mueve para rellenar el espacio muerto que se ha producido detras de él que a su vez produce un movimiento rotatorio en el fluido creando un vortice.

La velocidad del fluido producida por el obstaculo no es constante en ambos lados del cuerpo del obstaculo. Según aumenta la velocidad en un lado disminuye en el otro. Lo mismo ocurre con la presión. En el lado de alta velocidad la presión es baja y en el lado de baja velocidad la presión es alta. La presión procura redistribuirse, la zona de alta presión se mueve hacia la zona de baja presión, las zonas de presión cambian de lugar y se producen vortices a ambos lados del obstaculo.

La frecuencia de los torbellinos y la velocidad del fluido tienen una relación casi lineal cuando se encuentran las condiciones adecuadas. La frecuencia de los torbellinos es proporcional al número de Strouhal, la velocidad del fluido y la inversa del diámetro del obstáculo.

$$f \propto \frac{St \times V_d}{d}$$

Donde:  $f$  = Frecuencia de vórtices (Hz)  
 $St$  = Número de Strouhal  
 $V_d$  = Velocidad media del fluido (m/s)  
 $d$  = Diámetro del obstáculo (m)

El número de Strouhal permanece constante para una gama amplia de números de Reynolds, lo que indica que la frecuencia de torbellinos seguirá siendo la misma si cambia la densidad y que es directamente proporcional a la velocidad para cualquier diámetro de obstáculo. es decir:-

$$f = k \times V_d$$

Donde:  $k$  = Es una constante para todos los fluidos en un determinado tipo de medidor.

por tanto,  $V_d = f/k$

Entonces el caudal  $Q_v$  en la tubería se puede calcular de este modo:-

$$Q_v = A \times V_d = A \times f/k$$

Donde:  $A$  = Área del orificio del medidor (m<sup>2</sup>)

### Ventajas

- Rango razonable (siempre y cuando sean aceptables altas velocidades y caídas de presión).
- No tiene partes móviles.
- Poca resistencia al flujo.

### Inconvenientes

- Con caudales bajos, no se generan impulsos y el medidor puede dar lecturas bajas e incluso cero.
- A menudo citan velocidades máximas de 80 o 100 m/s que darían problemas graves en sistemas de vapor.
- Las vibraciones pueden causar errores en la precisión.
- Una instalación correcta es fundamental, ya que una junta mal colocada o restos de soldadura pueden producir torbellinos que causarían lecturas imprecisas.
- Se requieren tramos largos de tubería sin obstáculos aguas arriba, igual que las placas orificio.

# Instrumentación

Un medidor de cudad de vapor consta de dos partes - el 'primario' o la unidad de tubería, colocada en el paso del vapor y la 'secundaria' que convierte las señales a una forma utilizable. Además, habrá un tipo de procesador que pueda recibir, procesar y visualizar la información que requiere el usuario. Este procesador también puede recibir señales de presión y / o densidad para poder realizar compensación por densidad. La Figura 22 muestra un esquema de un sistema típico.

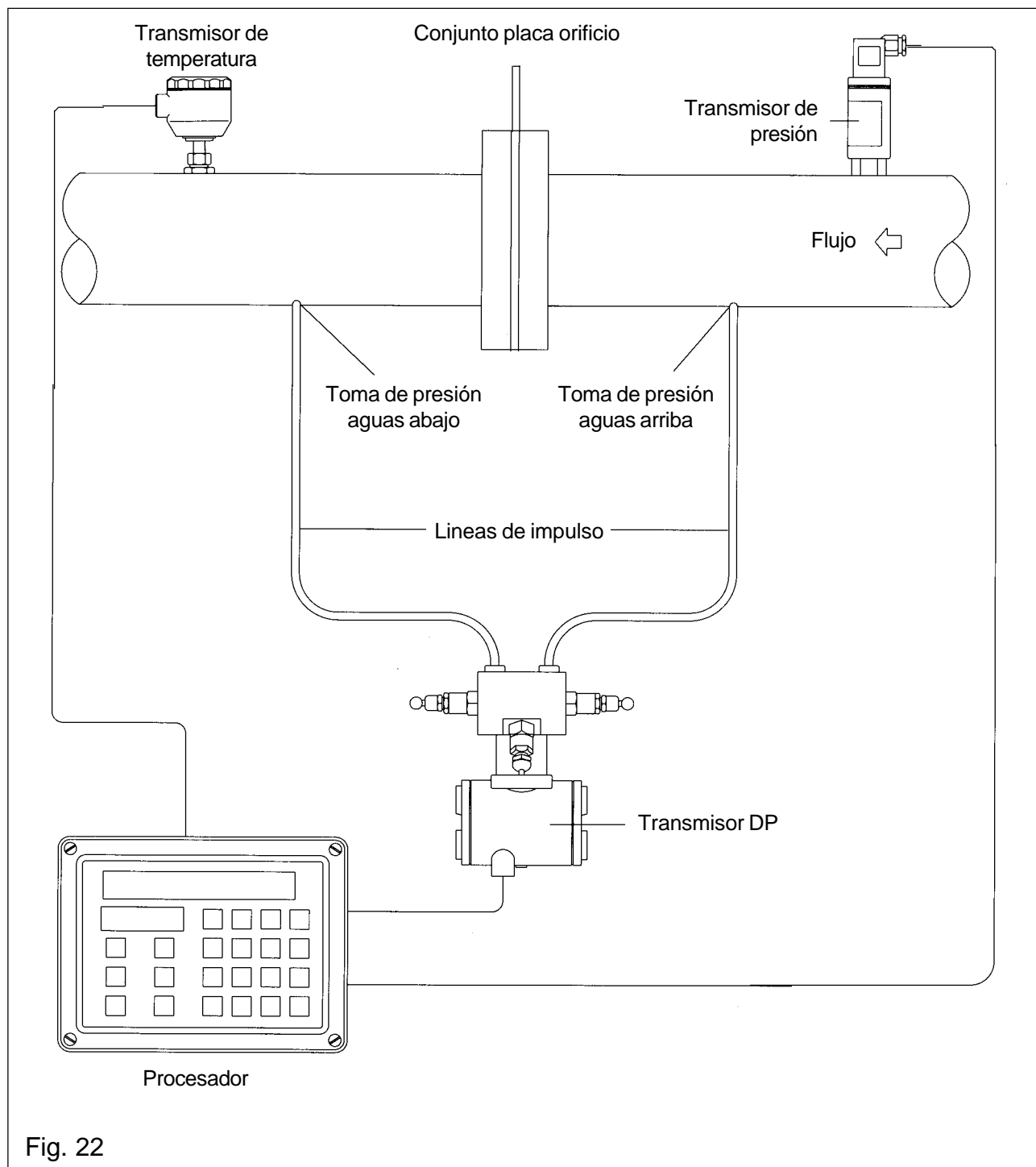
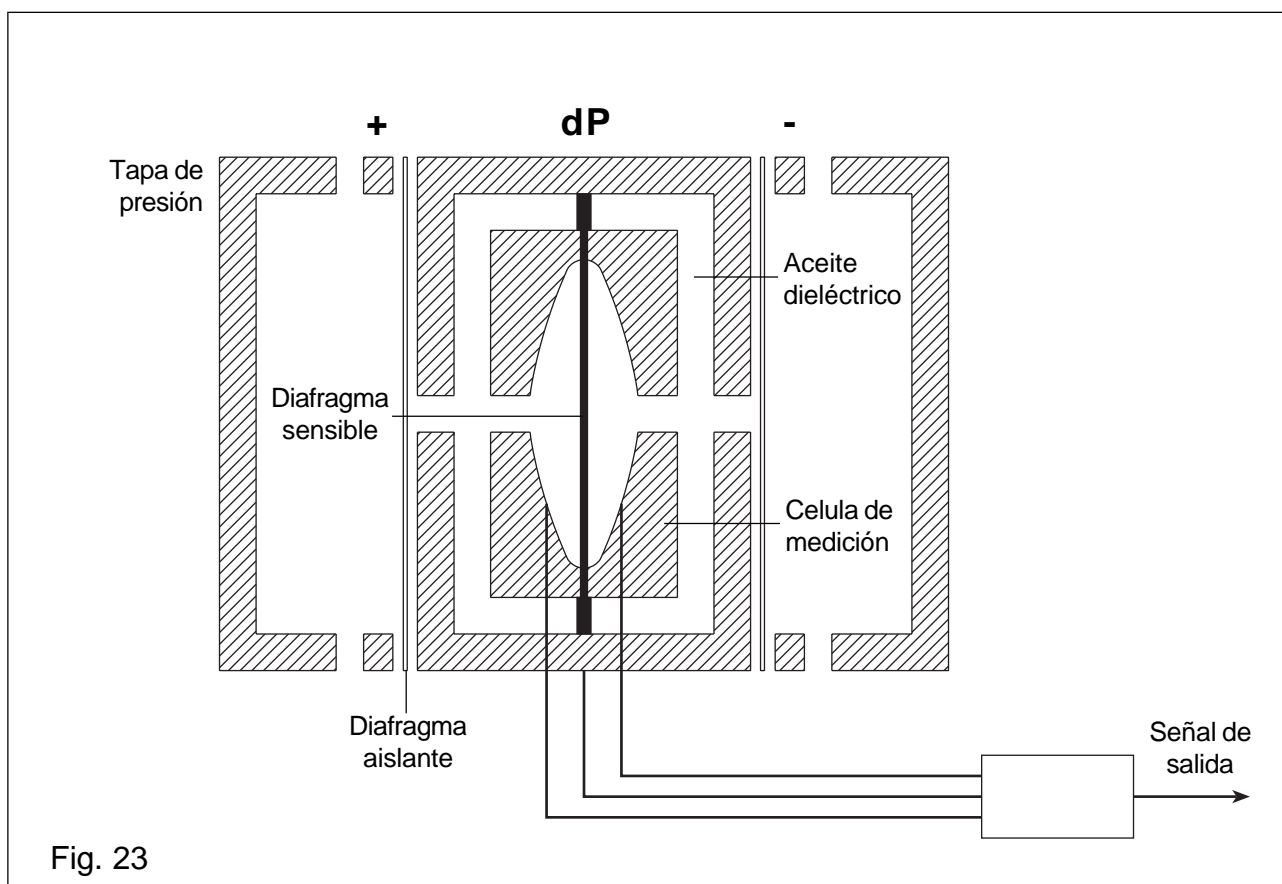


Fig. 22

Cuando la unidad de tubería es de presión diferencial, como una placa orificio o tubo pitot etc., y se requiere una señal eléctrica, la unidad secundaria será un transmisor DP que convierte la señal de presión a una señal eléctrica. Esta señal se puede transmitir a un procesador electrónico capaz de aceptar, almacenar y procesar estas señales según requiera el usuario.



Un transmisor DP típico aplica la presión diferencial producida por el elemento primario a través de un diafragma que está sumergido en un aceite dieléctrico, a cada lado del diafragma hay una placa capacitiva y el movimiento del diafragma crea una variación de capacitancia que se mide por medio de circuitos eléctricos, linearizada y convertida a una señal eléctrica para su transmisión (4 - 20 mA, 10 - 50 mA, etc.). El movimiento del diafragma es directamente proporcional a la diferencia de presión. Esta señal se puede enviar a cualquier instrumento electrónico diseñado para convertir la señal y proporcionar una lectura del caudal. Lo sofisticado del instrumento dependerá del tipo de información que requiera el usuario.



## Transmisores DP Multivariable

Recientemente, cuando se mide vapor, se pide la compensación de densidad utilizando entradas de temperatura o presión. Los beneficios se describen en la siguiente sección, 'Requerimientos especiales para mediciones precisas de caudal de vapor.'

Generalmente, se instala otro transmisor de presión aguas arriba del elemento primario y la señal analógica se transmite a un procesador externo junto con la señal analógica de salida del transmisor de presión diferencial. Ultimamente, en el mercado está apareciendo una nueva generación de transmisores de presión diferencial que detectan la presión aguas arriba, además poseen una electrónica sofisticada que permiten realizar la compensación de densidad sin otro equipo. Por tanto, el transmisor DP Multivariable puede medir la presión diferencial y la presión absoluta y aplica las correcciones necesarias. De este modo, se puede obtener una señal de salida del caudal másico del vapor sin necesidad de más equipos.

Para la medición de caudal de vapor recalentado se necesitará una señal temperatura.

## Recopilación de datos

Hay muchos métodos de recuperación y proceso de estos datos, como ordenadores especializados, PLCs (Programmable Logic Computer systems), o DCSs (Distributed Control Systems) y SCADAs (Supervisory Control and Data Acquisition systems).

Uno de los métodos más sencillos de recopilación de datos, almacenamiento y visualización es el Procesador. Con la llegada del microprocesador ahora disponemos de procesadores sumamente versátiles para la medición de caudal. Se pueden visualizar los siguientes datos:-

- Caudal actual.
- Vapor total utilizado.
- Temperatura / presión del vapor.
- Uso de vapor durante periodos específicos.
- Caudales y presiones anormales y activación de alarmas remotas.
- Compensación por variaciones de densidad.
- Transmisión a registradores de gráficos.
- Transmisión a sistemas de supervisión de energía.

Algunos se les puede llamar 'medidores de energía' ya que, además de lo anterior, pueden calcular y visualizar el uso de potencia (kW : Btu/h) y energía de calor (kJ : Btu)

Se pueden utilizar unidades visualizadoras en vez de procesadores si las señales de entrada son del tipo que la unidad pueda utilizar directamente, es decir, que las señales de entrada provienen directamente de un transmisor DP o una fuente equivalente como un medidor Vortex. La unidad proporciona una visualización local de las lecturas de los elementos primarios, además de poder retransmitir los datos a un punto central.

## **Análisis de datos**

La recolección de datos, ya sea manual, semiautomático o totalmente automático, se utilizará como una herramienta de supervisión para controlar el coste de la energía. Como resultado, estos datos tendrán que recopilarse durante un periodo de tiempo que sea suficiente para darnos una imagen precisa de los costes y la tendencia del proceso. Ciertos procesos requerirán datos diariamente, aunque la unidad preferida por los usuarios es de la semana de producción.

Lo más común para analizar los datos es el uso de ordenadores con programas capaces de manejar los cálculos y gráficos estadísticos. Una vez que el sistema de recopilación de datos esté en su lugar, habrá que determinar la relación entre producción y consumo. Esto se puede hacer mediante gráficos donde se obtiene la relación entre consumo (o consumo específico) y producción. Las cifras resultantes pueden contener incertidumbres sobre la naturaleza precisa de esta relación. Hay dos razones principales:

- Factores secundarios pueden afectar a los niveles de consumo.
- El control de consumo puede ser deficiente, ocultando una relación clara.

Se pueden utilizar técnicas de regresión para identificar el efecto de factores diversos. Se debe tener cuidado al usar tales métodos ya que se puede crear fácilmente una relación estadística entre dos o más variables que realmente son totalmente independientes.

Una vez determinados estos factores se puede determinar los 'consumos estándar de energía' y trazar una línea de consumos mínimos en las condiciones de operación actuales. La Figura 24 muestra la relación entre la producción y el consumo.

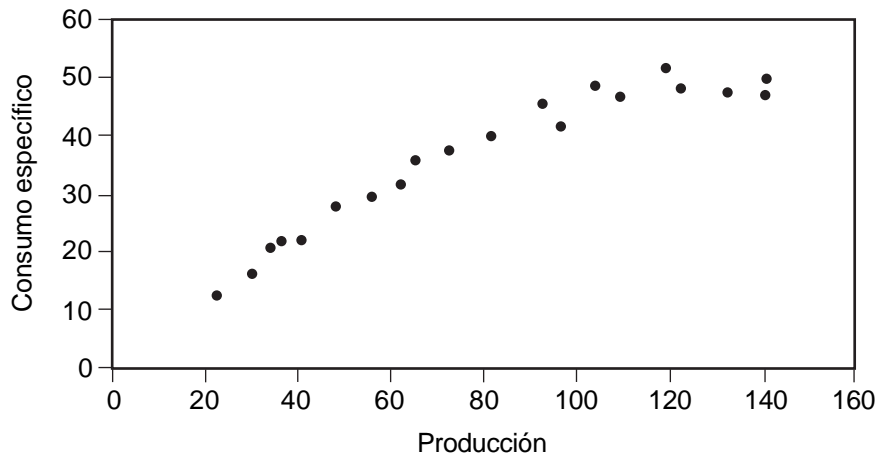


Fig. 24

Esta relación es la base para medir las producciones futuras.

Una vez calculado el estándar, los supervisores de secciones individuales pueden recibir regularmente informes de su consumo de energía y compararlo con el estándar. Entonces habrá que analizar estas cifras haciendo las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se compara el consumo con el estándar?
- ¿Está el consumo por encima o por debajo del estándar y por cuánto?
- ¿Existe alguna tendencia en el consumo?

Si hay una variación en consumo podría ser por varias razones. La primera y quizás la más probable sea la falta de control, o un control deficiente del consumo de energía en esa sección. Las variaciones estacionales también deben ser consideradas. Los datos iniciales de los cuales se calcula el estándar pueden ser incorrectos para el uso durante un año entero. Por consiguiente deben tenerse en cuenta las fluctuaciones. Un cambio en el proceso o la mezcla de la producción significará un cambio en el consumo y deberá tenerse en cuenta. Las tendencias producirán una variación continua en las cifras de consumo. Esta variación se puede producir por variaciones estacionales que no se hayan tenido en cuenta para el estándar, también puede ser una avería en la planta. Para poder aislar la causa es necesario primero verificar archivos pasados para determinar si el cambio es una tendencia hacia un aumento en el consumo o si es puntual. En el último caso, deben continuarse las comprobaciones alrededor de la planta de fugas y partes de equipo defectuosas etc. para proceder a su reparación.

El consumo estándar tiene que poder alcanzarse y suele ocurrir que se utilice la línea que encaje mejor con el promedio y no la de la mejor actuación que se pueda lograr.

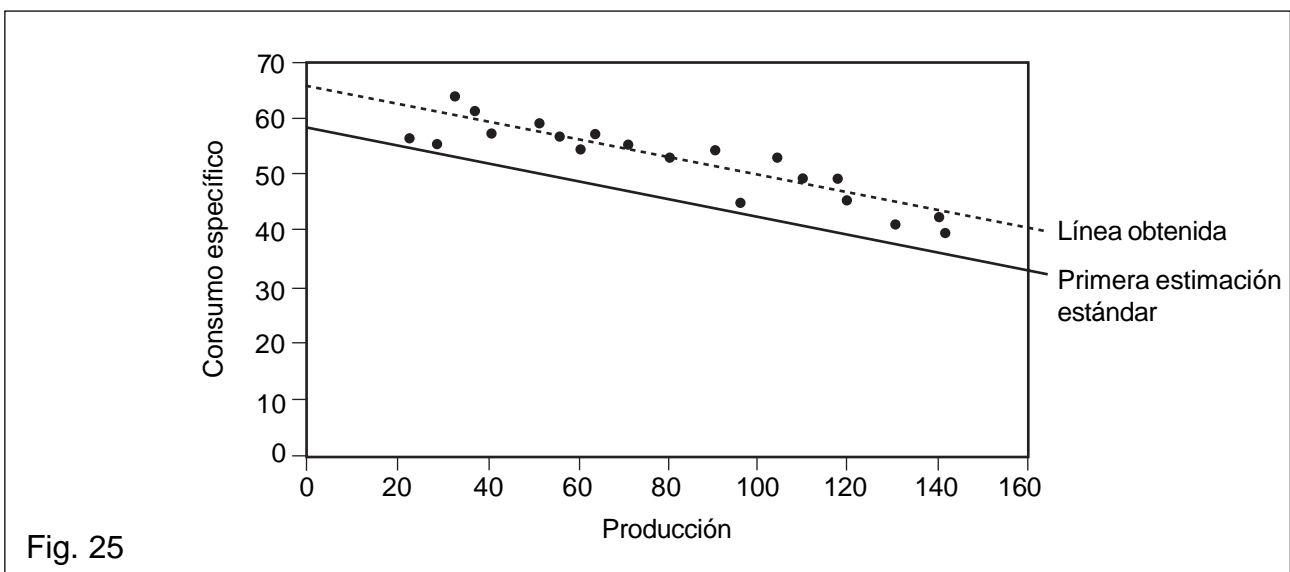


Fig. 25

Una vez que se ha elegido la línea estándar, éste será la nueva meta y el consumo de energía deberá tender a reducirse para alcanzar este nivel. Puede definirse como el rendimiento óptimo de energía que se puede lograr por las mejoras de la planta y / o métodos de trabajo.

Este aumento en rendimiento de energía proporcionará una marcada disminución en el coste de energía y de la planta en general, produciendo un sistema energéticamente más eficaz.

# Requerimientos especiales para mediciones precisas de caudal de vapor

## Compensación de densidad

En un caso ideal, la presión del vapor en las líneas de proceso permanecerán totalmente constantes. Por desgracia, este no suele ser el caso con cargas variables, pérdidas de presión por fricción y parámetros del proceso que contribuyen a las variaciones de presión, que en algunos casos pueden ser considerables. En sistemas de vapor recalentado, las variaciones de recalentamiento pueden causar cambios en la densidad aunque el proceso permanezca constante. Para medir caudales máscicos de vapor con precisión (o flujos de energía), es esencial tomar en cuenta estas variaciones de presión y temperatura. La gama de procesadores Spirax Sarco para medición de vapor incorporan una compensación automática y las variaciones de presión y temperatura no afectan la precisión de las lecturas de caudales máscicos (o energía).

Muchos sistemas de medición de vapor que se usan en la actualidad para monitorizar el consumo de vapor en los procesos no incorporan compensación de densidad y están diseñados para trabajar con una presión de línea fija. Si la presión de línea (y temperatura para el vapor recalentado) realmente son fijas, será perfectamente satisfactorio. De todos modos, incluso las pequeñas variaciones de presión pueden afectar la precisión del medidor. Según el tipo de medidor le puede afectar de una manera u otra.

## Medidores de velocidad

**Vortex.** La señal de salida de un medidor Vortex está en función del flujo. Es independiente de la densidad, presión y temperatura del fluido que se está controlando, es decir, dada la misma velocidad, la salida sin compensación del medidor Vortex será la misma si está midiendo 3 bar r de vapor, 17 bar r de vapor o agua. Si a un medidor de velocidad, que está dimensionado para trabajar a una determinada presión, se le hace trabajar a una presión diferente, nos daría un error en la medición. Se puede calcular fácilmente la dimensión del error:-

$$e = ((v \text{ Real} / v \text{ Teórico}) - 1) \times 100$$

Donde: **e** = Error de caudal expresado como un porcentaje del caudal real.

**v Real** = Volumen específico del vapor con la presión real de línea.

**v Teórico** = Volumen específico del vapor con la presión teórica de línea.

## Ejemplo

Un medidor de vapor Vortex dimensionado para trabajar a 5 bar r está trabajando a 4,2 bar r. ¿Qué error resultará?

$$v \text{ Real} = 0,361 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v \text{ Teórico} = 0,315 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\% \text{ error, } e = ((0,361 / 0,315) - 1) \times 100 = +14,6 \%$$

El medidor Vortex sin compensación tendrá un error positivo del 14,6 %

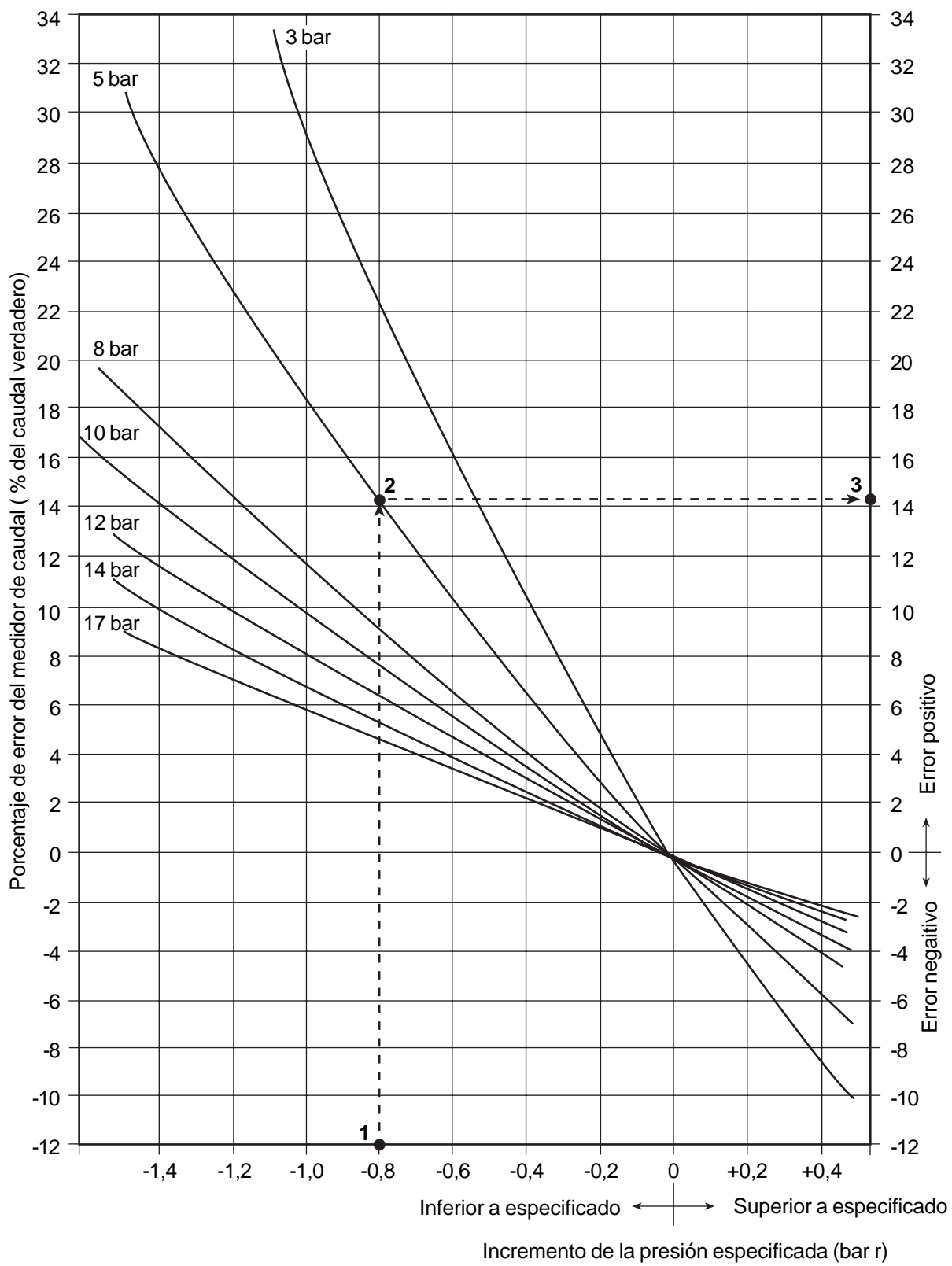


Fig. 26

## Medidores de presión diferencial

**Placas orificio.** La señal de salida de una placa orificio con transmisor DP es una señal de presión diferencial. El caudal másico resultante es una función de la geometría de la placa, la raíz cuadrada de la presión diferencial y la raíz cuadrada de la densidad del fluido, es decir, dada una presión diferencial a través de una placa orificio, el caudal másico derivado variará según la raíz cuadrada de la densidad.

Al igual que los medidores Vortex, si una placa orificio trabaja a una presión diferente a la especificada, se producirán errores. Se puede calcular fácilmente la dimensión del error:-

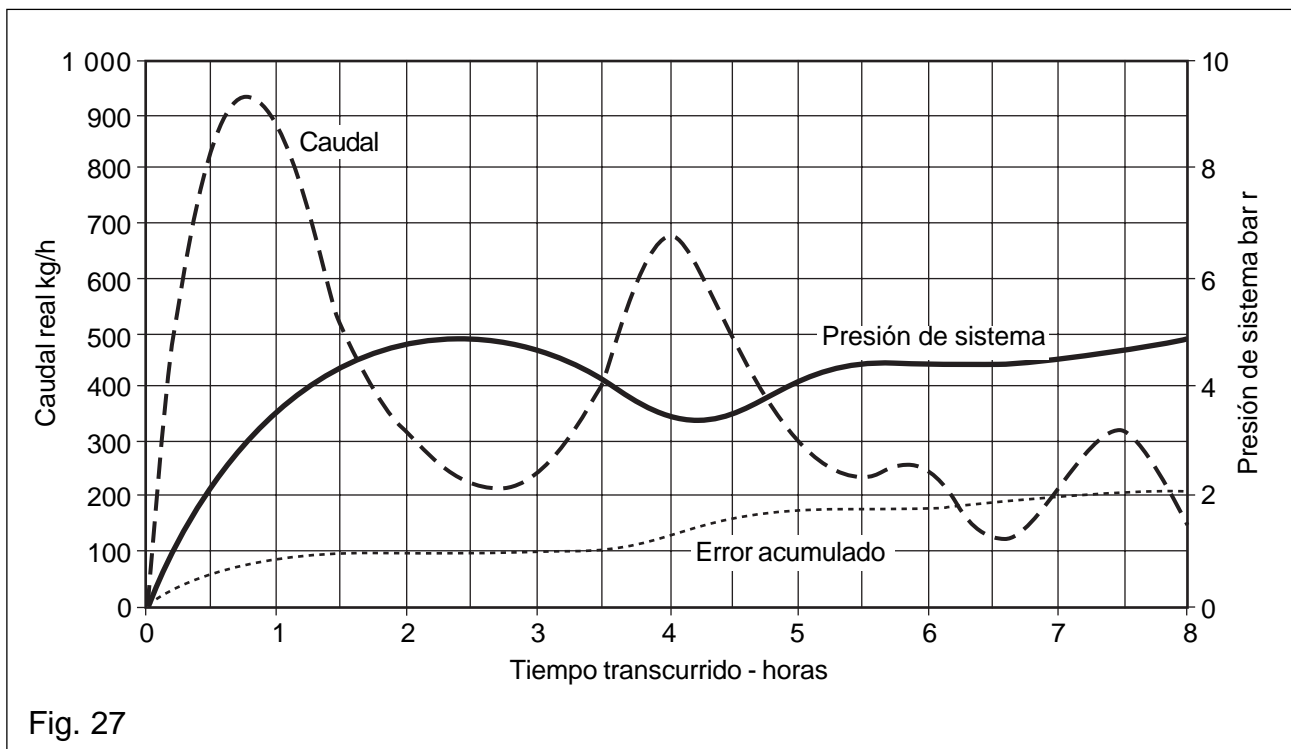
$$\% \text{ error, } e = \left[ \left( \frac{(\nu \text{ Real})^{1/2}}{(\nu \text{ Teórico})^{1/2}} \right) - 1 \right] \times 100$$

Donde:

$(\nu \text{ Real})^{1/2}$  = Raíz cuadrada del volumen específico del vapor con la presión real de línea.

$(\nu \text{ Teórico})^{1/2}$  = Raíz cuadrada del volumen específico del vapor con la presión teórica de línea.

Aquí se representa un ciclo típico de trabajo para una aplicación de vapor saturado. Después de la puesta en marcha, la presión del sistema aumenta gradualmente hasta la nominal, 5 bar r, pero debido a la demanda de carga del proceso, varía durante el día. Con un medidor sencillo, sin compensación de densidad, el error acumulado al final del día será importante.



**Ejemplo** Utilizando el gráfico (Figura 28, pág. 40), se está usando una placa orificio con un transmisor DP para medir el caudal de vapor saturado. La presión teórica es de 5 bar r, pero la presión real de la línea es solo de 4,2 bar r. ¿Qué error resultaría?

$$\begin{aligned}v \text{ Real} &= 0,361 \text{ m}^3/\text{kg} \\(v \text{ Real})^{1/2} &= 0,601\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v \text{ Teórico} &= 0,315 \text{ m}^3/\text{kg} \\(v \text{ Teórico})^{1/2} &= 0,561\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ error, } e &= ((0,601 / 0,561) - 1) \times 100 \\&= + 7,13 \%\end{aligned}$$

La placa orificio con un transmisor DP sin compensación tendrá un error positivo del 14,6 %

De aquí deducimos que la compensación de densidad es imprescindible si se va a medir un caudal con precisión. Si el medidor no tiene compensación de densidad, entonces, habrá que instalar sensores de presión y / o temperatura, que estén enlazados con el sistema de instrumentación. También se puede utilizar un transmisor DP multivariable.



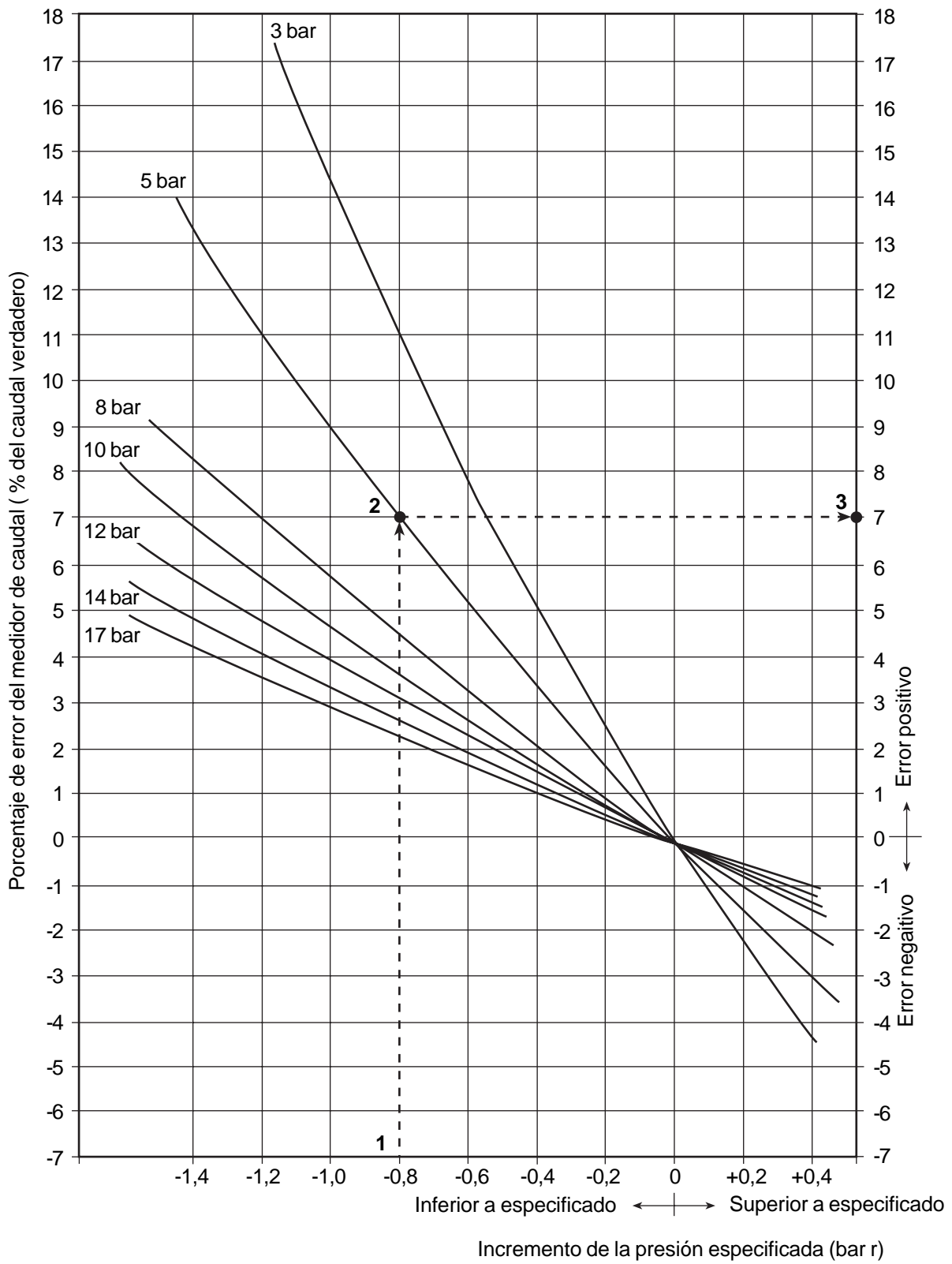


Fig. 28

## Fracción seca

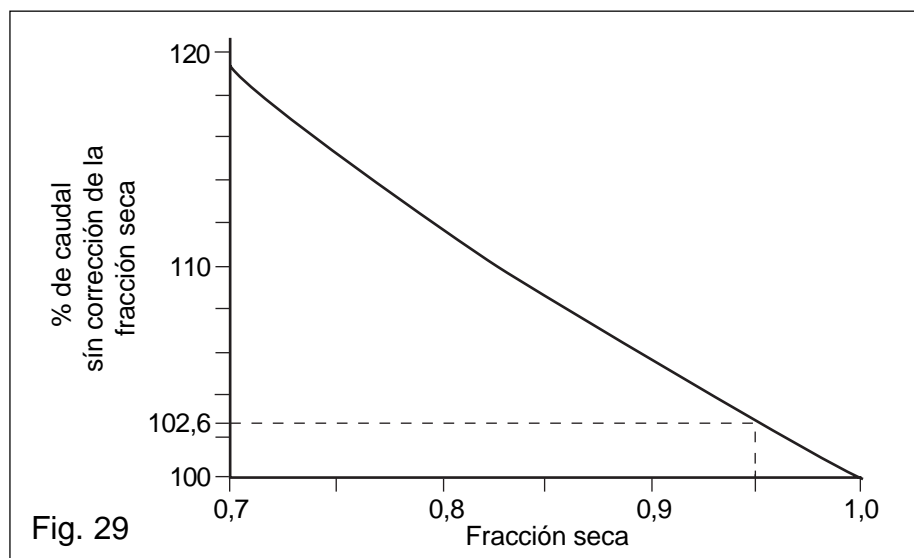
Al obtener un caudal volumétrico de vapor y aplicar la compensación de densidad nos da el caudal másico que considera las inevitables fluctuaciones en la presión del vapor. Esto es asumiendo que el vapor está totalmente seco. De todos modos, cuando el vapor no está totalmente seco (casi siempre), la compensación de densidad no será la correcta. La densidad será superior a la del vapor saturado seco y como no se ha considerado esta diferencia, el valor del caudal indicado será inferior que el real, El medidor tendrá un error negativo.

La siguiente ecuación nos muestra la relación:

$$Q_{mx} \cong Q_{mD} \times \frac{1}{(\chi)^{1/2}}$$

Donde:  $Q_{mx}$  = Caudal másico (kg/h) con una fracción seca de  $x$   
 $Q_{mD}$  = Caudal másico (kg/h) condiciones saturado seco  
1 = Unidad de fracción seca  
 $\chi$  = Fracción seca

Esta corrección de la fracción seca se puede expresar como un gráfico, (Figura 29).



Existen medidores de caudal que nos permiten introducir la fracción seca. Pero es difícil establecer esta cifra en una situación práctica. Si acondicionamos el vapor antes del medidor mejoraremos la calidad del vapor en el punto de medición. El uso del gráfico se explica mejor con un ejemplo. Considera un medidor de vapor con la fracción seca ajustada a 1,0 (100 %) - vapor saturado completamente seco, la fracción seca real es de 0,95 (95 %). El caudal que muestra el procesador es de 1 000 kg/h.

En la Figura 29 (pág. 41), si trazamos una línea horizontal del punto de 0,95 de fracción seca hasta la línea de % de caudal, se puede ver que el valor medido debería ser de un 102,6 % del valor indicado, es decir, 1 026 kg/h. Así que en este caso, el medidor de caudal de vapor tendrá un error negativo de 2,6 %.

Al contrario, si al mismo sistema se le ha ajustado la fracción seca de 0,95, y si el vapor saturado está completamente seco, está claro que nos daría de nuevo un error de 2,6 % pero en este caso el medidor tendrá un error positivo.

### **Conclusión**

Para mediciones de caudal de vapor precisas, se debe montar un separador de gotas adecuado antes de cualquier medidor de caudal de vapor saturado para asegurar las condiciones expuestas anteriormente. Ver la sección sobre la instalación correcta y calidad del vapor en la página 46.

### **Vapor recalentado**

Con el vapor recalentado siempre hay una relación entre la presión y la temperatura del vapor. Las tablas de vapor muestran la correlación junto con entalpía específica, volumen específico y densidad. Así que para aplicar la compensación de densidad en un medidor de caudal volumétrico en vapor saturado, solo hay que detectar la temperatura o presión del vapor. Esta señal se puede transmitir a un procesador de caudal que, si tiene un algoritmo de las tablas de vapor, realizará todos los cálculos necesarios.

Pero, el vapor recalentado está muy próximo a ser un gas verdadero y no existe relación entre temperatura y presión. Por tanto cuando se trata de vapor recalentado con el mismo tipo de medidor de caudal, hay que medir simultáneamente la presión y la temperatura del vapor. La instrumentación del medidor de caudal debe tener el software necesario para calcular las condiciones del vapor recalentado para poder proporcionar los datos correctos.

Si el medidor de caudal es del tipo de presión diferencial que no posee dicha instrumentación, siempre mostrará un error cuando haya vapor recalentado. La Tabla 2 nos muestra el porcentaje de error para varios grados de recalentamiento para los medidores que no tienen compensación de presión y temperatura.

Tabla 2

Presión bar r	Cantidad de recalentamiento			
	1°C	5°C	10°C	50°C
1	1,5	8,3	17,0	105,0
2	1,4	7,6	16,1	95,9
3	1,4	7,5	15,0	90,5
4	1,3	7,0	14,5	86,6
5	1,3	6,8	14,1	83,5
6	1,3	6,8	13,8	81,4
7	1,3	6,5	13,7	79,0
8	1,3	6,5	13,3	77,8
9	1,3	6,4	12,9	76,5
10	1,3	6,3	12,8	75,0
11	1,2	6,3	12,7	73,9
12	1,2	6,1	12,3	72,9
13	1,2	6,0	12,3	71,0
14	1,2	6,0	12,2	71,4
15	1,2	6,0	12,1	70,7
16	1,2	5,9	12,1	70,0
17	1,1	5,9	12,1	69,5

**Ejemplo**

Con vapor a una presión de línea de 4 bar r y 10°C de recalentamiento, el valor que indica el medidor de caudal será 14,5 % mayor que el valor real.

$$\text{Valor real} = \frac{\text{Valor indicado}}{(1 + (\% \text{ Error} / 100))}$$

Por ej. Si un display muestra 250 kg/h con las condiciones mencionadas anteriormente, entonces el caudal real será:

$$\frac{250}{(1 + 0,145)} = 218 \text{ kg/h}$$

# Otros métodos para medir el consumo de vapor

## Medición de condensado en una planta pequeña

Hay veces en que se necesita medir el consumo de vapor en una parte concreta de la planta pero no se puede justificar la instalación de un medidor de caudal relativamente caro. En estos casos, una manera de llegar a medir el consumo de vapor es medir el condensado que produce. Solo se haría una vez para calcular el rango del equipo, este no es un método práctico de monitorización continua.

Se puede realizar llevando el condensado y el revaporizado a un contenedor con un peso conocido de agua fría. En ese momento se conecta con la planta, con el condensado entrando en el contenedor por debajo del nivel del agua para que se condense el revaporizado que se pudiera producir. Se puede calcular el consumo de vapor por el aumento de peso durante un periodo determinado. Este método solo nos dará la cantidad de vapor utilizado durante un periodo de tiempo, en otras palabras, la media del consumo de vapor.

La Figura 30 nos muestra un intercambiador de calor de placas instalado con una bomba mecánica MFP14 de Spirax Sarco para un desalojo eficiente del condensado, incorpora un contador de ciclos como se describe en la Figura 31.

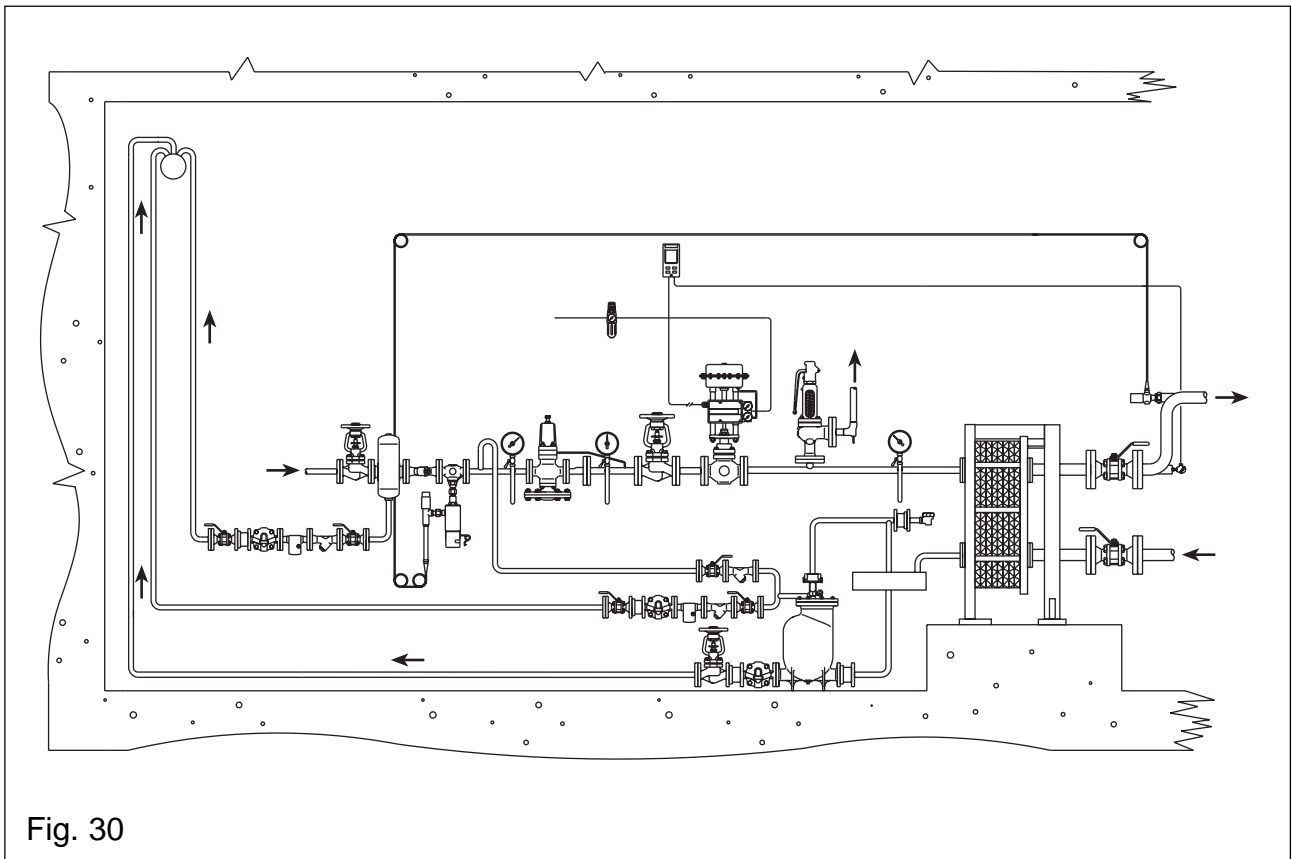
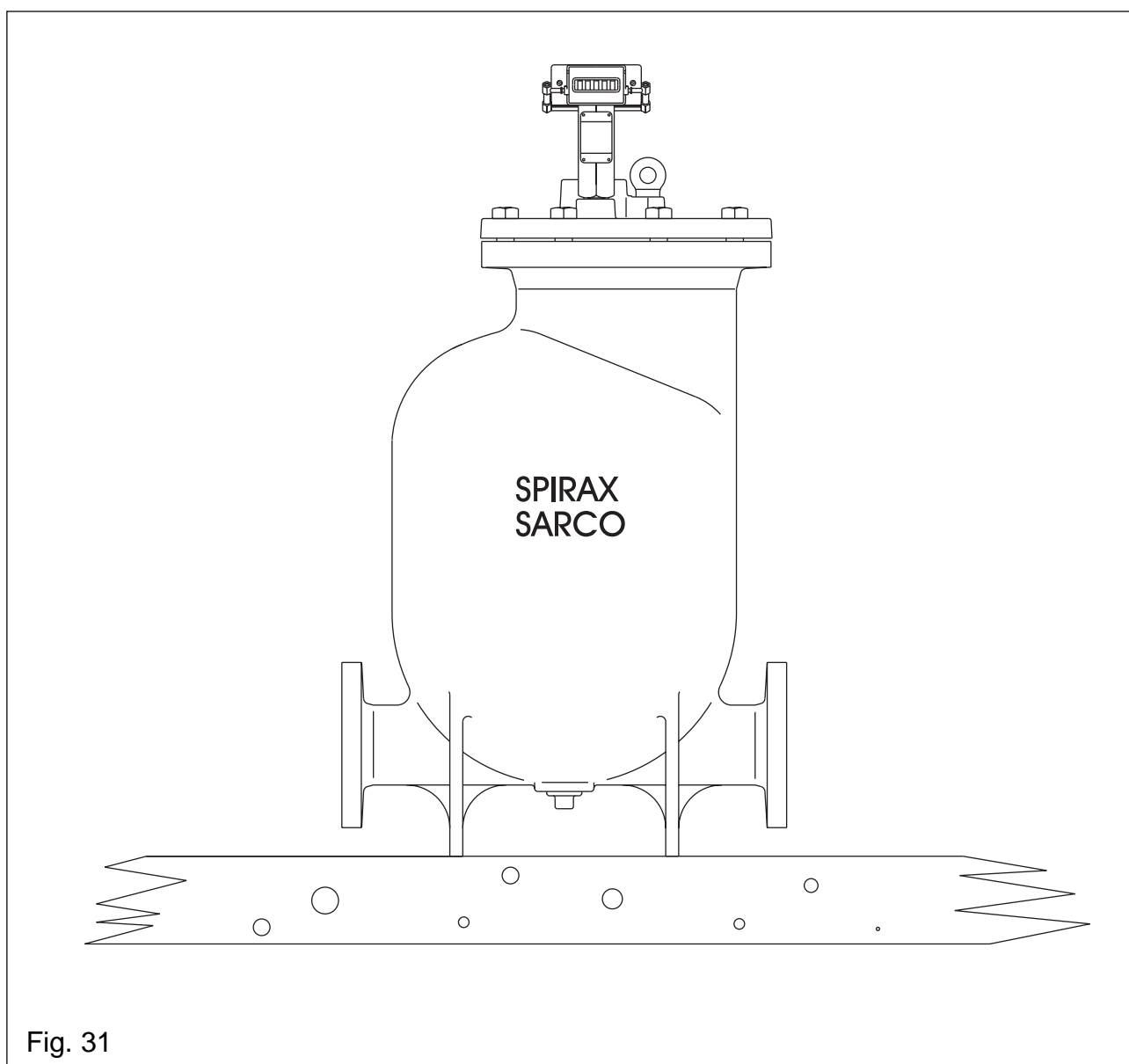


Fig. 30

### Medición de condensado bombeado

A menudo, el condensado que se descarga de un intercambiador de calor o un equipo de planta, se bombea por una bomba automática de desplazamiento positivo, como la MFP14 de Spirax Sarco. Si le añadimos un contador de ciclos se registrarán los ciclos. Los fabricantes de bombas deben informar del volumen que bombeado en cada ciclo a la bomba para poder calcular el consumo de vapor.

La Figura 31 nos muestra un contador de ciclos montado en una bomba mecánica para fluidos como la mencionada anteriormente.



# Instalación del medidor de caudal en sistemas de vapor

Todos los suministradores de medidores de caudal deben poder ofrecer consejos y recomendaciones de los requisitos de instalación de sus medidores. Siempre hay que pedir la información sobre los requisitos específicos necesarios para la instalación del medidor de caudal, como los tramos rectos de tubería sin obstáculos aguas arriba y aguas abajo

Sin embargo, hay algunas recomendaciones específicas que no son sobre la instalación de medidor de caudal, que son esenciales para una actuación correcta del medidor de caudal de vapor.

Las estadísticas nos muestran que casi el 30% de los problemas encontrados en medidores de caudal se deben a una instalación deficiente. Ningún medidor de caudal de vapor, no importa lo bueno que sea su diseño y su fabricación, puede trabajar correctamente si no se presta atención a su instalación y a la disposición del sistema de vapor.

## Calidad del vapor

El punto de medición el vapor debe estar siempre lo más seco posible es decir de buena calidad. El vapor húmedo puede causar grandes errores en la medición y puede dañar físicamente algunos tipos de medidor de caudal. Un método simple pero eficaz de eliminar el agua del vapor es instalar un separador (Figura 32) aguas arriba del medidor de caudal. Ver página 41 sobre la fracción seca.

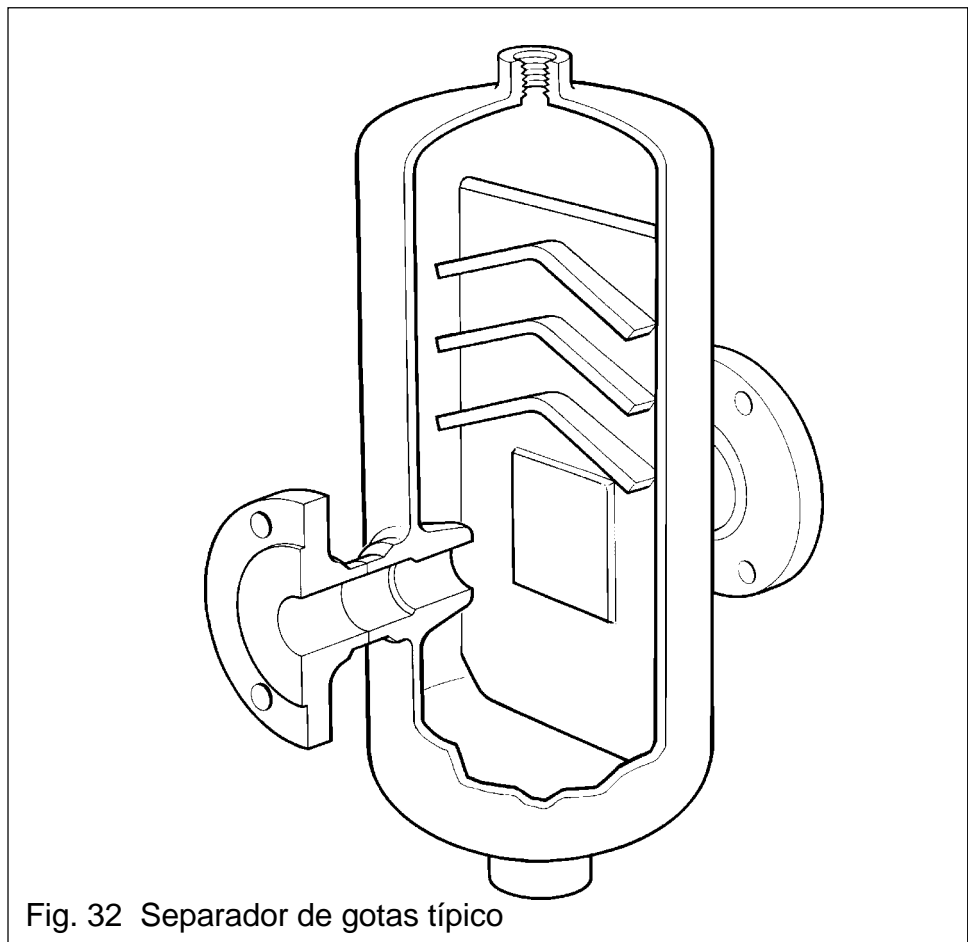


Fig. 32 Separador de gotas típico

Las gotas chocan con los deflectores y caen al fondo y se desalojan con un purgador dimensionado y seleccionado correctamente. Pruebas independientes demuestran lo sumamente eficaz que es el separador. En un medidor de caudal de vapor que se le puede introducir la fracción seca, se puede usar una fracción seca de 99% si se instala un separador como parte de la instalación de medidor de caudal de vapor.

El separador tiene un otro beneficio importante. Las olas de agua que impactan en el medidor de caudal de vapor causarían daños mecánicos graves. Instalando un separador delante de un medidor de caudal de vapor se reducirá la presión de impacto de tales olas de agua hasta en un 90%, proporcionando una protección considerable al dispositivo de medición de caudal.

Un filtro (Figura 33) debe instalarse delante del medidor de caudal. Este retendrá partículas grandes de incrustaciones o virutas que dañarían el dispositivo primario. (El tamiz interno debe limpiarse periódicamente - particularmente después de la primera puesta en marcha de una nueva instalación.

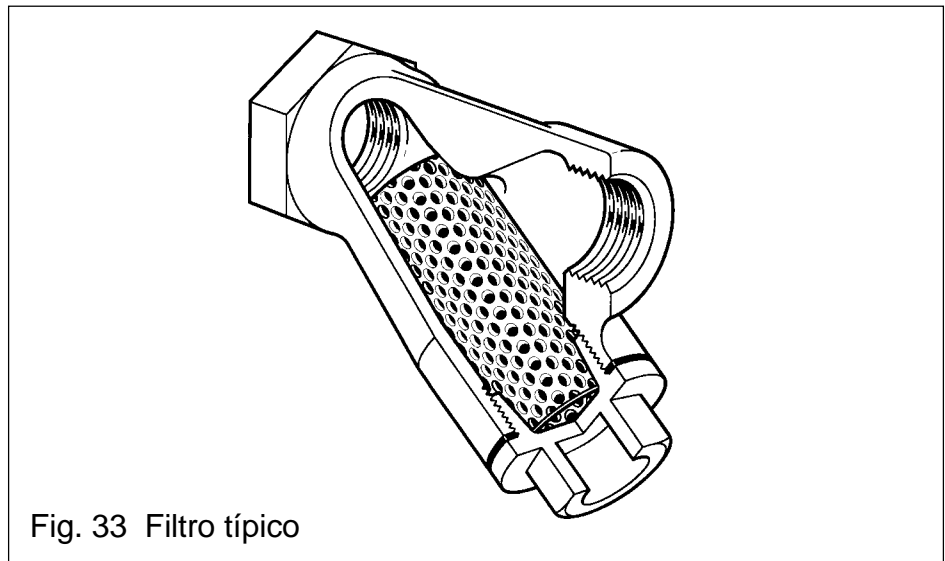
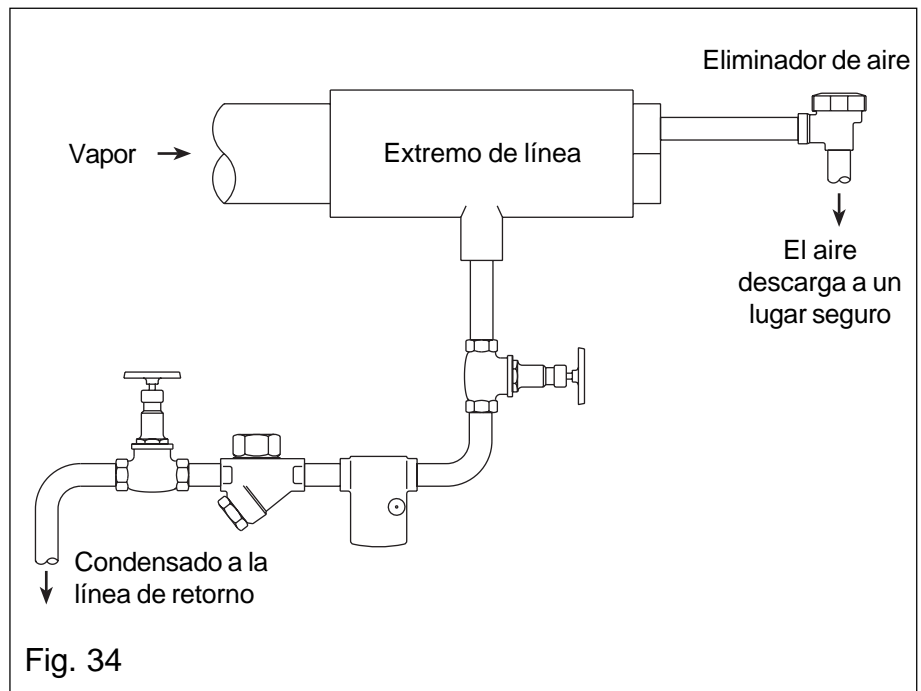


Fig. 33 Filtro típico

El separador con su purgador formará un punto adecuado para el desalojo del condensado de la línea delante del medidor de caudal. Pero cualquier punto bajo donde se eleve la línea principal de vapor a un nivel más alto también debe tener puntos de purga dimensionados y seleccionados correctamente. También se debe asegurar la eliminación de aire y otros gases instalando un eliminador de aire en la línea de vapor. El separador mostrado en la Figura 32 tiene una conexión de la parte superior para un eliminador de aire automático que elimine los gases no condensables antes de la estación de medición. La Figura 34 nos muestra un punto de purga y eliminación de aire en un extremo de una línea principal de vapor.





Como puede ser necesario realizar inspecciones, mantenimientos y quizás incluso retirar para calibrar, deberán colocarse válvulas de aislamiento a ambos lados del medidor. Estas válvulas deben ser del tipo ON - OFF y que presenten la mínima resistencia al fluido, como válvulas de esfera de paso total. Además un by-pass con válvulas para actuar como un reemplazo temporal si el medidor de caudal se retira de la línea, resolverá el problema de interrumpir el suministro de vapor durante los mantenimientos. Las tuberías y el medidor deben estar adecuadamente soportados y alineados con una caída al último punto de desagüe antes del medidor de caudal. Las tuberías también deben estar adecuadamente y eficazmente aisladas para minimizar las pérdidas de la radiación y el aumento de condensado.

### Recomendaciones para la instalación

1. Las tuberías deben estar adecuadamente soportadas y alineadas. Así se evitará el anegamiento durante las paradas y la posibilidad de problemas en la puesta en marcha.
2. Dimensionar el medidor según la capacidad más que con el tamaño de la tubería. Cuando se necesite reducciones, que sean reducciones excéntricas.
3. Siempre observar el sentido del flujo, generalmente irá marcado con una flecha en el cuerpo del medidor.
4. Se recomienda la instalación de una válvula de retención aguas abajo del transductor para evitar daños por el retorno.
5. No instalar el medidor de caudal aguas abajo de una estación reductora de presión ya que puede producir errores o daños.
6. Por la misma razón, no instalar un medidor de caudal aguas abajo de una válvula de interrupción parcialmente abierta.

7. Evitar la instalación del medidor de caudal aguas abajo de una válvula con actuador que puede causar variaciones bruscas de caudal, que pueden causar daños.
8. Siempre debe instalarse un separador de gotas aguas arriba del medidor de caudal para eliminar la humedad del vapor. Se precisa de vapor seco para medir con precisión. También proporciona cierta protección a los golpes de ariete.
9. El drenaje del separador debe ser con un purgador de boya.
10. Deberá utilizarse un filtro del tamaño de la línea con malla de 100 mesh de acero inoxidable para evitar que la suciedad y las incrustaciones lleguen al transductor. Se recomienda en instalaciones viejas y sucias donde hay suciedad y corrosión.
11. Las juntas no deben asomar dentro de la tubería.
12. Se puede instalar una válvula de interrupción de fuelle aguas arriba del medidor de caudal.
13. Deben tener los tramos rectos sin obstrucciones recomendados aguas arriba y aguas abajo del medidor de caudal. X + Y se le conoce como 'Tramo del medidor'.

Es muy importante mantener los tramos rectos sin obstrucciones aguas arriba y aguas abajo del medidor de caudal, para evitar la formación de torbellinos que se pueden producir con los codos, válvulas parcialmente abiertas etc.

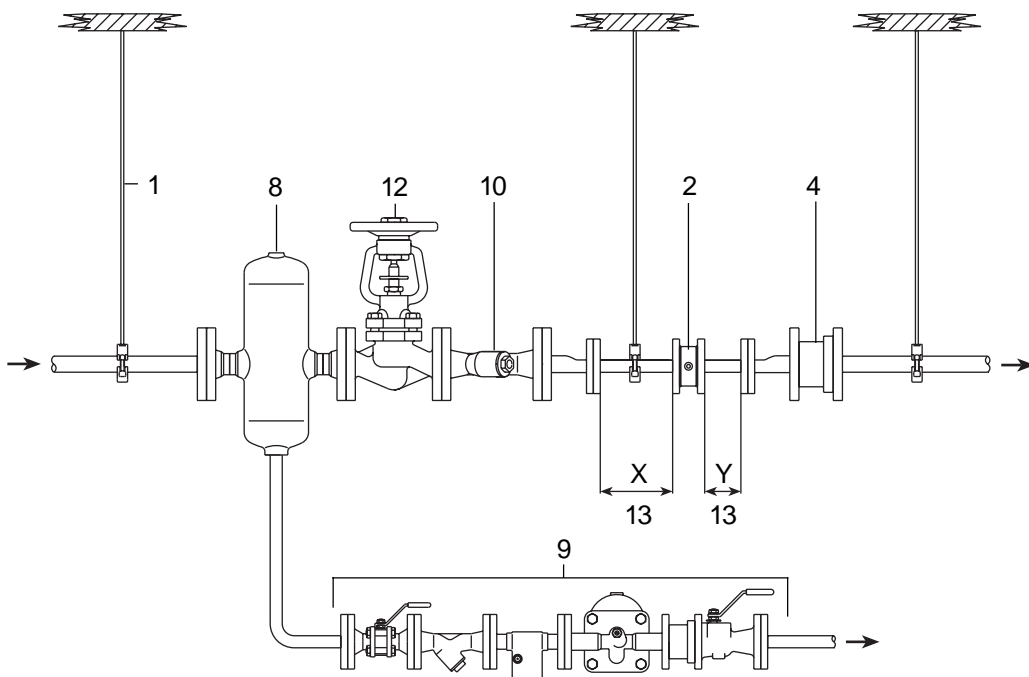


Fig. 35

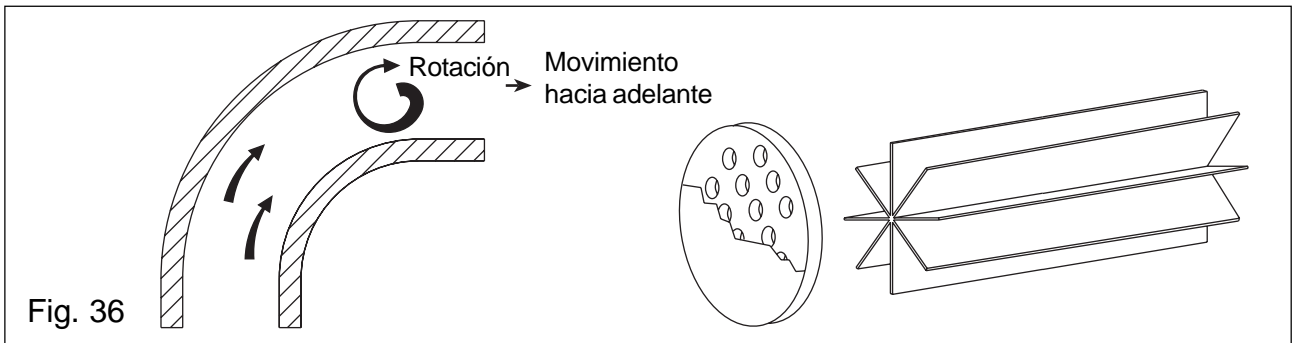


Fig. 36

Algunos medidores de caudal son más susceptibles a los torbellinos que otros. Algunos fabricantes recomiendan el uso de enderezadores para evitar los torbellinos. De todos modos, es preferible hacer todo lo posible para evitar la formación de torbellinos proporcionando el tramo del medidor correcto ya que los enderezadores pueden contener agua. Incluso puede ser mejor seleccionar un medidor que sea menos susceptible a los efectos de los torbellinos.

El dimensionado correcto del medidor de caudal es esencial y la mayoría de los fabricantes recomiendan caudales máximos y mínimos para cada tamaño de medidor.

Si el medidor que se va a utilizar es más pequeño que la línea en la que se va a montar, las reducciones en las tuberías deberán realizarse con reducciones excéntricas (Figura 37). De este modo se evitará la acumulación de condensado en un punto bajo - que sería el caso si se usan reducciones concéntricas. La reducción en el tamaño de tubería se debe realizar lo más cercano al medidor siempre que no interfiera en el tramo del medidor.

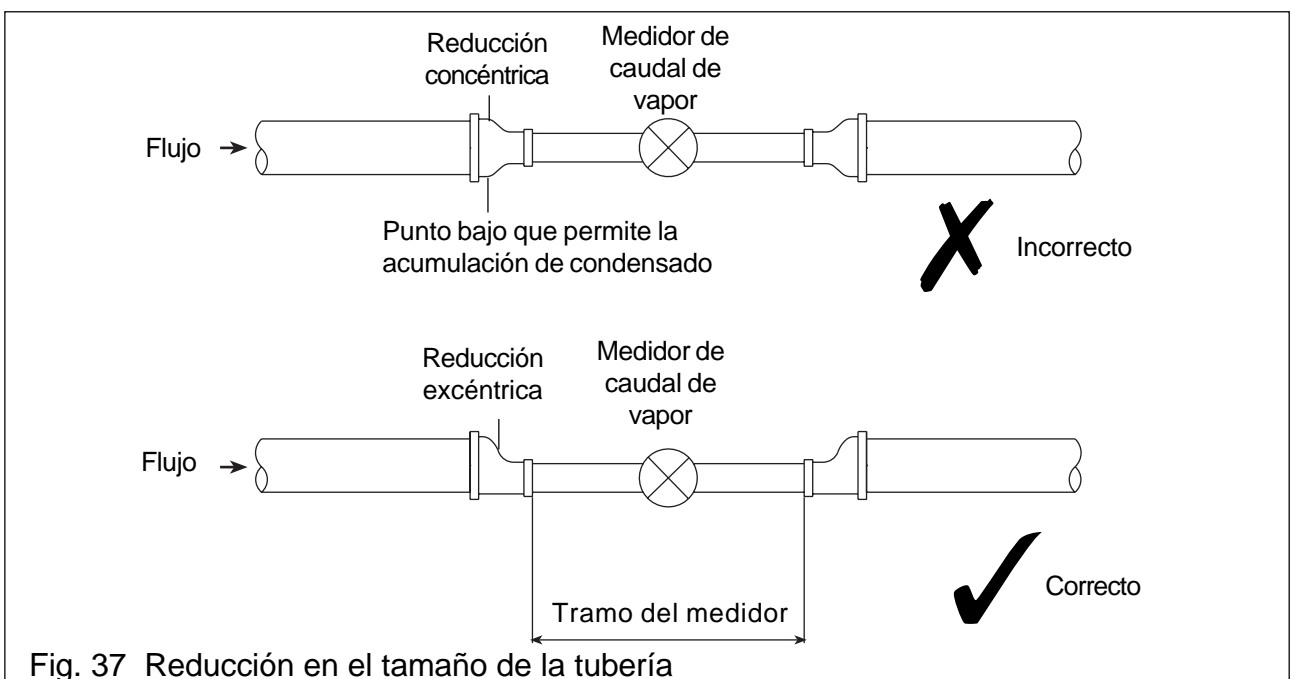


Fig. 37 Reducción en el tamaño de la tubería

# Consideraciones en el diseño del sistema

Es muy importante que desde el principio se efectúe una aproximación al tema muy bien estructurada para asegurarse de que:

- Se alcanzan los objetivos del diseño.
- No se omiten elementos del diseño.
- Se maximizan los beneficios.
- Los costes se minimizan.

Hay dos aspectos importantes a tener en cuenta en esta aproximación.

## 1. Consideraciones respecto al sistema de suministro de vapor.

Se deben identificar los cambios previstos en la planta o en el proceso que puedan afectar la instalación de los medidores de vapor y se debe considerar si la instalación de los medidores puede actuar como catalizador de estos cambios. Las alteraciones pueden referirse a la eliminación de tuberías redundantes, a cambios de sentido del vapor en el sistema de tuberías, la mejora del aislamiento ... y pueden representar una disminución en las necesidades de medir.

## 2. Identificando la necesidad de instalar los medidores.

Generalmente, puede ser por una o varias de las siguientes razones.

- Para proporcionar información de contabilidad, por ej. fijar costes por departamentos.
- Para poder vender vapor a terceros, es decir, cuando una estación central vende vapor a varios clientes.
- Para facilitar la definición de necesidades de mantenimiento y observar las tendencias.
- Para determinar niveles de eficiencia energética.

Cada objetivo impone limitaciones distintas en el diseño del sistema de medida de vapor.

En los dos primeros casos se debe instalar el número suficiente de contadores con el fin de que se puedan efectuar las imputaciones con precisión. Si el producto a vender es calor más que vapor, se deberán instalar también medidores en el retorno de condensados. Para ambos casos se necesitarán contadores de gran calidad en relación con los tres factores de precisión, repetitividad y rango. Además se deberán tomar las medidas de verificación necesarias para que se tenga confianza total en el sistema. Hay que tener en cuenta que si se pierde la confianza es muy difícil recuperarla.

### Determinar la disposición de los medidores de caudal

Cualquier sistema debe incluir también medidas de las pérdidas debidas al hecho de suministrar a un consumidor determinado. Para ello se deben colocar medidores tan cerca como se pueda de la caldera.

En aplicaciones de mantenimiento o de medida de la eficiencia de procesos el criterio importante es la repetitividad, puesto que el usuario está más interesado en las variaciones que en los valores absolutos. En estos casos se necesitará menos precisión.

Una vez se han definido las necesidades del sistema, se puede determinar el número de contadores necesarios considerando siempre de qué manera se puede abaratar el conjunto utilizando métodos alternativos como puede ser la medida del condensado en un tanque del que ya disponga el sistema.

La figura 38 muestra cuatro opciones distintas para el mismo sistema:

**Diagrama 1** el consumo individual de cada área se mide directamente excepto para el área B que se obtiene por diferencia. La desventaja de esta opción es que la mayoría de pérdidas del sistema se incluirán en el consumo de esta área B.

**Diagrama 2** usa el mismo número de medidores que la 1, éstos están colocados de manera que las pérdidas se reparten mejor entre las diferentes áreas puesto que se miden las inherentes a cada suministro.

**Diagrama 3** los caudales se miden en la entrada de cada zona y las pérdidas se obtienen por diferencia. Este esquema utiliza dos medidores más que los anteriores pero da lecturas directas y no hay que hacer sustracciones.

**Diagrama 4** muestra los beneficios de los Diagramas 1 y 2 ya que usa cinco medidores de caudal pero permite determinar y asignar los costes del caudal de las líneas de vapor individuales de una manera equilibrada.

Estos cuatro diagramas nos muestran como la conexión de varios medidores de caudal de vapor pueden afectar los resultados que se obtengan y influenciar el análisis de los datos.

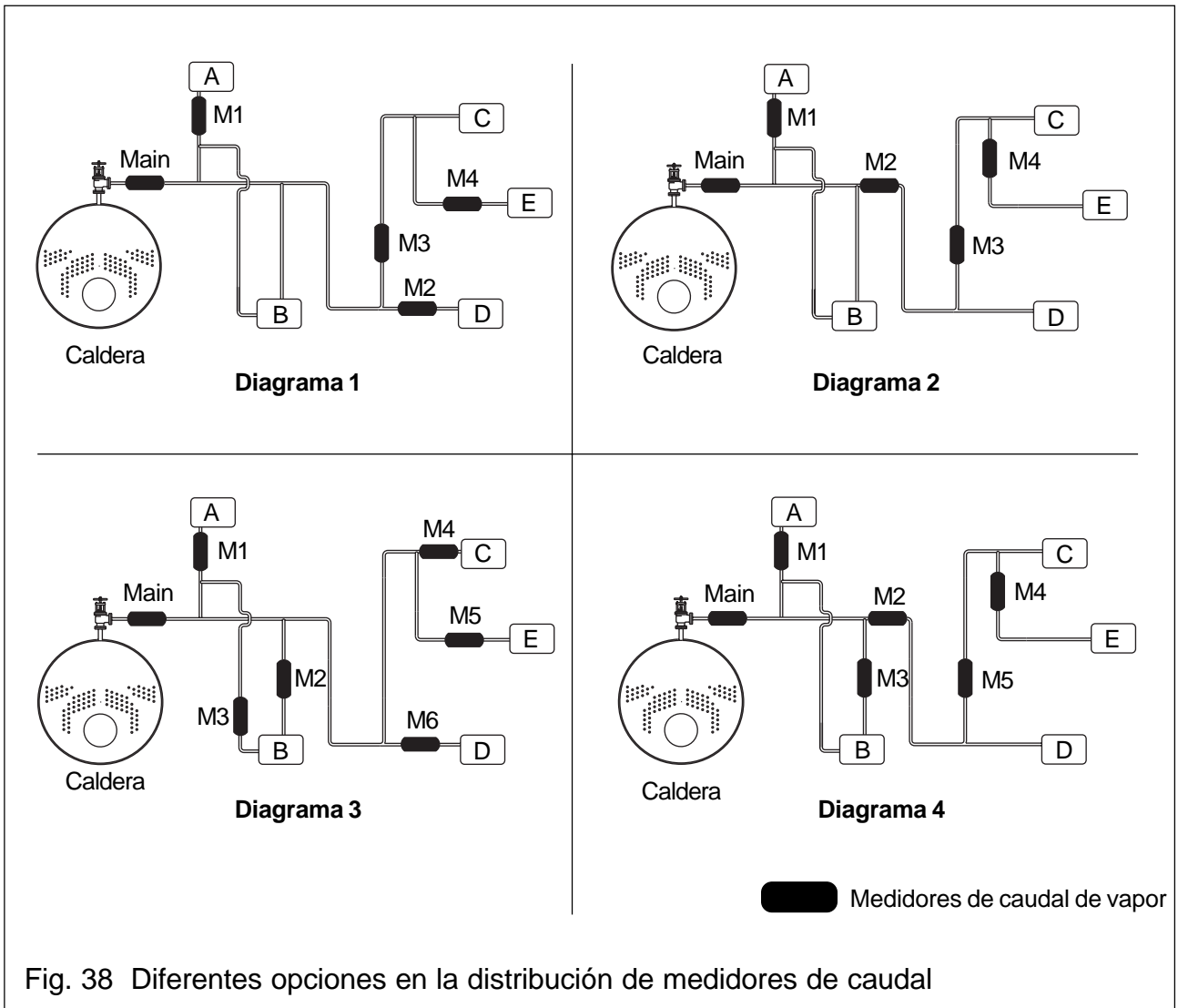


Fig. 38 Diferentes opciones en la distribución de medidores de caudal

Algunos factores a tomar en cuenta cuando se selecciona un medidor de caudal de vapor son:-

<b>Características</b>	Precisión . Repetibilidad. Rango. Pérdida de carga. Datos que se obtienen y presentación.
<b>Mantenimiento</b>	Fiabilidad. Necesidades de calibración . Recambios necesarios o esquema de cambio de servicio. Facilidad de mantenimiento.
<b>Coste</b>	Coste del medidor. Coste de los instrumentos asociados. Coste de instalación. Coste total durante la vida del medidor.
<b>Otros</b>	Reputación del fabricante. Apoyo que nos pueda dar el fabricante. Necesidades de calibración inicial. Compensación de densidad. Posibilidad de transmisión de datos. Posibilidad de asociarle otra instrumentación. Calidad de la literatura e información proporcionadas.

Estos puntos deben considerarse de una manera colectiva. Por ejemplo, puede ser un error seleccionar el medidor de caudal solo por la precisión cuando a menudo tiene que haber un equilibrio entre precisión y fiabilidad. Los medidores de caudal más fiables son a menudo los más delicados y pueden sufrir mucho cuando trabajan con vapor. Sería mejor buscar una precisión razonable con una buena repetibilidad y que se demuestre fiable al medir vapor.

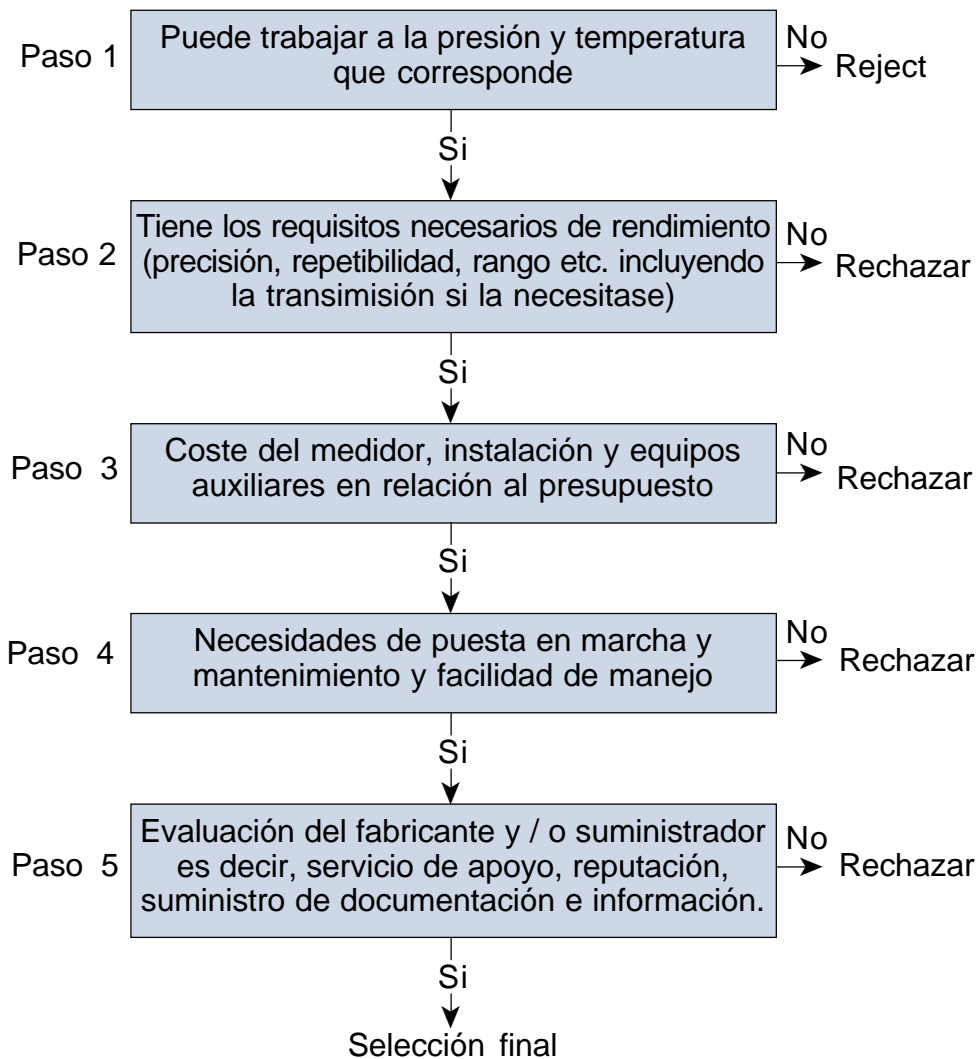
A continuación ofrecemos una ayuda en la selección de un medidor de caudal de vapor con las preguntas que debemos realizar.

- ¿Cuál es la aplicación?  
(Medidor de sala de calderas, de departamento, etc.)
- ¿Qué tamaño tiene la línea?
- ¿Cuál es la presión y temperatura?
- ¿Cuál es el objeto de la medición?  
(Distribución de costes, comprobar la eficiencia de la planta, control de ahorro de energía etc.)

- ¿Qué quieres que indique la instrumentación del medidor? (Caudal, cantidad másica o volumétrica etc.)
- ¿Cuál es el caudal máximo, mínimo y / o medio?
- ¿Qué precisión, repetibilidad y rango requieres?
- ¿De qué presupuesto disponemos?
- ¿Cuánto del presupuesto es para gastos de instalación y cuánto para equipos auxiliares ?
- ¿Quién instalará el medidor de caudal?
- ¿Quién pondrá en marcha al medidor de caudal?
- ¿Quién será el usuario del medidor de caudal?
- ¿Quién realizará el mantenimiento del medidor de caudal?
- ¿Quieres transmitir desde el medidor a un registrador o a un sistema de gestión de energía?
- ¿Estamos limitados por el tamaño físico?
- ¿Esta diseñado el medidor para trabajar con vapor?
- ¿Necesita alguna característica más - alarmas remotas, temporizadores, etc. ?

Una vez realizada la evaluación habrá que seguir los pasos de página 56 para hacer una selección final.





# Conclusión

Las dificultades en la supervisión de energía de vapor provienen del hecho que es a menudo un servicio 'gratuito' (sin medir).

## **La medición es esencial si se quiere reducir costes.**

La mayoría de las plantas obtienen sus cifras en el coste anual del combustible. Sin embargo, incluso estas cifras pueden ser dudosas cuando un suministro proporciona combustible a varios usuarios. También, si medimos el consumo total de combustible de dos o más calderas diferentes, puede esconderse información útil.

El gas o fuel pueden medirse fácilmente. Medir vapor es más difícil - por esta razón se explica que a menudo sea un servicio 'gratuito'. ¿Si se mide el vapor, la medición es exacta? La mayoría de los medidores de caudal realizan medidas de volumen, en cambio, el vapor se calcula por su caudal másico. Para convertir un volumen en másico, es esencial la compensación de densidad.

Es fácil aceptar la lectura de un instrumento viendo el gráfico. La mayoría de los medidores de caudal, sin embargo, se calibran con un medio que no es vapor, con un factor de la corrección para convertir la escala de la lectura en una cantidad real. ¿Se ha olvidado esto? Un factor de medidor de caudal que cercano a 1 todavía puede tener un efecto significativo en la eficacia de la caldera o en calcular el coste de vapor.

De vez en cuando los medidores de caudal deben comprobarse para asegurarse que no hay corrosión de cualquier orificio de medición o cualquier cambio similar en el de dispositivo primario.

Aunque a menudo la medición de caudal de vapor está confinada a la sala de calderas, puede ser muy útil en otras partes del sistema. Es esencial donde haya que calcularse el coste del vapor. Es información esencial para el gerente de la planta encargado de conservar energía o mejorar la eficacia o calidad de la producción.

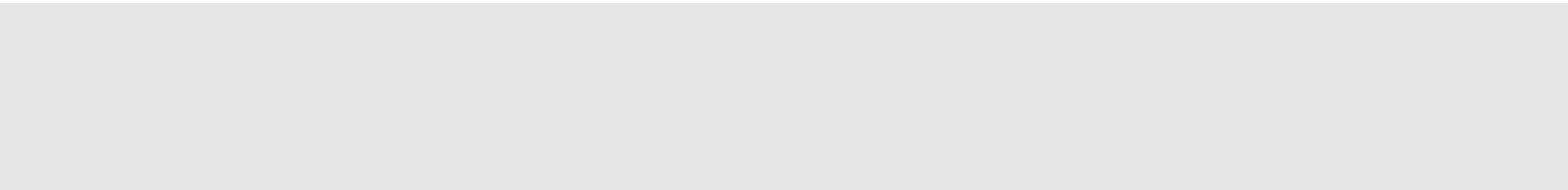
Los medidores de caudal de vapor proporcionan información útil sobre el rendimiento de la planta, suciedad en las superficies de intercambio o el funcionamiento defectuoso de los purgadores.

## **Las lecturas de medidor de caudal proporcionan la única manera positiva de evaluación cuando se realizan planes o mejoras en el ahorro de vapor.**

# Tablas de vapor

Presión		Temperatura °C	Entalpía específica			Volumen específico del vapor m <sup>3</sup> /kg
bar	kPa		Agua (h <sub>f</sub> ) kJ/kg	Evaporación (h <sub>fg</sub> ) kJ/kg	Vapor (h <sub>g</sub> ) kJ/kg	
absoluta						
0,30	30,0	69,10	289,23	2 336,1	2 625,3	5,229
0,50	50,0	81,33	340,49	2 305,4	2 645,9	3,240
0,75	75,0	91,78	384,39	2 278,6	2 663,0	2,217
0,95	95,0	98,20	411,43	2 261,8	2 673,2	1,777
manométrica						
0	0	100,00	419,04	2 257,0	2 676,0	1,673
0,10	10,0	102,66	430,2	2 250,2	2 680,2	1,533
0,20	20,0	105,10	440,8	2 243,4	2 684,2	1,414
0,30	30,0	107,39	450,4	2 237,2	2 687,6	1,312
0,40	40,0	109,55	459,7	2 231,3	2 691,0	1,225
0,50	50,0	111,61	468,3	2 225,6	2 693,9	1,149
0,60	60,0	113,56	476,4	2 220,4	2 696,8	1,088
0,70	70,0	115,40	484,1	2 215,4	2 699,5	1,024
0,80	80,0	117,14	491,6	2 210,5	2 702,1	0,971
0,90	90,0	118,80	498,9	2 205,6	2 704,5	0,923
1,00	100,0	120,42	505,6	2 201,1	2 706,7	0,881
1,10	110,0	121,96	512,2	2 197,0	2 709,2	0,841
1,20	120,0	123,46	518,7	2 192,8	2 711,5	0,806
1,30	130,0	124,90	524,6	2 188,7	2 713,3	0,773
1,40	140,0	126,28	530,5	2 184,8	2 715,3	0,743
1,50	150,0	127,62	536,1	2 181,0	2 717,1	0,714
1,60	160,0	128,89	541,6	2 177,3	2 718,9	0,689
1,70	170,0	130,13	547,1	2 173,7	2 720,8	0,665
1,80	180,0	131,37	552,3	2 170,1	2 722,4	0,643
1,90	190,0	132,54	557,3	2 166,7	2 724,0	0,622
2,00	200,0	133,69	562,2	2 163,3	2 725,5	0,603
2,20	220,0	135,88	571,7	2 156,9	2 728,6	0,568
2,40	240,0	138,01	580,7	2 150,7	2 731,4	0,536
2,60	260,0	140,00	589,2	2 144,7	2 733,9	0,509
2,80	280,0	141,92	597,4	2 139,0	2 736,4	0,483
3,00	300,0	143,75	605,3	2 133,4	2 738,7	0,461
3,20	320,0	145,46	612,9	2 128,1	2 741,0	0,440
3,40	340,0	147,20	620,0	2 122,9	2 742,9	0,422
3,60	360,0	148,84	627,1	2 117,8	2 744,9	0,405
3,80	380,0	150,44	634,0	2 112,9	2 746,9	0,389
4,00	400,0	151,96	640,7	2 108,1	2 748,8	0,374
4,50	450,0	155,55	656,3	2 096,7	2 753,0	0,342
5,00	500,0	158,92	670,9	2 086,0	2 756,9	0,315
5,50	550,0	162,08	684,6	2 075,7	2 760,3	0,292
6,00	600,0	165,04	697,5	2 066,0	2 763,5	0,272
6,50	650,0	167,83	709,7	2 056,8	2 766,5	0,255
7,00	700,0	170,50	721,4	2 047,7	2 769,1	0,240
7,50	750,0	173,02	732,5	2 039,2	2 771,7	0,227
8,00	800,0	175,43	743,1	2 030,9	2 774,0	0,215
8,50	850,0	177,75	753,3	2 022,9	2 776,2	0,204
9,00	900,0	179,97	763,0	2 015,1	2 778,1	0,194
9,50	950,0	182,10	772,5	2 007,5	2 780,0	0,185
10,00	1 000,0	184,13	781,6	2 000,1	2 781,7	0,177
10,50	1 050,0	186,05	790,1	1 993,0	2 783,3	0,171
11,00	1 100,0	188,02	798,8	1 986,0	2 784,8	0,163
11,50	1 150,0	189,82	807,1	1 979,1	2 786,3	0,157
12,00	1 200,0	191,68	815,1	1 972,5	2 787,6	0,151
12,50	1 250,0	193,43	822,9	1 965,4	2 788,8	0,148
13,00	1 300,0	195,10	830,4	1 959,6	2 790,0	0,141
14,00	1 400,0	198,35	845,1	1 947,1	2 792,2	0,132
15,00	1 500,0	201,45	859,0	1 935,0	2 794,0	0,124
16,00	1 600,0	204,38	872,3	1 923,4	2 795,7	0,117
17,00	1 700,0	207,17	885,0	1 912,1	2 797,1	0,110
18,00	1 800,0	209,90	897,2	1 901,3	2 798,5	0,105
19,00	1 900,0	212,47	909,0	1 890,5	2 799,5	0,100
20,00	2 000,0	214,96	920,3	1 880,2	2 800,5	0,099 4
21,00	2 100,0	217,35	931,3	1 870,1	2 801,4	0,090 6
22,00	2 200,0	219,65	941,9	1 860,1	2 802,0	0,086 8
23,00	2 300,0	221,85	952,2	1 850,4	2 802,6	0,083 2
24,00	2 400,0	224,02	962,2	1 840,9	2 803,1	0,079 7
25,00	2 500,0	226,12	972,1	1 831,4	2 803,5	0,076 8
26,00	2 600,0	228,15	981,6	1 822,2	2 803,8	0,074 0
27,00	2 700,0	230,14	990,7	1 813,3	2 804,0	0,071 4

Presión		Temperatura °C	Entalpía específica			Volumen específico del vapor m³/kg
bar	kPa		Agua (h <sub>f</sub> ) kJ/kg	Evaporación (h <sub>fg</sub> ) kJ/kg	Vapor (h <sub>g</sub> ) kJ/kg	
28,00	2 800,0	232,05	999,7	1 804,4	2 804,1	0,068 9
29,00	2 900,0	233,93	1 008,6	1 795,6	2 804,2	0,066 6
30,00	3 000,0	235,78	1 017,0	1 787,0	2 804,1	0,064 5
31,00	3 100,0	237,55	1 025,6	1 778,5	2 804,1	0,062 5
32,00	3 200,0	239,28	1 033,9	1 770,0	2 803,9	0,060 5
33,00	3 300,0	240,97	1 041,9	1 761,8	2 803,7	0,058 7
34,00	3 400,0	242,63	1 049,7	1 753,8	2 805,5	0,057 1
35,00	3 500,0	244,26	1 057,7	1 745,5	2 803,2	0,055 4
36,00	3 600,0	245,86	1 065,7	1 737,2	2 802,9	0,053 9
37,00	3 700,0	247,42	1 072,9	1 729,5	2 802,4	0,052 4
38,00	3 800,0	248,95	1 080,3	1 721,6	2 801,9	0,051 0
39,00	3 900,0	250,42	1 087,4	1 714,1	2 801,5	0,049 8
40,00	4 000,0	251,94	1 094,6	1 706,3	2 800,9	0,048 5
41,00	4 100,0	253,34	1 101,6	1 698,3	2 799,9	0,047 3
42,00	4 200,0	254,74	1 108,6	1 691,2	2 799,8	0,046 1
43,00	4 300,0	256,12	1 115,4	1 683,7	2 799,1	0,045 1
44,00	4 400,0	257,50	1 122,1	1 676,2	2 798,3	0,044 1
45,00	4 500,0	258,82	1 128,7	1 668,9	2 797,6	0,043 1
46,00	4 600,0	260,13	1 135,3	1 666,6	2 796,9	0,042 1
47,00	4 700,0	261,43	1 142,2	1 654,4	2 796,6	0,041 2
48,00	4 800,0	262,73	1 148,1	1 647,1	2 795,2	0,040 3
49,00	4 900,0	264,00	1 154,5	1 639,9	2 794,4	0,039 4
50,00	5 000,0	265,26	1 160,8	1 632,8	2 793,6	0,038 6
51,00	5 100,0	266,45	1 166,6	1 626,9	2 792,6	0,037 8
52,00	5 200,0	267,67	1 172,6	1 619,0	2 791,6	0,037 1
53,00	5 300,0	268,84	1 178,7	1 612,0	2 790,7	0,036 4
54,00	5 400,0	270,02	1 184,6	1 605,1	2 789,7	0,035 7
55,00	5 500,0	271,20	1 190,5	1 598,2	2 788,7	0,035 0
56,00	5 600,0	272,33	1 196,3	1 591,3	2 787,6	0,034 3
57,00	5 700,0	273,45	1 202,1	1 584,5	2 786,6	0,033 7
58,00	5 800,0	274,55	1 207,8	1 577,7	2 785,5	0,033 1
59,00	5 900,0	275,65	1 213,4	1 571,0	2 784,4	0,032 5
60,00	6 000,0	276,73	1 218,9	1 564,4	2 783,3	0,031 9
61,00	6 100,0	277,80	1 224,5	1 557,6	2 782,1	0,031 4
62,00	6 200,0	278,85	1 230,0	1 550,9	2 780,9	0,030 8
63,00	6 300,0	279,89	1 235,4	1 544,3	2 779,7	0,030 3
64,00	6 400,0	280,92	1 240,8	1 537,3	2 778,5	0,029 8
65,00	6 500,0	281,95	1 246,1	1 531,2	2 777,3	0,029 3
66,00	6 600,0	282,95	1 251,4	1 524,7	2 776,1	0,028 8
67,00	6 700,0	283,95	1 256,7	1 518,1	2 774,8	0,028 3
68,00	6 800,0	284,93	1 261,9	1 511,6	2 773,5	0,027 8
69,00	6 900,0	285,90	1 267,0	1 505,1	2 772,1	0,027 4
70,00	7 000,0	286,85	1 272,1	1 498,7	2 770,8	0,027 0
72,00	7 200,0	288,75	1 282,3	1 485,8	2 768,1	0,026 2
74,00	7 400,0	290,60	1 292,3	1 473,0	2 765,3	0,025 4
76,00	7 600,0	292,41	1 302,3	1 460,2	2 762,5	0,024 6
78,00	7 800,0	294,20	1 311,9	1 447,6	2 759,5	0,023 9
80,00	8 000,0	295,96	1 321,5	1 435,0	2 756,5	0,023 3
82,00	8 200,0	297,66	1 330,9	1 422,5	2 753,4	0,022 6
84,00	8 400,0	299,35	1 340,3	1 410,0	2 750,3	0,022 0
86,00	8 600,0	301,00	1 349,6	1 397,6	2 747,2	0,021 4
88,00	8 800,0	302,61	1 358,8	1 385,2	2 744,0	0,020 8
90,00	9 000,0	304,20	1 367,8	1 372,7	2 740,5	0,020 2
92,00	9 200,0	305,77	1 376,8	1 360,3	2 737,1	0,019 7
94,00	9 400,0	307,24	1 385,7	1 348,0	2 733,7	0,019 2
96,00	9 600,0	308,83	1 394,5	1 335,7	2 730,2	0,018 7
98,00	9 800,0	310,32	1 403,2	1 323,3	2 726,5	0,018 3
100,00	10 000,0	311,79	1 411,9	1 310,9	2 722,8	0,017 8
102,00	10 200,0	313,24	1 420,5	1 298,7	2 719,2	0,017 4
104,00	10 400,0	314,67	1 429,0	1 286,3	2 715,3	0,017 0
106,00	10 600,0	316,08	1 437,5	1 274,0	2 711,5	0,016 6
108,00	10 800,0	317,46	1 445,9	1 261,7	2 707,6	0,016 2
110,00	11 000,0	318,83	1 454,3	1 249,3	2 703,6	0,015 8
112,00	11 200,0	320,17	1 462,6	1 237,0	2 699,6	0,015 4
114,00	11 400,0	321,50	1 470,8	1 224,6	2 695,4	0,015 0
116,00	11 600,0	322,81	1 479,0	1 212,2	2 691,2	0,014 7
118,00	11 800,0	324,10	1 487,2	1 199,8	2 687,0	0,014 4
120,00	12 000,0	325,38	1 495,4	1 187,3	2 682,7	0,014 1



---

Spirax-Sarco Limited, Charlton House,  
Cheltenham, Gloucestershire, GL53 8ER UK.  
Tel: +44 (0)1242 521361 Fax: +44 (0)1242 573342  
E-mail: [Enquiries@SpiraxSarco.com](mailto:Enquiries@SpiraxSarco.com)  
Internet: [www.SpiraxSarco.com](http://www.SpiraxSarco.com)

© Copyright 1998 Spirax Sarco is a registered trademark of Spirax-Sarco Limited

**spirax**  
**/sarco**

**TR-GCM-10**

CM Issue 1