

| | |
|--|------------|
| 3.3 Elementos electromecánicos..... | 96 |
| 3.4 Elementos electrónicos de vacío | 100 |
| 4. Medidas de caudal | 105 |
| 4.1 Medidores volumétricos | 106 |
| 4.1.1 Instrumentos de presión diferencial..... | 106 |
| 4.1.2 Área variable (rotámetros)..... | 143 |
| 4.1.3 Velocidad..... | 153 |
| 4.1.4 Fuerza (medidor de placa)..... | 161 |
| 4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)..... | 162 |
| 4.1.6 Desplazamiento positivo | 175 |
| 4.1.7 Remolino y vórtex | 179 |
| 4.2 Medidores de caudal masa..... | 182 |
| 4.2.1 Medidores volumétricos compensados..... | 182 |
| 4.2.2 Medidores térmicos de caudal | 185 |
| 4.2.3 Anemómetro de hilo caliente | 186 |
| 4.2.4 Medidor de Coriolis | 189 |
| 4.3 Comparación de características de los medidores de caudal..... | 193 |
| 5. Medición de nivel..... | 195 |
| 5.1 Medidores de nivel de líquidos | 195 |
| 5.1.1 Instrumentos de medida directa..... | 196 |
| 5.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática..... | 200 |
| 5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento | 208 |
| 5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido | 211 |
| 5.1.5 Medidor de nivel de ultrasonidos..... | 215 |
| 5.1.6 Medidor de nivel de radar o microondas | 217 |
| 5.1.7 Medidor de nivel de radiación | 220 |
| 5.1.8 Medidor de nivel láser | 223 |
| 5.1.9 Otros fenómenos..... | 224 |
| 5.1.10 Medidor másico de nivel | 225 |
| 5.2 Medidores de nivel de sólidos..... | 226 |
| 5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo..... | 228 |
| 5.2.2 Detectores de nivel continuos | 230 |
| 6. Medida de temperaturas | 235 |
| 6.1 Introducción | 235 |
| 6.2 Termómetro de vidrio..... | 236 |
| 6.3 Termómetro bimetálico | 236 |
| 6.4 Termómetros de bulbo y capilar | 237 |
| 6.5 Termómetros de resistencia | 240 |
| 6.6 Termistores | 251 |
| 6.7 Sensores de temperatura de semiconductor..... | 253 |
| 6.8 Termopares | 254 |

Capítulo 4

Medidas de caudal

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de caudales de líquidos y gases.

Existen dos tipos de medidores, los volumétricos que determinan el caudal en volumen del fluido, y los de masa que determinan el caudal masa. Se reservan los medidores volumétricos para la medida general de caudal y se destinan los medidores de caudal másico a aquellas aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante, por ejemplo en las determinaciones finales del caudal del producto para su facturación.

Los principios de medida de los medidores de caudal son:

| Sistema | Elemento | Transmisor |
|--------------------------|---|---|
| Presión diferencial | Placa-orificio Tubería Tubo Venturi Tubo Pitot Tubo Annubar | conectados a tubo U o a elemento de fuelle o de diafragma |
| Área variable | Rotámetro | Equilibrio de fuerzas Silicio difundido |
| Velocidad | Vertedero con flotador en canales abiertos Turbinas Sondas ultrasónicas | Equilibrio de movimientos Potenciométrico Puente de Impedancias |
| Fuerza | Placa de impacto | Potenciométrico Piezoelectrónico |
| Tensión inducida | Medidor magnético | Equilibrio de fuerzas Galgas extensométricas Convertidor potenciométrico |
| Medidores volumétricos | Desplazamiento positivo | Disco giratorio Pistón oscilante Pistón alternativo |
| | Turborotor | Medidor rotativo Cicloidal Birrotor Oval |
| | Oscilante | Medidor paredes deformables Medidor de frecuencia de termistorancia, o condensador o ultrasonidos Válvula oscilante |
| Medidores de caudal masa | Compensación de presión y temperatura en medidores volumétricos | Generator tacometrónico o transductor de impulsos |
| | Térmico | Transductor de resistencia |
| | Momento | Transductor de impulsos |
| | Fuerza de Coriolis | Puente de Wheatstone Convertidor de par |

4.1 Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido, bien sea directamente (desplazamiento), bien indirectamente por deducción o inferencia (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

Es necesario señalar que la medida de caudal volumétrico en la industria se lleva a cabo principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa orificio o diafragma, la tobera, el tubo Venturi, el tubo Pitot y el tubo Annubar.

4.1.1 Instrumentos de presión diferencial

4.1.1.1 Fórmula general

Los elementos de presión diferencial se basan en la diferencia de presiones provocada por un estrechamiento en la tubería por donde circula el fluido (líquido, gas o vapor). La presión diferencial provocada por el estrechamiento es captada por dos tomas de presión situadas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del mismo, o bien a una corta distancia. Su valor es mayor que la pérdida de carga real que debe compensar el sistema de bombeo del fluido.

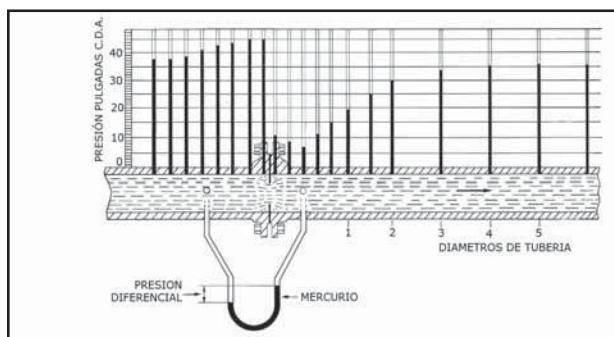


Figura 4.1 Presión diferencial creada por la placa orificio

La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernouilli (altura cinética + altura de presión + altura potencial = constante) a una tubería horizontal (figura 4.2).

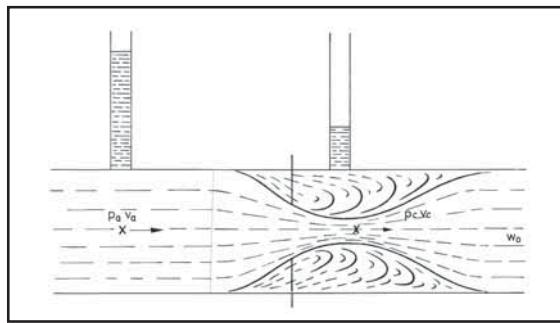
Sean P_a , P_c y V_a , V_c las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída, respectivamente, y S_a , S_c las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0}$$

y:

$$S_a V_a = S_c V_c$$

siendo ρ_0 la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

**Figura 4.2** Teorema de Bernouilli

De aquí se obtiene:

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2 \left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

y llamando d el diámetro del orificio, en m, y D el diámetro interior de la tubería aguas arriba, en m:

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

y llamando β a la relación de diámetros $\beta = d/D$, resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

y llamando $E = \frac{1}{1 - \beta^4}$ al coeficiente de velocidad de acercamiento, resulta:

$$V_c = E \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

y el caudal, en volumen, será:

$$Q_v = S_c V_c = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}} \text{ m}^3 / \text{s} = K \sqrt{\frac{h}{\rho_0}} \text{ m}^3 / \text{s}$$

y el caudal, en peso:

$$Q_m = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \times \rho_0} \text{ kg / s} = K \sqrt{H} \text{ kg / s}$$

expresando d en m; h , P_a y P_c en Pascal y ρ_0 en Kg/m^3 , y siendo K una constante, d el diámetro del orificio y h la presión diferencial producida por el elemento.

Estas fórmulas están limitadas a fluidos incompresibles. Así pues, de forma generalizada, el caudal volumétrico se puede expresar en función de la presión diferencial creada por un elemento depurímetro como:

$$Q_v = K \sqrt{H}$$

en la que H es la diferencia de alturas de presión del fluido y K es una constante empírica.

Estas fórmulas son aproximadas. En la práctica, se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

La fórmula anterior se afecta de un coeficiente adicional C , llamado "*coeficiente de descarga*", con lo cual:

$$Q_v = CE \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

Por otro lado, se encuentra que la relación:

$$\alpha = \frac{Q_v}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}}$$

llamada "*coeficiente de caudal*" sólo depende del número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{V \times D}{\nu} \quad \text{y} \quad Re_d = \frac{V \times D}{\nu} \times \frac{1}{\beta}$$

con V , la velocidad axial media del fluido aguas arriba y ν , la viscosidad cinemática del fluido.

De aquí:

$$C \times E = \alpha \quad \text{y} \quad C = \alpha/E$$

El caudal masa sería:

$$Q_m = Q_v \times \rho_0 = CE \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \times \rho_0} \text{ kg / s} = K \sqrt{H}$$

En el caso de un fluido compresible, su densidad varía en toda la sección de la vena ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico.

La expresión final que se obtiene es parecida a la de los fluidos incompresibles, introduciendo un coeficiente experimental de expansión ε para tener en cuenta la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo. No depende del número de Reynolds y es función de la relación de presiones, de la relación de calores específicos para los fluidos compresibles y de la relación de secciones del elemento y la tubería. La expresión final es:

$$Q_v = CE \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}} \text{ m}^3 / \text{s}$$

expresada en las mismas unidades que la ecuación correspondiente a los fluidos incompresibles. O bien en caudal masa:

$$Q_m = CE\epsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \times \rho_0} \text{ kg / s}$$

Si las presiones P_a y P_c se expresaran en bar (1 Pa = 10^{-5} bar) y los diámetros D y d en mm, las expresiones anteriores cambian a:

$$Q_v = CE\epsilon \frac{\pi^2}{4} \frac{d^2}{106} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0} \times 10^5} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4.1)$$

$$Q_m = CE\epsilon \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{d^2}{106} \right) \sqrt{2(P_a - P_c) \times 10^5 \rho_0} \text{ kg / s} \quad (4.2)$$

En el caso de que la densidad se calcule a partir de la densidad en condiciones normales, la fórmula anterior para fluidos compresibles es aplicable a los gases que sigan la ley de los gases perfectos. En la práctica, la ley no es exactamente verdadera cuando las presiones de servicio superan los 10 bar, debiendo notar que lo es tanto menos cuanto más se acerque el gas a las condiciones críticas.

| Elemento | Presión crítica — P_c | | Temperatura crítica — T_c | | Coeficiente isentrópico Z (C_p/C_v) |
|-------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|------|---|
| | psia | bars (abs) | ° F | ° C | |
| Ácido acético | 841 | 58,0 | 612 | 322 | |
| Acetona | 691 | 47,6 | 455 | 235 | |
| Acetileno | 911 | 62,9 | 97 | 36 | 1,24 |
| Aire | 547 | 37,8 | -222 | -141 | 1,41 |
| Amoníaco | 1638 | 113,0 | 270 | 132 | 1,31 |
| Argón | 705 | 48,6 | -188 | -122 | 1,67 |
| Benceno | 701 | 48,4 | 552 | 289 | |
| Butano | 529 | 36,5 | 307 | 153 | 1,10 |
| Dióxido de carbono | 1072 | 74,0 | 88 | 31 | 1,30 |
| Monóxido de carbono | 514 | 25,5 | -218 | -139 | 1,40 |
| Tetracloruro de carbono | 661 | 45,6 | 541 | 283 | |
| Cloro | 1118 | 77,0 | 291 | 144 | |
| Etano | 717 | 49,5 | 90 | 32 | 1,19 |
| Alcohol etílico | 927 | 64,0 | 469 | 243 | |
| Etileno | 742 | 51,2 | 50 | 10 | 1,24 |
| Éter etílico | 522 | 36,0 | 383 | 195 | 1,13 |
| Flúor | 367 | 25,3 | -247 | -155 | |
| Helio | 33,2 | 2,29 | -450 | -268 | 1,66 |
| Heptano | 394 | 27,2 | 513 | 267 | |
| Hidrógeno | 188 | 13,0 | -400 | -240 | 1,41 |
| Ácido clorhídico | 1199 | 82,6 | 124 | 51 | |
| Isobutano | 544 | 37,5 | 273 | 134 | |
| Alcohol isopropílico | 779 | 53,7 | 455 | 235 | |
| Metano | 673 | 46,4 | -117 | -83 | 1,31 |
| Alcohol metílico | 1156 | 79,6 | 464 | 240 | 1,203 |
| Nitrógeno | 492 | 34,0 | -233 | -147 | 1,40 |
| Óxido nítrico | 1054 | 72,7 | 99 | 37 | |
| Octano | 362 | 25,0 | 565 | 296 | |
| Oxígeno | 730 | 50,4 | -182 | -119 | 1,40 |
| Pentano | 485 | 33,5 | 387 | 197 | |
| Fenol | 889 | 61,3 | 786 | 419 | |

Tabla 4.1 Constantes críticas de los gases

De aquí que la densidad del gas se aparte de la teórica dependiendo de la temperatura y de la presión críticas. Las desviaciones están representadas por el coeficiente de compresibilidad Z , que es la relación entre la densidad, considerando el gas perfecto, y la densidad real.

En la figura 4.3 puede determinarse el valor de Z directamente. Otra forma de determinar el factor de compresibilidad es emplear la ecuación de estado reducida de los gases. En esta ecuación se usan las magnitudes reducidas de la presión y la temperatura (P_r y T_r), es decir, los cocientes entre la magnitud en cuestión y la correspondiente magnitud crítica.

De este modo:

$$P_r = P/P_c \quad \text{y} \quad T_r = T/T_c$$

y la ecuación reducida es:

$$P_r V_r = Z n R T_r$$

con:

$$V_r = \text{volumen reducido} = V/V_c$$

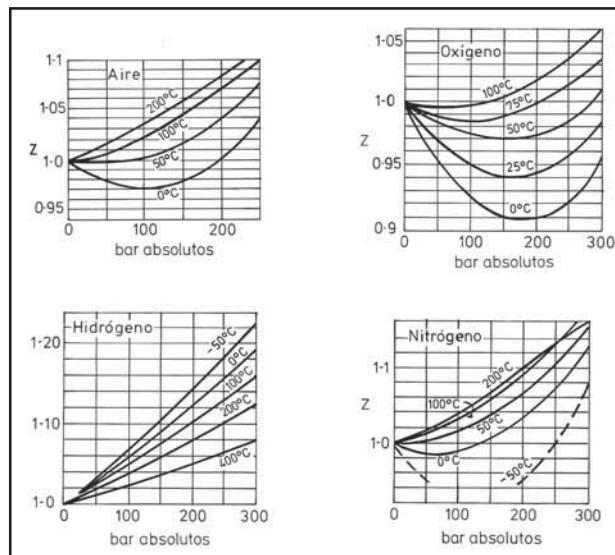
n = número de moles de gas

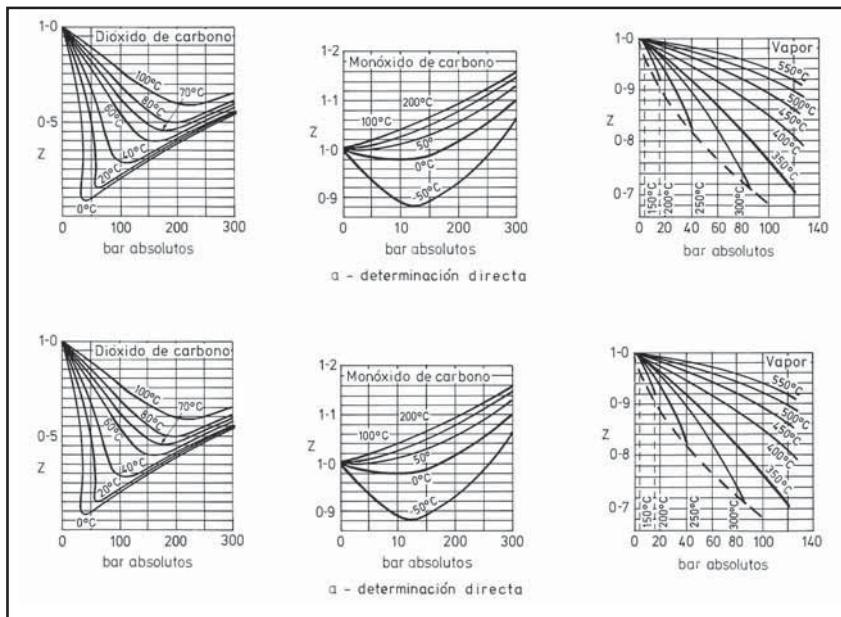
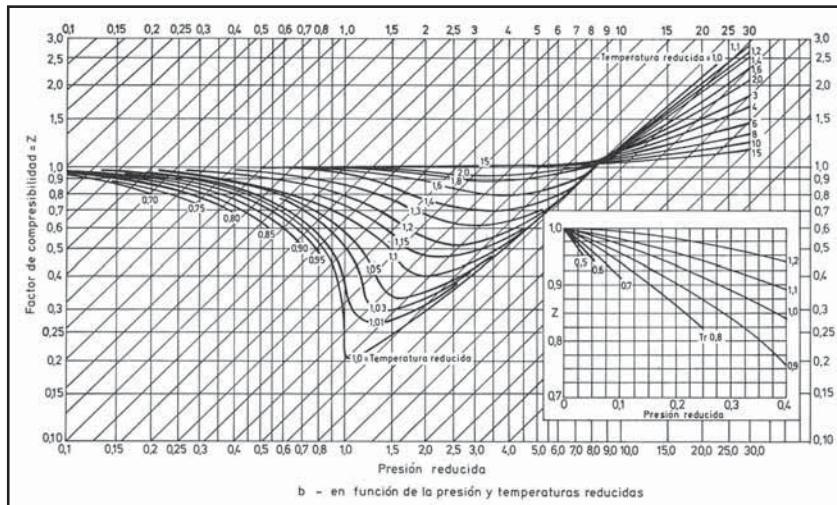
R = constante general de los gases

Z = coeficiente de compresibilidad que corrige directamente la densidad del gas

La determinación de Z se logra empleando las curvas de coeficientes de compresibilidad de la figura 4.4, conjuntamente con la tabla que da las constantes críticas de algunos gases.

| Elemento | Presión crítica — P_c | | Temperatura crítica — T_c | | Coeficiente isentrópico γ (C_p/C_v) |
|-------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|-----|--|
| | psia | bars (abs) | °F | °C | |
| Fosgeno | 823 | 56,7 | 360 | 182 | |
| Propano | 617 | 42,6 | 207 | 97 | 1,33 |
| Propileno | 661 | 45,6 | 198 | 92 | |
| Refrigerante 12 | 582 | 40,1 | 234 | 112 | |
| Refrigerante 22 | 713 | 51,2 | 207 | 97 | |
| Dióxido de azufre | 1142 | 78,8 | 315 | 157 | |
| Agua | 3206 | 221,0 | 705 | 374 | 1,30 |



**Figura 4.3** Coeficientes de compresibilidad**Figura 4.4** Coeficiente de compresibilidad

Cuando el gas transporta vapor de agua, sin contener partículas de agua, deja de ser puro y se considera húmedo. La densidad del gas húmedo se desvía del correspondiente al gas seco de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\omega_h = \frac{P_h - fP_v}{P_n} \times \frac{T_n}{T_h} \times \frac{1}{Z} \times \omega_s + f\omega_v$$

en la que:

ω_h = densidad del gas húmedo en condiciones de servicio (kg/m^3)

ω_s = densidad del gas seco en condiciones estándar (kg/m^3)

w_v = peso específico del vapor saturado en las condiciones de servicio (kg/m^3)

P_h = presión absoluta del gas húmedo

P_n = presión absoluta del gas seco en condiciones estándar (1 atm= 1,013 bar)

P_v = presión absoluta del vapor saturado en las condiciones de medida en bar

T_h = temperatura absoluta del gas húmedo ($273^\circ + tK$)

T_n = temperatura absoluta del gas seco en condiciones estándar = 288 K

Z = coeficiente de compresibilidad

f = humedad relativa

La adición de vapor de agua a una cantidad determinada de gas seco influye en el caudal correspondiente a una presión diferencial dada de dos modos distintos: por un lado, la densidad del gas húmedo cambia con relación a la del gas seco y, por otro, el gas medido es sólo una parte de la mezcla que pasa a través del elemento.

De aquí que el factor de corrección N para gas húmedo debe ser directamente proporcional al porcentaje del peso del gas seco con relación al peso de la mezcla y directamente proporcional a la raíz cuadrada del porcentaje de densidades entre el gas húmedo y el seco (este último a la misma presión P_h). Es decir, si ρ_g = densidad relativa del gas seco, w = tensión del vapor de agua = $f \times P_r$ y su densidad relativa es 0,624, resulta:

$$\frac{\text{densidad gas húmedo}}{\text{densidad gas seco}} = \frac{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293 + \frac{w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times 0,624 \times 1,293}{\frac{P_h}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293} = \frac{(P_h - w)r_g + 0,624 \times w}{P_h \times r_g}$$

luego:

$$\frac{\text{peso gas seco en mezcla}}{\text{peso total de la mezcla}} = \frac{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293}{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293 + \frac{w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times 0,624 \times 1,293} = \frac{(P_h - w) \times r_g}{(P_h - w) \times r_g + 0,624 \times w}$$

luego:

$$N = \frac{(P_h - w)r_g}{(P_h - w)r_g + 0,624w} \sqrt{\frac{(P_h - w)r_g + 0,624w}{P_h r_g}} = \sqrt{\frac{P_h - w}{P_h + \frac{0,624 P_h \times w}{(P_h - w)r_g}}}$$

y llamando $P_h/w = B$, resulta:

$$N = \sqrt{\frac{B - 1}{B + \frac{0,624 B}{(B - 1)r_g}}}$$

fórmula que da directamente el factor de corrección para gas húmedo en función de:

$$B = \frac{P_h}{w} = \frac{\text{Presión absoluta del gas húmedo}}{\text{Presión del vapor de agua}}$$

Esta fórmula está representada en la figura 4.5 en función de la temperatura de saturación del gas (punto de rocío) y de su peso específico. Los pasos a seguir en la lectura del gráfico son los siguientes:

1. Del punto de rocío en la escala superior se determina la presión de vapor w mediante la línea de presiones correspondiente.
2. Se obtiene B como cociente de la presión absoluta del gas P_h y de w .
3. Con B en la escala vertical derecha y , mediante las curvas de peso específico, se lee en la escala inferior el factor N .

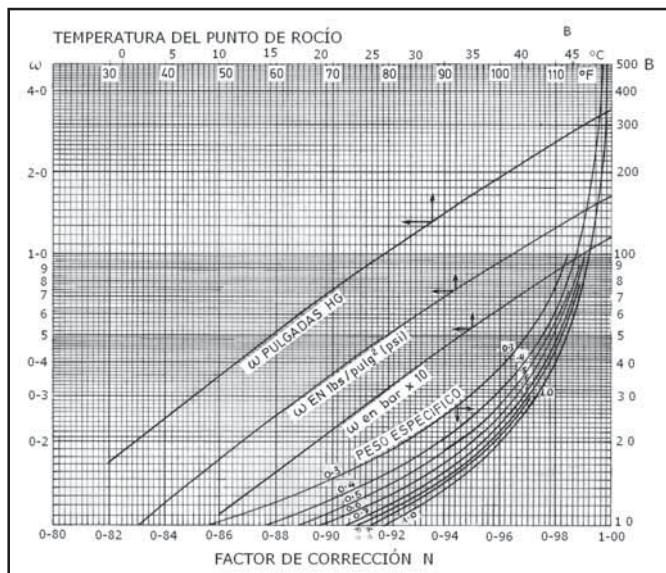


Figura 4.5 Factor de corrección de humedad del gas

En ocasiones, el caudal del fluido es pulsante debido a la acción de bombas de pistón, compresores, ventiladores, etc. Como es lógico, es necesario amortiguarlo y ello se realiza en los instrumentos de medida mediante los dispositivos amortiguadores de que disponen. La señal resultante obtenida es el promedio de la presión diferencial efectiva, de modo que el caudal leído en el instrumento es:

$$Q_m = C \sqrt{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_n}{n}}$$

Sin embargo, el caudal real promedio que el instrumento leería realmente, si fuera capaz de trabajar sin amortiguación, sería:

$$Q_{m'} = C \left[\frac{\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \sqrt{\Delta P_3} + \dots + \sqrt{\Delta P_n}}{n} \right]$$

El error $Q_m - Q_{m'}$ es siempre positivo dependiendo del tipo de pulsaciones y del sistema de amortiguamiento. Para disminuir este error es necesario aumentar la pérdida de carga o bien el volumen que se encuentra entre la máquina, causa de las pulsaciones, y el punto de medida del caudal.

En la selección de la presión diferencial, que el elemento de medida (diafragma, tobera, tubo Venturi) producirá para el caudal máximo del fluido fijado en el cálculo, se presentan dos factores importantes a considerar, la presión de la línea y la pérdida de carga máxima del elemento. Ambos factores influyen en el costo de funcionamiento de la instalación, es decir, en el costo necesario para que el fluido pase a través del elemento. Asimismo, la conveniencia de lograr una exactitud casi constante en todo el campo de medida de la presión diferencial es otro compromiso a satisfacer. Depende de la relación de diámetros y de la situación del elemento en la tubería conjuntamente con los tramos rectos y accesorios que se encuentren aguas arriba y aguas abajo del elemento.

| mm c. de a. | Pulgadas c. de a. | ** Presión estática mínima recomendada | | |
|----------------|----------------------|---|-----------------|---------------------|
| | | mm y bar | pulgadas y psig | |
| 64 | 2.536* | 0 mm c. de a. | 0" | H ₂ O ga |
| 102 | 4.019* | 127 mm c. de a. | 5" | H ₂ O ga |
| 127 | 5.000 | 178 mm c. de a. | 7" | H ₂ O ga |
| 162 | 6.370 | 254 mm c. de a. | 10" | H ₂ O ga |
| 254 | 10.000 | 508 mm c. de a. | 20" | H ₂ O ga |
| 256 | 10.099* | 508 mm c. de a. | 20" | H ₂ O ga |
| 406 | 16.000 | 889 mm c. de a. | 35" | H ₂ O ga |
| 508 | 20.000 | 0,14 bar | 2 psig | |
| 552 | 21.722 | 0,14 bar | 2 psig | |
| 635 | 25.000 | 0,7 bar | 10 psig | |
| 644 | 25.360 | 0,7 bar | 10 psig | |
| 874 | 34.429 | 0,7 bar | 10 psig | |
| 1270 | 50.000 | 1,4 bar | 20 psig | |
| 1386 | 54.562 | 1,7 bar | 25 psig | |
| 1453 | 57.210 | 2,5 bar | 35 psig | |
| 2196 | 86.479 | 3,2 bar | 45 psig | |
| 2540 | 100.00 | 4,2 bar | 60 psig | |
| 3270 | 128.73 | 4,2 bar | 60 psig | |
| 3481 | 137.05 | 4,9 bar | 70 psig | |
| 5080 | 200.00 | 7 bar | 100 psig | |
| 5518 | 217.23 | 7 bar | 100 psig | |
| 5813 | 228.86 | 7 bar | 100 psig | |
| 7620 | 300.00 | 9,8 bar | 140 psig | |
| 8744 | 344.26 | 10,5 bar | 150 psig | |
| 10160 | 400.00 | 12,6 bar | 180 psig | |
| 12700 | 500.00 | 15,5 bar | 220 psig | |
| 15240 | 600.00 | 18,3 bar | 260 psig | |
| 17780 | 700.00 | 21,1 bar | 300 psig | |
| 20320 | 800.00 | 23,9 bar | 340 psig | |
| 22860 | 900.00 | 26,7 bar | 380 psig | |
| 25400 | 1000.00 | 29,5 bar | 420 psig | |

* Diferenciales utilizados sólo para gases.

** En caudales de gases o de vapores, el diferencial en pulgadas de c. de a. no debe exceder la presión estática total de psia.

Tabla 4.2 Presión diferencial máxima

Los compromisos anteriores entre los varios factores expuestos se reflejan en la tabla 4.2, que relaciona la presión diferencial máxima que el elemento puede admitir con la presión estática en

la línea y con los gráficos de longitudes rectas de tubería y pérdidas de carga. Hay que señalar que en la medida de caudales de líquidos se emplea normalmente una presión diferencial de 2500 mm c. de a. (100" c. de a.).

| 1º accesorio aguas arriba | Distancia aguas arriba entre el medidor y el primer accesorio (múltiplos Φ tubería) | | | | | | | | | | | | | Elementos primarios | |
|--|--|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|-----|---------------------|---|
| | $\beta = \Phi_{\text{orificio}}/\Phi_{\text{interior tubería}}$ | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | | |
| Curva de 90º o T | 10 | 10 | 10 | 12 | 14 | 14 | 14 | 16 | 18 | 22 | 28 | 36 | 46 | 14 | 1 |
| | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | | | 14 | 2 |
| Dos o mas curvas de 90º (radio D) en el mismo plano | 14 | 14 | 16 | 16 | 18 | 20 | 22 | 26 | 32 | 36 | 42 | 50 | | 18 | 1 |
| | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | | | | 18 | 2 |
| Dos o mas curvas de 90º (radio D) en diferentes planos | 34 | 34 | 34 | 36 | 36 | 38 | 40 | 44 | 48 | 54 | 62 | 70 | 80 | 31 | 1 |
| | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 8,5 | 12,5 | 17,5 | 23,5 | 27,5 | 29,5 | | | | 31 | 2 |
| Reductor 2D a D en una longitud de 3D, Venturi 3D a D en 3,5D | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 14 | 22 | 30 | | 7 | 1 |
| | 1,5 | 2,5 | 4,5 | 5,5 | 6,5 | 8,5 | 9,5 | 10,5 | 11,5 | | | | | 7 | 2 |
| Expansión 0,5D a D en una longitud de 1,5D, Venturi 0,75D a D en D | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 17 | 18 | 20 | 22 | 25 | 30 | 38 | 54 | 15 | 1 |
| | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | 5,5 | 6,5 | | | | 15 | 2 |
| Válvula de globo (totalmente abierta) | 18 | 18 | 18 | 18 | 20 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 32 | 36 | 44 | 16 | 1 |
| | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 5,5 | 5,5 | 6,5 | | | | 16 | 2 |
| Válvula de compuerta (totalmente abierta) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 14 | 14 | 16 | 20 | 24 | 30 | 10 | 1 |
| | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 5,5 | 5,5 | | | | 10 | 2 |
| Reducción simétrica abrupta de 2D a D | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 15 | 1 |
| | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | | | | 15 | 2 |
| Tanque | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 1 |
| | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | | | | 30 | 2 |

Figura 4.6 Tramos rectos de tubería para la instalación del elemento

La instalación de los elementos de presión diferencial requiere que se respeten unas distancias de tramos rectos de la tubería, antes y después del elemento. En la figura 4.6 pueden verse estas normas generales en las cuales se señalan en abscisas la relación de diámetros d/D (0 interior del elemento a 0 tubería) y en ordenadas las distancias expresadas en diámetros de tubería. En general, el tramo de tubería recta es de 16 a 44 diámetros de tubería aguas arriba y de 2,5 a 5 diámetros de tubería aguas abajo.

Cuando la longitud de tubería recta disponible es pequeña, debido a las condiciones de instalación por codos, curvas, válvulas, etc., y las distancias son críticas, se utilizan dispositivos llamados *enderezadores de venas* que dan un régimen laminar del fluido y permiten reducir el espacio recto necesario (figura 4.7).

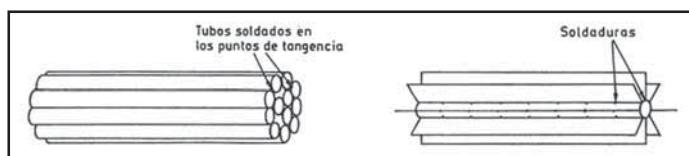


Figura 4.7 Enderezadores de venas

Por otro lado, los elementos de presión diferencial absorben una pérdida de carga que depende de la relación de diámetros d/D y que es una fracción de la presión diferencial que crea el elemento.

En la figura 4.8 puede verse el porcentaje de presión diferencial absorbida, pudiendo apreciarse que el orden de pérdida de carga de mayor a menor es placa-orificio/tobera/tubo Venturi.

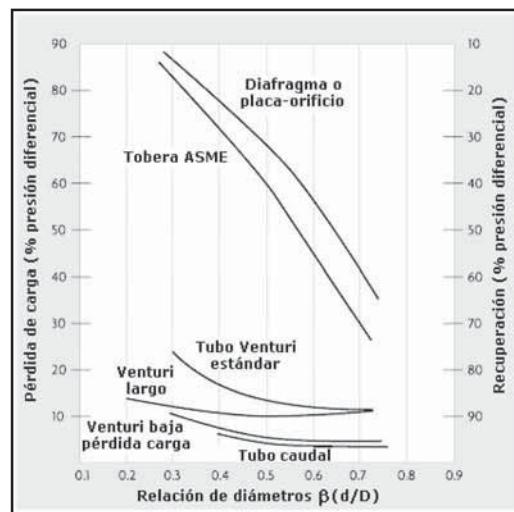


Figura 4.8 Pérdida de carga de los elementos de presión diferencial

4.1.1.2 Elementos de presión diferencial

Los elementos de presión diferencial son los siguientes:

La *placa-orificio* o *diafragma* consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas, conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial proporcional al cuadrado del caudal. La disposición de las tomas puede verse en la figura 4.9.

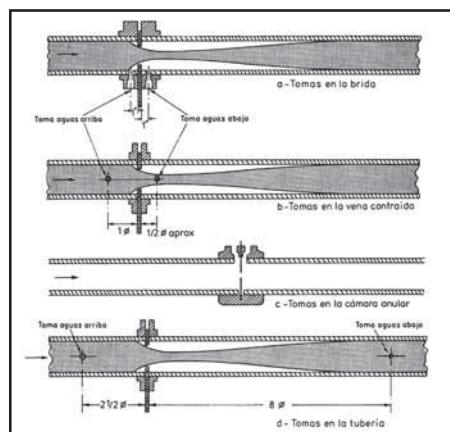


Figura 4.9 Disposición de las tomas de presión diferencial

Tomas en la brida (*flange taps*) (figura 4.9a). Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda, ya que las tomas están taladradas en las bridgas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída (*vena contracta taps*) (figura 4.9b). La toma posterior está situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a $1/2 \varnothing$ de la tubería. La toma anterior se sitúa a $1 \varnothing$ de la tubería.

Tomas radiales (*radius taps*). Son parecidas a las tomas de vena contraída, pero fijando siempre las tomas anterior y posterior a 1 y $1/2 \varnothing$ de la tubería, respectivamente.

Tomas en la cámara anular (*corner taps*) (figura 4.9c). Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Se emplean mucho en Europa.

Tomas en la tubería (*pipe taps*) (figura 4.9d). Las tomas anterior y posterior están situadas a $2 \frac{1}{2} \varnothing$ y $8 \varnothing$, respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio de la placa puede ser *concéntrico*, *excéntrico* o *segmental*, con un pequeño orificio de purga para los pequeños arrastres sólidos o gaseosos que pueda llevar el fluido (figura 4.10a). Los dos últimos diafragmas permiten medir caudales de fluidos que contengan una cantidad pequeña de sólidos y de gases. La exactitud obtenida con la placa es del orden de $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$.

La *tobera* está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales del 60% superiores a los de la placa-orificio en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es del 30% al 80% de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad, si bien, si estos sólidos son abrasivos, pueden afectar a la precisión del elemento. El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su exactitud es del orden de $\pm 0,95\%$ a $\pm 1,5\%$.

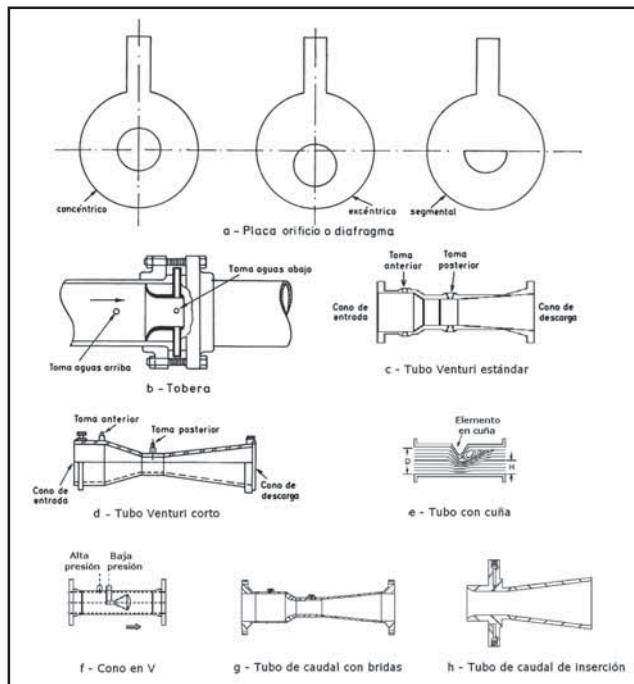


Figura 4.10 Tipos de elementos

El *tubo Venturi* (figura 4.10c) permite la medición de caudales del 60% superiores a los de la placa orificio, en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo del 10% al 20% de la presión diferencial. Posee una gran exactitud y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida. El coste del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces al de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,75\%$.

El *tubo Dall* es una combinación del tubo Venturi y de la placa-orificio que fue introducido en los años 1960. Se caracteriza por un ángulo brusco en la parte central que magnifica la presión diferencial con relación al tubo Venturi. Sin embargo, no predice con suficiente exactitud el coeficiente de descarga del elemento, de modo que es necesario disponer de más datos para calcular el rendimiento. En 1970 se descubrió que el coeficiente de descarga del tubo Dall era una función del número de Reynolds y que tenía un error en la medida del caudal de un 12%. Por este motivo, cayó en desuso.

En fluidos difíciles (lodos) de viscosidad apreciable o corrosivos, se utilizan elementos tales como el de cuña y el de cono en V que proporcionan una mejor recuperación de la presión del fluido, es decir, la pérdida de carga que absorben es pequeña. Las tomas suelen estar aisladas del proceso y, de este modo, no presentan el riesgo de obturación de las tomas de presión y de los tubos que comunican con el transmisor de presión diferencial.

El medidor de *cuña* tiene una restricción en V que se caracteriza por la relación H/D , siendo H la altura de la abertura en la restricción y D el diámetro de la tubería (semejante a la relación $\beta = d/D$). La exactitud puede llegar al $\pm 0,5\%$, si bien es del $\pm 3\%$ al $\pm 5\%$ cuando la densidad del fluido (lodos) no permanece constante. Puede utilizarse para fluidos que circulen bidireccionalmente. Su pérdida de carga es el 50% de la de una placa orificio. Su rangeabilidad (relación entre los valores máximo y mínimo del caudal) puede llegar a 8:1. Se aplica en la industria petroquímica, en la extracción de petróleo y en fluidos difíciles de alta viscosidad (lodos, aguas negras, etc.).

El medidor de *cono en V* tiene un cono centrado en la tubería que, al paso del fluido, crea una zona de baja presión aguas abajo, la que capta un orificio practicado en la base del cono. El cono optimiza el perfil de velocidades del fluido, ya que debido a su forma mezcla la alta velocidad del fluido en el centro del medidor con la baja velocidad existente cerca de las paredes. Esta optimización amortigua las pulsaciones de caudal del fluido y contribuye a una baja pérdida de carga del medidor. Su exactitud es del orden del $\pm 0,5\%$ de la lectura y su repetibilidad del $\pm 0,1\%$. Su rangeabilidad (relación entre los valores máximo y mínimo del caudal) es de 10 a 1 frente al clásico 3 a 1 de la placa-orificio. Requiere de 0 a 3 diámetros de tubería recta aguas arriba y de 0 a 1 diámetro aguas abajo.

Los *tubos de caudal* son derivaciones del tubo Venturi que se caracterizan por su baja pérdida de carga. Su exactitud es del $\pm 0,5\%$ pudiendo llegar al $\pm 0,25\%$ calibrado en laboratorios.

Para el cálculo de los diafragmas, toberas y tubos Venturi se utilizan normas variadas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- ISO 5167-1980 *Medida del flujo de fluidos por medio de placas-orificio, toberas o tubos Venturi, insertados en conductos de sección circular. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.*
- ISO-5167 (1991) - *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full.*

Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes.

Revisión 1:1998. *International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.*

- ISO-5167 (2003) *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full.*

Part 1: General principles and requirements.

Part 2: Orifice Plates.

Part 3: Nozzles and Venturi nozzles.

Part 4: Venturi tubes.

- Norma ASME 19.5 *Flowmeter Computation Handbook. American Society for Mechanical Engineers*, New York, 1971.
- ASME MFC-3M (1989 y 2004) *Measurements of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle and Venturi.*
- Norma ASME MFC-14M-2001 *Measurement of fluid flow using small bore precision orifice. American Society for Mechanical Engineers*, New York, 2001.
- ANSI/API 2530-AGA Report No. 3 (1985 y 1992) *Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids. American Gas Association (AGA).*

Part 3 Natural Gas Applications.

- *Principle and Practice of Flow Meter Engineering*, L. K. Spink (1978).

En estas normas se indican las pérdidas de carga de los elementos y las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancias mínimas a codos, curvas, válvulas, etc. Cuando estas condiciones de distancia son críticas, se utilizan dispositivos llamados *enderezadores de venas* que dan un régimen laminar del fluido y permiten reducir el espacio recto necesario (figura 4.7).

Como ejemplo, figuran a continuación las bases de cálculo y un resumen de la norma ISO. Esta norma es bastante empleada en Europa y su utilización es cómoda. Como ejemplo ilustrativo se expone el cálculo de una placa-orificio para un fluido incompresible.

4.1.1.3 Resumen de la norma ISO 5167-1980

Fluidos incompresibles

La norma ISO 5167-1980 aplicada al cálculo de los elementos de presión diferencial para fluidos incompresibles que pasan a través de la placa-orificio, tobera o tubo Venturi (figura 4.11a, b y c) sigue la marcha que podemos observar en la figura.

La fórmula del caudal es:

$$Q_v = 3,512 \times 10^4 \times \alpha \times \beta^2 \times \varepsilon \times D^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho_0}}$$

$$Q_m = 3,512 \times 10^4 \times \alpha \times \beta^2 \times \varepsilon \times D^2 \sqrt{(P_1 - P_2) \times \rho_0}$$

en la que:

Q_v = caudal volumétrico en m^3

Q_m = caudal volumétrico en m^3

C = coeficiente de descarga

α = coeficiente de caudal

$$E = \text{coeficiente de velocidad de acercamiento} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

con β = relación de diámetros (d/D)

$d = \emptyset$ mínimo del orificio del elemento en mm

$D = \emptyset$ interior de la tubería en mm

P_1 = presión estática absoluta en el ángulo muerto antes del elemento en bar

P_2 = presión estática absoluta en el ángulo muerto después del elemento en bar

ρ_0 = densidad del fluido en las condiciones P_0, T_0 en kg/m^3

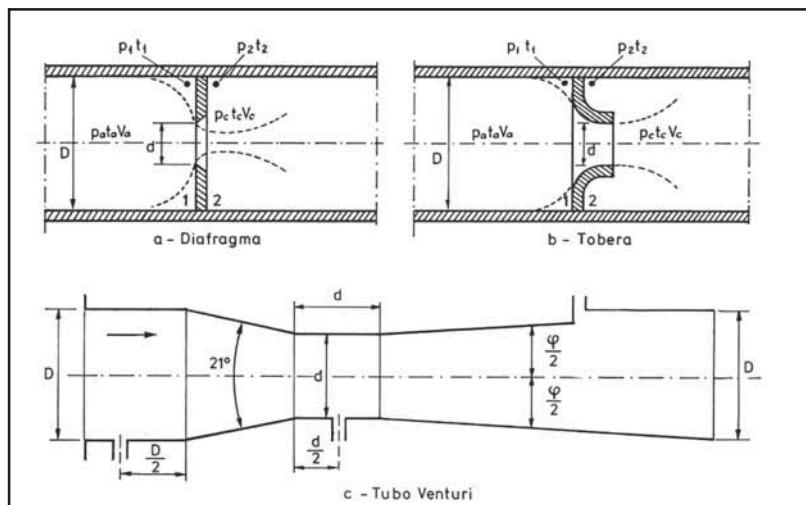


Figura 4.11 Placa-orificio, tobera y tubo Venturi

Para el cálculo de las dimensiones del elemento se despeja el término $\alpha\beta^2$ de las fórmulas anteriores, resultando:

Diafragma, tobera o tubo Venturi:

$$\alpha\beta^2 = \frac{4Q_v}{\varepsilon\pi D^2 \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho_0}}}$$

o en función del caudal masa:

$$CJ\alpha\beta^2 = \frac{4Q_m}{\varepsilon\pi D^2 \sqrt{2(P_1 - P_2)\rho_0}}$$

expresiones en las cuales el segundo término es conocido. A continuación, y por aproximaciones sucesivas, se determina la relación final de diámetros β del elemento primario seleccionado, de acuerdo con la aproximación deseada en el cálculo, que suele ser de 0,01%.

Si se desea un cálculo rápido del elemento deprimógeno, basta considerar:

Coeficiente de descarga de la placa-orificio = 0,6

Coeficiente de descarga de la tobera y del tubo Venturi = 1

Velocidad de acercamiento = 1

Y las fórmulas de cálculo son las siguientes:

Placa-orificio y tobera:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \times 10^4}{2,1 \times \sqrt{PD \times \rho}}}$$

Tubo Venturi:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \times 10^4}{3,5 \times \sqrt{PD \times \rho}}}$$

en las que:

d = diámetro del orificio, en mm

Q_m = caudal masa, en kg/s

PD = presión diferencial, en bar

ρ = densidad del fluido en condiciones de servicio, en kg/m³

La marcha a seguir en el cálculo normal del elemento es la siguiente (se ha seguido un procedimiento de cálculo parecido al expuesto en la obra *Shell Flow Meter Engineering Handbook* que sigue la norma ISO 5167-1980, citado en las referencias):

Diafragma con tomas en la brida

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \times [1 + H \times 10^{-5}(t - t_0)]$$

siendo:

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido, en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente, en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería, en mm/m

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente, en °C

2. Número de Reynolds:

$$\text{Re}_D = \frac{1,2732 \times 10^6 \times Q_m}{\eta D}$$

con:

Q_m = caudal de diseño, en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en mPa × s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{4,6 \times 10^{-10} \times D^4 \times PD \times \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta el gráfico de la figura 4.12 del número de Reynolds para comprobar los límites de sus valores con relación a β .

La tabla que sigue proporciona los valores máximos que puede tener la rugosidad relativa k/D de la tubería, para una distancia de 10 diámetros de tubería aguas arriba de la placa orificio, para satisfacer la norma ISO.

Si $k/D \times 10^4$ es < 10 no hay límite para el valor de β .

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ε (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ , o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante, respectivamente, puede consultarse en la tabla 4.1.

| Dilatación media materiales mm/m a 1.000 °C | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Material tubería | 0 y 100°C | 0 y 200°C | 0 y 300°C | 0 y 400°C | 0 y 500°C | 0 y 600°C |
| Acero | 1,17 | 1,22 | 1,28 | 1,33 | 1,38 | 1,43 |
| Fundición | 1,04 | 1,09 | 1,15 | 1,2 | 1,26 | 1,32 |
| Bronce | 1,75 | 1,79 | 1,83 | 1,88 | 1,92 | — |
| Acero inoxidable 18/8 | 1,6 | 1,65 | 1,71 | 1,76 | 1,8 | 1,84 |
| Acero con 13% Cromo | 1,05 | 1,1 | 1,13 | 1,17 | 1,2 | 1,22 |

Tabla 4.3 Dilatación media de materiales en mm/m y para 1000 °C
(multiplicar por 0.001 para obtener mm/m °C)

| | <i>Líquido</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> |
|-------------------------------------|----------------|----------|----------|
| Aceite de linaza | 7,5 | 27,2 | |
| Acetaldehído | 15,2 | 4,8 | |
| Acetato de amilo | 11,8 | 12,5 | |
| Acetato de butilo | 12,3 | 11,0 | |
| Acetato de etilo | 13,7 | 9,1 | |
| Acetato de metilo | 14,2 | 8,2 | |
| Acetato de vinilo | 14,0 | 8,8 | |
| Acetona, 100 % | 14,5 | 7,2 | |
| Acetona, 35 % | 7,9 | 15,0 | |
| Ácido acético, 100 % | 12,1 | 14,2 | |
| Ácido acético, 70 % | 9,5 | 17,0 | |
| Ácido butírico | 12,1 | 15,3 | |
| Ácido clorhídrico, 31,5 % | 13,0 | 16,6 | |
| Ácido clorosulfónico | 11,2 | 18,1 | |
| Ácido fórmico | 10,7 | 15,8 | |
| Ácido isobutírico | 12,2 | 14,4 | |
| Ácido nítrico, 95 % | 12,8 | 13,8 | |
| Ácido nítrico, 60 % | 10,8 | 17,0 | |

Tabla 4-4 Viscosidad y densidad de líquidos

(X e Y son las coordenadas para determinación de la viscosidad según los gráficos)

| Líquido | X | Y |
|--|------|------|
| Ácido propiónico | 12,8 | 13,8 |
| Ácido sulfúrico, 110 % | 7,2 | 27,4 |
| Ácido sulfúrico, 98 % | 7,0 | 24,8 |
| Ácido sulfúrico, 60 % | 10,2 | 21,3 |
| Agua | 10,2 | 13,0 |
| Alcohol alílico | 10,2 | 14,3 |
| Alcohol amílico | 7,5 | 18,4 |
| Amoníaco, 100 % | 12,6 | 2,0 |
| Amoníaco, 26 % | 10,1 | 13,9 |
| Anhídrido acético | 12,7 | 12,8 |
| Anilina | 8,1 | 18,7 |
| Anisol | 12,3 | 13,5 |
| Benceno | 12,5 | 10,9 |
| Bromo | 14,2 | 13,2 |
| Bromotolueno | 20,0 | 15,9 |
| Bromuro de etilo | 14,5 | 8,1 |
| Bromuro de propilo | 14,5 | 9,6 |
| Butanol | 8,6 | 17,2 |
| Ciclohexanol | 2,9 | 24,3 |
| Clorobenceno | 12,3 | 12,4 |
| Cloroformo | 14,4 | 10,2 |
| Clorotolueno, orto | 13,0 | 13,3 |
| Clorotolueno, meta | 13,3 | 12,5 |
| Clorotolueno, para | 13,3 | 12,5 |
| Cloruro de calcio, sol. 25 % | 6,6 | 15,9 |
| Cloruro estánnico | 13,5 | 12,8 |
| Cloruro de etilo | 14,8 | 6,0 |
| Cloruro de metilo | 15,0 | 3,8 |
| Cloruro de propilo | 14,4 | 7,5 |
| Cloruro de sodio, sol. 25 % | 10,2 | 16,6 |
| Cloruro de sulfuro | 15,2 | 12,4 |
| Cresol, meta | 2,5 | 20,8 |
| Dibromoetano | 12,7 | 15,8 |
| Dicloroetano | 13,2 | 12,2 |
| Diclorometano | 14,6 | 8,9 |
| Difenilo | 12,0 | 18,3 |
| Dióxido de azufre | 15,2 | 7,1 |
| Dióxido de carbono | 11,6 | 0,3 |
| Etanol, 100 % | 10,5 | 13,8 |
| Etanol, 95 % | 9,8 | 14,3 |
| Etanol, 40 % | 6,5 | 16,6 |
| Éter etílico | 14,5 | 5,3 |
| Etilbenceno | 13,2 | 11,5 |
| Fenol | 6,9 | 20,8 |
| Formato de etilo | 14,2 | 8,4 |
| Freón-11 | 14,4 | 9,0 |
| Freón-12 | 16,8 | 5,6 |
| Freón-21 | 15,7 | 7,5 |
| Freón-22 | 17,2 | 4,7 |
| Freón-113 | 12,5 | 11,4 |
| Glicerina, 100 % | 2,0 | 30,0 |
| Glicerina, 50 % | 6,9 | 19,6 |
| Glicol | 6,0 | 23,6 |
| Heptano | 14,1 | 8,4 |
| Hexano | 14,7 | 7,0 |
| Hidróxido sódico, 50 % | 3,2 | 25,8 |
| Ioduro de etilo | 14,7 | 10,3 |
| Ioduro de propilo | 14,1 | 11,6 |
| Isobutanol | 7,1 | 18,0 |
| Isopropanol | 8,2 | 16,0 |
| Keroseno | 10,2 | 16,9 |

Tabla 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos (continuación)

| Líquido | X | Y |
|-----------------------------------|------|------|
| Mercurio | 18,4 | 16,4 |
| Metanol, 100 % | 12,4 | 10,5 |
| Metanol, 90 % | 12,3 | 11,8 |
| Metanol, 40 % | 7,8 | 15,5 |
| Metiletilcetona | 13,9 | 8,6 |
| Naftaleno | 7,9 | 18,1 |
| Nitrobenceno | 10,6 | 16,2 |
| Nitrotolueno | 11,0 | 17,0 |
| Octano | 13,7 | 10,0 |
| Octanol | 6,6 | 21,1 |
| Oxalato de dietilo | 11,0 | 16,4 |
| Oxalato de dimetilo | 12,3 | 15,8 |
| Oxalato de dipropilo | 10,3 | 17,7 |
| Pentacloroetano | 10,9 | 17,3 |
| Pentano | 14,9 | 5,2 |
| Propanol | 9,1 | 16,5 |
| Sodio | 16,4 | 13,9 |
| Sulfuro de carbono | 16,1 | 7,5 |
| Tetracloroetano | 11,9 | 15,7 |
| Tetracloroetileno | 14,2 | 12,7 |
| Tetracloruro de carbono | 12,7 | 13,1 |
| Tetracloruro de titanio | 14,4 | 12,3 |
| Tolueno | 13,7 | 10,4 |
| Trementina | 11,5 | 14,9 |
| Tribromuro de fósforo | 13,8 | 16,7 |
| Tricloroetileno | 14,8 | 10,5 |
| Tricloruro de arsénico | 13,9 | 14,5 |
| Tricloruro de fósforo | 16,2 | 10,9 |
| Xileno, orto | 13,5 | 12,1 |
| Xileno, meta | 13,9 | 10,6 |
| Xileno, para | 13,9 | 10,9 |

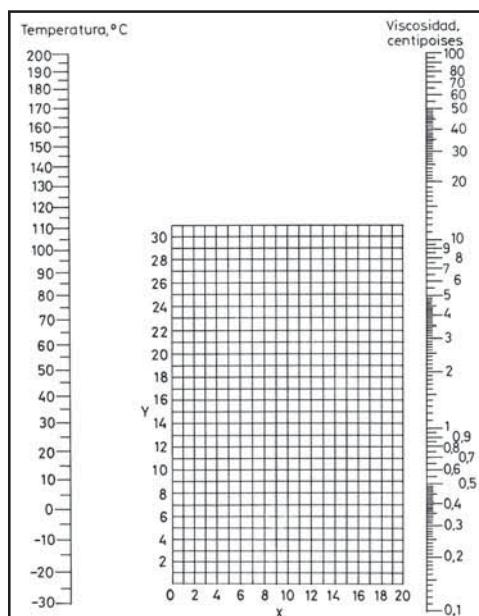
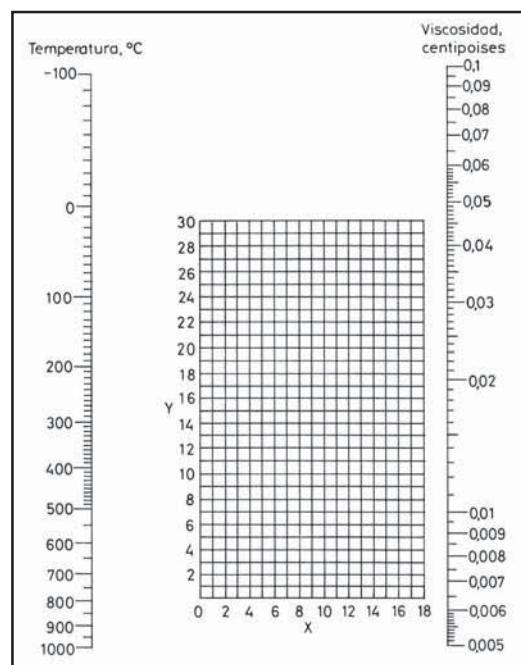


Tabla 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos (continuación)

**Tabla 4.5** Viscosidad de gases y vapores a 1 atm

| <i>Gas o vapor</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Gas o vapor</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> |
|--------------------------------|----------|----------|---|----------|----------|
| Acetato de etilo . . . | 8,5 | 13,2 | Freón-11 | 10,6 | 15,1 |
| Acetileno | 9,8 | 14,9 | Freón-12 | 11,1 | 16,0 |
| Acetona | 8,9 | 13,0 | Freón-21 | 10,8 | 15,3 |
| Ácido acético | 7,7 | 14,3 | Freón-22 | 10,1 | 17,0 |
| Agua | 8,0 | 16,0 | Freón-113 | 11,3 | 14,0 |
| Aire | 11,0 | 20,0 | Helio | 10,9 | 20,5 |
| Amoníaco | 8,4 | 16,0 | Hexeno | 8,6 | 11,8 |
| Argón | 10,5 | 24,0 | Hidrógeno | 11,2 | 12,4 |
| Benceno | 8,5 | 13,2 | $\text{H}_2 + \text{N}_2$ (3 : 1) | 11,2 | 17,2 |
| Bromo | 8,9 | 19,2 | Iodo | 9,0 | 18,4 |
| Bromuro de hidrógeno | 8,8 | 20,9 | Ioduro de hidrógeno | 9,0 | 21,3 |
| Buteno-1 | 9,2 | 13,7 | Mercurio | 5,3 | 22,9 |
| Buteno-2 | 8,9 | 13,0 | Metano | 9,9 | 15,5 |
| Cianógeno | 9,2 | 15,2 | Metanol | 8,5 | 15,6 |
| Cianuro de hidrógeno | 9,8 | 14,9 | Monóxido de carbono | 11,0 | 20,0 |
| Ciclohexano | 9,2 | 12,0 | Nitrógeno | 10,6 | 20,0 |
| Cloro | 9,0 | 18,4 | Oxido nítrico | 10,9 | 20,5 |
| Cloroformo | 8,9 | 15,7 | Oxido nitroso | 8,8 | 19,0 |
| Cloruro de etilo | 8,5 | 15,6 | Oxígeno | 11,0 | 21,3 |
| Cloruro de hidrógeno | 8,8 | 18,7 | Pentano | 7,0 | 12,8 |
| Cloruro de nitrógeno | 8,0 | 17,6 | Propano | 9,7 | 12,9 |
| Dióxido de azufre | 9,6 | 17,0 | Propanol | 8,4 | 13,4 |
| Dióxido de carbono | 9,5 | 18,7 | Propeno | 9,0 | 13,8 |
| Etano | 9,1 | 14,5 | Sulfuro de carbono | 8,0 | 16,0 |
| Etanol | 9,2 | 14,2 | Sulfuro de hidrógeno | 8,6 | 18,0 |
| Éter etílico | 8,9 | 13,0 | Tolueno | 8,6 | 12,4 |
| Etileno | 9,5 | 15,1 | Trimetilbutano (2,3,3) | 9,5 | 10,5 |
| Flúor | 7,3 | 23,8 | Xenón | 9,3 | 23,0 |

Tabla 4.5 Viscosidad de gases y vapores a 1 atm (continuación)
(coordenadas X e Y para determinar la viscosidad según la gráfica)

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \times \beta^4) \times \frac{PD}{P1 \times \kappa}$$

$P1$ es la presión del fluido aguas arriba de la placa.

5. Se calcula el coeficiente de descarga C según la fórmula:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \times \beta^{2,1} - 0,184 \times \beta^8 + 0,0029 \times \beta^{2,5} \times \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,75} + \left(\frac{2,286}{D} \right) \times \frac{\beta^4}{1-\beta^4} \times \left(\frac{0,85598}{D} \right) \times \beta^3$$

Si el diámetro D a la temperatura de paso del fluido es menor o igual a 58,615 mm, entonces el coeficiente 2,286 que afecta al término $\beta^4/(1 - \beta^4)$ cambiará a 0,039.

6. A continuación, se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es vapor de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1\%$:

$$F_s = 1 + 0,0074 \times W1 \quad (\text{limitado para } W1\% \leq 5\%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \times Q_m}{D^2 \times \varepsilon \times C \times F_s} \sqrt{\frac{1-\beta^4}{PD \times \rho}}$$

Con el valor calculado de β , se repiten los cálculos de los puntos 4 a 6 hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

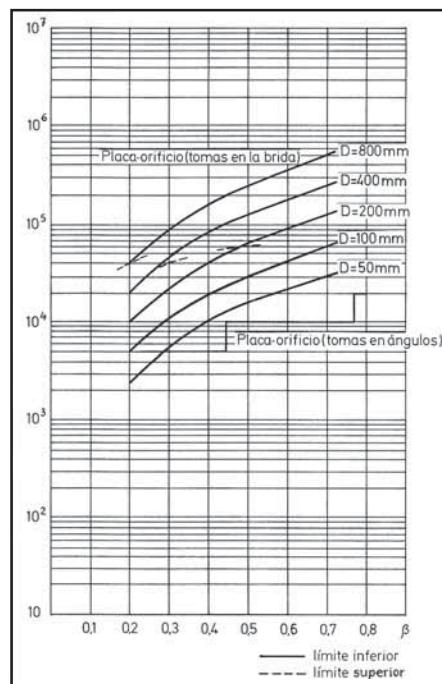


Figura 4.12 Límites superior e inferior del número de Reynolds

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es:

$$d = \beta \times D$$

8. El diámetro del orificio a mecanizar, siendo H el coeficiente de dilatación de la placa, es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \times (t - t_0)}$$

La marcha del cálculo de la Tobera ISA 1932 y del tubo Venturi es parecida, con la diferencia de los valores de ε en el paso 4 y de C en el paso 5. El error global de la medida en un elemento deprimógeno vendrá dado por:

$$\begin{aligned} \text{Error global} &= \frac{\Delta Q_m}{Q_m} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + 4 \frac{\beta^4 \sqrt{1-\beta^4}}{C} \times \left(\frac{\Delta D}{d}\right)^2 + 4 \left[1 + \frac{\beta^4 \sqrt{1-\beta^4}}{C}\right] \times \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{\Delta(PD)}{PD}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2} \end{aligned}$$

El error en el coeficiente de descarga C es de $\pm 0,6\%$ en la placa-orificio, $\pm 0,8\%$ en la tobera ISO 1932, y entre $\pm 0,7\%$ y $\pm 1,5\%$ en el tubo Venturi.

El error en el factor de expansión ε es de $\pm 4(\Delta P/P)\%$ en la placa-orificio, $\pm 2(\Delta P/P)\%$ en la tobera ISO 1932, y del $\pm (4 + 100 \times \beta^8) \times (\Delta P/P)\%$ en el tubo Venturi, todos ellos dentro de las limitaciones de β que van del 0,3% al 0,8%.

El error en los diámetros D (tubería) y d (orificio) es el valor medio cuadrático de las medidas micrométricas realizadas. El error en la presión diferencial $P_1 - P_2$ viene dado por la precisión del aparato de medida que es típicamente del $\pm 0,1\%$ al $\pm 0,5\%$.

El error en la medida de la densidad viene dado por el instrumento de densidad o los aparatos de compensación de presión y temperatura, en cuyo caso se añade la media cuadrática de las precisiones correspondientes.

A continuación figura un programa de ordenador para el cálculo de la placa-orificio, la tobera ISA 1932, la tobera ASME de radio largo y el tubo Venturi, con ejemplos de cálculo.

```

10 LOCATE 1, 1: PRINT "CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma
ISO-5167-1980 © A.Creus"
20 REM- Placa-orificio con tomas en la brida, Tobera ISA 1932 (Europa),
Tobera ASME de Radio largo, y Tubo Venturi
30 LOCATE 1, 70: COLOR 0, 7: PRINT "ESC"; : COLOR 7, 0: LOCATE 1, 74:
PRINT "MENU"; : LOCATE 1, 60, 1, 1, 6
34 LOCATE 2, 1: PRINT "PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME
DE RADIO LARGO(U)";
35 LOCATE 3, 1: PRINT "TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA
SOLDADA(C); "; VENT$;
36 LOCATE 4, 1: PRINT "LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V)";
39 LOCATE 3, 70, 1, 1, 6
40 DEPRI$ = INKEY$: IF DEPRI$ = "" THEN 40
41 IF DEPRI$ = "P" OR DEPRI$ = "p" THEN ELEM% = 1: LOCATE 2, 1: COLOR 0,
7: PRINT "PLACA-ORIFICIO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60

```

```
42 IF DEPRI$ = "T" OR DEPRI$ = "t" THEN ELEM% = 2: LOCATE 2, 20: COLOR 0,
7: PRINT "TOBERA ISO 1932"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
43 IF DEPRI$ = "U" OR DEPRI$ = "u" THEN ELEM% = 3: LOCATE 2, 33: COLOR 0,
7: PRINT "TOBERA ASME DE RADIO LARGO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
45 IF DEPRI$ = "F" OR DEPRI$ = "f" THEN ELEM% = 4: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 16: COLOR 0, 7: PRINT
"FORJADO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
46 IF DEPRI$ = "M" OR DEPRI$ = "m" THEN ELEM% = 5: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 29: COLOR 0, 7: PRINT
"MECANIZADO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
47 IF DEPRI$ = "C" OR DEPRI$ = "c" THEN ELEM% = 6: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 45: COLOR 0, 7: PRINT
"CHAPA SOLDADA"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
48 IF DEPRI$ = CHR$(27) AND CU% = 8 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
CHAIN "PROCON01"
49 IF DEPRI$ = CHR$(27) AND CU% = 9 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
CHAIN "PROCON02"
50 BEEP: GOTO 40
60 LOCATE 4, 70, 1, 1, 6
62 FLUI$ = INKEY$: IF FLUI$ = "" THEN 62
64 IF FLUI$ = "L" OR FLUI$ = "l" THEN FLUI% = 1: LOCATE 4, 1: COLOR 0, 7:
PRINT "LIQUIDO"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
65 IF FLUI$ = "G" OR FLUI$ = "g" THEN FLUI% = 2: LOCATE 4, 14: COLOR 0,
7: PRINT "GAS"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
66 IF FLUI$ = "V" OR FLUI$ = "v" THEN FLUI% = 3: LOCATE 4, 23: COLOR 0,
7: PRINT "VAPOR"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
67 BEEP: GOTO 60
70 'IF FLUI% = 1 THEN 71 ELSE 110
71 LOCATE 5, 1: PRINT "'TEMPERATURA DE SERVICIO en "; CHR$(248); "C"; : ' T1
72 LOCATE 6, 1: PRINT "'TEMPERATURA AMBIENTE en "; CHR$(248); "C"; : ' TO
73 LOCATE 7, 1: PRINT "'DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3"; : ' DENSI
74 LOCATE 8, 1: PRINT ""; CHR$(237); " medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA
AMBIENTE en mm"; : ' DO
75 LOCATE 9, 1: PRINT "'COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /";
CHR$(248); "C"; : ' H
76 IF ELEM% = 1 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "'COEFICIENTE DE DILATACION DE
LA PLACA /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
78 IF ELEM% = 2 OR ELEM% = 3 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "'COEFICIENTE DE
DILATACION DE LA TOBERA /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
79 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "'CO
EFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO VENTURI /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
80 LOCATE 11, 1: PRINT "'CAUDAL MASA EN Kg/seg."; : ' QM
81 IF FLUI% = 2 OR FLUI% = 3 THEN LOCATE 12, 1: PRINT "'COEFICIENTE ISEN
TROPICO (Relaci$n de Calores Especifcos)"; : ' CAPA
82 IF FLUI% = 3 THEN LOCATE 13, 1: PRINT "HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua
(sobrecalentado y saturado es 0)"; : ' WI
83 LOCATE 14, 1: PRINT "'VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en
centipoises"; : ' VIS
84 LOCATE 15, 1: PRINT "'PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO";
: ' PD
```

```

85 LOCATE 16, 1: PRINT ""PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA
PRESION en bar"; : ' P1
88 LOCATE 5, 70, 1, 1, 6: NMAX = 3000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: T1 =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 88
89 LOCATE 6, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 1: GOSUB 2250: T0 =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 89
90 LOCATE 7, 70, 1, 1, 6: NMAX = 15000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: Densi =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 90
91 LOCATE 8, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: D0 =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 91
92 LOCATE 9, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB 2250: H = VAL(XZ$):
IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 92
93 IF ELEM% = 1 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB
2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 93
96 IF ELEM% = 2 OR ELEM% = 3 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1:
LLOND% = 8: GOSUB 2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 96
97 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6:
NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB 2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = ""
THEN BEEP: GOTO 97
98 LOCATE 11, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 4: GOSUB 2250: QM =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 98
99 IF FLUI% = 2 OR FLUI% = 3 THEN LOCATE 12, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100:
LLOND% = 4: GOSUB 2250: CAPA = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP:
GOTO 99
100 IF FLUI% = 3 THEN LOCATE 13, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 4: GO
SUB 2250: W1 = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 100
101 LOCATE 14, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 6: GOSUB 2250: VIS =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 101
102 LOCATE 15, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 4: GOSUB 2250: PD =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 102
103 LOCATE 16, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1000: LLOND% = 4: GOSUB 2250: P1 =
VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 103
200 D = D0 * (1 + H * (T1 - T0))
210 RED = (1273200! * QM) / (VIS * D): REM- NUMERO DE REYNOLDS
220 FS = 1: IF FLUI% = 3 THEN FS = 1 + .0074 * W1: REM- FACTOR DE CORRECCION
DEL VAPOR
230 BETA = (QM ^ 2 / ((4.6 * 10 ^ -10 * D ^ 4 * PD * Densi) + QM ^ 2)) ^ .25
240 IF ELEM% = 1 THEN 250 ELSE 350
250 REM- PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA
260 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE EPSILON = 1 - (.41 + .35 * BETA ^
4) * (PD / P1) * CAPA ^ -1
270 IF D > 58.615 THEN C = .5959 + .0312 * BETA ^ 2.1 - .184 * BETA ^ 8 +
.0029 * BETA ^ 2.5 * (10 ^ 6 / RED) ^ .75 + (2.286 / D) * BETA ^ 4 *
(1 - BETA ^ 4) ^ -1 - (.85598 / D) * BETA ^ 3
275 IF D <= 58.615 THEN C = .5959 + .0312 * BETA ^ 2.1 - .184 * BETA ^ 8
+ .0029 * BETA ^ 2.5 * (10 ^ 6 / RED) ^ .75 + (.039 / D) * BETA ^ 4 *
(1 - BETA ^ 4) ^ -1 - (.85598 / D) * BETA ^ 3
280 BETA1 = (2847.05 * QM * (SQR(1 - BETA ^ 4)) / (D ^ 2 * EPSILON * C *
FS * (SQR(Densi * PD)))) ^ .5
290 IF ABS((BETA - BETA1) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 250
300 D1 = D * BETA1

```

```
310 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
320 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "-----"
-----": COLOR 7, 0
330 PRINT "N$ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
"DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
340 GOTO 2500
350 IF ELEM% = 2 THEN 360 ELSE 460
360 REM- TOBERA ISA 1932 (EUROPA)
370 IF FLUID$ = "L" OR FLUID$ = "1" THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) /
P1: EPSILON = ((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4) /
(1 - BETA ^ 4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) /
(1 - K))) ^ .5
380 C = .99 - .2262 * BETA ^ 4.1 + (.000215 - .001125 * BETA + .00249 *
BETA ^ 4.7) * (10 ^ 6 / RED) ^ 1.15
390 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
* SQR(DENSI * PD))) ^ .5
400 'PRINT ABS((BETA1 - BETA) / BETA1)
410 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 360
410 D1 = D * BETA1
420 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
430 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "-----"
-----": COLOR 7, 0
440 PRINT "N$ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
"DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
450 GOTO 2500
460 IF ELEM% = 3 THEN 470 ELSE 570
470 REM- TOBERA ASME RADIO LARGO (AMERICA)
480 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) / P1: EPSILON =
((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4) / (1 - BETA ^
4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) / (1 - K))) ^ .5
490 C = .9965 - .00653 * BETA ^ .5 + (10 ^ 6 / RED) ^ .5
500 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
* SQR(DENSI * PD))) ^ .5
510 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 470
520 D1 = D * BETA1
530 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
540 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "-----"
-----": COLOR 7, 0
550 PRINT "N$ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
"DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
560 GOTO 2500
570 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN 580 ELSE BEEP: GOTO 26
580 REM- TUBO VENTURI
590 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) / P1: EPSILON =
((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4) / (1 - BETA ^
4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) / (1 - K))) ^ .5
600 IF ELEM% = 4 THEN C = .984
```

```

610 IF ELEM% = 5 THEN C = .995
620 IF ELEM% = 6 THEN C = .985
630 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
    * SQR(DENSI * PD))) ^ .5
640 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 250
650 D1 = D * BETA1
660 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
670 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "-----
-----": COLOR 7, 0
680 PRINT "N$ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
    "DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
    DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
690 GOTO 2500
2250 XZ$ = "": REM- SUBRUTINA ENTRADA NUMEROS CON DECIMALES + 0 -
2260 CONTA% = 0: PUNT% = 0
2270 X$ = INKEY$: IF X$ = "" THEN 2270
2280 COL = POS(0)
2290 IF X$ = CHR$(13) THEN RETURN
2300 IF LEN(XZ$) = 0 THEN CONTA% = CONTA% + 1: PUNT% = 0: GOTO 2330
2310 IF X$ = CHR$(27) AND CU% = 8 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
    CHAIN "PROCON01"
2311 IF X$ = CHR$(27) AND CU% = 9 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
    CHAIN "PROCON02"
2320 IF X$ = CHR$(8) AND LEN(XZ$) >= 1 THEN LOCATE , COL - 1: PRINT " ";
    : LOCATE , COL - 1: XZ$ = LEFT$(XZ$, LEN(XZ$) - 1)
2330 IF CONTA% = 2 THEN CONTA% = 0: GOTO 2340
2340 IF X$ < " " OR X$ > "z" THEN 2270: REM-DETECTA LA PULSACION DE ALT Y
    NO ESCRIBE
2350 IF ASC(X$) = 45 AND XZ$ = "" THEN 2400
2360 IF ASC(X$) <> 46 THEN 2390
2370 IF ASC(X$) = 46 THEN PUNT% = PUNT% + 1: IF PUNT% >= 2 THEN PUNT% =
    2: REM-PERMITE ESCRIBIR SOLO UN PUNTO PARA LOS DECIMALES
2380 IF PUNT% = 1 THEN 2400 ELSE 2390
2390 IF ASC(X$) < 48 OR ASC(X$) > 57 THEN 2270: REM-DETECTA LAS LETRAS
    PULSADAS Y NO LAS ESCRIBE
2400 XZ$ = XZ$ + X$: PRINT X$;
2410 IF VAL(XZ$) > NMAX THEN BEEP: LOCATE , COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1
    TO LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR: LOCATE , COL - LEN(XZ$) + 1:
    XZ$ = "": GOTO 2270
2420 IF LEN(XZ$) - LEN(STR$(INT(VAL(XZ$)))) > LLOND% THEN BEEP: LOCATE ,
    COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1 TO LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR:
    LOCATE , COL - LEN(XZ$) + 1: XZ$ = "": PUNT% = 0: GOTO 2270
2430 IF COL >= 78 THEN BEEP: LOCATE , COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1 TO
    LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR: LOCATE , COL - LEN(XZ$) +
    1: XZ$ = "": PUNT% = 0: GOTO 2270
2440 GOTO 2270
2500 LOCATE 25, 1: PRINT "PULSE CUALQUIER TECLA para el cálculo de otro
    elemento"; : WHILE INKEY$ = "": WEND
2510 GOTO 26

```

```
2520 REM-TRATAMIENTO DE ERRORES
2530 SOUND 500, .5: IF ERR = 5 OR ERR = 6 THEN 2532 ELSE 2540
2532 LOCATE 19, 22: PRINT "DATOS INCORRECTOS - Repita el cálculo";
2533 LOCATE 21, 22: PRINT "(Pulse cualquier tecla para continuar)";
2534 DO WHILE INKEY$ = "": LOOP: RESUME 26
2540 BEEP: SCREEN 0: RESUME 26
```

Ejemplos de cálculo

CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU
PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)
TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);
LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V) L

| | |
|--|-----------|
| ¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C | 15 |
| ¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C | 15 |
| ¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³ | 1000 |
| ¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm | 600 |
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C | .00000117 |
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA PLACA /°C | .0000016 |
| ¿CAUDAL MASA EN Kg/seg. | 448 |
| ¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises | .00114 |
| ¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO | .2 |
| ¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar | 1.02 |

RESULTADOS DEL CALCULO

Nº de REYNOLDS = 8.339088E+08
BETA (d/D) = .6191493
DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 371.4749
DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 371.4749

CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU
PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)
TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);
LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V) V

| | |
|---|-----------|
| ¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C | 250 |
| ¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C | 15 |
| ¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³ | 4.6 |
| ¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm | 150 |
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C | .00000117 |

| | |
|--|---------|
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TOBERA /°C | .000016 |
| ¿CAUDAL MASA EN Kg/seg. | 2.83 |
| ¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos) | 1.3 |
| HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua (sobre calentado y saturado es 0) | 0 |
| ¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises | .018 |
| ¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO | .2 |
| ¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar | 11 |

RESULTADOS DEL CALCULO

Nº de REYNOLDS = 1330843

BETA (d/D) = .6035718

DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 90.78593

DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 90.44586

PULSE CUALQUIER TECLA para el cálculo de otro elemento

CALCULO DE ELEMENTOS DE PRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU

PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)

TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);

| | |
|--|----------|
| LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V) | G |
| ¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C | 15 |
| ¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C | 15 |
| ¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³ | .5 |
| ¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm | 300 |
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C | .0000117 |
| ¿COEFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO VENTURI /°C | .000016 |
| ¿CAUDAL MASA EN Kg/seg. | .3425 |
| ¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos) | 1.31 |
| ¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises | .012 |
| ¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO | .004 |
| ¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar | 1.007 |

RESULTADOS DEL CALCULO

Nº de REYNOLDS = 121130.8

BETA (d/D) = .6087617

DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 182.6207

DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 182.6207

En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 pueden verse dimensiones constructivas del diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

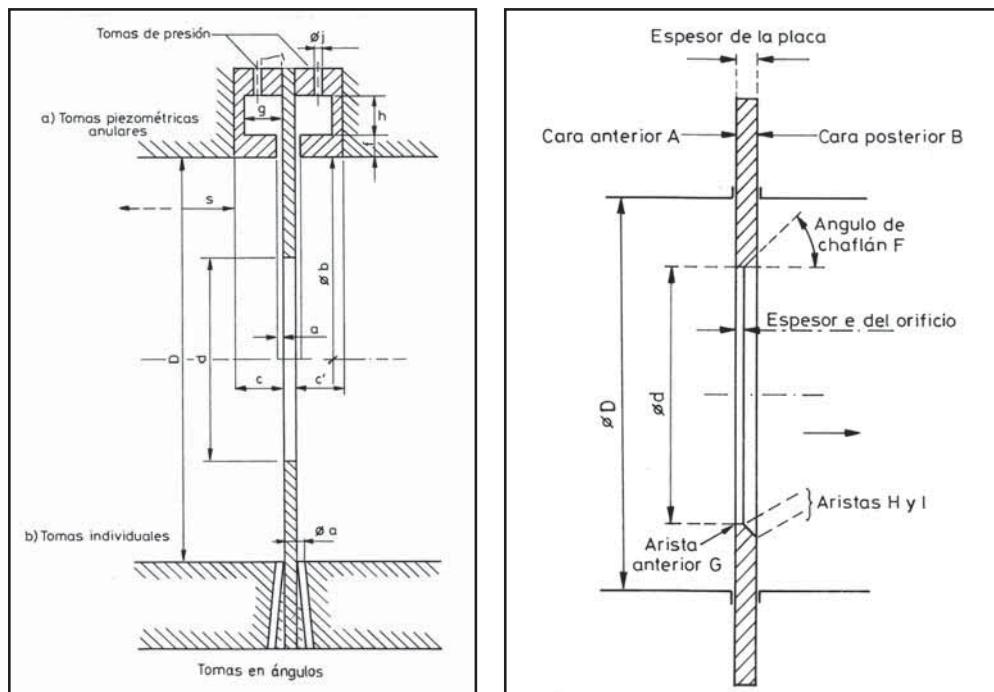


Figura 4.13 Diafragma

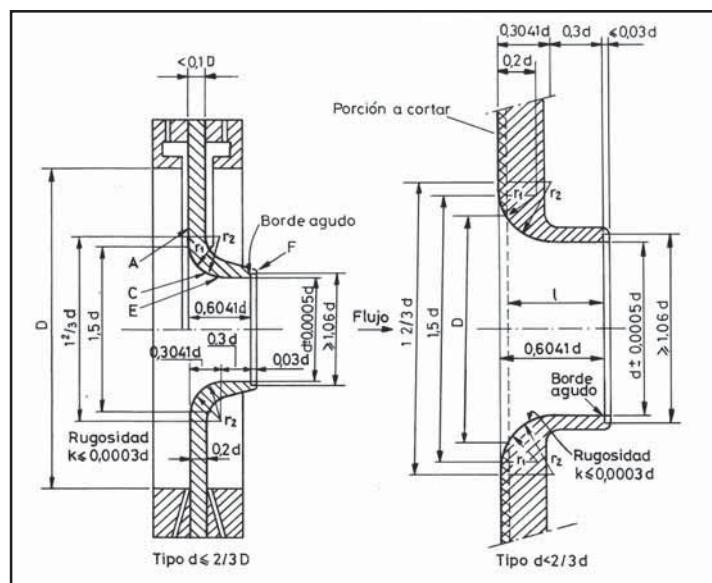


Figura 4.14a Tubería

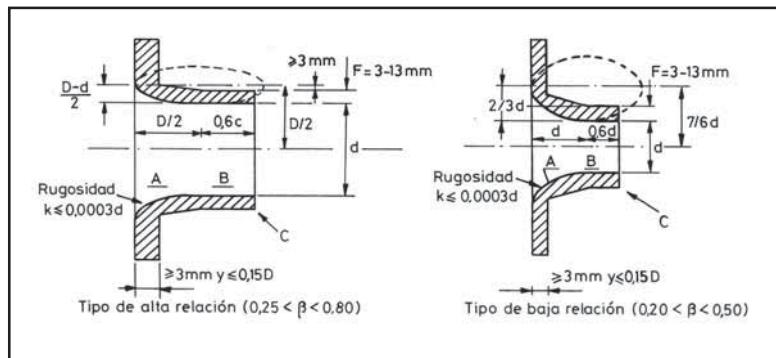


Figura 4.14b Tobera (continuación)

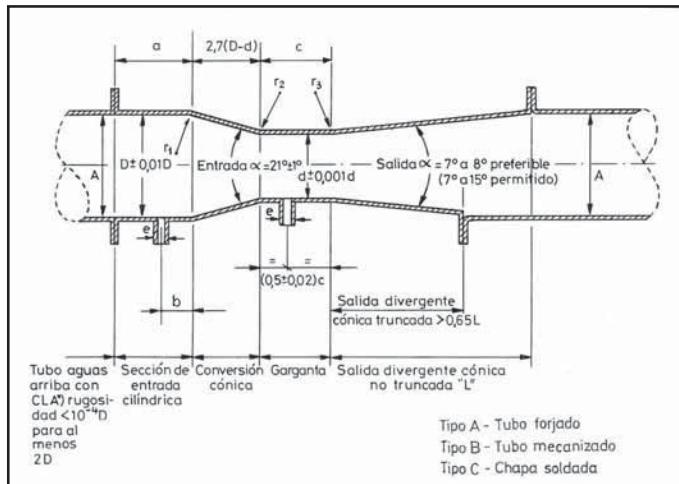


Figura 4.15 Tubo Venturi

En la fórmula general simplificada del caudal:

$$Q_v = K \sqrt{\frac{h}{\rho}}$$

se observa que la medida depende de la densidad del fluido, por lo cual, si ésta cambia variará la lectura del instrumento. Por otro lado, cuando se realiza el cálculo se parte de unos datos previos que se toman lo más próximos posibles a los reales de funcionamiento.

Si la densidad real se aparta de la tomada para el cálculo, habrá que corregirla con el factor siguiente:

El caudal real es:

$$Q_r = K \sqrt{\frac{h}{\rho_r}}$$

siendo ρ_r la densidad real.

El caudal leído es:

$$Q_c = K \sqrt{\frac{h}{\rho_c}}$$

siendo ρ_c la densidad que se tomó para calcular el diafragma. Luego:

$$Q_r = Q_c \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$$

que da la expresión del caudal real en función del caudal leído con el factor de corrección:

$$\sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$$

En el caso de un líquido, la corrección se realiza fácilmente ya que es fácil medir ρ_r .

En el caso de un vapor saturado, basta conocer su presión o su temperatura para obtener, mediante tablas, su densidad. Si el vapor es recalentado, será preciso conocer su presión y su temperatura.

Cuando el fluido a medir es un gas, su densidad se determina a partir de su composición realizada por análisis químicos según la fórmula:

$$\rho_{r0} = \sum \rho_{ng} \times V_g$$

en la que:

ρ_{r0} = densidad de la mezcla del gas real a 0 °C y 760 mm Hg

ρ_{ng} = densidad del gas g a 0 °C y 760 mm Hg

V_g = % en volumen del gas g

Si el gas es ideal, su densidad ρ_r a la temperatura y presión a su paso por el diafragma es:

$$\rho_r = \rho_{r0} \frac{P_r}{1,013} \times \frac{273}{273 + t_r}$$

en la que:

P_r = presión absoluta real, en bar

t_r = temperatura real, en °C

Mientras que la densidad del gas calculada era:

$$\rho_c = \rho_{c0} \frac{P_c}{1,013} \times \frac{273}{273 + t_c}$$

donde se deduce que el valor del caudal Q_r , en m³/h, en función del caudal Q_c leído es:

$$Q_r = Q_c \sqrt{\frac{\rho_{c0}}{\rho_{r0}} \times \frac{P_c}{P_r} \times \frac{273 + t_r}{273 + t_c}}$$

Si la humedad del gas que se ha tomado en el cálculo era h_c , con la indicación del instrumento expresada en Nm^3/h de gas seco, y una vez puesta en marcha la instalación, la humedad real resulta ser de h_r , el factor de corrección correspondiente será:

$$F = \frac{100 - h_r}{100 - h_c}$$

es decir, el cociente entre el porcentaje de gas seco que realmente contiene el gas y el porcentaje de gas seco tomado en el cálculo.

Si la temperatura del fluido varía mucho con relación a la considerada en el cálculo, el diámetro del orificio calculado se desviará del diámetro real en las condiciones de servicio. El factor de corrección del caudal será:

$$F = \left(\frac{d_r}{d_c} \right)^2$$

siendo:

d_r = diámetro real

d_c = diámetro calculado

debido a que en la fórmula del caudal el diámetro figura elevado a la potencia 2.

Si el gas lleva partículas en suspensión que se depositan en las paredes de la tubería, en particular en su parte baja, el diámetro interior de la tubería se reduce gradualmente afectando a la lectura del caudal. Si la limpieza periódica de la tubería es difícil, la mejor solución es determinar un coeficiente de corrección aproximado del caudal, partiendo de la base de que las partículas del fluido se van depositando proporcionalmente al tiempo de funcionamiento.

De este modo, determinado el diámetro D_T de la tubería al cabo del tiempo T mediante el desmontaje del elemento, la expresión general que da el diámetro de la tubería en el tiempo t es:

$$D_t = D_0 - \frac{1}{T}(D_0 - D_T)$$

con lo que:

D_0 = diámetro inicial de la tubería

D_T = diámetro de la tubería al cabo del tiempo t

Siendo la fórmula general:

$$Q_v = CE\varepsilon \times \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{10^6} \times \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \times 10^5} m^3 / s$$

el factor de corrección correspondiente será:

$$F = \frac{(CE\varepsilon\beta^2 D^2) \text{ al cabo del tiempo } t}{(CE\varepsilon\beta^2 D^2) \text{ valores iniciales}}$$

4.1.1.4 Tubo Pitot

El *tubo Pitot* fue ideado por Henri de Pitot (1695-1771) y mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (figura 4.16). La ecuación correspondiente es:

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

en la que:

P_2 = presión de impacto o total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad

P_1 = presión estática absoluta en el fluido

ρ = densidad

V = velocidad del fluido en el eje del impacto

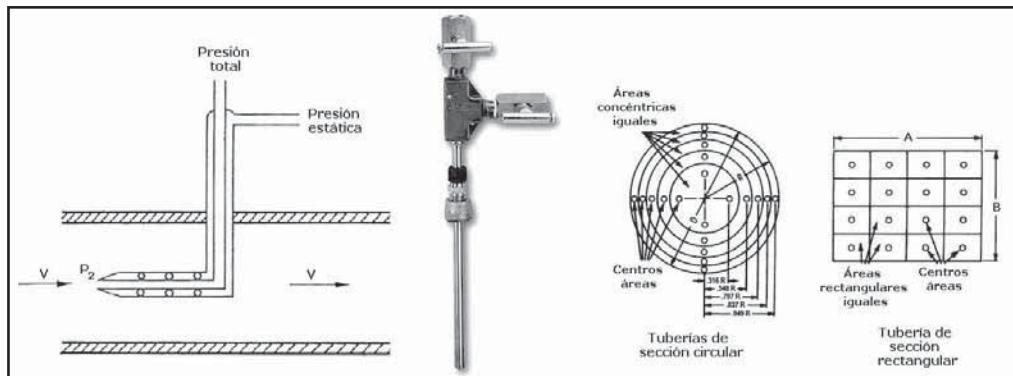


Figura 4.16 Tubo Pitot

De aquí se deduce:

$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_2 - P_1)2}{\rho}}$$

o bien introduciendo un coeficiente de velocidad C para tener en cuenta la irregular distribución de velocidades, la rugosidad de la tubería, etc., resulta:

$$V_1 = C \sqrt{\frac{(P_2 - P_1)2}{\rho}} \pi$$

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar, disponiéndolo en un tramo recto de tubería. Si el eje del tubo está en el centro de la tubería, se considera $C = 0,9$ y se obtiene una exactitud del orden del $\pm 2\%$ al $\pm 5\%$.

Si se desea la máxima exactitud se efectúan las medidas con el tubo Pitot en los puntos centrales de áreas concéntricas iguales en las tuberías de sección circular (20 lecturas), o en áreas rectangulares

iguales en las tuberías de sección rectangular (de 16 a 64 lecturas) y se promedian las raíces cuadradas de las velocidades medidas. De este modo, puede obtenerse una exactitud del $\pm 2\%$.

Se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

4.1.1.5 Tubo Annubar

El *tubo Annubar* (figura 4.17) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica, determinada por computador, que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Estos anillos tienen áreas iguales.

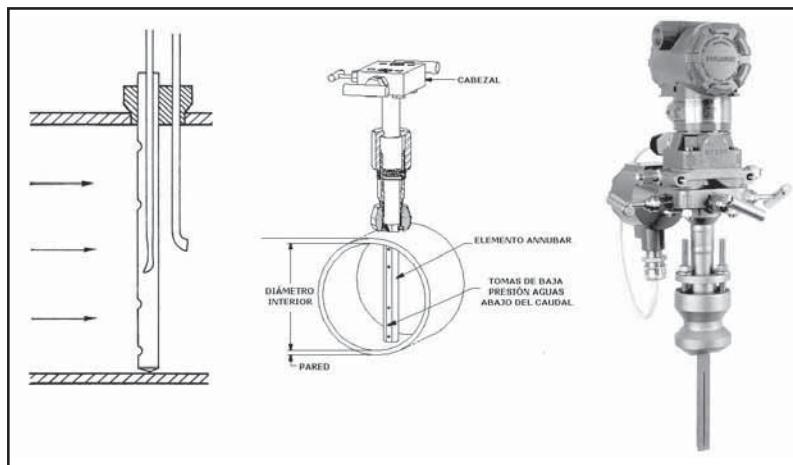


Figura 4.17 Tubo Annubar

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total, con su orificio en el centro de la tubería y aguas abajo de la misma. El tubo Annubar es de mayor precisión que el tubo Pitot, del orden del $\pm 1\%$, tiene una baja pérdida de carga y se emplea para la medida de pequeños o grandes caudales de líquidos y gases.

La *placa-orificio variable* es una innovación de la placa-orificio. Permite obtener una gama de variaciones de caudal mucho más amplia que puede llegar hasta la relación 50 a 1, mientras que en la placa-orificio viene limitada por la relación 3 a 1.

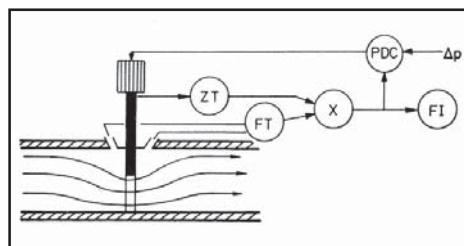


Figura 4.18 Placa-orificio variable

En la figura 4.18 puede verse un esquema de funcionamiento observándose que el sistema consiste en un servomotor con realimentación que posiciona una placa para obtener una presión diferencial especificada.

4.1.1.6 Medidor de codo

Se basa en la fuerza centrífuga ejercida por el fluido a su paso por un codo de la tubería. Esta fuerza es proporcional al producto $Densidad\ del\ líquido \times velocidad^2$ e inversamente proporcional al radio del codo. Situando dos tomas en el codo a 45° , la diferencia de presiones permitirá deducir el caudal del fluido. La pérdida de carga es sólo la del propio codo.

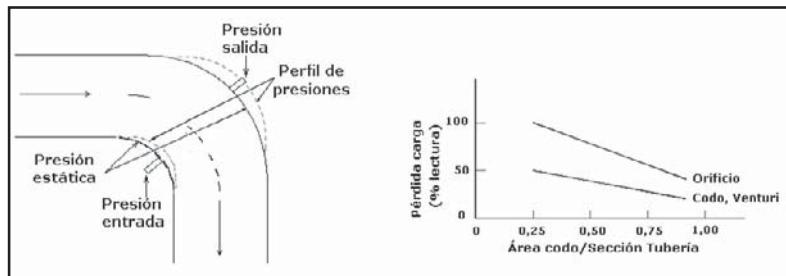
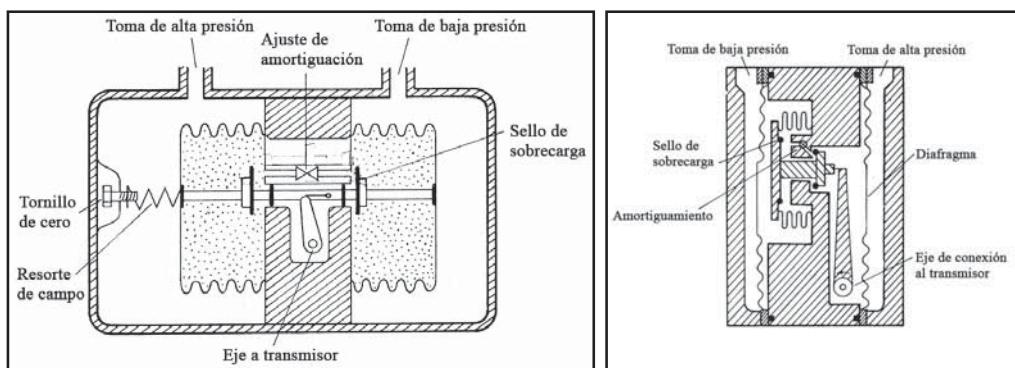


Figura 4.19 Medidor de codo

El coste del elemento es bajo. Sin embargo, como la diferencia de presiones es pequeña, su exactitud es baja y sólo se aplica cuando la precisión es suficiente y el coste de otros sistemas de medición sería muy elevado. Se han utilizado en la industria nuclear para captar las altas velocidades del fluido que se producen cuando hay una rotura en la tubería.

4.1.1.7 Transmisores de fuelle y de diafragma

La presión diferencial creada por la placa, la tobera o el tubo Venturi, puede medirse con un tubo en U de mercurio, o bien transmitirse con los instrumentos llamados convertidores diferenciales.



a) Transmisor de fuelle

b) Transmisor de diafragma

Figura 4.20 Transmisores de fuelle y de diafragma

El *transmisor de presión diferencial de fuelle* (figura 4.20a) contiene dos cámaras para la alta y baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente arrastrando la palanca de unión, el cable

y un eje exterior cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o electrónico. Un resorte de margen permite disponer de varias gamas de presión diferencial. La protección contra sobrecargas está asegurada por dos anillos de sellado que cierran herméticamente el paso del líquido de llenado de un fuelle al otro, e impiden su destrucción ante una maniobra incorrecta. Otro accesorio es una válvula contra pulsaciones de caudal que restringe el paso del líquido de llenado entre los fuelles.

El *transmisor de presión diferencial de diafragma* (figura 4.20b) se diferencia del de fuelle en que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas en lugar de fuelles, con lo cual el desplazamiento volumétrico es casi nulo.

El cuerpo de estos transmisores suele ser de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio; el fuelle o diafragma de acero inoxidable 316 (disponible también en monel, hastelloy C, teflón en inoxidable o Kel-F en monel) y el líquido de llenado silicona.

Las conexiones entre las tomas del diafragma y el convertidor de presión diferencial deben ser adecuadas al fluido a medir (figura 4.21). Con el objeto de aislar el instrumento se prevén 3 válvulas que constituyen lo que se denomina un *manifold*; este tiene una doble misión, aislar el instrumento del proceso para su mantenimiento e igualar las presiones en las dos cámaras del instrumento en la puesta en marcha de la instalación.

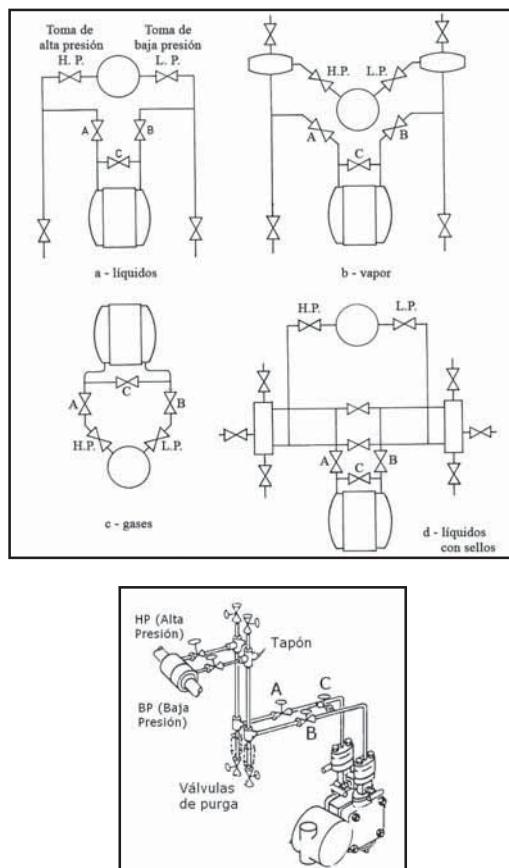


Figura 4.21 Conexiones entre el elemento y el transmisor de caudal

Si la tubería está sometida a una vibración fuerte, es aconsejable unir el instrumento al sistema mediante conexiones flexibles adecuadas a las condiciones de trabajo.

Si el fluido es corrosivo o viscoso, o bien condensa o evapora, o bien se congela o se solidifica, es necesario utilizar sistemas de sello que aislen el instrumento del proceso. Un caso típico es la medida de caudal de vapor en la que el fluido de sello es el propio condensado del vapor. En otros casos, se suele emplear una mezcla de 50% de glicerina y 50% de agua.

Hay que señalar que en la medida de caudales de vapor con transmisores de fuelle es preciso, al variar el caudal, utilizar cámaras de condensación para compensar los cambios de volumen de las cámaras de fuelle. En los transmisores de diafragma, al ser el desplazamiento volumétrico despreciable, esto no es necesario.

Cuando los problemas de condensación o de evaporación del fluido o de obturación del elemento no pueden resolverse de otra forma, es necesario utilizar un sistema de purga que introduzca un fluido de purga en la zona de medida del elemento diferencial. El fluido de purga debe ser limpio, no debe reaccionar con el fluido medido, debe circular a un caudal bajo y constante ($0,6 \text{ cm}^3/\text{s}$ para líquidos y $60 \text{ cm}^3/\text{s}$ para gas) y debe disponerse un sistema que impida la entrada del fluido del proceso en caso de un fallo en la purga.

Si el fluido de proceso es susceptible de condensación, solidificación o congelación a las temperaturas más bajas que puedan encontrarse en las tuberías, es necesario disponer de un sistema de calentamiento, en general con vapor a baja presión que impida este fenómeno. La calefacción eléctrica, si bien no está muy extendida, es cómoda y admite un buen control de temperatura.

Los transmisores citados de fuelle y diafragma, según la señal de transmisión usada utilizan, bien un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas, bien un transductor electrónico de equilibrio de fuerzas o bien un transductor digital piezoresistivo o capacitivo, idénticos a los que se estudiaron en el capítulo de instrumentos de presión. En la figura 4.22 pueden verse estos transductores de caudal.

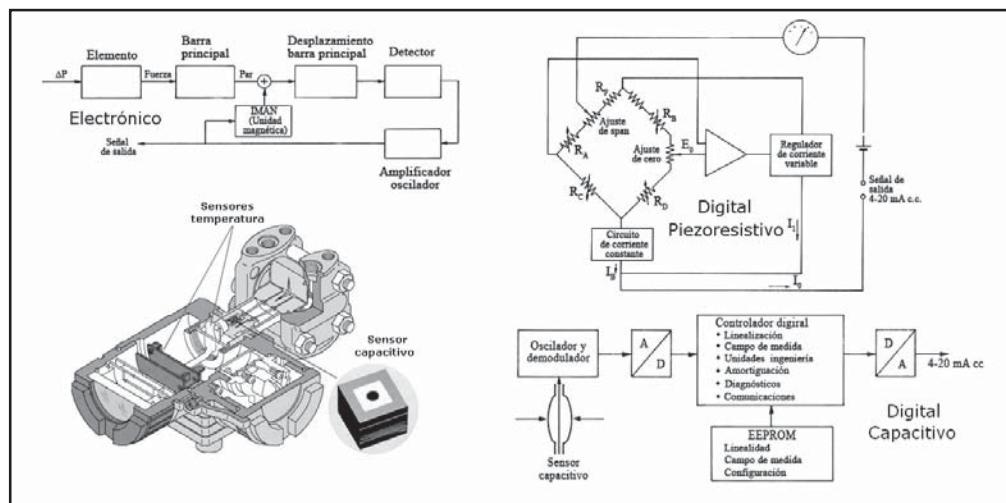


Figura 4.22 Transmisor de caudal electrónico y digital (piezoresistivo y capacitivo)

Los instrumentos transmisores o registradores de caudal miden, realmente, una presión diferencial y cómo el caudal varía según la raíz cuadrada de la presión diferencial, la escala o el gráfico del receptor,

a no ser que se utilice un extractor de raíz cuadrada intermedio, y estará graduado normalmente de 0-10 con un factor de conversión para poder leer directamente en unidades de caudal.

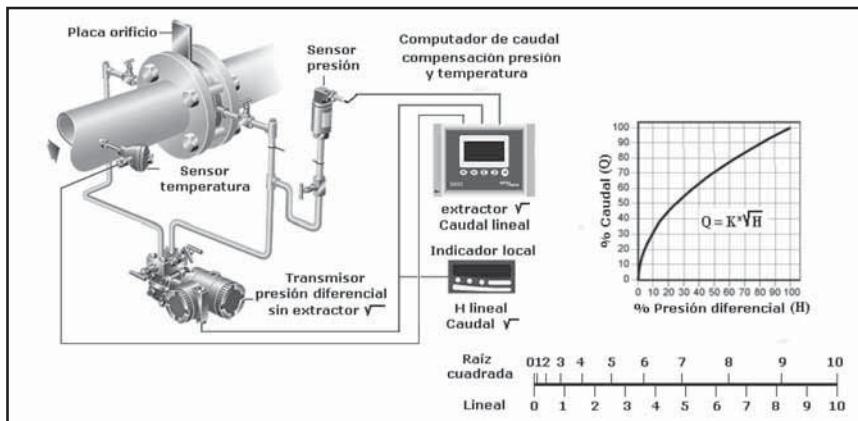


Figura 4.23 Señales de presión diferencial y caudal en elementos deprimógenos (placa-orificio, tobera, tubo Venturi)

Para conservar la exactitud de la medida se considera que la rangeabilidad es de 3:1. Los transmisores inteligentes de presión diferencial disponen de un algoritmo incorporado que extrae la raíz cuadrada de la señal, con lo que al receptor le llega una señal lineal.

4.1.1.8 Integradores

En ocasiones, desde el punto de vista de contabilización de caudales para propósitos de facturación o de balance energético de la planta, interesa *integrar* el caudal. Esto se consigue con integradores mecánicos, neumáticos, electrónicos o digitales.

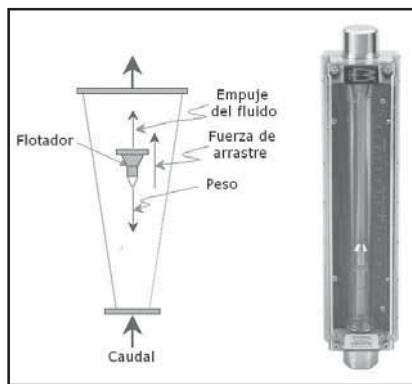
Los integradores neumáticos reciben la señal de transmisión (0,2-1 bar o 3-15 psi), extraen la raíz cuadrada y la totalizan continuamente en un integrador de 5-6 dígitos. Los integradores electrónicos o digitales integran un valor analógico, o un número basado en una selección en segundos, minutos, horas o días o bien pulsos cada 20, 40, ... ms y el algoritmo de integración puede ser triangular, cuadrado, trapezoidal y pulsos.

En los estudios anteriores hemos visto que las variaciones de la densidad dependen, en un líquido, de los cambios en la temperatura y, en los gases y vapores, de las variaciones en la presión, en la temperatura y en la compresibilidad. El caudal real puede determinarse registrando dichas variables y calculando las correcciones, o bien, realizando las operaciones de corrección automáticamente.

La compensación automática se logra con un instrumento multiplicador-divisor de las tres variables, presión diferencial, presión y temperatura. Más adelante, en el apartado correspondiente a la determinación del caudal masa, estudiaremos este punto.

4.1.2 Área variable (rotámetros)

Los *elementos de área variable* se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa-orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del caudal y de la fuerza de arrastre producida por el fluido.

**Figura 4.24** Rotámetro

El primer rotámetro, es decir, el primer elemento de área variable con flotador giratorio, fue inventado en 1908 por Kart Kueppers en Aachen (patente alemana 215225).

En el rotámetro, un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El caudal depende del peso específico del líquido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

La condición de equilibrio del flotador, según las fuerzas que actúan sobre el mismo (figura 4.24) es:

$$G = v_1 \rho_f$$

$$F = v_1 \rho_l$$

$$E = C_d \rho_l A_f \times \frac{v^2}{2g}$$

$$F + E = G$$

en las que:

G = peso del flotador

v_f = volumen del flotador

ρ_f = densidad del flotador

ρ_l = densidad del fluido

E = fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador

F = fuerza de empuje del fluido sobre el flotador

C_d = coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador

v = velocidad del fluido

A_f = área de la sección del flotador

A_w = sección interior del tubo

Resolviendo las ecuaciones anteriores, resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{C_d \rho_l A_f}}$$

El valor de C_d depende de la viscosidad del fluido.

El rotámetro, al ser un diafragma de orificio variable, tendrá como éste, un coeficiente de descarga que englobará el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, etc.

Por conveniencia, se incorpora el término $C = \sqrt{\frac{1}{C_d}}$ a este coeficiente de descarga, pasando la expresión anterior a:

$$v = C \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

Como el caudal es:

$$Q_v = v \times A_w$$

con A_w sección interior del tubo, resulta:

$$Q_v = CA_w \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

o bien en unidades de masa:

$$Q_m = CA_w \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{A_f}} \rho_l$$

Esta fórmula permite determinar el caudal del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido. Este caudal depende del peso específico del líquido y de la sección interior del tubo A_w , ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador. Por este motivo, la elección del tamaño de los rotámetros es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

Con el fin de normalizar los cálculos se acostumbra a referir los caudales del líquido o del vapor y gas a sus equivalentes en agua y aire respectivamente. Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Caudal de líquido:

$$Q_l = CA_w \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

Caudal equivalente en agua:

$$Q_{agua} = CA_w \sqrt{\frac{2gv_f(8,04 - 1)}{1 \times A_f}}$$

Habiendo considerado un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8,04; dividiendo ambas ecuaciones y despejando el caudal equivalente en agua, resulta:

$$Q_{\text{agua}} = Q_l \sqrt{\frac{\rho_l \times 7,04}{\rho_f - \rho_l}}$$

Análogamente, para un gas a t en °C y p en mm Hg, y despreciando ρ_g en el término $\rho_f - \rho_g$ resulta:

$$Q_{\text{aire}} (\text{Nm}^3 / \text{minuto}) = Q_g (\text{Nm}^3 / \text{minuto}) \sqrt{\rho_g \times \frac{T}{288} \times \frac{760}{P} \times \frac{8,04}{\rho_f}}$$

en la que:

ρ_g = densidad del gas referida al aire a 15 °C y 760 mm Hg

T = temperatura absoluta del gas ($273 + t$)

P = presión absoluta del gas en mm Hg ($p + 760$)

y en el caso de vapor:

$$Q_{\text{aire}} (\text{Nm}^3 / \text{minuto}) = Q_{\text{aire}} (\text{Kg} / \text{minuto}) \times 2,56 \times \sqrt{\frac{v_g}{\rho_f}}$$

en la que v_g es el volumen específico del vapor de agua en las condiciones de servicio y el caudal de vapor está expresado en masa.

Las fórmulas anteriores, reglas de cálculo o programas informáticos permiten determinar los caudales equivalentes en agua o en aire del fluido y, de aquí, el tamaño del rotámetro consultando las tablas del fabricante. Estas dan el tamaño, el número del tubo y el del flotador con su forma y peso.

Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio y metálicos. Los fabricantes los mecanizan de tal modo que queda asegurada la intercambiabilidad de los diversos tubos y flotadores, a fin de obtener los caudales respectivos sin necesidad de calibrar individualmente cada rotámetro.

Los tubos de vidrio pueden ser con nervios interiores, que sirven para guiar el flotador, o bien lisos. Los tubos metálicos son siempre cónico lisos y precisan de extensión por no tener una lectura directa.

Los tubos tienen una conicidad que viene expresada como la relación entre el diámetro interno del tubo en la escala máxima y el diámetro de la cabeza del flotador. Esta relación varía de 1,20 a 1,35.

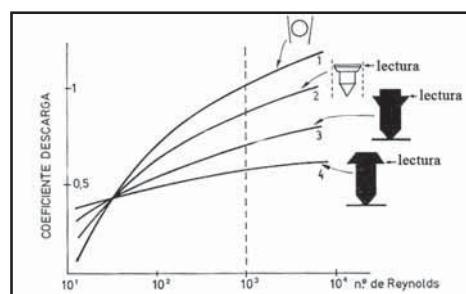


Figura 4.25 Curvas de viscosidad

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción. En la figura 4.25 pueden verse los más utilizados:

- Esféricos (posición 1) para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde plano (posición 2) para caudales medios y elevados, con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico, con borde saliente de cara inclinada contra el flujo (posición 3), con menor influencia de la viscosidad. Por sus características de caudal puede compararse a una tobera.
- Cilíndrico, con bordes salientes contra el flujo (posición 4) y con la mínima influencia de la viscosidad del fluido. Por su funcionamiento puede compararse a una placa-orificio o tobera.

La figura 4.25 indica la influencia que la viscosidad del fluido puede tener en el coeficiente de descarga del rotámetro, señalando las características relativas de independencia de cada tipo de flotador.

El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316 si bien, para satisfacer la gran variedad de requerimientos de resistencia a la corrosión que se presenta en la industria, también se utilizan otros metales. También se utilizan flotadores de plástico, si bien se prefieren los metálicos por su mayor facilidad de mecanización del borde superior.

En las tablas 4.6 y 4.7 se indican las densidades de los materiales comunes empleados en los flotadores normales y esféricos, respectivamente.

| Materiales comunes flotadores normales | | | |
|--|----------|-------------|----------|
| Material | Densidad | Material | Densidad |
| Aluminio | 2,72 | Inox. 316 | 8,04 |
| Bronce | 8,78 | Hastelloy B | 9,24 |
| Durimet | 8,02 | Hastelloy C | 8,94 |
| Monel | 8,84 | Piomo | 11,38 |
| Níquel | 8,91 | Tantalio | 16,6 |
| Goma | 1,2 | Teflón | 2,2 |
| Inox. 303 | 7,92 | Titanio | 4,5 |

Tabla 4.6 Materiales comunes de flotadores normales

| Materiales comunes de flotadores esféricos | | | |
|--|----------|-----------|----------|
| Material | Densidad | Material | Densidad |
| Vidrio de borosilicato | 2,2 | Inox. 316 | 8,04 |
| Aluminio | 2,72 | Monel | 8,84 |
| Zafiro | 4,03 | Carboloy | 14,95 |
| Inox 304 | 7,92 | Tantalio | 16,6 |

Tabla 4.7 Materiales comunes de flotadores esféricos

Las escalas de los rotámetros están grabadas en una escala de latón o de aluminio montada a lo largo del tubo y situada en coincidencia con la línea de cero del tubo, o bien directamente en el tubo de vidrio. La escala puede estar graduada en unidades directas del caudal (referido siempre a unas condiciones de servicio dadas) o bien en porcentaje del 10% al 100% de la escala total.

En este último caso, se añade un factor de multiplicación a todas las lecturas para convertir a unidades de caudal en volumen o peso del fluido. Otra forma de graduar la escala es en mm, acompañando una curva de calibración caudal-lectura en mm para determinar el caudal del fluido. La curva de calibración se emplea en rotámetros de pequeña capacidad, en los cuales el caudal no es lineal dentro del intervalo del campo de medida 10 a 1. Hay que señalar que la rangeabilidad (valor máximo a valor mínimo del caudal medible conservando la exactitud del aparato) de los rotámetros es de 10 a 1.

La pérdida de carga del rotámetro es constante en todo el recorrido del flotador y puede hacerse muy baja mediante una forma adecuada de éste. La pérdida de carga del flotador puede determinarse a partir de la expresión siguiente que relaciona el peso efectivo del flotador con su sección transversal máxima.

$$\Delta p = \frac{G_f - v_f \times \rho_l \times g}{A_f}$$

en la que:

G_f = peso del flotador

v_f = volumen del flotador

ρ_l = densidad del fluido

A_f = sección transversal máxima del flotador

A esta pérdida de carga hay que sumar la debida a las conexiones y al tubo para obtener la pérdida de carga total. El valor aproximado de ésta es el doble de la del flotador.

Del examen de la expresión del caudal de un rotámetro se desprende que su capacidad depende de las densidades del flotador y del fluido. Si cambian las condiciones de empleo de un rotámetro ya calibrado, es necesario aplicar unos factores para corregir el caudal leído. Estos factores se deducen de forma parecida al cálculo realizado en la determinación del tamaño del rotámetro de los caudales equivalentes en agua y en aire del fluido, y son los siguientes:

Variación en las densidades del flotador y del fluido

Factor en un líquido:

$$K_v = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{(\rho_{f2} - \rho_{l2}) \times \rho_{l1}}{(\rho_{f1} - \rho_{l1}) \times \rho_{l2}}}$$

En el caso de un gas, su densidad puede despreciarse frente al peso específico del flotador, de modo que el factor correspondiente es:

Factor en un gas:

$$K_v = \sqrt{\frac{\rho_{f2} \times \rho_{g1}}{\rho_{f1} \times \rho_{g2}}}$$

en la que Q_1 son las condiciones de calibración y Q_2 las nuevas condiciones de servicio; se supone el mismo coeficiente de descarga en ambos casos.

Variación en la temperatura

En los líquidos, los cambios en la temperatura hacen variar la densidad del líquido, luego:

Factor en un líquido:

$$K_t = \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_{l2}) \times \rho_{l1}}{(\rho_f - \rho_{l1}) \times \rho_{l2}}}$$

En un gas la densidad varía inversamente a la temperatura absoluta, luego:

Factor en un gas expresado en unidades de volumen:

$$K_t = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Variación en la presión

En un líquido no influye por ser el líquido incompresible, en cambio en los gases la densidad varía directamente con la presión absoluta, luego:

Factor en un gas:

$$K_p = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

Las variaciones simultáneas en la densidad, la temperatura y la presión se tienen en cuenta con el factor:

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{\rho_{l1} \times T_1 P_2}{\rho_{l2} \times T_2 P_1}} \text{ en unidades volumétricas}$$

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{\rho_{l2} \times T_2 P_1}{\rho_{l1} \times T_1 P_2}} \text{ en unidades de masa}$$

Al deducir la ecuación del caudal del rotámetro no se tuvo en cuenta la fuerza debida a la viscosidad. Tal como se vio anteriormente, su magnitud depende de la forma del flotador y de la viscosidad del fluido, en particular, del número de Reynolds en el espacio anular comprendido entre la superficie del flotador y la interior del tubo.

Cuanto más alto es el número de Reynolds, tanto menor será la influencia debida a las variaciones de la viscosidad; de este modo, se desprecia la influencia que puedan tener dichas variaciones en los gases, ya que éstos dan un alto número de Reynolds. En los líquidos, un adecuado diseño del flotador permite obtener inmunidad frente a dichas variaciones.

En la figura 4.25 se representan las curvas de viscosidad para un mismo tubo con diferentes formas de los flotadores del mismo peso y densidad. Puede observarse que la curva del flotador 4 es casi plana, de tal modo que se utiliza siempre que sean apreciables los efectos de la viscosidad.

Cuando la viscosidad del fluido es muy elevada, no es posible encontrar el caudal equivalente en agua, siendo necesario calibrar el rotámetro por simulación hidráulica, o bien, con el mismo líquido del proceso. Los límites de aplicación de los flotadores tipos 3 y 4 pueden verse en la figura 4.26.

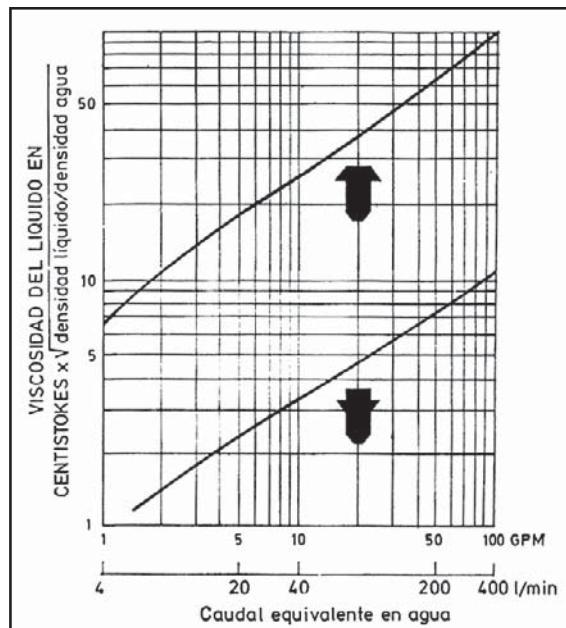


Figura 4.26 Límites de aplicación de los flotadores según la viscosidad

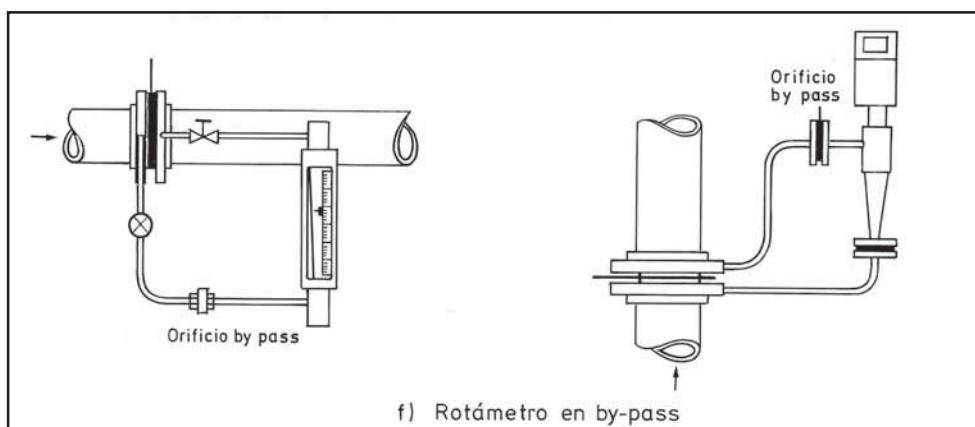
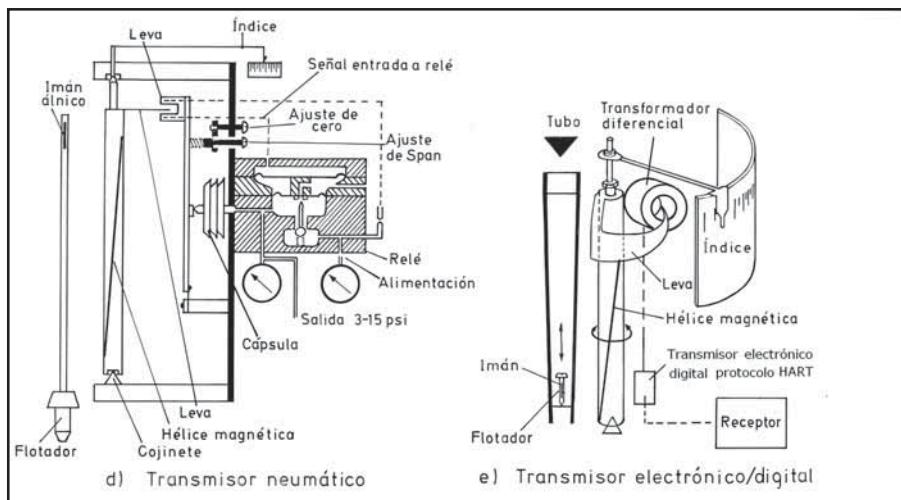
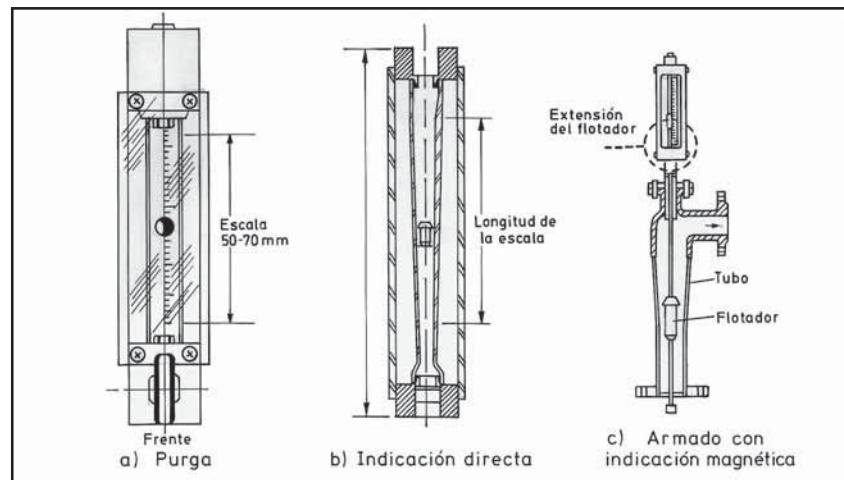
La simulación hidráulica para obtener las curvas de corrección se basa en utilizar un aceite de características conocidas (viscosidad, temperatura y densidad) y suponer una densidad (correspondiente a una temperatura dada) para el fluido cuyas curvas de viscosidad desean determinarse. Se verifica la ecuación:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt{\frac{\rho_{f2} - \rho_{l1}}{\rho_{f2} - \rho_{l2}}} \times \frac{\rho_{l2}}{\rho_{l1}}$$

en la que las condiciones 1 se refieren al aceite conocido y las 2 al simulado. Esta expresión permite calcular la viscosidad del fluido simulado 2. El mayor problema que se presenta en las calibraciones de viscosidad es en la obtención de curvas correctas de temperatura-viscosidad, de modo que los datos conocidos de la viscosidad se corresponden exactamente con las temperaturas de trabajo en la planta.

La calibración de los rotámetros se consigue, básicamente, manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado y medido con precisión.

En los líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas, mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetros y calibradores, graduados con sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0,01 segundos como mínimo.

**Figura 4.27** Tipos de rotámetros

Según la aplicación, los rotámetros pueden dividirse en rotámetros de purga, de indicación directa para usos generales y armados con indicación magnética y transmisión neumática, electrónica y digital (figura 4.27).

Los rotámetros de purga se utilizan para caudales muy pequeños. Algunas de sus aplicaciones típicas son la purga hidráulica de los sellos mecánicos de las bombas generales de la planta, la medición del nivel por burbujeo, la purga de elementos de presión diferencial para la medida de caudal evitando la obturación de las tuberías y la purga de instrumentos que trabajan en atmósferas corrosivas o polvorrientas.

Los rotámetros de vidrio de indicación directa pueden adoptar varias disposiciones: llevar placas laterales, estar cerrados con cuatro placas con ventana de cristal para ver el tubo; disponer de armadura de seguridad o blindada de cierre estanco para evitar que, en caso de rotura del tubo, el gas o el líquido interiores puedan dañar al operador; disponer de armadura antihielo con gel de sílice para evitar la presencia de humedad en el espacio entre la armadura y el tubo que podría impedir la visibilidad del flotador.

Los rotámetros armados incorporan un tubo metálico que no permite la lectura directa del caudal, con lo cual precisan de indicación externa o de transmisión.

Los rotámetros se emplean asimismo conectados a las tomas de una placa-orificio o diafragma, es decir, como rotámetros *by-pass*. En esta aplicación, en lugar de medir la presión diferencial, miden el caudal del fluido que circula de la toma de alta presión a la baja, debido a la presión diferencial creada por la placa. El rotámetro determina un caudal proporcional linealmente al caudal principal de paso por la tubería gracias a un segundo orificio situado en la tubería de *by-pass* y calibrado de tal forma que el flotador marca el 100% de la escala cuando el caudal, que pasa a través de la placa-orificio en la tubería principal, llega al 100% con la presión diferencial máxima de cálculo.

Como el rotámetro en *by-pass* mide caudal y no presión diferencial (utilizándose sólo la presión diferencial creada por la placa-orificio en la tubería principal como una bomba hidráulica que crea un caudal derivado del principal) la escala de medida es lineal y no de raíz cuadrada como sería al suponer que el elemento de medida fuese un diafragma.

Los transmisores neumáticos acoplados al rotámetro consisten en una leva que sigue magnéticamente el movimiento del flotador y que se encuentra situada entre dos toberas neumáticas. Estas toberas forman parte de un transmisor de equilibrio de movimientos.

Los transductores electrónicos acoplados a rotámetros pueden ser potenciométricos o de puente de impedancias. Ambos disponen de una varilla que sigue magnéticamente el movimiento del flotador dentro del tubo y que acciona un potenciómetro en el primero y un transformador diferencial de núcleo móvil el segundo.

El transmisor análogo/digital (figura 4.28) es híbrido utilizando el protocolo HART, lo que le permite enviar la señal analógica de 4-20 mA c.c. y la señal digital con el protocolo HART por el mismo par de hilos del transmisor electrónico analógico. El transmisor puede programarse mediante un comunicador portátil para indicación, transmisión e integración del caudal, factores de calibración y alarmas de alto y bajo caudal. Estos instrumentos tienen una exactitud del $\pm 1\%$ o menor en toda la escala y una repetibilidad del $\pm 0,25\%$.

Excepto en el caso de rotámetros de purga, debe dejarse una longitud mínima de tubería recta de 5 diámetros aguas arriba del rotámetro. El máximo error que puede producir una perturbación es del 5%.

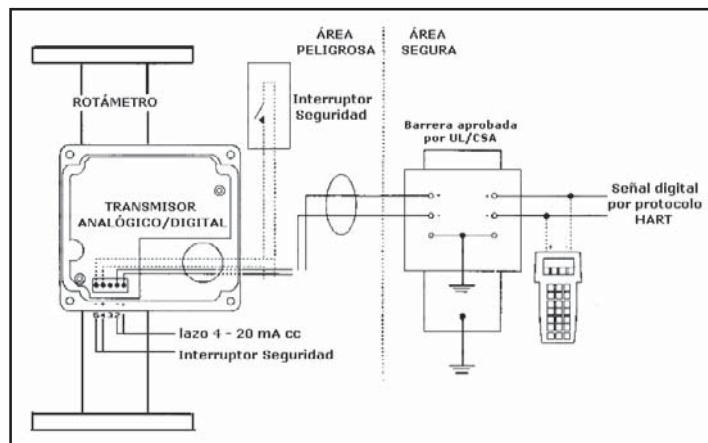


Figura 4.28 Rotámetro con transmisor analógico/digital

El intervalo de medida de los rotámetros es usualmente de 1 a 10 (relación entre el caudal mínimo y el máximo) con una escala lineal. Su exactitud es del orden de $\pm 2\%$ de toda la escala cuando están sin calibrar y de $\pm 1\%$ con calibración.

Los rotámetros son adecuados para la medida de pequeños caudales llegando a límites mínimos de 0,1 cm³/minuto en agua y de 1 cm³/minuto en aire. El valor máximo que pueden alcanzar es de 3,5 m³/minuto en agua y de 30 m³/minuto en aire. Pueden utilizarse en la medida de mayores caudales montándose como rotámetros *by-pass* en la tubería.

4.1.3 Velocidad

4.1.3.1 Vertederos y Venturi

En la medición del caudal en canales abiertos se utilizan vertederos de formas variadas que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal, entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura.

La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influído por la curva de bajada de la superficie del agua y es conveniente, incluso, utilizar un pozo de protección (tubería de Ø ligeramente mayor que el flotador) para el flotador del instrumento de medida, caso de utilizar este sistema.

El caudal es proporcional a la diferencia de alturas según la fórmula general empírica:

$$Q = K \times l \times H^n$$

Q = caudal, en m³/s

K = constante que depende del tipo de vertedero

l = anchura de la garganta del vertedero, en m

H = diferencia máxima de alturas, en m

n = exponente que depende del tipo de vertedero o canal

Los vertederos más empleados son de los siguientes tipos (figura 4.29):

- *Rectangular* (figura 4.29a) con contracción lateral, simple y fácil de construir y el más económico. Es apto para la medida de caudales de 0-60 m³/h a 0-2.000 m³/h. La fórmula de medida de caudales que suele usarse es la de Francis:

$$Q = 1,84(l - 0,2H)H^{\frac{3}{2}} \text{ m}^3 / \text{s}$$

siendo l la anchura del rectángulo en m.

El valor de $0,2H$ viene sustituido por $0,1H$ si no hay contracción del manto vertido, es decir, si l = anchura del canal.

- *Triangular o en V* (figura 4.29b) que consiste en una placa con un corte en V de vértice dirigido hacia abajo y con cada lado igualmente inclinado respecto a la vertical. A igualdad de tamaño, su campo de medida es más amplio que el de los otros vertederos. Es capaz de medir caudales dentro del intervalo 0-30 m³/h a 0-2.300 m³/h. La fórmula empírica aplicable es:

$$Q = 1,33 \times H^{2,475} \text{ m}^3 / \text{s}$$

para un vertedero en V de 90°.

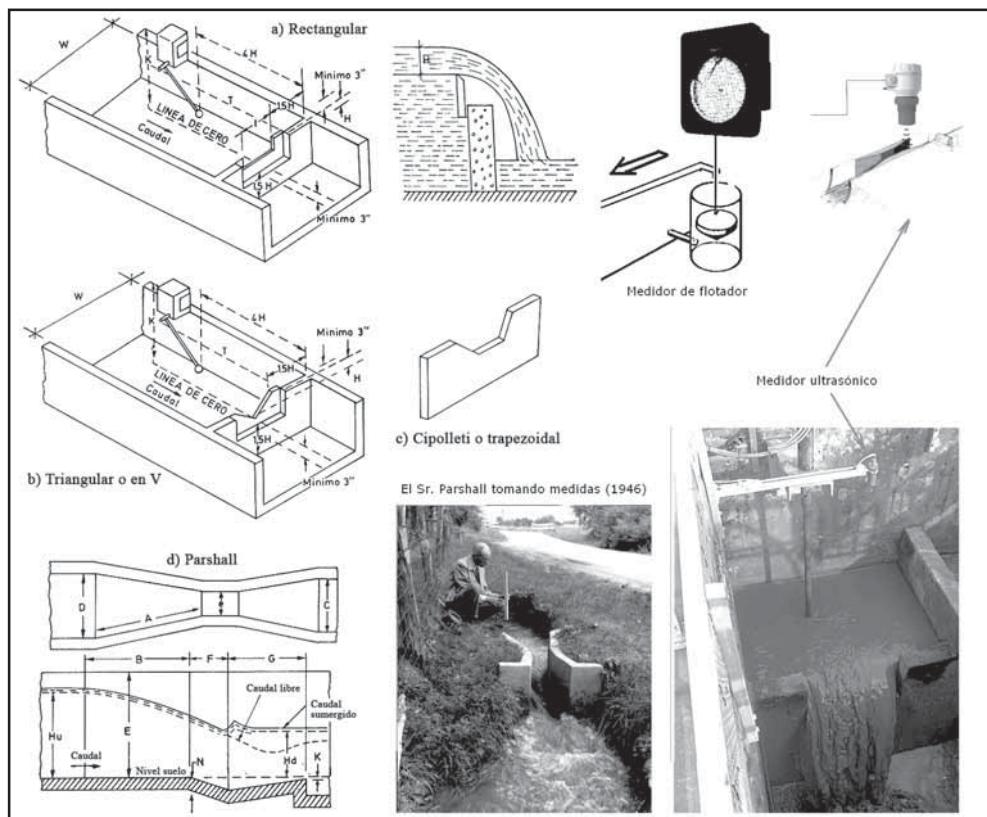


Figura 4.29 Tipos de vertederos

- *Cipolletti o trapezoidal* (figura 4.29c) con la ranura en forma de trapecio invertido. La pendiente de los lados del trapecio corrige las contracciones laterales del manto de agua y el caudal es, por lo tanto, proporcional a la altura de la cresta. Su campo de medida equivale al del vertedero rectangular. La fórmula empírica es:

$$Q = 1,86lH^{\frac{3}{2}} \text{ m}^3 / \text{s}$$

- El *vertedero Parshall o Venturi* (figura 4.29d) se emplea normalmente en aquellas aplicaciones en las que un vertedero normal no es siempre adecuado, tal como ocurre cuando el líquido transporta sólidos o sedimentos en cantidad excesiva, o bien cuando no existe altura de presión suficiente, o bien cuando no es posible construir un tramo recto de longitud suficiente (un mínimo de 10 veces la anchura del canal). Puede utilizarse para caudales superiores a 0-30 m³/h. El vertedero Parshall es de forma parecida al tubo Venturi. Consiste en paredes verticales y con el suelo inclinado en la estrangulación tal como puede verse en la figura 4.29d. La descarga del fluido puede presentarse de dos formas:

- Caudal libre, cuando la elevación del agua después de la estrangulación es lo suficientemente baja como para impedir que el agua que se descarga retorne hacia atrás y no siga suavemente el perfil del elemento Parshall.
- Caudal sumergido cuando el agua está a demasiada altura después de la estrangulación y vuelve hacia atrás. Se procura evitar por la complicación de los cálculos de la descarga.

La condición de caudal libre se tiene cuando la relación de las alturas de cresta en la parte plana y en la parte final del elemento, referidas al nivel plano, H_u/H_d es menor de 0,6 para un elemento de garganta hasta 230 mm y menor de 0,7 para anchuras de garganta mayores de 300 mm. Relaciones mayores dan lugar a caudales del tipo sumergido en el cual el caudal es una función de H_u y H_d , mientras que en la condición de caudal libre el flujo es únicamente función de H_u . Se suele mantener generalmente esta condición.

La ecuación general empírica del vertedero Parshall es $Q = K \times l \times H^n$ con los coeficientes de la tabla 4.8.

| Constantes del vertedero Parshall | | | |
|-----------------------------------|-------|----------|-------|
| K | l (m) | l (pies) | n |
| 2,32 | 0,076 | 1/4 | 1,547 |
| 2,5 | 0,152 | 1/2 | 1,58 |
| 2,34 | 0,228 | 3/4 | 1,53 |
| 2,26 | 0,305 | 1 | 1,522 |
| 2,31 | 0,457 | 1,5 | 1,54 |
| 2,34 | 0,609 | 2 | 1,55 |
| 2,39 | 0,914 | 3 | 1,566 |
| 2,42 | 1,219 | 4 | 1,578 |

Tabla 4.8 Constantes de vertedero Parshall

La medida del caudal puede efectuarse multiplicando la velocidad, medida con un tubo Pitot, por la sección del canal.

Como la relación entre la altura del líquido y el caudal es lineal, se utiliza un instrumento de flotador (figura 4.29a), o bien de burbujeo, que mide la diferencia de alturas dada y puede indicar, regular y registrar directamente el caudal o bien transmitirlo a distancia con un transmisor del tipo electrónico o digital.

Otro sistema es la medición directa mediante un sensor ultrasónico con indicación y transmisión.

4.1.3.2 Turbinas

Los *medidores de turbina* (figura 4.30) consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. El fluido choca contra el borde frontal de las palas del rotor produciendo un área de baja presión y, como resultado de esta presión diferencial, las palas giran.

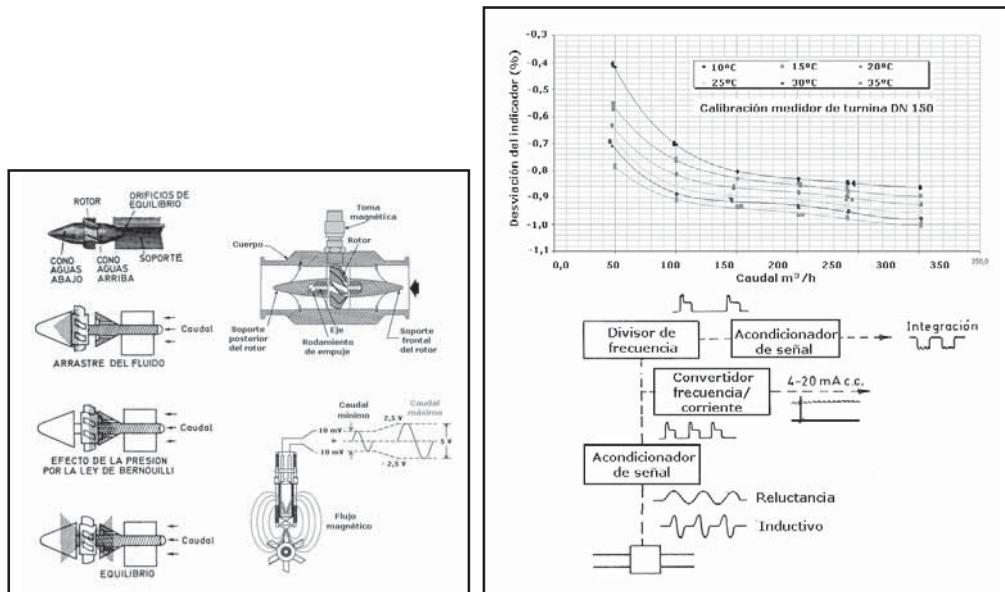


Figura 4.30 Medidor de turbina

Como la velocidad del fluido baja inmediatamente después de las palas de la turbina, por el principio de Bernoulli aumenta la presión aguas abajo de la turbina y, como consecuencia, se ejerce una fuerza igual y opuesta a la del fluido aguas arriba y, de este modo, el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales, evitando así los efectos indeseables de un rozamiento que necesariamente se produciría.

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia, la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo, induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto, es proporcional al giro de la turbina.

En el tipo inductivo, poco usado actualmente, el rotor lleva incorporadas piezas magnéticas y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En ambos casos la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal, siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo. Por ejemplo, si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulsos por unidad de caudal es constante (figura 4.31). La turbina está limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad del perfil del líquido a través de la tubería cuando aumenta la viscosidad. En las paredes, el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que las puntas de las palas no pueden girar a mayor velocidad. En general, para viscosidades superiores a 3-5 centistokes se reduce considerablemente el intervalo de medida del instrumento.

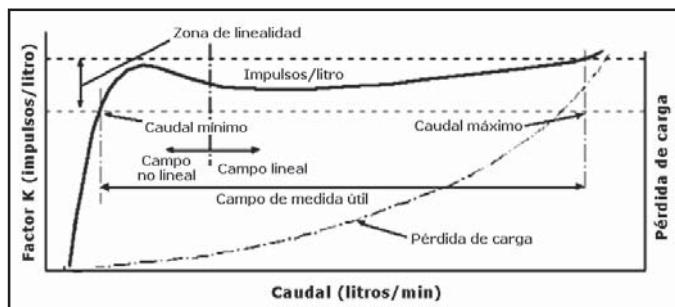


Figura 4.31 Curvas del medidor de turbina

La exactitud es muy elevada, del orden del $\pm 0,3\%$. La máxima precisión se consigue con un régimen laminar, instalando el instrumento en una tubería recta de longitudes mínimas 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo. El campo de medida llega hasta la relación 15 a 1 entre el caudal máximo y el mínimo, y la escala es lineal.

El medidor debe estar instalado de tal modo que siempre esté lleno de líquido aunque el caudal sea nulo, ya que, en la puesta en marcha, el choque del fluido a alta velocidad podría dañarlo seriamente. Es necesario el empleo de un filtro a la entrada del instrumento, incluso para mediciones de caudal de agua, ya que la más pequeña partícula podría desgastar los álabes de la turbina y afectar a la exactitud de la medida. La frecuencia generada por el medidor de turbina se transmite a un convertidor indicador o totalizador.

En la medición de gas se instalará siempre aguas arriba un filtro de cartucho con un grado de filtración mínimo de 3-5 micras o, en cualquier caso, el recomendado por el fabricante.

Los medidores de turbina pueden trabajar con caudales un 20% superior al caudal máximo estipulado sin producir daños. No obstante, la velocidad excesiva del rotor disminuirá la duración de los cojinetes en el caso de que se alcancen caudales tan altos periódicamente.

4.1.3.3 Transductores ultrasónicos

Los *transductores de ultrasonidos* se basan en el fenómeno "ultrasónico" caracterizado porque las pequeñas perturbaciones de presión en el seno de un fluido se propagan a la velocidad del sonido correspondiente al fluido. Si, además, el fluido posee también velocidad, entonces la velocidad absoluta de la propagación de la perturbación de presión es la suma algebraica de ambas.

En la práctica, las pequeñas perturbaciones de presión son pequeñas crestas de ondas sinusoidales cuya frecuencia está por encima del rango audible para el ser humano, sobre los 20.000 Hz, siendo 10.000 Hz un valor habitual.

Se aplica a un cristal una energía eléctrica, en forma de una pequeña perturbación de voltaje a alta frecuencia, provocando un estado de vibración. Si el cristal está en contacto con el fluido, esta vibración se transmite a éste y se propaga a su través. El haz cónico proyectado desde un cristal circular tiene un semiángulo α dado por la siguiente expresión:

$$\alpha = 1,2\lambda/D$$

Para que el haz acústico esté bien definido, la relación λ/D debe ser pequeña. Siendo D del orden de 1 cm (instrumento compacto), el valor de λ podrá ser del orden de 1 mm. El agua, por ejemplo, tiene una longitud de onda $\lambda = 1,5 \times 10^6/f$, en mm, (f es la frecuencia en Hz); así que la necesidad de frecuencias del orden de megahercios resulta obvia.

El cristal receptor se expone a estas fluctuaciones de presión y responde vibrando también. Dicho movimiento vibratorio produce una señal eléctrica proporcional a la acción habitual de desplazamiento del transductor piezoelectrónico.

En uno de los modelos más sencillos (figura 4.32a), se verifican las siguientes ecuaciones:

$$T_{aguas\ abajo}(A\ a\ B) = \frac{D}{\frac{\operatorname{sen}\alpha}{c+V\times\cos\alpha}}$$

$$T_{aguas\ arriba}(B\ a\ A) = \frac{D}{\frac{\operatorname{sen}\alpha}{c-V\times\cos\alpha}}$$

En las que:

c = velocidad del sonido en el fluido

D = diámetro de la tubería

V = velocidad media del fluido

α = ángulo de la trayectoria del sonido con el eje de la tubería

Resolviendo las ecuaciones anteriores resulta:

$$V = \frac{\frac{D}{\operatorname{sen}2\alpha} \times (T_{aguas\ arriba} - T_{aguas\ abajo})}{T_{aguas\ arriba} \times T_{aguas\ abajo}} = \frac{D}{\operatorname{sen}2\alpha} \times \frac{\Delta T}{T_{aguas\ arriba} \times T_{aguas\ abajo}}$$

$$Q = K \times A \times V$$

con:

Q = caudal del fluido

K = coeficiente del instrumento determinado por calibración

A = área de la sección de la tubería

Esta fórmula indica que las medidas de la velocidad y del caudal son independientes de las propiedades del fluido, de la presión, temperatura, materiales de la tubería, etc.

En otras técnicas de medición se mide la diferencia de fases o la diferencia de frecuencias entre las ondas del sonido que recorren el fluido en ambos sentidos.

El sensor puede ser fijado con abrazaderas al exterior de la tubería o bien puede estar montado dentro de la tubería en contacto con el fluido.

En otro método, utilizado en fluidos limpios, se desvía el haz de sonido emitido por un transmisor perpendicularmente a la tubería (figura 4.32b).

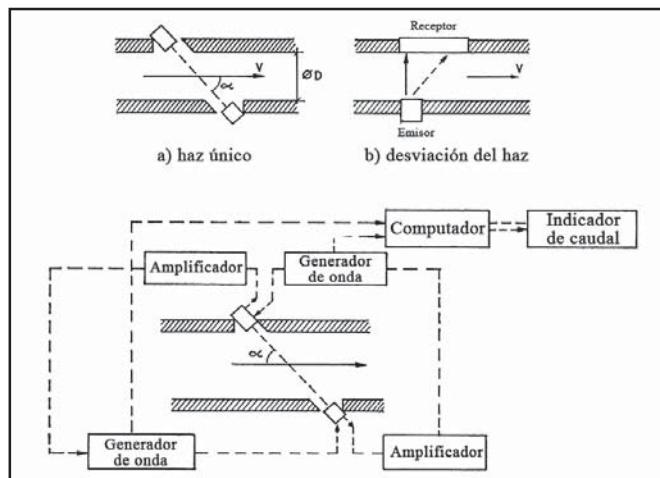


Figura 4.32 Medición de caudal por ultrasonidos

Los transductores ultrasónicos con un solo haz tienen una exactitud del $\pm 2\%$ al $\pm 3\%$ y un intervalo de medida de caudales de 20 a 1 con una escala lineal. Con dos haces, la exactitud alcanza $\pm 0,5\%$. Con tres haces el instrumento es capaz de diferenciar el flujo laminar del turbulento con lo que, añadiendo un software inteligente, la exactitud llega al $\pm 0,3\%$.

Un transductor de 5 haces (10 sensores) cumple con las condiciones rigurosas del trasvase y medida de caudal de productos petrolíferos de alto valor.

Estos elementos no tienen partes móviles, con lo cual tienen muy poco mantenimiento, no perturban el fluido, su perdida de carga es muy pequeña, la operación es bidireccional y su rangeabilidad (relación entre el caudal máximo y el mínimo sin perder exactitud en la medida) es grande.

Son adecuados en la medida de la mayor parte de líquidos. Son sensibles a los cambios en la densidad del líquido, y por lo tanto a la temperatura, ya que estas variables influyen en la velocidad del sonido. Por ejemplo, la velocidad del sonido en el seno del agua varía un 0,2% por grado centígrado de cambio en la temperatura.

- *Método Doppler* (figura 4.33). Fue descrito inicialmente por el físico austriaco Christian Doppler en 1842. Se proyectan ondas sónicas a lo largo del flujo del fluido y se mide el corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno al reflejarse el sonido en partículas suspendidas o burbujas de gas contenidas en el fluido, es decir, las discontinuidades del fluido reflejan la onda ultrasónica emitida con una frecuencia ligeramente diferente que es proporcional al caudal del fluido. El método viene limitado por la necesidad de la presencia de partículas, pero permite medir algunos caudales de fluidos difíciles tales, como mezclas gas-líquido, fangos, etc.

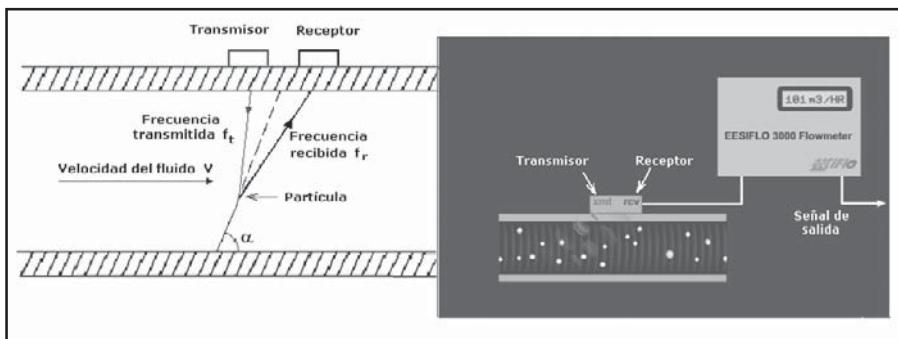


Figura 4.33 Medidor Doppler. Fuente: EESIFLO

Considerando que hay poca desviación entre la onda enviada y la reflejada por una partícula en el seno del líquido resulta:

$$\text{Velocidad aguas arriba: } V = V_s - V \cos \alpha$$

$$\text{Velocidad aguas abajo: } V = V_s + V \cos \alpha$$

Con:

V = velocidad media del fluido

V_s = velocidad del sonido en el fluido

α = ángulo de la trayectoria del sonido con el eje de la tubería

La relación entre las frecuencias reflejada y transmitida es:

$$f_r = f_t \times \frac{V_s + V \cos \alpha}{V_s - V \cos \alpha} = \frac{f_t}{V_s} \times \left(\frac{V_s + V \cos \alpha}{V_s} + V \cos \alpha \right) = f_t \times \frac{1 + 2V \cos \alpha}{V_s}$$

Habiendo considerado que $V < V_s$.

La deriva de frecuencias es:

$$\Delta f = f_r - f_t = V \times \frac{2f_t \cos \alpha}{V_s} = k \times V$$

Donde la constante k es:

$$k = \frac{2f_t \cos \alpha}{V_s}$$

Luego, la velocidad del fluido en la tubería es directamente proporcional al cambio de frecuencia entre las señales ultrasónicas transmitida y reflejada. Será necesario efectuar correcciones en la velocidad del sonido V_s , ya que depende de la presión y temperatura del fluido.

La indicación del instrumento depende, en gran medida, de las propiedades físicas del líquido, tales como la conductividad sónica, la densidad y distribución de las partículas en suspensión, el perfil de los filetes del líquido en el flujo y los cambios en la densidad y la temperatura.

Su exactitud es del $\pm 2\%$. Se desaconseja el montaje del sensor en el exterior mediante abrazaderas en algunos materiales de tubería (cobre, hormigón, plástico y fibra de vidrio), ya que las discontinuidades existentes en el material pueden afectar la medida, de modo que la exactitud puede empeorar al $\pm 20\%$.

4.1.4 Fuerza (medidor de placa)

El *medidor de placa* (figura 4.34) consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje o fuerza de impacto del fluido.

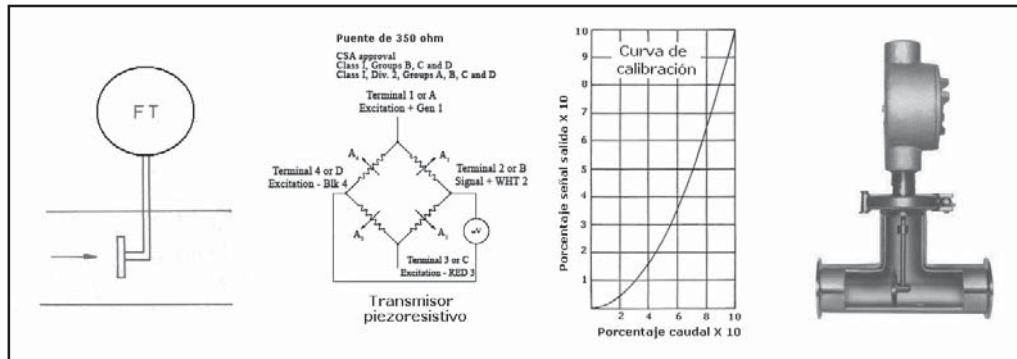


Figura 4.34 Medidor de placa. Fuente: Aliant

La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido y depende del área anular entre las paredes de la tubería y la placa. Corresponde a la siguiente ecuación:

$$F = \frac{v^2}{2g} \times \rho \times C_d \times A$$

en la que:

F = fuerza total en la placa

v = velocidad del fluido

ρ = densidad del fluido

C_d = constante experimental (coeficiente de rozamiento del disco)

A = área de la placa

De aquí:

$$v = \sqrt{\frac{2gF}{\rho \times C_d \times A}}$$

El caudal volumétrico es:

$$Q = S \times v = S \times \sqrt{\frac{2gF}{\rho \times C_d \times A}}$$

Siendo S el área de la sección interior de la tubería.

El valor típico de la constante C_d es 1,28 para placas planas y de 0,07 a 0,5 para esferas.

La placa está conectada a un transmisor de equilibrio de fuerzas o piezoresistivo. La fuerza dinámica del fluido sobre la placa es transmitida a través de una palanca a un puente de Wheatstone de cuatro galgas extensiométricas activas que proporciona una señal de salida de 4-20 mA c.c. compatible con el protocolo HART. Esta señal es proporcional a la fuerza de impacto del fluido sobre la placa y, a su vez, el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de esta fuerza. Luego, la señal transmitida es proporcional a la raíz cuadrada del caudal, siendo independiente de la temperatura del fluido o de su presión estática.

Desde el punto de vista del mantenimiento conviene limpiar la placa en las paradas largas de la planta, en particular si el fluido es un producto pegajoso o bien es un producto alimenticio. Se han dado casos de que las abejas han proliferado en la placa impidiendo que esta pueda moverse en la puesta en marcha.

El instrumento permite medir caudales de fluidos sucios o corrosivos y fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión. De hecho, puede medir caudales de cualquier tipo de líquido, gas o vapor que van de un mínimo de 0,3 l/min hasta 40.000 l/min. Tiene una alta fiabilidad y su vida útil alcanza los 20 millones de ciclos. La rangeabilidad es de 15:1 y la exactitud en la medida es del ± 1%. Su desventaja es la pérdida de carga producida por la placa.

4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)

4.1.5.1 Medidor magnético de caudal

La ley de Faraday establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. La regla de la mano derecha nos indica que colocando la mano derecha abierta, con la palma perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético, y los dedos en el sentido de la corriente del fluido, el pulgar señala el sentido de la corriente inducida.

Faraday intentó aplicar esta teoría en la medición de la velocidad del río Támesis en 1832. Suponía que el agua del río circulaba perpendicularmente al campo magnético de la Tierra y que el agua era un conductor relativamente bueno. Sumergió una probeta en el agua y esperaba obtener una señal que variara directamente con la velocidad.

No tuvo éxito debido a que no disponía de indicadores sensibles y a que el campo magnético de la Tierra es bajo. No obstante, su teoría fue aceptada. Los holandeses fueron los primeros en el mundo que adaptaron este principio. En 1950 practicaron el bombeo de grandes cantidades de agua de una zona a otra en las tierras bajas de Holanda. Era importante tener una indicación del caudal para supervisar los caudales manejados. En 1950, cuando se desarrollaron ampliamente las técnicas más avanzadas de corriente alterna, se diseñaron amplificadores más fiables y económicos y, sólo entonces, pasó a utilizarse el medidor magnético de caudal en una gran variedad de aplicaciones industriales.

La fórmula del caudal que da la ley de Faraday de inducción electromagnética es la siguiente:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(B \times A)}{dt} = -N \times B \frac{dA}{dt} = -N \times B \times D \frac{dl}{dt} = -N \times B \times D \times v = K \times v$$

Siendo:

E = tensión generada en el conductor

N = número de espiras de la bobina

φ = flujo magnético

B = densidad del campo magnético

D = distancia entre los dos electrodos (longitud del conductor)

v = velocidad del movimiento del flujo de caudal

K = constante

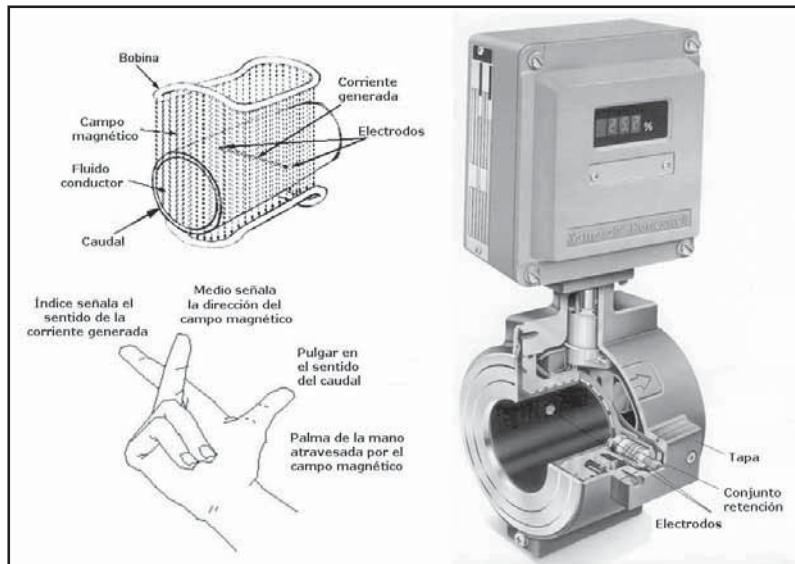


Figura 4.35 Medidor magnético de caudal. Fuente: Honeywell

El signo negativo indica que la corriente inducida crea otro campo magnético opuesto al campo magnético creado por la bobina (ley de Lenz).

La señal generada es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos, por lo que el medidor está libre de pérdidas de carga en el fluido. La fórmula indica que la tensión generada (voltios) es proporcional a la velocidad del flujo de caudal. Sin embargo, para que el instrumento pueda medir se requiere que el fluido tenga una conductividad eléctrica mayor de 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Asimismo, la constante K (y la señal generada) depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido.

Siendo:

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4}$$

Resulta:

$$Q = K \frac{E_s}{B} \times D$$

Las fórmulas anteriores indican que la señal E_s depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido. Es obvio, que para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad, debe eliminarse la influencia de estos tres factores y, por otro lado, es muy difícil mantenerlos en valores constantes (la temperatura y la conductividad del fluido vienen dadas por las condiciones particulares de servicio).

De aquí que la señal de voltaje del medidor se compara en el receptor con otra tensión denominada "tensión de referencia E_r ". Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético B , la tensión de la línea y las variaciones de temperatura y de conductividad no influyen en la exactitud de la medida. La señal de referencia E_r se toma de un arrollamiento colocado en los bobinados de campo que genera el flujo magnético. En la figura 4.36 puede verse un esquema de conexiones del elemento de medida.

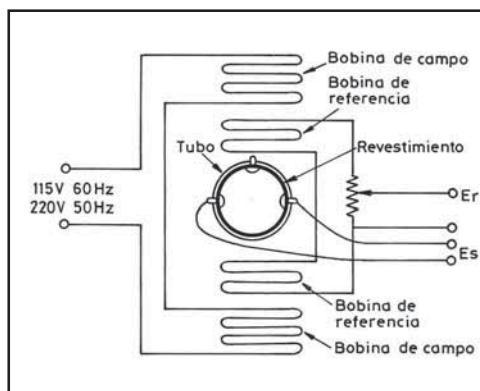


Figura 4.36 Elemento magnético de medida

El valor de E_r se escoge de tal forma que la relación E_s/E_r se hace constante en todos los medidores de caudal. De este modo se logra su intercambiabilidad con cualquier receptor. El valor de E_r , transmitido al receptor puede establecerse con completa exactitud, gracias a un potenciómetro colocado, normalmente, en el medidor y fijado en fábrica para el valor máximo del caudal.

Las bobinas pueden ser alimentadas por una fuente de c.a. generándose así una señal de c.a. dentro del campo de microvoltios a milivoltios. El sistema se utiliza en particular en fluidos tales como aguas negras, líquidos viscosos y en la industria del papel (15% de las instalaciones). El sistema es fiable y rápido, pero presenta el inconveniente de precisar periódicamente de ajuste de cero con la tubería llena y sin flujo de caudal del líquido.

En el 85% de las instalaciones se utiliza una fuente de tensión continua que excita periódicamente las bobinas que generan el campo magnético, mediante impulsos de baja frecuencia (figura 4.37). El sistema toma una medida de la señal generada cuando las bobinas están excitadas, la almacena y toma una segunda medida cuando las bobinas están desexcitadas. Esta segunda medida es debi-

da al ruido de la instalación y se resta de la suma de la señal + ruido, con lo que se obtiene sólo la medida de la señal. El sistema establece el cero durante cada ciclo de desexcitación de las bobinas, de modo que se eliminan así la deriva del cero y el ajuste de cero. El sistema mejora la exactitud, que alcanza el $\pm 0,5\%$ dentro de una rangeabilidad de 10:1.

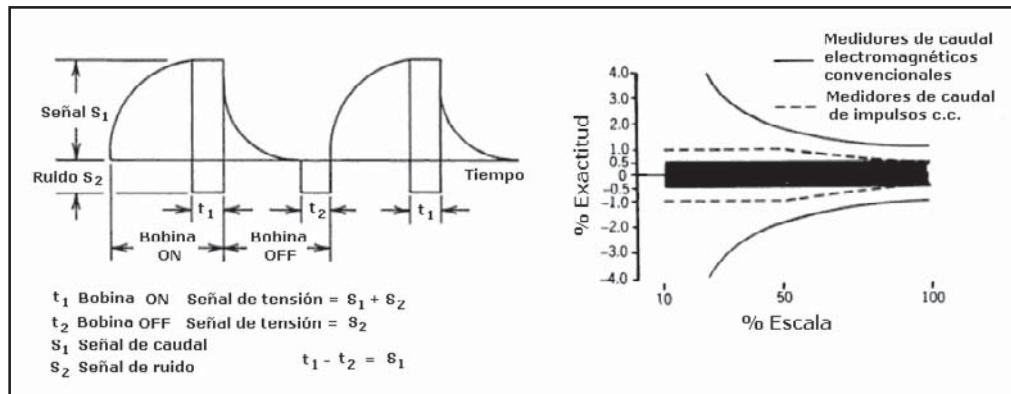


Figura 4.37 Alimentación de impulsos de c.c. Fuente: J.G. Kopp y B.G. Liptak

Una limitación que presenta la alimentación con c.c. es la lentitud de la respuesta, que suele ser de 0,2 a 2 segundos, y la sensibilidad a ruidos causados por aguas negras o por líquidos de baja conductividad.

El circuito de excitación de doble frecuencia (figura 4.38) soluciona el problema. Se excitan las bobinas con una corriente formada por dos componentes, uno de baja frecuencia (< 50 Hz) que garantiza una buena estabilidad del cero y otro de alta frecuencia que es inmune al ruido causado por fluidos de baja conductividad, alta viscosidad, fangos y reacciones electroquímicas.

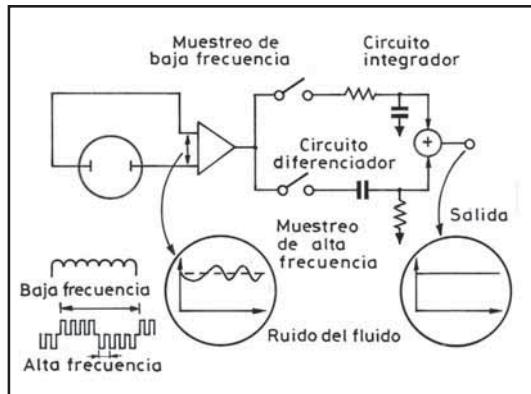


Figura 4.38 Alimentación de las bobinas del campo magnético con dos ondas superpuestas

La conductividad del fluido es la única característica propia del líquido que puede limitar el empleo del medidor magnético de caudal. El sistema electrónico, utilizado en el elemento y en el receptor, permite medir caudales de líquidos que tengan una conductividad superior a los 3 micromhos/cm. No obstante, en casos especiales, puede trabajarse con valores menores, añadiendo al circuito de

medida un preamplificador adicional (acondicionador de señal), alcanzándose una conductividad mínima de 0,3 micromhos/cm.

Con electrodos planos, sin contacto con el líquido, aislados dentro de las capas del material del revestimiento y acoplados capacitivamente con el proceso es posible medir caudales de líquidos con conductividades tan bajas como 0,05 micromhos/cm.

La conductividad eléctrica en los gases es generalmente mucho más baja, por lo que, el medidor magnético no puede emplearse para la medida de caudales de gases.

| Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm | Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm |
|-----------------------------------|------------------|---|----------|---|---|-------------------|---|----------|---|
| AgNO ₃ | Nitrato de plata | 5 10 20 40 60 | 18 | 2,56 × 10 ⁴ 4,76 × 10 ⁴ 8,72 × 10 ⁴ 15,65 × 10 ⁴ 21,01 × 10 ⁴ | C ₂ H ₅ CO ₂ H | Ácido propiónico | 1,00 5,01 10,08 20,02 30,03 50,09 69,99 100,00 | 18 | 4,79 × 10 ² 9,25 × 10 ² 11,13 × 10 ² 10,42 × 10 ² 8,18 × 10 ² 3,77 × 10 ² 85 0,07 |
| BaCl ₂ | Cloruro de bario | 5 10 15 24 | 18 | 3,89 × 10 ⁴ 7,33 × 10 ⁴ 10,51 × 10 ⁴ 15,34 × 10 ⁴ | C ₃ H ₇ CO ₂ H | Ácido butírico | 1,00 5,02 10,07 15,03 20,01 50,04 70,01 100 | 18 | 4,55 × 10 ² 8,63 × 10 ² 9,86 × 10 ² 9,55 × 10 ² 8,88 × 10 ² 2,96 × 10 ² 56,00 0,06 |
| Ba(NO ₃) ₂ | Nitrato de bario | 4,2 8,4 | 18 | 2,09 × 10 ⁴ 3,52 × 10 ⁴ | (CO ₂ H) ₂ | Ácido oxálico | 3,5 7,0 | 18 | 5,08 × 10 ⁴ 7,83 × 10 ⁴ |
| Ba(OH ₂) | Hidróxido bárico | 1,25 2,5 | 18 | 2,50 × 10 ⁴ 4,79 × 10 ⁴ | CaCl ₂ | Cloruro de calcio | 5,0 10,0 20 25 30 35 | 18 | 6,43 × 10 ⁴ 11,41 × 10 ⁴ 17,28 × 10 ⁴ 17,81 × 10 ⁴ 16,58 × 10 ⁴ 13,66 × 10 ⁴ |
| CH ₃ CO ₂ H | Ácido acético | 0,3 1 5 10 20 30 40 50 60 70 99,7 | 18 | 3,18 × 10 ² 5,84 × 10 ² 12,25 × 10 ² 15,26 × 10 ² 16,05 × 10 ² 14,01 × 10 ² 10,81 × 10 ² 7,40 × 10 ² 4,56 × 10 ² 2,35 × 10 ² 0,04 | C ₂ H ₅ CO ₂ H | Ácido propiónico | 1,00 5,01 10,08 20,02 30,03 50,09 69,99 100,00 | 18 | 4,79 × 10 ² 9,25 × 10 ² 11,13 × 10 ² 10,42 × 10 ² 8,18 × 10 ² 3,77 × 10 ² 85 0,07 |
| AgNO ₃ | Nitrato de plata | 5 10 20 40 60 | 18 | 2,56 × 10 ⁴ 4,76 × 10 ⁴ 8,72 × 10 ⁴ 15,65 × 10 ⁴ 21,01 × 10 ⁴ | C ₃ H ₇ CO ₂ H | Ácido butírico | 1,00 5,02 10,07 15,03 20,01 50,04 70,01 100 | 18 | 4,55 × 10 ² 8,63 × 10 ² 9,86 × 10 ² 9,55 × 10 ² 8,88 × 10 ² 2,96 × 10 ² 56,00 0,06 |
| BaCl ₂ | Cloruro de bario | 5 10 15 24 | 18 | 3,89 × 10 ⁴ 7,33 × 10 ⁴ 10,51 × 10 ⁴ 15,34 × 10 ⁴ | (CO ₂ H) ₂ | Ácido oxálico | 3,5 7,0 | 18 | 5,08 × 10 ⁴ 7,83 × 10 ⁴ |
| Ba(NO ₃) ₂ | Nitrato de bario | 4,2 8,4 | 18 | 2,09 × 10 ⁴ 3,52 × 10 ⁴ | CaCl ₂ | Cloruro de calcio | 5,0 10,0 20 25 30 35 | 18 | 6,43 × 10 ⁴ 11,41 × 10 ⁴ 17,28 × 10 ⁴ 17,81 × 10 ⁴ 16,58 × 10 ⁴ 13,66 × 10 ⁴ |
| Ba(OH ₂) | Hidróxido bárico | 1,25 2,5 | 18 | 2,50 × 10 ⁴ 4,79 × 10 ⁴ | C ₂ H ₅ CO ₂ H | Ácido propiónico | 1,00 5,01 10,08 20,02 30,03 50,09 69,99 100,00 | 18 | 4,79 × 10 ² 9,25 × 10 ² 11,13 × 10 ² 10,42 × 10 ² 8,18 × 10 ² 3,77 × 10 ² 85 0,07 |
| CH ₃ CO ₂ H | Ácido acético | 0,3 1 5 10 20 30 40 50 60 70 99,7 | 18 | 3,18 × 10 ² 5,84 × 10 ² 12,25 × 10 ² 15,26 × 10 ² 16,05 × 10 ² 14,01 × 10 ² 10,81 × 10 ² 7,40 × 10 ² 4,56 × 10 ² 2,35 × 10 ² 0,04 | (CO ₂ H) ₂ | Ácido oxálico | 3,5 7,0 | 18 | 5,08 × 10 ⁴ 7,83 × 10 ⁴ |
| | | | | | CaCl ₂ | Cloruro de calcio | 5,0 10,0 20 25 30 35 | 18 | 6,43 × 10 ⁴ 11,41 × 10 ⁴ 17,28 × 10 ⁴ 17,81 × 10 ⁴ 16,58 × 10 ⁴ 13,66 × 10 ⁴ |

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas

| Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm | Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm |
|--------------------|---------------------|---------------------------|----------|---|---------|--|-----------|----------|----------------------------|
| HBr | Ácido bromhídrico | 5 | 15 | $19,08 \times 10^4$ | | Ácido yodhídrico | 15,85 | 15 | $18,53 \times 10^4$ |
| | | 10 | | $35,49 \times 10^4$ | | | 24,5 | | $28,32 \times 10^4$ |
| | | 15 | | $49,40 \times 10^4$ | | | 29,8 | | $34,11 \times 10^4$ |
| HCO ₂ H | Ácido fórmico | 4,94 | 18 | $55,00 \times 10^2$ | | Ácido nítrico | 5 | 15 | $13,32 \times 10^4$ |
| | | 9,55 | | $75,60 \times 10^2$ | | | 6,2 | | $31,23 \times 10^4$ |
| | | 20,34 | | $98,40 \times 10^2$ | | | 12,4 | | $54,18 \times 10^4$ |
| | | 29,83 | | $10,38 \times 10^3$ | | | 24,8 | | $76,76 \times 10^4$ |
| | | 39,95 | | $98,40 \times 10^2$ | | | 31,0. | | $78,19 \times 10^4$ |
| | | 50,02 | | $86,40 \times 10^2$ | | | 37,2 | | $75,45 \times 10^4$ |
| | | 70,06 | | $52,30 \times 10^2$ | | | 49,6 | | $63,41 \times 10^4$ |
| | | 89,02 | | $18,70 \times 10^2$ | | | 62,0 | | $49,04 \times 10^4$ |
| | | 100 | | $2,80 \times 10^2$ | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| HCl | Ácido clorhídrico | 5 | 15 | $39,48 \times 10^4$ | | Ácido fosfórico | 10 | 15 | $56,60 \times 10^3$ |
| | | 10 | | $63,02 \times 10^4$ | | | 20 | | $11,29 \times 10^4$ |
| | | 20 | | $76,15 \times 10^4$ | | | 30 | | $16,54 \times 10^4$ |
| | | 30 | | $66,20 \times 10^4$ | | | 35 | | $18,58 \times 10^4$ |
| | | 40 | | $51,52 \times 10^4$ | | | 50 | | $20,73 \times 10^4$ |
| HF | Ácido fluorhídrico | 0,004 | 18 | $2,50 \times 10^2$ | | Ácido sulfúrico | 5 | 18 | $20,85 \times 10^4$ |
| | | 0,007 | | $3,80 \times 10^2$ | | | 10 | | $39,15 \times 10^4$ |
| | | 0,015 | | $5,00 \times 10^2$ | | | 15 | | $54,32 \times 10^4$ |
| | | 0,030 | | $8,00 \times 10^2$ | | | 20 | | $65,27 \times 10^4$ |
| | | 0,060 | | $12,30 \times 10^2$ | | | 25 | | $71,71 \times 10^4$ |
| | | 0,121 | | $21,00 \times 10^2$ | | | 30 | | $73,88 \times 10^4$ |
| | | 0,242 | | $36,30 \times 10^2$ | | | 35 | | $72,43 \times 10^4$ |
| | | 0,484 | | $67,30 \times 10^2$ | | Acetato de potasio | 4,67 | 15 | $34,70 \times 10^8$ |
| | | 1,50 | | $19,80 \times 10^3$ | | | 9,33 | | $62,50 \times 10^8$ |
| | | 2,48 | | $31,50 \times 10^3$ | | | 28 | | $12,56 \times 10^4$ |
| | | 4,80 | | $59,30 \times 10^3$ | | | 46,67 | | $11,22 \times 10^4$ |
| | | 7,75 | | $96,30 \times 10^3$ | | | 65,33 | | $47,90 \times 10^8$ |
| | | 40 | | $68,00 \times 10^4$ | | KCN | 3,25 | 15 | $52,70 \times 10^8$ |
| | | 50 | | $54,05 \times 10^4$ | | | 6,5 | | $10,26 \times 10^4$ |
| | | 60 | | $37,26 \times 10^4$ | | Carbonato potásico | 5 | 15 | $56,10 \times 10^8$ |
| | | 65 | | $29,05 \times 10^4$ | | | 10 | | $10,38 \times 10^4$ |
| | | 70 | | $21,57 \times 10^4$ | | | 20 | | $18,06 \times 10^4$ |
| | | 75 | | $15,22 \times 10^4$ | | | 30 | | $22,22 \times 10^4$ |
| | | 80 | | $11,05 \times 10^4$ | | | 40 | | $21,68 \times 10^4$ |
| | | 85 | | $98,50 \times 10^3$ | | | 50 | | $14,69 \times 10^4$ |
| | | 86 | | $99,20 \times 10^3$ | | K ₂ C ₂ O ₄ | 5 | 18 | $48,80 \times 10^8$ |
| | | 87 | | $10,10 \times 10^4$ | | | 10 | | $91,50 \times 10^8$ |
| | | 88 | | $10,33 \times 10^4$ | | Cloruro potásico | 5 | 18 | $69,00 \times 10^8$ |
| | | 89 | | $10,55 \times 10^4$ | | | 10 | | $13,59 \times 10^4$ |
| | | 90 | | $10,75 \times 10^4$ | | | 15 | | $20,20 \times 10^4$ |
| | | 91 | | $10,93 \times 10^4$ | | | 20 | | $26,77 \times 10^4$ |
| | | 92 | | $11,02 \times 10^4$ | | | 21 | | $28,10 \times 10^4$ |
| | | 93 | | $10,96 \times 10^4$ | | KF | 5 | 18 | $65,20 \times 10^8$ |
| | | 94 | | $10,71 \times 10^4$ | | | 10 | | $12,09 \times 10^4$ |
| | | 95 | | $10,25 \times 10^4$ | | | 20 | | $20,80 \times 10^4$ |
| | | 96 | | $94,40 \times 10^3$ | | | 30 | | $25,61 \times 10^4$ |
| | | 97 | | $80,00 \times 10^3$ | | | 40 | | $25,22 \times 10^4$ |
| | | 99,4 | | $85,00 \times 10^2$ | | KI | 5 | 18 | $33,80 \times 10^8$ |
| | | | | | | | 10 | | $68,00 \times 10^8$ |
| HgBr ₂ | Bromuro de mercurio | 0,223 0,422 | 18 | 16 26 | | | | | |
| HgCl ₂ | Cloruro de mercurio | 0,229 1,013 5,08 | 18 | 44 114 421 | | | | | |
| KBr | Bromuro de potasio | 5 10 20 30 36 | 15 | $4,65 \times 10^4$ $9,28 \times 10^4$ $19,07 \times 10^4$ $29,23 \times 10^4$ $35,07 \times 10^4$ | | | | | |

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (continuación)

La selección de la longitud del cable de conexión entre el sensor y el convertidor depende de la conductividad del líquido.

| Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm | Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm |
|------------------------------------|----------------------|--|----------|---|-----------------------------------|---------------------|---|----------|---|
| | | 20 30 40 55 | | $14,55 \times 10^4$ $23,03 \times 10^4$ $31,68 \times 10^4$ $42,26 \times 10^4$ | LiCl | Cloruro de litio | 2,5 5 10 20 30 40 | 18 | $41,00 \times 10^3$ $73,30 \times 10^3$ $12,18 \times 10^4$ $16,76 \times 10^4$ $13,99 \times 10^4$ $84,40 \times 10^4$ |
| KNO ₃ | Nitrato potásico | 5 10 15 20 22 | 18 | $45,40 \times 10^3$ $83,90 \times 10^3$ $11,86 \times 10^4$ $15,05 \times 10^4$ $16,25 \times 10^4$ | LiI | Yoduro de litio | 5 10 20 25 | 18 | $29,60 \times 10^3$ $57,30 \times 10^3$ $10,94 \times 10^4$ $13,46 \times 10^4$ |
| KOH | Hidróxido potásico | 4,2 8,4 16,8 25,2 33,6 42,0 | 15 | $14,64 \times 10^4$ $27,23 \times 10^4$ $45,58 \times 10^4$ $54,03 \times 10^4$ $52,21 \times 10^4$ $42,12 \times 10^4$ | LiOH | Hidróxido de litio | 1,25 2,5 5,0 7,5 | 18 | $78,10 \times 10^3$ $14,16 \times 10^4$ $23,96 \times 10^4$ $29,99 \times 10^4$ |
| K ₂ S | Sulfuro potásico | 3,18 4,98 9,93 19,96 29,97 38,08 47,26 | 18 | $84,50 \times 10^3$ $12,84 \times 10^4$ $23,43 \times 10^4$ $40,20 \times 10^4$ $45,63 \times 10^4$ $41,06 \times 10^4$ $25,79 \times 10^4$ | Li ₂ SO ₄ | Sulfato de litio | 5 10 | 15 | $40,00 \times 10^3$ $61,00 \times 10^3$ |
| K ₂ SO ₄ | Sulfato potásico | 5 10 | 18 | $45,80 \times 10^3$ $86,00 \times 10^3$ | MgCl ₂ | Cloruro de magnesio | 5 10 20 30 34 | 18 | $68,30 \times 10^3$ $11,28 \times 10^4$ $14,02 \times 10^4$ $10,61 \times 10^4$ $76,80 \times 10^3$ |
| Li ₂ CO ₃ | Carbonato de litio | 0,20 0,63 | 18 | $34,30 \times 10^2$ $88,50 \times 10^2$ | Mg(NO ₃) ₂ | Nitrato de magnesio | 5 10 17 | 18 | $43,80 \times 10^3$ $77,00 \times 10^3$ $11,02 \times 10^3$ |
| MgSO ₄ | Sulfato magnésico | 5 10 15 25 | 15 | $26,30 \times 10^3$ $41,40 \times 10^3$ $48,00 \times 10^3$ $41,50 \times 10^3$ | NaNO ₃ | Nitrato sódico | 5 10 20 30 | 18 | $43,60 \times 10^3$ $78,20 \times 10^3$ $13,03 \times 10^4$ $16,06 \times 10^4$ |
| MnCl ₂ | Cloruro de manganeso | 5 10 15 20 25 28 | 15 | $52,60 \times 10^3$ $84,40 \times 10^3$ $10,55 \times 10^4$ $11,34 \times 10^4$ $10,90 \times 10^4$ $10,16 \times 10^4$ | NaOH | Hidróxido sódico | 1 2 4 6 8 10 15 20 25 27,5 30 32,5 35 37,5 40 45 50 | 18 | $46,50 \times 10^3$ $88,70 \times 10^3$ $16,28 \times 10^4$ $22,42 \times 10^4$ $27,29 \times 10^4$ $30,93 \times 10^4$ $34,90 \times 10^4$ $32,84 \times 10^4$ $27,17 \times 10^4$ $23,86 \times 10^4$ $20,74 \times 10^4$ $17,98 \times 10^4$ $15,60 \times 10^4$ $13,61 \times 10^4$ $12,06 \times 10^4$ $97,70 \times 10^3$ $82,00 \times 10^3$ |
| Na-CH ₃ CO ₂ | Acetato de sodio | 5 20 32 | 18 | $29,50 \times 10^3$ $65,10 \times 10^3$ $56,90 \times 10^3$ | Na ₂ S | Sulfuro sódico | 2,02 5,03 9,64 14,02 16,12 18,15 | 18 | $61,20 \times 10^3$ $13,21 \times 10^4$ $20,17 \times 10^4$ $23,59 \times 10^4$ $22,43 \times 10^4$ $21,84 \times 10^4$ |
| Na ₂ CO ₃ | Carbonato de sodio | 5 10 15 | 18 | $45,10 \times 10^3$ $70,50 \times 10^3$ $83,60 \times 10^3$ | Na ₂ SO ₄ | Sulfato sódico | 5 10 15 | 18 | $40,90 \times 10^3$ $68,70 \times 10^3$ $88,60 \times 10^3$ |
| NaCl | Cloruro sódico | 5 10 15 20 25 26 | 18 | $67,20 \times 10^3$ $12,11 \times 10^4$ $16,42 \times 10^4$ $19,57 \times 10^4$ $21,35 \times 10^4$ $21,51 \times 10^4$ | | | | | |
| NaI | Yoduro sódico | 5 10 20 40 | 18 | $29,80 \times 10^3$ $58,10 \times 10^3$ $11,44 \times 10^4$ $21,11 \times 10^4$ | | | | | |

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (continuación)

Con el fin de poder evaluar las características conductivas de cada medio, la tabla 4.9 facilita las conductividades de diversas soluciones acuosas.

| Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm | Fórmula | Nombre | % en peso | Temp. °C | Conductividad micromhos/cm |
|------------------------------|-----------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-----------|----------|----------------------------|
| NH_3 | Amoníaco | 0,10 | 15 | $2,51 \times 10^2$ | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ | Nitrato de plomo | 5 | 15 | $19,10 \times 10^8$ |
| | | 0,40 | | $4,92 \times 10^2$ | | | 10 | | $32,20 \times 10^8$ |
| | | 0,80 | | $6,57 \times 10^2$ | | | 15 | | $42,90 \times 10^8$ |
| | | 1,60 | | $8,67 \times 10^2$ | | | 20 | | $52,10 \times 10^8$ |
| | | 4,01 | | $10,95 \times 10^2$ | | | 25 | | $60,00 \times 10^8$ |
| | | 8,03 | | $10,38 \times 10^2$ | | | 30 | | $66,80 \times 10^8$ |
| | | 16,15 | | $6,32 \times 10^2$ | | | | | |
| | | 30,5 | | $1,93 \times 10^2$ | | | | | |
| NH_4Cl | Cloruro amónico | 5 | 18 | $91,80 \times 10^8$ | SrCl_2 | Cloruro de estroncio | 5 | 18 | $48,30 \times 10^8$ |
| | | 10 | | $17,76 \times 10^4$ | | | 10 | | $88,60 \times 10^8$ |
| | | 15 | | $25,86 \times 10^4$ | | | 15 | | $12,31 \times 10^4$ |
| | | 20 | | $33,65 \times 10^4$ | | | 22 | | $15,83 \times 10^4$ |
| | | 25 | | $40,25 \times 10^4$ | | | | | |
| NH_4I | Yoduro amónico | 10 | 18 | $77,20 \times 10^8$ | $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ | Nitrato de estroncio | 5 | 15 | $30,90 \times 10^8$ |
| | | 20 | | $15,99 \times 10^4$ | | | 10 | | $52,70 \times 10^8$ |
| | | 50 | | $42,00 \times 10^4$ | | | 15 | | $69,00 \times 10^8$ |
| NH_4NO_3 | Nitrato amónico | 5 | 15 | $59,00 \times 10^8$ | ZnCl_2 | Cloruro de cinc | 2,5 | 15 | $27,60 \times 10^8$ |
| | | 10 | | $11,17 \times 10^4$ | | | 5 | | $48,30 \times 10^8$ |
| | | 30 | | $28,41 \times 10^4$ | | | 10 | | $72,70 \times 10^8$ |
| | | 50 | | $36,33 \times 10^4$ | | | 20 | | $91,20 \times 10^8$ |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | Sulfato amónico | 5 | 15 | $55,20 \times 10^8$ | ZnSO_4 | Sulfato de cinc | 30 | 15 | $92,60 \times 10^8$ |
| | | 10 | | $10,10 \times 10^4$ | | | 40 | | $84,50 \times 10^8$ |
| | | 20 | | $17,79 \times 10^4$ | | | 60 | | $36,90 \times 10^8$ |
| | | 30 | | $22,92 \times 10^4$ | | | | | |
| | | 31 | | $23,21 \times 10^4$ | | | | | |

Cortesía de Brooks Instruments.

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (final)

En planta existen muchas fuentes de señales de ruido que pueden perturbar el funcionamiento de los medidores magnéticos de caudal. Por ejemplo, un motor eléctrico de gran potencia colocado en las inmediaciones del elemento genera un campo magnético que puede superponerse al flujo propio del medidor. Este tipo de ruido queda eliminado gracias al sistema de tensión de referencia E , que ya se ha descrito anteriormente (figura 4.36).

Una fuente de ruido de baja frecuencia, en particular en líquidos de alta viscosidad y en líquidos con aditivos químicos, es el choque de las partículas en suspensión contra los electrodos, lo que se soluciona con una fuente de alimentación de c.a. de alta frecuencia que es inmune al ruido de baja frecuencia.

Asimismo, los restantes motores y las líneas eléctricas de potencia pueden generar corrientes y tensiones eléctricas en las tuberías de la planta, siendo estas señales captadas por el medidor en forma de señales de tensión. Al objeto de reducir la influencia de estas señales de ruido se conectan eléctricamente en *by-pass* las bridas de conexión del medidor y se ponen a masa. Sin embargo, la práctica ha demostrado que esta medida es insuficiente y muchos fabricantes han dispuesto sistemas en el receptor para eliminar dichas señales de ruido.

Es obvio que, siendo el ruido dependiente en gran parte de la situación del medidor y de la utilización continua o intermitente del equipo parásito, el sistema de compensación debe ser corregido una vez variadas las condiciones. Sin embargo, existe un sistema que evita dichas correcciones: consiste en introducir un tercer electrodo en el medidor y conectarlo a masa. De este modo, la unidad de medida está puesta a tierra con relación a dichas señales de ruido y es completamente insensible a las mismas, sin que sea necesario hacer ajustes de posición en la instalación (figura 4.39).

En la sección de medida se generan corrientes parásitas en el líquido, debido al campo magnético de corriente alterna. Estas corrientes, a su vez, generan un campo magnético y una tensión. Este campo magnético se opone al principal generado en los bobinados de campo y, por lo tanto, hace variar la densidad del flujo. La compensación de esta variación de flujo la llevan a cabo, automáticamente los bobinados de referencia descritos en la figura 4.35. Por otro lado, la tensión generada aparece como una señal en los electrodos y es captada por el receptor. Su magnitud depende de la densidad del flujo magnético y de la conductividad del fluido, y está desfasada con relación a la señal de velocidad del líquido. Como este desfase perturba el trabajo del sistema, es esencial anular esta señal.

Algunos fabricantes compensan este fenómeno de desfase empleando cables de conexión rígidos y con curvatura especial en los electrodos o bien compensándolo en el receptor. El primer método es difícil y la posición de los cables es extremadamente crítica. Por otro lado, la compensación en el receptor cambia completamente la intercambiabilidad entre los elementos primarios y el receptor, ya que la magnitud de esta señal desfasada es distinta para cada medidor y, por consiguiente, si se sustituye el medidor de caudal es necesario el reajuste del receptor.

Otros fabricantes emplean un arrollamiento cerrado con un potenciómetro de equilibrio en cada electrodo. Los bucles formados están situados en el campo magnético del instrumento y, en la misma forma que un transformador, generan una tensión que está desfasada 90° con relación a la señal de velocidad del fluido. En el potenciómetro se toma una parte de esta tensión para compensar la señal de ruido desfasada. Las conexiones eléctricas, en el elemento primario, están dispuestas de tal modo que la tensión inducida en el bucle del electrodo se suma a la señal de desfase.

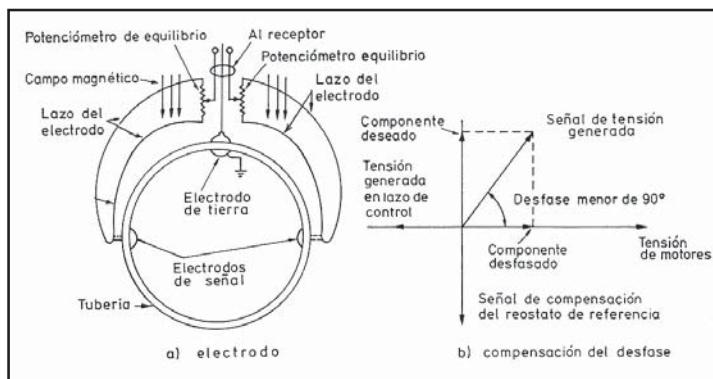


Figura 4.39 Electrodo de puesta a masa

Los tamaños de los tubos de medida varían desde 0,1" hasta 72", con diferentes capacidades.

Al medidor magnético de caudal se le pueden acoplar instrumentos para conseguir las siguientes funciones auxiliares, que también puede aportar directamente el convertidor a microprocesador:

- Indicación con una escala lineal de 0-100% de la escala.
- Transmisión neumática.
- Transmisión electrónica.
- Transmisión telemétrica con un transmisor de impulsos.
- Autocomprobación automática con diagnósticos de fallo.
- Módulo de comunicaciones.

- Integración.
- Registro.

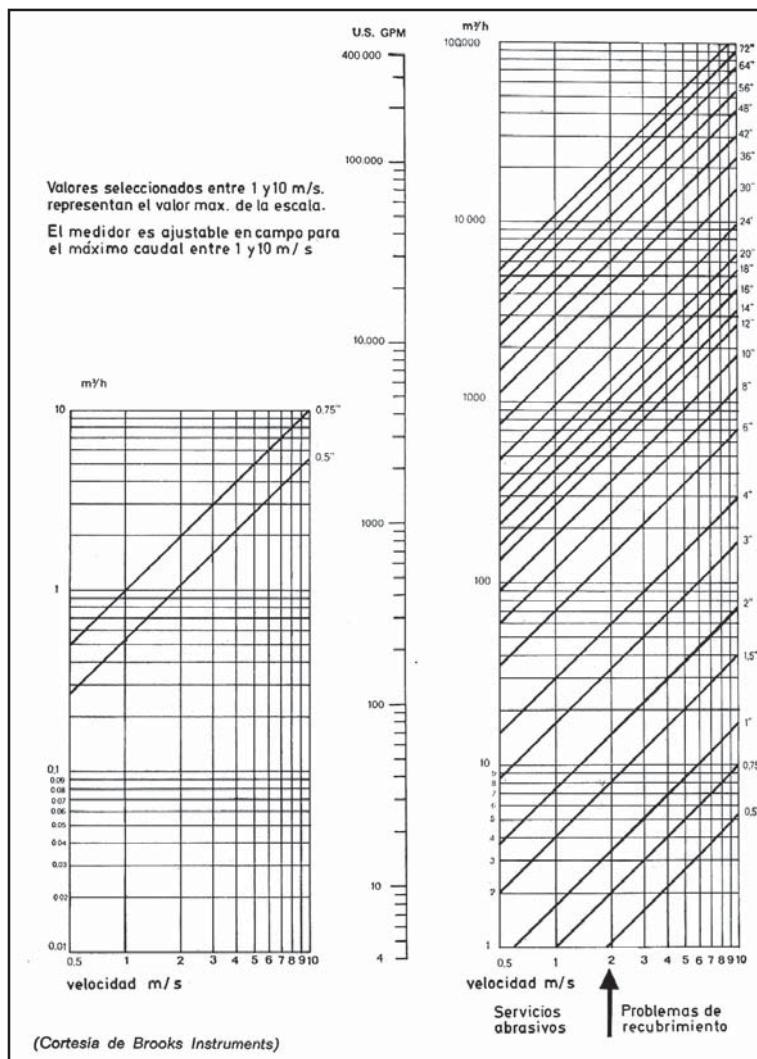


Figura 4.40 Capacidades de los medidores magnéticos de caudal

Los electrodos del tubo de medida deben seleccionarse de acuerdo con su resistencia a la corrosión o a la abrasión en el caso de aplicaciones químicas. En la tabla 4.10 se indican los materiales empleados y su resistencia, debiendo señalarse que el material más utilizado es el acero inoxidable 316.

Como materiales opcionales se emplean el Hastelloy para soluciones corrosivas a temperaturas y concentraciones bajas, la aleación Haynes con fangos abrasivos, el platino frente a soluciones ácidas, el tantalio para la mayor parte de los ácidos con independencia de su concentración y, finalmente, el titanio frente a ácidos fuertemente concentrados a altas temperaturas y a bases.

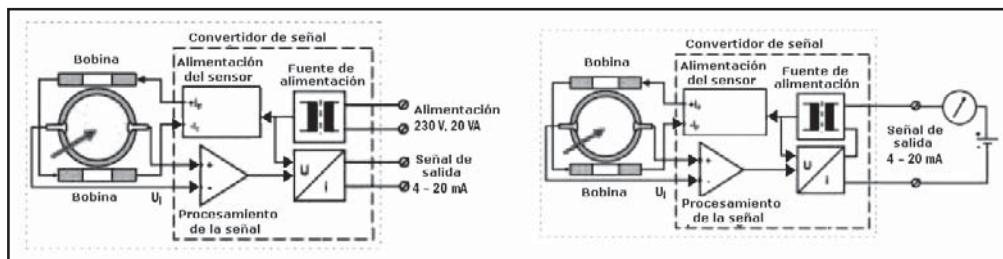


Figura 4.41 Transductor de 4-20 mA c.c.

| Materiales del cuerpo | | Materiales de los electrodos | | | | Material revestimiento | | | |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|--|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|--|--|
| Material | Material | Resistencia a la abrasión | Resistencia a la corrosión | Aplicaciones | Material | Resistencia a la abrasión | Resistencia a la corrosión | Aplicaciones | |
| Poliuretano | Inox 316 | Media | Buena | El más utilizado | Teflón (PTFE & PFA) | Media | Excelente | Ácidos, jarabes, licores. No recomendado en CIH y FH | |
| PTFE/PFA | Hastelloy B y C | Media | Buena | Soluciones corrosivas a temperaturas bajas | Poliuretano | Excelente | Media (vulnerable) | Fangos, aguas negras | |
| Goma resistente a la abrasión | Haynes Alloy 25 | Excelente | Media | Fangos abrasivos | Goma | Excelente | Media (vulnerable) | Fangos medios, agua | |
| Neopreno | Platino | Pobre | Excelente | Soluciones ácidas | Neopreno | Excelente | Media (vulnerable) | Agua natural y tratada, agua caliente y fría | |
| Ebonita (goma dura) | Tantalo | Media | Buena | Ácidos | Vidrio | Pobre | Excelente | Ácidos, productos alimenticios | |
| AISI 304 | Titánio | Buena | Buena | Ácidos fuertemente concentrados a altas temperaturas y bases | Fibra de vidrio (tubo de medida) | Media | Excelente | Pasta de papel, aguas negras, CIH | |
| Acero al carbono | Monel | Buena | Buena | Generales | Cerámica | Excelente | Media (vulnerable) | Fluidos a bajas temperaturas | |

Tabla 4.10 Materiales utilizados en los medidores de caudal electromagnéticos

Si la velocidad del fluido supera los 2-3 m/s es conveniente colocar un diafragma de protección en la entrada del elemento para prevenir su erosión. El diámetro interno del orificio del diafragma debe ser el mismo que el del revestimiento y la velocidad del fluido no debe exceder los 5 m/s para prevenir un desgaste excesivo del revestimiento. Para disminuir la velocidad puede instalarse un medidor mayor que el diámetro de la tubería, teniendo presente que la velocidad no debe bajar a menos de 1 m/s para el valor máximo de la escala.

El fluido puede llevar sustancias que por su naturaleza química pueden recubrir el tubo, los electrodos o ambos. El recubrimiento de los electrodos se presenta, en particular, en los procesos en que se añaden numerosos aditivos. En algunos casos, dicho recubrimiento no da lugar a errores importantes siempre que las sustancias se depositen concéntricamente y no aislen eléctricamente el electrodo del fluido.

Si el tubo se va recubriendo concéntricamente hasta que el área interna sea la mitad, la velocidad se duplicará para mantener el mismo caudal; por otro lado, el diámetro disminuirá en un factor de 0,707. Por consiguiente, el instrumento indicará teóricamente una tensión distinta deducida de la fórmula:

$$E = -N \times B \times d \times v$$

Es decir:

$$E = -N \times B \times d \times v = -N \times B \times 0,707 \times 2 \times v = -1,414 \times N \times B \times D \times v$$

Sin embargo, la práctica ha demostrado que, al tener el recubrimiento la misma conductividad que el líquido, la resistencia en *shunt* formada compensa el aumento de tensión y el instrumento señala aproximadamente el caudal correcto.

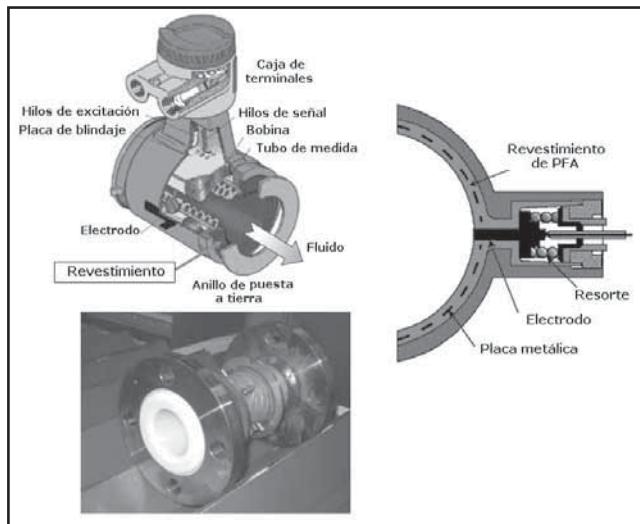


Figura 4.42 Revestimiento y electrodos

La mayor parte de las sustancias depositadas tienen la misma conductividad que el fluido, ya que permanecen en forma de pasta húmeda. Sin embargo, cuando dichas sustancias son aislantes bastará una película delgada para que el instrumento marque cero.

Entre estas dos situaciones pueden obtenerse resultados cualesquiera. Algunos de estos problemas se solucionan utilizando varios tipos de dispositivos limpiadores y calefactores de tubos.

El dispositivo ultrasónico consiste en un generador ultrasónico que hace vibrar los electrodos con vibraciones de alta frecuencia (65 ± 10 kHz) y baja amplitud que contrarrestan la tendencia de los electrodos a recubrirse, o bien remueven determinados depósitos que pueden interferir con la medida de caudal.

El sistema de limpieza de baja tensión consiste en aplicar una baja tensión a los electrodos mientras se cortocircuita la señal de entrada al transmisor para su protección. La baja tensión y corriente aplicadas al electrodo remueven los depósitos de películas de grasa o de las sustancias depositadas en los electrodos.

Aunque estos sistemas no impiden que se depositen sustancias en la tubería y, por lo tanto, no eliminan estas fuentes de error, si que alargan los períodos de tiempo de mantenimiento.

La calefacción exterior de los tubos puede efectuarse mediante cintas de resistencias alimentadas eléctricamente y controladas por medio de un termostato. La calefacción que se consigue en el tubo impide el depósito de grasa o de sólidos en las paredes del tubo, tanto en marcha como en la parada de la instalación, gracias a la temperatura controlada conseguida con el termostato.

En otros sistemas, los electrodos disponen de un sello de presión y están contenidos en una unidad fácil de desmontar, lo que permite limpiar o sustituir los electrodos sin necesidad de desmontar el tubo de medida de la tubería.

El medidor puede montarse inclinado u horizontal siempre que se mantenga la tubería llena de líquido durante la medida. Si la instalación es inclinada es conveniente colocar una válvula aguas abajo para asegurar que la tubería esté llena para todos los caudales de líquido que puedan pasar a través. No obstante, si el sistema de bombeo se para, el nivel del líquido en el elemento deja de bañar los electrodos, abriéndose el circuito y dando una señal de salida errónea. Algunos fabricantes modifican ligeramente el circuito para que el índice del instrumento receptor señale cero cuando el circuito está abierto. Los instrumentos digitales detectan automáticamente el estado sin líquido de la tubería.

Generalmente, no se requiere una longitud recta de tubería antes del medidor de caudal. Sin embargo, la existencia de accesorios que pueden provocar la formación de filetes de caudal asimétricos, obliga a situar el elemento unos 5 diámetros de tubería o más a partir de la conexión aguas arriba. Asimismo, cuando el elemento está colocado en la impulsión de una bomba se recomienda una separación de unos 8 diámetros de tubería.

Los fluidos que contienen partículas magnéticas en suspensión pueden medirse con un medidor magnético de caudal siempre que las partículas estén en suspensión homogénea al pasar a través del elemento. Se consigue, generalmente, instalando el medidor en una tubería vertical en la que las partículas magnéticas adoptarán una distribución uniforme en la sección transversal de la tubería.

Los medidores de caudal no requieren, normalmente, ajustes antes de la puesta en marcha. Los ajustes y la calibración necesarios se han llevado a cabo ya en la fábrica. Una vez que el instrumento está instalado y completadas todas las conexiones eléctricas, el medidor de caudal está listo para servicio. Basta llenar completamente la tubería con líquido y conectar el instrumento a la corriente permitiendo un tiempo para que el sistema se caliente y se establezca.

Los elementos magnéticos de caudal se calibran en fábrica utilizando un sistema dinámico de pesada y consiguiéndose así una precisión elevada del $\pm 0,1\%$.

Con el sistema completo, incluyendo el receptor, se obtiene una exactitud del 1% de toda la escala, pudiéndose llegar a una mayor exactitud, del orden del $\pm 0,5\%$, con una calibración especial y siempre que la conductividad sea elevada. El campo de medida entre el caudal máximo y el mínimo puede llegar a 100:1 con una escala de lectura lineal. La fidelidad del conjunto es del $\pm 0,25\%$. La gama de velocidades varía de 0,1 a 10 m/s.

La adición de un microprocesador mejora sustancialmente las funciones de inteligencia del medidor magnético de caudal. Su exactitud pasa al $\pm 0,5\%$ gracias al circuito de alta frecuencia y al filtrado digital de la señal que elimina las interferencias de los depósitos de sólidos en la tubería. La relación entre el campo de medida máximo al mínimo es de 100:1, se dispone de autodiagnóstico del aparato, de detección automática del estado sin líquido de la tubería, y de capacidad para medir, manual o automáticamente, el caudal en los dos sentidos de circulación del fluido. Pueden seleccionarse las unidades de ingeniería de lectura que se deseen y disponer de doble campo de medida, seleccionable manual o automáticamente.

Los medidores magnéticos de caudal son adecuados para la medida de caudales de líquidos conductores, en particular los líquidos fangosos y fluidos corrosivos. Su pérdida de carga es baja y corresponde a la de una tubería del mismo diámetro y de la misma longitud. Pueden medir caudales,

en ambos sentidos de paso, del fluido en la tubería. Tienen un bajo mantenimiento ya que carecen de partes móviles. Su rangeabilidad es de 100:1. Presentan el inconveniente de que la conductividad del fluido debe ser, como mínimo, de $3 \mu\text{S}/\text{cm}$ en la mayor parte de los casos.

4.1.6 Desplazamiento positivo

Los *medidores de desplazamiento positivo* miden el caudal, en volumen, contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. La exactitud depende de los huecos entre las partes móviles y las fijas y aumenta con la calidad de la mecanización y con el tamaño del instrumento.

Para una medición correcta, estos medidores no precisan de longitudes rectas aguas arriba y aguas abajo del propio medidor. Existen cuatro tipos básicos de medidores:

- Disco oscilante.
- Pistón oscilante.
- Pistón alternativo.
- Rotativos.

4.1.6.1 Medidor de disco basculante

El instrumento dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado de una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara en el lado opuesto, de modo que la cámara queda dividida en compartimientos móviles separados de volumen conocido.

Cuando pasa el fluido, el disco toma un movimiento parecido al de un trompo caído, de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternativamente, estableciendo contacto con las paredes de la cámara desde su parte inferior a la superior. Este movimiento de bamboleo se transmite mediante una bola y el eje del disco a un tren de engranajes (figura 4.43). El par disponible es pequeño, lo que pone un límite en la utilización de accesorios mecánicos. Empleado originalmente en aplicaciones domésticas para agua, se utiliza industrialmente en la medición de caudales de agua fría, agua caliente, aceite y líquidos alimenticios. La exactitud es del $\pm 1\%$ al $\pm 5\%$. La presión máxima es de 100 bar y el caudal máximo es de 600 l/min y se fabrica para pequeños tamaños de tubería.

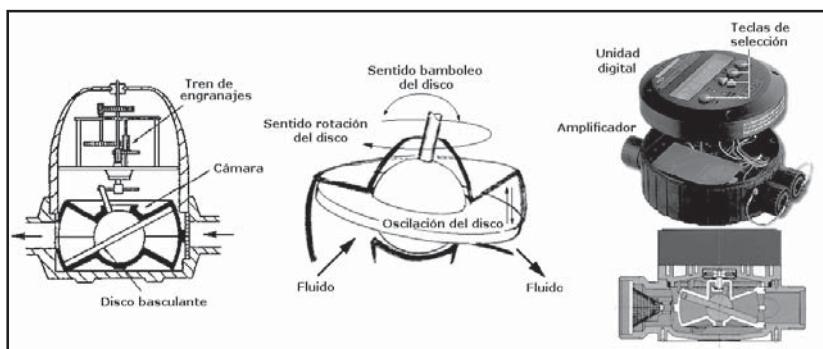


Figura 4.43 Medidor de disco basculante

4.1.6.2 Medidor de pistón oscilante

El instrumento (figura 4.44) se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisoria que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente, en un movimiento circular, entre las dos caras planas de la cámara, y que está provisto de una ranura que se desliza en la placa divisoria fija y que hace de guía del movimiento oscilante. El eje del pistón, al girar, transmite su movimiento a un tren de engranajes y a un contador. El par disponible es elevado de modo que el instrumento puede accionar los accesorios mecánicos que sean necesarios y transmitir mediante un transmisor de impulsos.

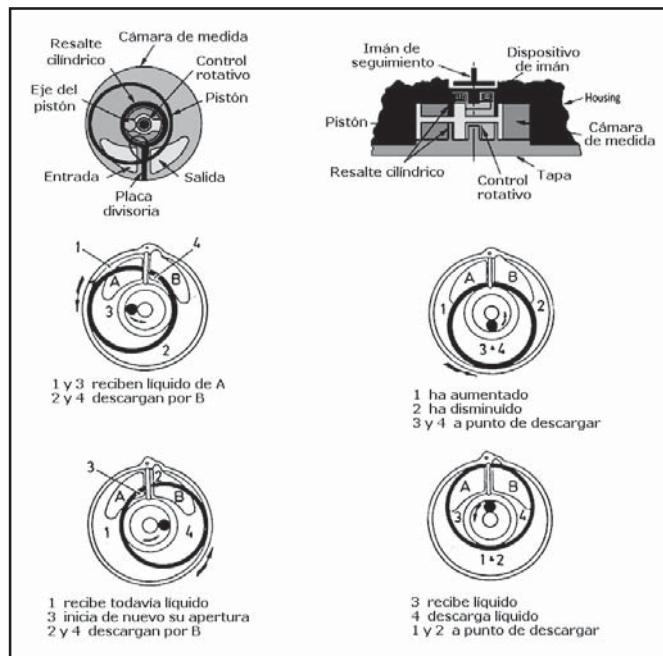


Figura 4.44 Medidor de pistón oscilante

Los diagramas adjuntos (figura 4.44) indican el movimiento del pistón desde que entra el líquido en la cámara hasta que ha sido medido y descargado.

La exactitud normal es del $\pm 1\%$, pudiéndose llegar al $\pm 0,2\%$ con pistón metálico y $\pm 0,5\%$ con pistón sintético, dentro de un margen de caudal de 5:1. Se fabrican para tamaños de tubería de hasta 3" con caudales máximos de 1.200 l/min y presiones máximas de 20 bar. Se aplican en la medición de caudales de agua y de líquidos viscosos o corrosivos.

4.1.6.3 Medidor de pistón alternativo

El *medidor de pistón convencional* (figura 4.45) es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. El instrumento se fabrica en muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, válvulas rotativas, válvulas deslizantes, horizontales. Estos instrumentos se han empleado mucho en la industria petroquímica y pueden alcanzar una precisión del $\pm 0,2\%$.

Su capacidad es pequeña comparada con los tamaños de otros medidores. Su costo inicial es alto, dan una pérdida de carga alta y son difíciles de reparar.

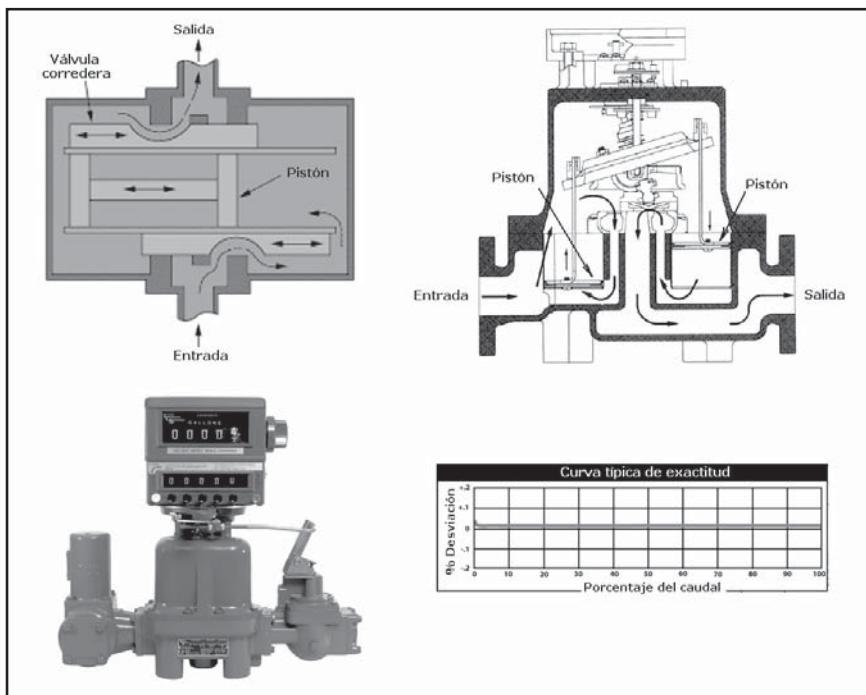


Figura 4.45 Medidor de pistón alternativo. Fuente: Total Control System

4.1.6.4 Medidor rotativo

Este tipo de instrumento tiene válvulas rotativas que giran excéntricamente rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido, en forma incremental, de la entrada a la salida. Se emplean mucho en la industria petroquímica para la medida de crudos y de gasolina, con intervalos de medida que van de unos pocos l/min de líquidos limpios de baja viscosidad hasta 64.000 l/min de crudos viscosos.

Hay varios tipos de medidores rotativos, siendo los cicloidales, los de dos rotores (birrotor) y los ovales los más empleados.

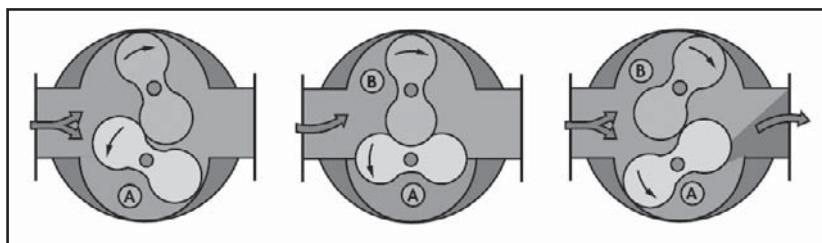


Figura 4.46 Medidor cicloidal - lóbulos Root

Los *cicloidales* (figura 4.46) contienen dos lóbulos del tipo Root engranados entre sí, que giran en direcciones opuestas, manteniendo una posición relativa fija y desplazando un volumen fijo de fluido líquido o gas en cada revolución.

Se fabrican en tamaños que van de 2 a 24" y con caudales de líquidos de 30 a 66.500 l/min, y en gas hasta 3 Nm³/h. Su exactitud es del $\pm 1\%$ para caudales del 10% al 100% del intervalo de medida, bajando mucho la precisión en caudales bajos debido a los huecos que existen entre los lóbulos.

El sistema *birrotor* (figura 4.47) consiste en dos rotores, sin contacto mecánico entre sí, que giran como únicos elementos móviles en la cámara de medida. La relación de giro mutuo se mantiene gracias a un conjunto de engranajes helicoidales totalmente cerrado y sin contacto con el líquido. Los rotores están equilibrados, estática y dinámicamente, y se apoyan en rodamientos de bolas de acero inoxidable.

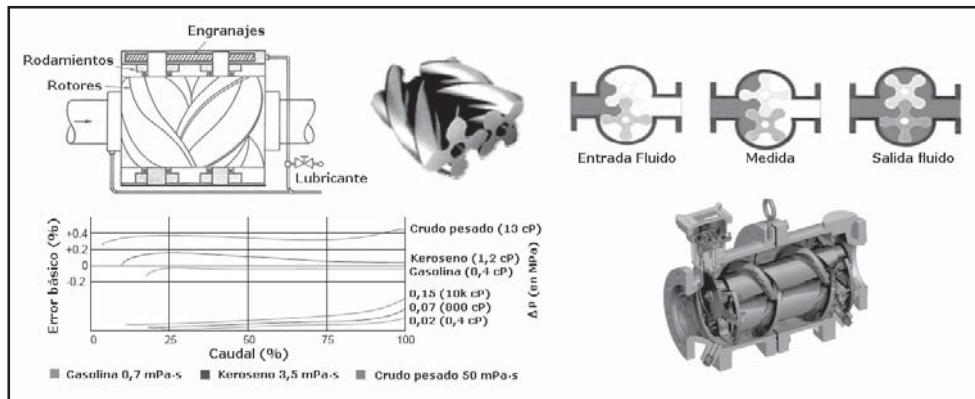


Figura 4.47 Medidor birotor

Al no existir contacto mecánico entre los rotores, la vida útil es larga y el mantenimiento es fácil. El instrumento puede trabajar con bajas presiones diferenciales del orden de 1" c. de a.

Son reversibles, admiten sobrevelocidades esporádicas sin recibir daño alguno, no requieren filtros, admiten el paso de partículas extrañas y permiten desmontar fácilmente la unidad de medida sin necesidad de desmontar el conjunto completo.

Su ajuste es sencillo y son de fácil calibración mientras el instrumento está bajo presión y sin pérdida de líquido. Su tamaño varía de 3 a 12". La exactitud es del $\pm 0,2\%$, con una pérdida de carga de 0,3 bar y con un margen de caudal de 5 a 1.

Los *medidores ovales* (figura 4.48) disponen de dos ruedas ovales que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el líquido. La acción del líquido va actuando alternativamente sobre cada una de las ruedas dando lugar a un giro suave de un par casi constante.

En la posición 1 el fluido ejerce una fuerza a derechas sobre el engranaje A, sin ejercer ninguna sobre el engranaje B, ya que este es perpendicular al flujo del fluido. En la posición 2, el fluido inicia una fuerza sobre el engranaje B. En la posición 3 sólo se ejerce una fuerza sobre el engranaje B. Finalmente, en la posición 4 se inicia una fuerza sobre el engranaje A para regresar a la posición 1.

La cámara de medida y las ruedas están mecanizadas con gran precisión para conseguir un deslizamiento mínimo entre las mismas, sin formación de bolsas o espacios muertos en la cámara de medida y barriendo completamente la misma en cada rotación. De este modo, la medida es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido. La exactitud es del $\pm 0,1\%$ al $\pm 0,5\%$ del caudal total. Los tamaños varían de 1/2 a 3".

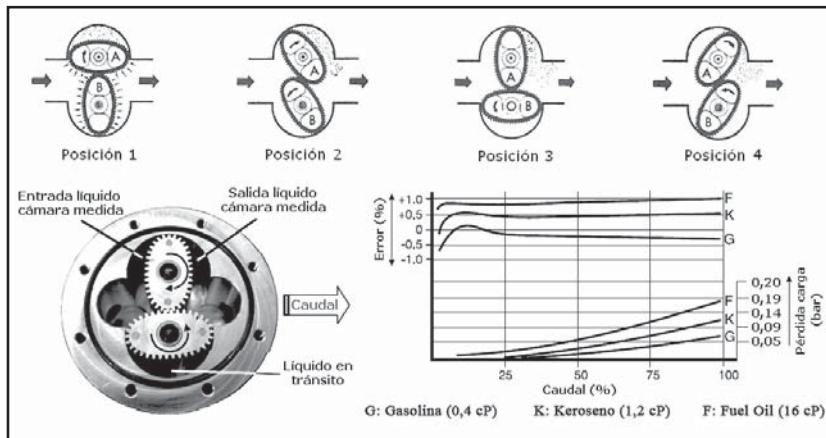


Figura 4.48 Medidor oval

4.1.6.5 Accesorios

Los medidores de desplazamiento positivo que se han descrito pueden tener acoplados varios tipos de transductores:

Transductor de impulsos por microrruptor eléctrico o neumático en el que el eje del medidor acciona un interruptor por medio de una leva. El interruptor está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

Transductor de impulsos por sensor magnético que utiliza un rotor con unos pequeños imanes embebidos en él y un captador magnético situado en el exterior de la caja del rotor. Al girar el rotor se obtienen impulsos de ondas cuadradas, aptos para circuitos convertidores o integradores.

Generador tacometrónico que genera una señal en c.c. de 0-100 mV proporcional al caudal. En su forma más sencilla consiste en un generador de c.c. con estator de imán permanente y rotor bobinado. La exactitud es bastante elevada, del orden del 0,01% para velocidades medias.

Combinados con estos transductores se encuentran otros tipos de accesorios:

- Convertidor de frecuencia-tensión.
- Convertidor de frecuencia-corriente.
- Totalizador electromecánico con *reset* manual.
- Totalizador electromecánico con *reset* externo, manual y automático.
- Totalizador electromecánico con predeterminador para procesos discontinuos.
- Totalizador neumático con programador para procesos discontinuos.
- Totalizador digital con *reset* externo, manual y automático y salida de control.
- Módulo de comunicaciones.

4.1.7 Remolino y vórtex

El *medidor de caudal por remolino* (figura 4.49) se basa en la determinación de la frecuencia del remolino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería a cuyo través pasa el fluido

(líquido o gas). La frecuencia del remolino es proporcional a la velocidad del fluido, de acuerdo con la expresión conocida como número de Strouhal:

$$St = \frac{f \times d}{v}$$

Donde:

St = número de Strouhal

f = frecuencia del remolino

d = anchura del remolino

v = velocidad del fluido

El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 20.000 y 70.000.000 [$Re = (v \times D)/\eta$].

En estas condiciones, la frecuencia del remolino no se ve afectada por la viscosidad, la densidad, la temperatura o la presión del fluido. d es mantenido constante por el fabricante del medidor, con lo cual, y siendo:

$$Q = s \times v$$

con:

D = diámetro tubería

η = viscosidad cinemática

Q = caudal volumétrico del fluido

s = sección de la tubería

resulta:

$$Q = \frac{f \times d \times s}{St} = f \times K$$

siendo K el número de impulsos/litro.

Por lo tanto, el caudal volumétrico del fluido es proporcional a la frecuencia del remolino.

La detección de la frecuencia se logra con sensores de presión de cristales piezoelectrinos, o con una termistancia de muy baja inercia térmica que sigue los efectos de refrigeración del remolino generado en el gas, o bien mediante un condensador de capacidad variable, función de la deformación de un diafragma (placa), o bien mediante la aplicación de un haz de ultrasonidos perpendicularmente al remolino, midiendo el tiempo de tránsito del haz desde el transmisor al receptor.

Los transductores de remolino son adecuados en la medida de caudales de gases y de líquidos y su intervalo de medida entre el valor máximo y el mínimo es de 50 a 1. Deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 10 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo.

El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de remolinos.

La exactitud del instrumento es del $\pm 1\%$ al $\pm 1,5\%$.

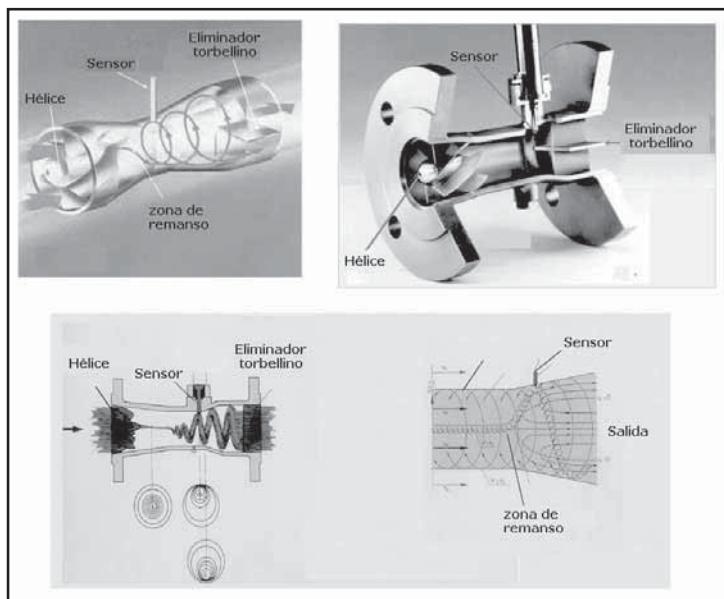


Figura 4.49 Medidor de caudal por remolino)

Los instrumentos de vórtex son parecidos a los de remolino, excepto que están basados en el efecto Von Karman, donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad) desfasados en 180° , cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y, por lo tanto, al caudal.

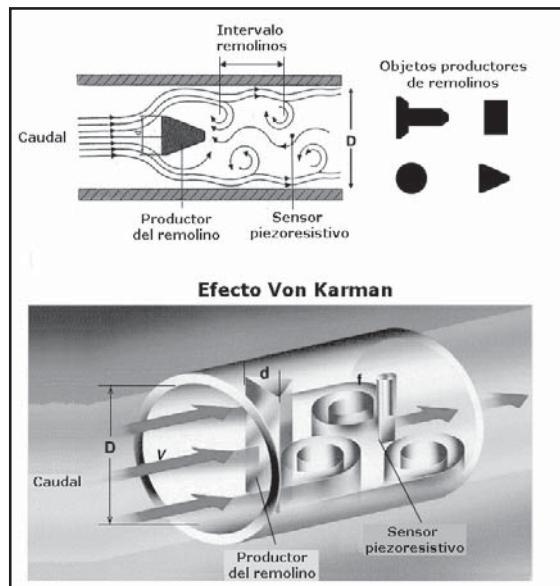


Figura 4.50 Medidor de caudal vórtex

Para asegurar una correcta medición, la tubería debe estar libre de obstrucciones cerca de la entrada. Generalmente, deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 15 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo. El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad).

El vórtex debe instalarse de tal manera que el sensor esté siempre lleno de líquido. La exactitud es del $\pm 0,75\%$ para líquidos y del $\pm 1\%$ para gases.

4.2 Medidores de caudal masa

Si bien en la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de caudal, con el caudal determinado en las condiciones de servicio, en ocasiones interesa medir el caudal masa, sea inferencialmente por compensación de la presión, la temperatura o la densidad, o bien aprovechando características medibles de la masa con sistemas básicos de *medida directa*, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis.

4.2.1 Medidores volumétricos compensados

Los medidores de caudal masa operando con medidores volumétricos con *compensación de densidad* se basan en transmitir la densidad (o su equivalente a partir de las medidas de la presión y temperatura del fluido), al medidor volumétrico y aplicar una simple operación de multiplicar para tener el caudal masa.

En los líquidos, como son incompresibles, la densidad varía por los cambios en la temperatura del fluido. Si se instala un transmisor de densidad que mida ésta en condiciones de servicio, bastará aplicar su salida directamente a la salida del transmisor de caudal para tener así el caudal corregido.

Siendo la fórmula simplificada del caudal de un fluido incompresible:

$$Q_p = \sqrt{K(p_a - p_c)\rho_0} \text{ kg/h}$$

con:

K = constante

$p_a - p_c$ = presión diferencial creada por el elemento

ρ_0 = densidad del líquido en condiciones de servicio

o bien:

$$Q_p^2 = K(p_a - p_c) \times \rho_0$$

Así, pues, la señal de presión diferencial $p_a - p_c$ captada por el transmisor correspondiente debe multiplicarse por la señal del transmisor de densidad, lo que se efectúa en el compensador.

El campo de medida del transmisor de densidad se fija de tal modo que el factor de corrección sea 1 cuando la densidad transmitida corresponde a la de cálculo.

Si el transmisor de densidad mide ésta en condiciones estándar (por ejemplo, a 15°C) la señal de salida correspondiente debe corregirse, manual o automáticamente, para las variaciones de temperatura de la línea antes de introducirla en el compensador.

En los gases la fórmula simplificada toma la misma forma que la fórmula anterior para líquidos, ya que el factor de expansión ε puede incluirse en la constante K , luego:

$$Q_p^2 = K(p_a - p_c) \times \rho_0$$

con ρ_0 el peso específico del gas en las condiciones de servicio.

En los instrumentos electrónicos pueden utilizarse varios sistemas:

- Una unidad compensadora (multiplicador-divisor) (figura 4.51) que trabaja con un transmisor de presión diferencial, un transmisor de presión absoluta PP/I de 4-20 miliamperios c.c. y un transmisor de temperatura TC/I de 4-20 mA c.c. y que compensa el caudal de gas para las variaciones de temperatura y presión. Puede realizar correcciones manuales de peso específico y compresibilidad. Su exactitud es del $\pm 0,2\%$ de la escala.
- Una unidad calculadora que compensa el caudal de gas para las variaciones de densidad del gas (figura 4.52) con correcciones manuales del peso específico. Sus características son semejantes a la unidad anterior. Su exactitud es del $\pm 0,15\%$ de la escala.

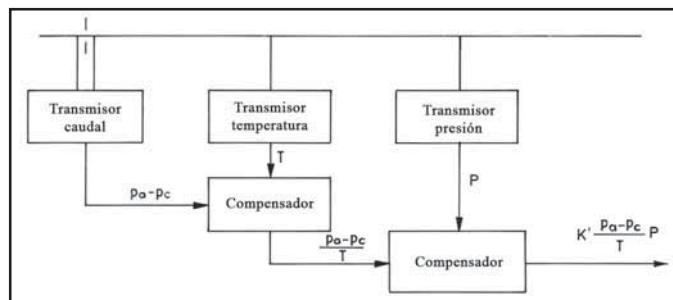


Figura 4.51 Unidad compensadora

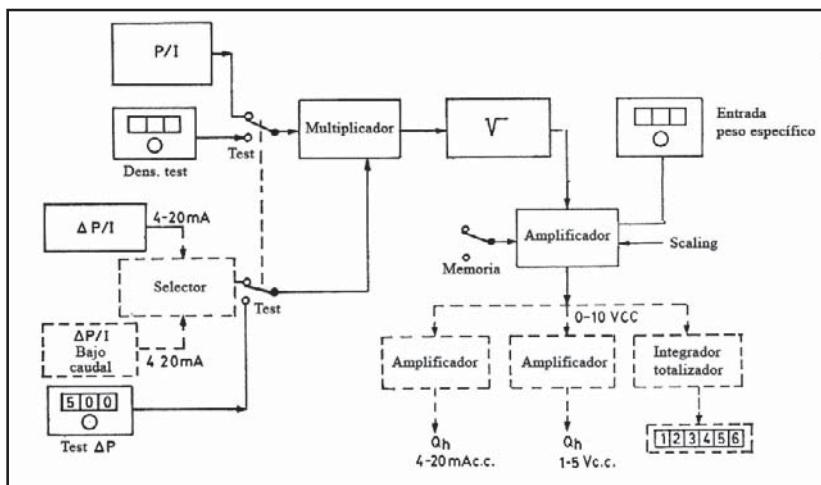


Figura 4.52 Compensación densidad

c) Compensación digital con transmisor multivariable (figura 4.53).

Los transmisores multivariantes tienen incorporadas las compensaciones de presión y temperatura y, de este modo, reemplazan los tres transmisores clásicos de caudal volumétrico, presión y temperatura por un solo aparato.

Tienen la ventaja de proporcionar un cálculo dinámico del coeficiente de descarga, del factor de expansión del gas, de los efectos de las dilataciones térmicas que intervienen en la medida del caudal, de la presión y de la temperatura y, todo ello, dentro del mismo instrumento con sólo las conexiones adicionales de la sonda de temperatura (sonda de resistencia para mayor exactitud o termopar) y de la toma de presión en la tubería.

Permiten cambiar fácilmente las unidades de ingeniería, los campos de medida de la presión, temperatura y del propio caudal y facilitan un diagnóstico del estado del instrumento, así como de las comunicaciones (HART, FOUNDATION Fieldbus, Profibus PA, Modbus, etc.) con la planta y con el panel de control.

Tienen una exactitud en el caudal masa del $\pm 1\%$ y una rangeabilidad de 8:1 en lugar de la clásica 3:1.

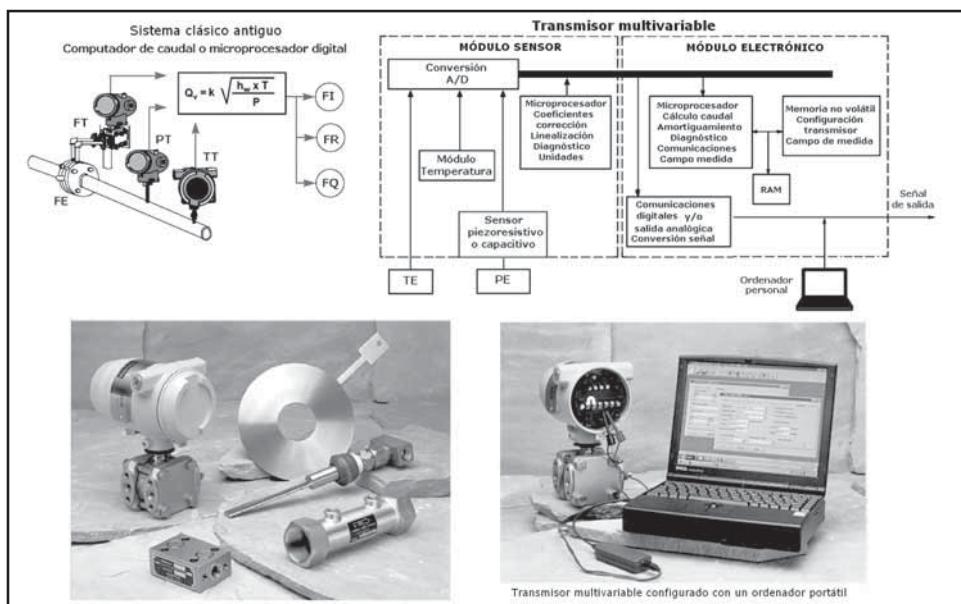


Figura 4.53 Transmisor multivariable

En cada uno de los sistemas descritos, la exactitud final de la medida depende de la influencia de los componentes empleados. Debe señalarse que con la placa-orificio colocada en tubería especial prefabricada puede obtenerse una exactitud en el caudal del $\pm 0,5\%$.

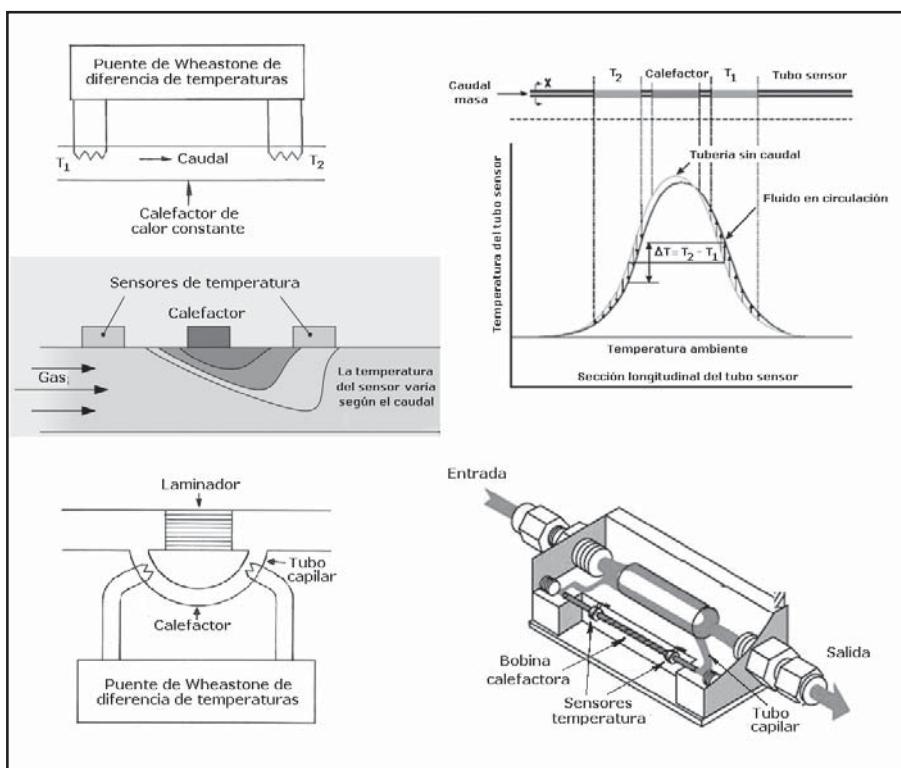
En la tabla 4.11 se señalan las exactitudes alcanzables con los conjuntos anteriores, debiendo señalarse que no están incluidos los elementos primarios ni los instrumentos finales (receptores, integradores, controladores, etc.).

| Instrumento | Exactitud (± %) | Compensación Presión y Temperatura | | Compensación Densidad | | Digital multivariable (± %) |
|---|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | Electrónico (Neumático) | Electrónico (± %) | Neumático (± %) | Electrónico (± %) | Neumático (± %) | |
| Sonda resistencia | 0,3 | 0,3 | 0,3 | | | 0,3 |
| Placa orificio | 0,5 - 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| DP/I (DP/P) | 0,2 (0,5) | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,05 |
| PP/I (PP/P) | 0,1 (0,5) | 0,5 | 0,5 | - | - | 0,05 |
| TT/I (TT/P) | 0,3 (0,5) | 0,2 | 0,5 | - | - | 0,05 |
| Densidad | 0,5 (0,25) | - | - | 0,3 | 1 | - |
| Compensador | 0,5 (0,2) | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,05 |
| Caudal masa (Valor medio cuadrático) | | 1,21 | 1,45 | 1,08 | 1,58 | 1,05 |

Tabla 4.11 Sistemas de medida de caudal compensado

4.2.2 Medidores térmicos de caudal

Miden el caudal masa directamente y se basan en la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente. El primer instrumento de esta clase fue proyectado por Thomas en 1911 para medir el caudal masa de gas en una tobera. Por este motivo, estos aparatos reciben también el nombre de medidores de caudal Thomas.

**Figura 4.54** Medidor térmico. Fuente: Shell Research, Amsterdam, The Netherlands

Consisten en una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el que circula el fluido. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas. Cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia la segunda sonda y se presenta una diferencia de temperaturas que va aumentando progresivamente entre las dos sondas a medida que aumenta el caudal. Esta diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo, de acuerdo con la ecuación:

$$Q = mc_e (t_2 - t_1)$$

en la que:

Q = calor transferido

m = masa del fluido

c_e = calor específico

t_1 = temperatura anterior

t_2 = temperatura posterior

El sistema está conectado a un puente de Wheatstone que determina la diferencia de temperaturas y la amplifica con una señal de salida de 0-5 V c.c. en 1000 ohmios de impedancia. Esta señal puede ser utilizada en registradores, indicadores digitales y controladores y admite comunicaciones digitales (HART, FOUNDATION Fieldbus, Profibus PA, Modbus, etc.) con la planta y con el panel de control.

La exactitud del medidor térmico de caudal es del $\pm 1\%$ al $\pm 2\%$ de toda la escala, la rangeabilidad es de 100:1, la repetibilidad del $\pm 0,2\%$ de la escala y la constante de tiempo de 0,5 a 3 s. Es recomendable la calibración del instrumento en las condiciones más cercanas posibles a su utilización final.

La medida es apta para bajos caudales de gas que van según los modelos de 0-10 cm³/minuto.

Para aumentar el caudal medible se deriva el fluido con un capilar y se intercala un laminador que garantiza el mismo flujo laminar que en el capilar. Como se conoce la relación de secciones entre el laminador y el capilar, midiendo el caudal en el sensor se obtiene la medida del caudal total. De este modo, los caudales medibles llegan a 15 l/min en gases y a 20 kg/h en líquidos.

No hay obstrucciones al paso de caudal por ser el tubo de medida recto y las paredes internas lisas. El instrumento puede medir caudales bajos y es adecuado para gases tales como aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, helio, amoníaco, argón, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, ácido clorhídrico, etano, etileno, metano, fosfórico y otros. También puede emplearse en líquidos, pero con caudales muy bajos.

Sus desventajas son que el gas debe estar seco y libre de partículas, tiene una respuesta lenta y debe ser calibrado para un gas o una mezcla de gases determinada.

4.2.3 Anemómetro de hilo caliente

Consiste en un conductor de hilo delgado (0,004 mm de diámetro y 1,27 mm de largo) o bien una película delgada, soportado en sus extremos y calentado por una corriente eléctrica. El hilo suele ser de tungsteno, material rígido de alto coeficiente de temperatura de resistencia. El sensor está dispuesto en una tubería por la que circula el gas, con lo que se enfriá y la tasa de enfriamiento es

proporcional al caudal masa. Se utilizan para velocidades de 15 a 3.600 m/minuto y en fluidos con turbulencias.

El circuito puede ser de corriente constante o de temperatura constante.

En el *circuito de corriente constante* (o potencia constante) la corriente a través del hilo caliente se mantiene constante y la temperatura de equilibrio alcanzada, por el hilo caliente expuesto al flujo del fluido, es simplemente proporcional al caudal. Tienen el inconveniente de que el cero no es estable, la respuesta en velocidad y temperatura es lenta y la compensación de temperatura está limitada.

El calor o potencia generados en el hilo $I^2 \times R$ se mantiene constante y la temperatura de equilibrio alcanzada con el calor perdido por el paso del fluido, es función de la velocidad del fluido.

En equilibrio se verifica la siguiente ecuación:

$$I^2 \times R_{hilo} = h \times A \times (T_{hilo} - T_{fluido})$$

siendo:

I = intensidad de la corriente

R_{hilo} = resistencia del hilo caliente

T_{hilo} = temperatura del hilo caliente

T_{fluido} = temperatura del fluido

h = coeficiente de transferencia de calor de la película

A = área de transferencia de calor

En este tipo de corriente constante, el valor de la corriente es elevado y si la velocidad del fluido disminuye bruscamente, se reduce la pérdida por convección y el hilo caliente puede quemarse por exceso de calor.

En el *circuito de temperatura constante* un circuito electrónico de retroalimentación ajusta la corriente que circula a través del hilo caliente para mantener una temperatura constante del mismo, bajo todas las condiciones de caudal del fluido. La pequeña inercia del hilo combinada con la alta amplificación del amplificador permite determinar fluctuaciones en la velocidad del fluido de varios cientos de Hz.

El hilo se conecta a un circuito de puente de Wheatstone. Cuando no hay caudal, el circuito está equilibrado y, cuando el caudal varía, cambia la resistencia del hilo caliente y el puente se desequilibra. La tensión de desequilibrio se amplifica y alimenta el puente, con lo que la corriente del puente necesaria para equilibrarlo indica la velocidad del flujo del fluido.

Se asume que se alcanza un equilibrio entre el calor generado por la corriente en el hilo y la perdida de calor por convección del entorno. Si la velocidad cambia el coeficiente de transferencia de calor por convección, varía dando lugar a un nuevo equilibrio entre la temperatura del hilo y el entorno. Las ecuaciones de transferencia de calor del hilo caliente incluyen las propiedades del fluido (conductividad calorífica, viscosidad, densidad, concentración, etc.) así como la temperatura del hilo, la geometría del sensor y la dirección del flujo respecto al sensor.

Se verifica la ecuación:

$$W = Q + \frac{dQ_i}{dt}$$

en la que:

$$W = \text{potencia por efecto Joule} = I^2 \times R_w$$

Q = calor transferido al entorno

$Q_i = C_w T_w$ = energía térmica almacenada en el hilo

C_w = calor específico del hilo

T_w = temperatura del hilo

La tensión de salida del circuito tiene la forma:

$$E^2(v) = a + b \times v^\theta$$

En la que a, b, θ son constantes de calibración del anemómetro.

Esta ecuación no tiene una relación lineal con la velocidad y es de naturaleza exponencial. De aquí que precisa la calibración del anemómetro antes de su utilización. El sistema tiene una sensibilidad casi constante dentro del campo amplio de velocidades, de modo que cubre velocidades desde unos pocos cm/s hasta velocidades superiores a la del sonido. Los sensores pueden ser de varios tipos: hilos miniatura (buena respuesta de alta frecuencia), hilos de lamina de oro, película delgada de níquel o sensores de fibra. La exactitud es del $\pm 1\%$.

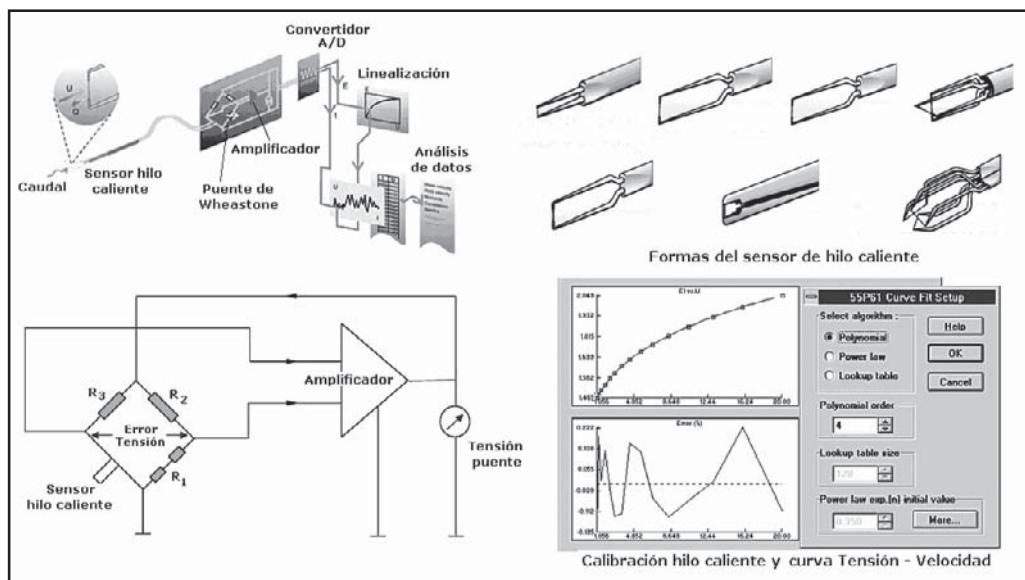


Figura 4.55 Anemómetro de hilo caliente de temperatura constante

Los anemómetros de hilo caliente se caracterizan por una buena respuesta de alta frecuencia, un bajo ruido electrónico y son inmunes a la rotura del sensor cuando el gas deja de circular súbitamente. Tienen las desventajas de su inestabilidad, deriva y alto ruido que enmascaran la medida de fluidos de baja velocidad.

Se utilizan para medir perfiles de velocidades y en investigación de turbulencias. Su fragilidad y su susceptibilidad a los errores causados por la suciedad no los hacen adecuados para el entorno

industrial. Pero en entornos limpios y en medidas esporádicas de caudal son perfectamente utilizables para medir la velocidad y lógicamente el caudal (velocidad \times sección tubería).

4.2.4 Medidor de Coriolis

El *medidor de Coriolis* se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795-1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie giratoria, que gira con velocidad angular constante w , experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular \times radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y , por lo tanto, una fuerza sobre su masa. Como el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración que, a su vez, es debida a una fuerza que actúa sobre la bola. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis es, pues, una manifestación de la inercia del objeto según la primera ley del movimiento de Newton. Además, también es válida la segunda ley de Newton (Fuerza = Masa \times Aceleración), lo que permite, al hacer circular el fluido por un tubo especial provisto de un mecanismo de vibración y de sensores de la fuerza desarrollada, determinar el caudal masa del fluido.

Puede entenderse el teorema de Coriolis, situando por ejemplo, una bola de acero en el centro de un disco giratorio lleno de grasa, que actúa como freno, y al hacerlo girar, la bola describe una línea curva hasta salir del disco. Durante su recorrido tiene una velocidad tangencial igual a la velocidad angular del disco multiplicada por la distancia al centro de giro. Esta velocidad tangencial va aumentando a medida que la bola se aleja del centro del disco, lo que, tal como se ha dicho, evidencia la existencia de una aceleración y , por lo tanto, de una fuerza.

Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio Norte y a izquierdas en el hemisferio Sur.

Asimismo, todos los vientos de la circulación general que soplan desde el Norte al Sur en el hemisferio Norte son desviados, debido a la rotación de la Tierra de Oeste a Este, gracias a la fuerza de Coriolis sobre las masas de aire de los cinturones de presión, constituyendo en el cinturón 30° N - 60° N, los vientos predominantes del Oeste y en el cinturón 0° N - 30° N, los vientos alisios.

Por otro lado, el célebre péndulo de Foucault también demuestra el fenómeno. Situado en cualquier punto de la Tierra gira con una velocidad directamente proporcional al seno de la latitud del lugar y así el tiempo de una rotación es inversamente proporcional al valor de dicho seno. De este modo un péndulo situado a 45° gira una vez cada 1,4 días ($\operatorname{seno} 45^\circ = 0,7$ y $1/0,7 = 1,4$) y a 30° ($\operatorname{seno} 30^\circ = 0,5$ y $1/0,5 = 2$) cada 2 días.

Asimismo, la torsión de una manguera de agua al dejar libre su extremo, es otra evidencia de la fuerza de Coriolis.

La generación de la fuerza de Coriolis puede producirse básicamente de dos formas:

- Por inversión de las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de omega (Ω) en estado de vibración controlada*

La vibración del tubo es perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, tiene una amplitud de unos 2 mm y una frecuencia de 80 ciclos/minuto próxima a la frecuencia natural del

tubo. Cuando en la mitad de un ciclo el tubo se mueve hacia arriba, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo con una fuerza (Coriolis) en cada unidad de masa que depende del radio de giro. Al pasar al tubo de salida, la velocidad del movimiento vertical se reduce, ya que al progresar dentro de la tubería va disminuyendo el radio de giro, con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba.

De este modo, se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, y que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

$$\overline{F} = 2m\overline{w} \times \overline{V}$$

siendo:

$$\overline{F} = \text{fuerza de Coriolis}$$

$$m = \text{masa del fluido contenida en el tubo recto de longitud } L$$

$$\overline{w} = \text{velocidad angular alrededor del eje del tubo en } \Omega$$

$$\overline{V} = \text{velocidad lineal del fluido}$$

El par creado respecto al eje R-R del tubo es:

$$M = 2 \times F \times r = 4 \times w \times r \times m \times V = 4 \times w \times r \times Q$$

Si K_s es la constante de elasticidad del tubo y θ el ángulo de torsión del tubo, la fuerza de torsión del tubo que equivale al par creado respecto al eje del tubo es:

$$T = K_s \times \theta$$

Luego, como $M = T$ resulta finalmente el caudal másico:

$$Q = \frac{K_s \times \theta}{4wr}$$

Así pues, el ángulo de torsión del tubo medido con dos sensores, situados por encima y por debajo en la línea del eje, determinará el caudal.

La constante K_s de elasticidad del tubo tiene por expresión:

$$K_s = S_k (20 \text{ } ^\circ\text{C}) \times (1 + S_{kt} x (t - 20 \text{ } ^\circ\text{C}))$$

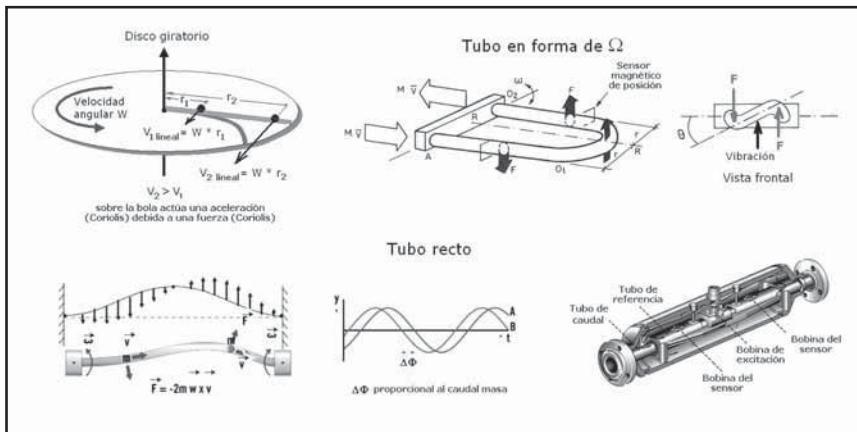
siendo:

$$S_{kt} = \text{coeficiente de corrección de temperatura del material}$$

$$S_k (20 \text{ } ^\circ\text{C}) = \text{constante del sensor a } 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t = \text{temperatura}$$

Los sensores magnéticos de posición están situados en el centro del tubo y combinan dos intervalos de tiempo, uno del movimiento hacia abajo del tubo y el otro del movimiento hacia arriba. De este modo, la diferencia de las ondas se traduce en impulsos que alimentan un integrador lineal. Cuando hay caudal, el integrador carga un circuito electrónico analógico o digital. Las opciones de salida incluyen señales de frecuencia, analógica de 4-20 mA c.c., y digital por protocolo HART, Modbus, Fieldbus o Profibus.

**Figura 4.56** Medidor de Coriolis

La diferencia en tiempo (Δt) de las señales de los sensores de posición está relacionada con θ y con la velocidad (V_i) del tubo en su punto medio, según:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{V_i}{2r} \times \Delta t$$

y como θ es pequeño resulta:

$$\theta = \frac{Lw}{2r} \times \Delta t$$

y combinando las expresiones de Q y θ resulta:

$$Q = \frac{K_s \times L}{8r^2} \Delta t$$

lo que indica que el caudal sólo es proporcional al intervalo de tiempo y a las constantes del tubo. Es independiente de w (frecuencia de vibración del tubo).

b) Por inversión de las velocidades angulares del fluido mediante un tubo recto

El tubo está fijado en ambos extremos y se hace vibrar en el centro, de tal modo que el eje de rotación del lado de la entrada es opuesto al eje de rotación a la salida, creándose así dos fuerzas de Coriolis opuestas. Por ejemplo, si el tubo asciende en la entrada, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo. Al pasar del centro es forzado a reducir su movimiento vertical con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba.

$$\vec{F} = -2 \times m \times w \times v$$

con:

$$m = \text{masa del fluido}$$

$$w = \text{velocidad angular del movimiento de torsión}$$

$$v = \text{velocidad lineal del fluido}$$

Se observa que la velocidad lineal del fluido en los puntos extremos es la misma, pero debido a la vibración a que se somete el tubo, la velocidad angular en A es contraria a la de B. Esta diferencia de fase es la que miden los sensores y es proporcional al caudal másico. La ventaja principal del tubo recto con relación al tubo en forma de omega (Ω) es que su pérdida de carga es muy baja y no afecta a los fluidos muy viscosos o abrasivos o que contengan una cantidad importante de sólidos en suspensión, que obturarían el tubo.

Cuando en la mitad de un ciclo el tubo se mueve hacia arriba, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo con una fuerza (Coriolis) en cada unidad de masa que depende del radio de giro. Al pasar al tubo de salida, la velocidad del movimiento vertical se reduce, ya que al progresar dentro de la tubería va disminuyendo el radio de giro, con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba. De este modo, se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, y que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

La medida es independiente de la temperatura, presión y densidad del fluido. La selección del material del tubo es importante puesto que debe soportar la fatiga mecánica debida a la vibración a su frecuencia natural, la corrosión y erosión del fluido.

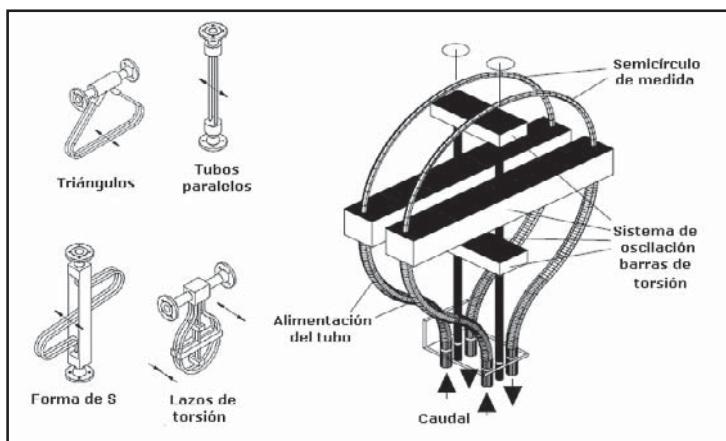


Figura 4.57 Formas de tubos de Coriolis. Fuente: ISA Expo 2004 - Rheonik

La exactitud es del orden del $\pm 0,3\%$.

El modelo de doble (Ω) dispone de varillas de torsión y barras transversales. La medida activa se realiza en el semicírculo superior donde están los sensores. El sistema de oscilación consiste en dos barras de torsión y dos barras transversales. El sistema de alimentación está en la parte inferior y sólo es afectado por un bajo momento de torsión. Puede medir hasta $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ a presiones hasta 900 bar y temperaturas entre -250°C y 400°C .

Otros tipos de tubos empleados tienen la forma de S, Z, triángulos y lazos de torsión.

Todos estos instrumentos de caudal pueden disponer de unidades de transmisión inteligente que les permiten su fácil calibración, el cambio rápido del campo de medida y la lectura de la variable en cualquier punto de la instalación donde se hayan previsto tomas, por ejemplo, en el transmisor y en el receptor.

4.3 Comparación de características de los medidores de caudal

En la tabla 4.12 se muestran las características resumidas de los instrumentos medidores de caudal.

| Tipo | Rango- abilidad | Exactitud (%) | Escala | Presión máx., bar | Temperatura máx., °C | Pérdida de carga | Servicio | Materiales | Coste relativo | Ventajas | Desventajas |
|--------------------|--------------------|------------------|------------|----------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------|--|--|
| Placa | 3:1 | 2% - 4% | cuadrática | 400 | 500 | Media | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Bajo | Simple, económica | Possible obturación, desgaste |
| Tobera | 3:1 | 2% | cuadrática | 400 | 500 | Media | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Alto | Simple, exactitud | Possible obturación, coste alto |
| Tubo Venturi | 3:1 | 1% | cuadrática | 400 | 500 | Baja | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Alto | Exactitud, poca ΔP | Possible obturación, coste muy alto |
| Tubo Pitot | 3:1 | 1%-3% | cuadrática | 400 | 500 | Muy baja | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Bajo | Simple, económico | Poca exactitud, possible obturación |
| Tubo Annubar | 3:1 | 0,5% - 1,5% | cuadrática | 400 | 500 | Muy baja | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Bajo | Mayor exactitud, poca ΔP | Possible obturación |
| Rotámetro | 10:1 | 1% - 2% | lineal | 400 | 250 | Media | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos/Vidrio | Bajo | Simple, económico, mayor exactitud | Possible obturación |
| Vertedero | 10:1 | 1% - 2% | especial | Atmosférica | 60 | Baja a media | Líquidos | Metales | Alto | Simple, bajo coste | Possible obturación |
| Turbina | 20:1 | 0,25% | lineal | 200 | 250 | Alta | Líquido/gas | Metales | Alto | Exactitud, margen amplio | Desgaste, daños por caudal excesivo |
| Ultrasónico | 20:1 | 2% | lineal | 100 | 250 | Ninguna | Líquido/gas | Metales/Plásti- cos | Alto | Cualquier líquido, baja ΔP, bajo mantenimien- to | Coste inicial alto, sensible a varaciones densidad |
| Placa de impacto | 10:1 | 1% | cuadrática | 100 | 400 | Media | Líquidos | Metales | Medio | Fluidos viscosos | Poca capacidad |
| Magnético | 40:1 | 0,5% - 1% | lineal | 20 - 200 | 150 | Ninguna | Líquidos | Metales/ Teflón/Fibra de vidrio | Alto | Exactitud, baja ΔP | Líquidos conductores, electrodos pueden recubrirse |
| Disco basculante | 10:1 | 1% - 5% | lineal | 100 | 80 | Alta | Líquido/gas | Metales/ Plásticos | Bajo | Económico | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Pistón oscilante | 10:1 | 0,50% | lineal | 10 - 150 | 120 | Alta | Líquido/gas | Metales | Medio | Exactitud, campo amplio, económico | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Pistón alternativo | 10:1 | 0,50% | lineal | 25 | 100 | Alta | Líquido/gas | Metales | Medio | Exactitud, campo amplio | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Cicloidal | 10:1 | 0,50% | lineal | 100 | 150 | Alta | Líquido/gas | Metales | Medio | Exactitud, campo amplio, baja ΔP | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Birrotor | 10:1 | 0,50% | lineal | 100 | 200 | Alta | Líquido/gas | Metales | Medio | Exactitud, campo amplio, reversible | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Oval | 10:1 | 0,50% | lineal | 100 | 180 | Alta | Líquido/gas | Metales | Medio | Exactitud, campo amplio, reversible | Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías |
| Torbellino | 10:1 | 1% | lineal | 50 | 100 | Media | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Alto | Margen amplio, poca ΔP, fácil instalación | Caro, vibración afecta exactitud |
| Vórtex | 10:1 | 1% | lineal | 50 | 100 | Media | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Alto | Margen amplio, poca ΔP, fácil instalación | Caro, vibración afecta exactitud |
| Térmico | 10:1 | 1% | lineal | 100 | 65 | Ninguna | Gas | Metales/ Plásticos | Alto | Económico, fluidos de baja densidad | Poca exactitud, limpieza periódica |
| Hilo caliente | | | especial | 100 | 65 | Baja | Gas | Metales/ Plásticos | Medio | Medida caudales gases turbulentos | Investigación, usos industriales limpios |
| Coriolis | 10:1 | 0,50% | lineal | 900 | -250 °C a 400 °C | Baja | Líquido/vapor /gas | Metales/ Plásticos | Alto | Exactitud elevada, caudal masa verdadero | Sensible a vibraciones, coste alto |

Tabla 4.12 Características resumidas de los instrumentos medidores de caudal