



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIDORES DE VAZÃO

MÁRIO PINOTTI JR.
PAULO SELEGHIM

SÃO CARLOS
2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIDORES DE VAZÃO

MARIO PINOTTI Jr.

PAULO SELEGHIM

APOSTILA
P725mv
e. 1

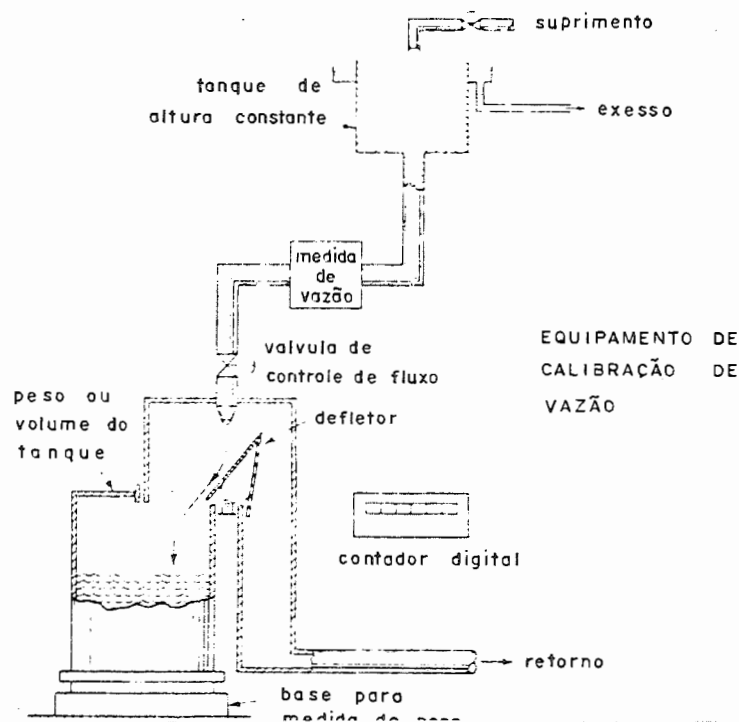
1980

MEDIDA DE VAZÃO

Muitas vezes a vazão ou a descarga através de um duto ou canalização deve ser medida ou controlada. Muitos aparelhos foram desenvolvidos para esse fim e podem ser divididos em dois tipos: um que mede o volume que passa na unidade de tempo (m^3/s), isto é mede a vazão; e outro que mede a massa que passa na unidade de tempo (Kg/s), isto é, mede a descarga. Muitas vezes interessa medir também o volume ou a massa total que passou num dado intervalo de tempo. Esta medida requer uma integração no tempo da vazão ou da descarga. Esta operação pode ser realizada por parte própria do medidor ou por um integrador para fins gerais colocado muitas vezes em local afastado do medidor.

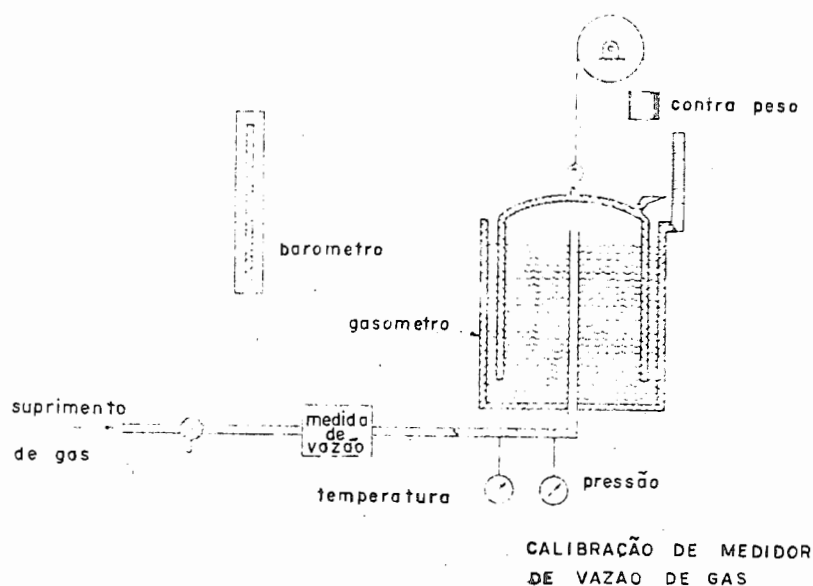
PADRÕES E CALIBRAÇÃO

A calibração dos medidores de vazão e descarga depende dos padrões de volume e tempo, ou da massa e tempo. A calibração primária é em geral baseada no estabelecimento de um escoamento permanente pelo medidor a ser calibrado e na subsequente medida do volume ou massa do fluido que passou num intervalo de tempo medido com precisão. Qualquer medidor estável e preciso calibrado por tais métodos primários torna-se um padrão secundário para outros medidores menos precisos. Possíveis fontes de erro nesse procedimento são: variação das propriedades do fluido (densidade, viscosidade e temperatura) orientação do medidor, nível de pressão e perturbações (por exemplo, cotovelos, tes, válvulas etc) acima e abaixo do medidor.



Um arranjo típico para uma calibração primária e precisa de medidores para líquidos e apresentada na figura acima. Calibração realizada com arranjos desse tipo cuidando-se dos vários detalhes que podem influir, o erro total do medidor ficar menor que 1%.

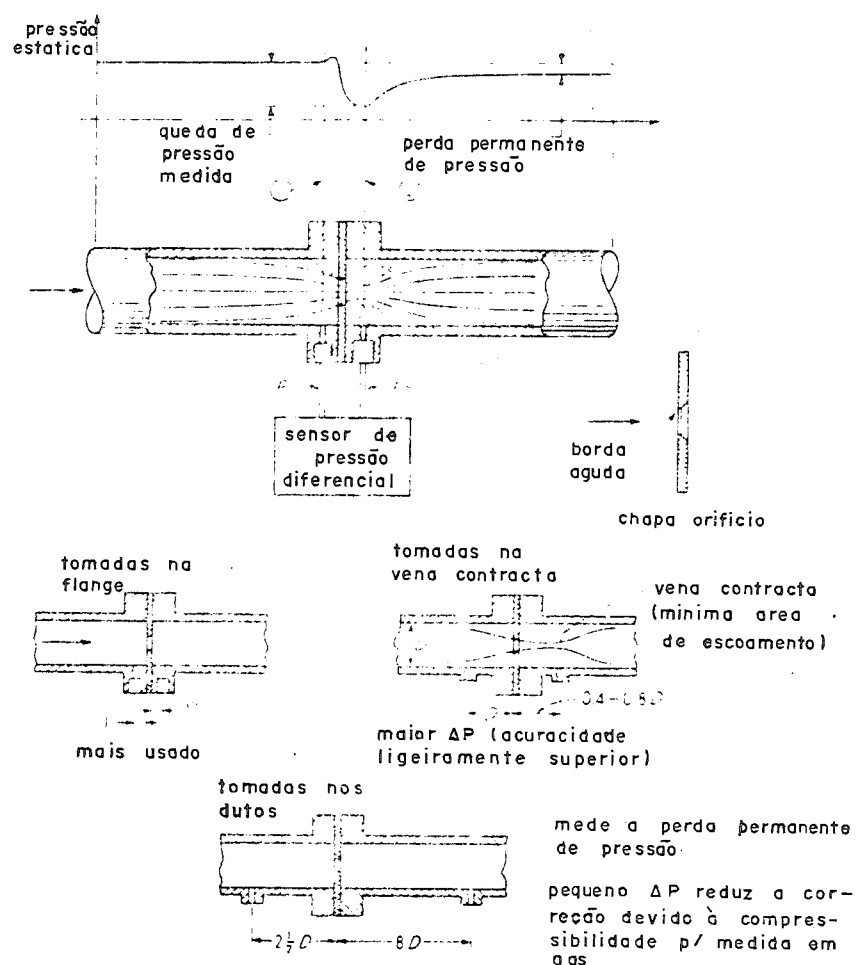
A calibração de medidores para serem usados com gás pode ser feita com líquidos desde que as relações de semelhança sejam mantidas e as correções necessárias sejam aplicadas. Se este procedimento for insatisfatório pode-se realizar uma calibração direta com gás utilizando-se um gasometro conforme mostra a figura abaixo.



MEDIDORES DE ÁREA CONSTANTE E QUEDA VARIÁVEL DE PRESSÃO (MEDIDORES DE ORIFÍCIO).

Um dos tipos mais usados de medidor de vazão é aquele que tem uma restrição fixa da área de escoamento do fluido num tubo ou num ducto. A restrição do escoamento causa uma queda de pressão que varia conforme a vazão; assim a medida da queda de pressão por meio de um captador diferencial permite a medida da vazão. Os dispositivos mais comuns que utilizam este princípio são: o orifício, o bocal, o tubo venturi e o tubo de Dall.

O orifício de arestas vivas é sem dúvida o elemento de medidor mais usado pois ele é simples, de, baixo custo e existe muita informação técnica e científica a seu respeito.



MEDIDOR DE VAZÃO TIPO ORIFICIO

A figura acima mostra um medidor desse tipo. Considerando-se um escoamento unidimensional incompressível, sem atrito, sem trabalho, sem calor e sem variação de altura a teoria fornece a expressão para a vazão:

$$Q_t = \frac{A_{2f}}{\sqrt{1 - (A_{2f}/A_{1f})^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

onde A_{1f} , A_{2f} são as áreas normais do escoamento onde p_1 e p_2 são medidos

- ρ - densidade do fluido
- p_1 p_2 - pressões estáticas

Em geral, na realidade as hipóteses feitas não são totalmente satisfeitas havendo então necessidade de se introduzir fatores experimentais de correção. Por outro lado, são utilizadas as áreas do tubo e do orifício no lugar de A_{1f} e A_{2f} , pois são aquelas que podem ser medidas. Define-se o coeficiente de descarga.

$$C_d = \frac{Q_a}{Q_t}$$

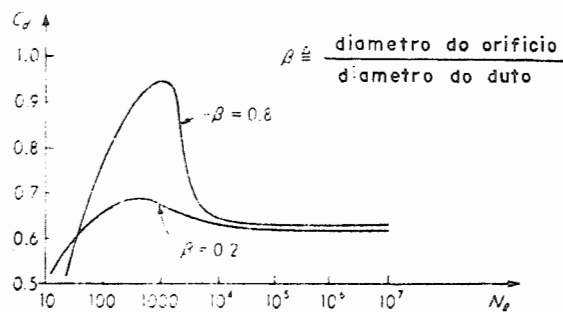
e então

$$Q_a = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

onde A_1 - área do tubo

A_2 - área do orifício

O coeficiente de descarga varia principalmente com o número de Reynolds.



VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA

Apesar disso, em muitos casos, pode-se deixar de realizar a calibração pois existem informações e normas que se forem seguidas fornecem os valores de C_d em tabelas e gráficos com boa precisão obtidas de experiências anteriores.

Como a vazão é proporcional a $\sqrt{\Delta p}$, uma variação de 10/1 em Δp corresponde a uma variação aproximada de 3/1 na vazão. Como os medidores de pressão em geral são bastante imprecisos abaixo de 10% do fundo de escala, esta não-linearidade típica de todos os medidores de orifício restringe a faixa de precisão das medidas de vazão a 3/1. Isto é, um medidor desse tipo não pode ser utilizado com precisão abaixo de 30% de sua vazão máxima. Esta não-linearidade devido a raiz quadrada também causa dificuldades nos escoamentos pulsantes onde a vazão média (a ser medida) tem uma componente de flutuação superimposta a ela. Seja o caso onde

$$Q = Q_{av} + Q_p \sin \omega t \quad Q_p < Q_{av}$$

e o medidor de vazão tal que

$$\Delta p = K Q^2$$

Assim sendo a entrada Δp no medidor de pressão é:

$$\Delta p = K (Q_{av}^2 + 2 \times Q_{av} Q_p \sin \omega t + Q_p^2 \sin^2 \omega t)$$

Tendo um filtro passa-baixo, o aparelho indicará o valor médio, isto é:

$$\Delta p_{av} = K \left(Q_{av}^2 + \frac{Q_p^2}{2} \right)$$

Portanto tomando-se esse valor e determinando-se o valor de Q_{av} por:

$$Q_{av} = \sqrt{\frac{\Delta p_{av}}{K}}$$

obter-se-á um valor maior do que o real. Outra dificuldade causada por essa não linearidade ocorre quando a vazão deve ser integrada para se obter o fluxo total num dado tempo. Deve-se extrair a raiz quadrada do sinal Δp antes de realizar a sua integração.

Desta classe de medidores de vazão os do tipo de orifício são os que apresentam uma perda maior, e esta é a sua maior desvantagem. A perda permanente em pressão é dada aproximadamente por $\Delta p (1 - \beta^2)$. Em geral tem-se $\beta = 0,2$ a $0,7$ e conseqüentemente a perda será $0,96 \Delta p$ a $0,51 \Delta p$. Entretanto a perda de potência pode ser pequena uma vez que se recomenda que a queda Δp para medidores de vazão de líquidos seja da ordem de 20 a 400 in de água.

Os coeficientes de vazão para os orifícios são muito sensíveis às condições da aresta do orifício à montante do escoamento. O projeto

padrão do orifício requer que a aresta seja bastante aguda e também que a chapa do orifício seja bastante pequena em relação ao seu diâmetro. O desgaste da aresta cansado pelo uso normal, ou por partículas abrasivas no fluido podem causar grandes variações no coeficiente de descarga. Fluidos que contêm sólidos em suspensão podem causar dificuldades pois os sólidos tendem a se acumularem junto ao orifício modificando suas condições. Uma solução frequentemente adotada para esse problema é usar um orifício excêntrico colocado na parte inferior do tubo fazendo com que os sólidos passem e não se acumulem. Líquidos contendo traços de vapor ou gás podem ser medidos se o orifício for colocado numa secção vertical da tubulação.

Para fluidos compressíveis a equação obtida anteriormente não é válida. Considerando-se um processo isoentrópico entre os estados 1 e 2 tem-se então a expressão:

$$W = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gk p_1}{(k-1)v_1}} \sqrt{\frac{(p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_2)^{(k+1)/k}}{1 - \beta^2 (p_2/p_1)^{2/k}}}$$

onde

- W - descarga (Kgf/s)
- K - relação entre os calores específicos (= 1.4 p/o ar)
- g - aceleração da gravidade
- v_1 - volume específico no estado 1 (m^3/Kgf)

O coeficiente de descarga é o mesmo para líquidos ou gases desde que o número de Reynolds seja o mesmo. Em muitas instalações de gás a queda de pressão no medidor é tão pequena que a relação p_2/p_1 é 0,99 ou mais. Nessas condições a equação mais simples para fluidos incompressíveis pode ser usada com um erro menor que 0,6% sendo $\beta = 0,5$ e $K = 1.4$. Isto é:

$$W = C_d A_2 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right)^{-1} \sqrt{\frac{2g (p_1 - p_2)}{v_1}}$$

Para $p_2/p_1 < 0,99$ o erro se torna maior. Para tais situações uma expressão mais ampla deve ser utilizada. Nos bocais e venturis o processo se aproxima bastante do isoentrópico permitindo a utilização da expressão geral anterior. Para os orifícios se introduz um coeficiente de compressibilidade (y) experimental.

$$w = Y \left[C_d A_2 \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right] \sqrt{\frac{2g (P_1 - P_2)}{v_1}}$$

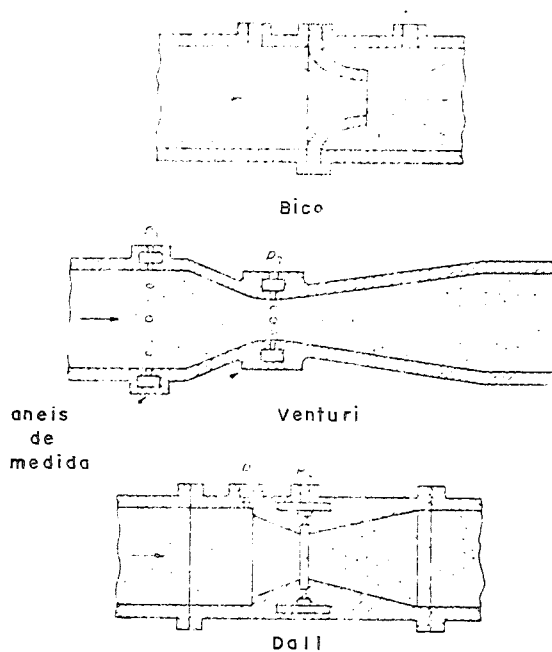
onde

$$Y = 1 - (0,41 + 0,35 \beta^4) \frac{P_1 - P_2}{P_1} \frac{1}{K}$$

ou

$$Y = 1 - \left[0,333 + 1,145 (B^2 + 0,7 \beta^2 + 12 \beta^3) \right] \frac{P_1 - P_2}{P_1} \frac{1}{K}$$

sendo a primeira expressão de Y utilizada nos casos em que as tomadas de pressão são próximas ao orifício.



MEDIDOR DE QUEDA DE TENSÃO VARIÁVEL

O bocal, o tubo venturi e o tubo de Dall operam todos no mesmo princípio do orifício e as diferenças significativas estão nos valores numéricos de algumas características.

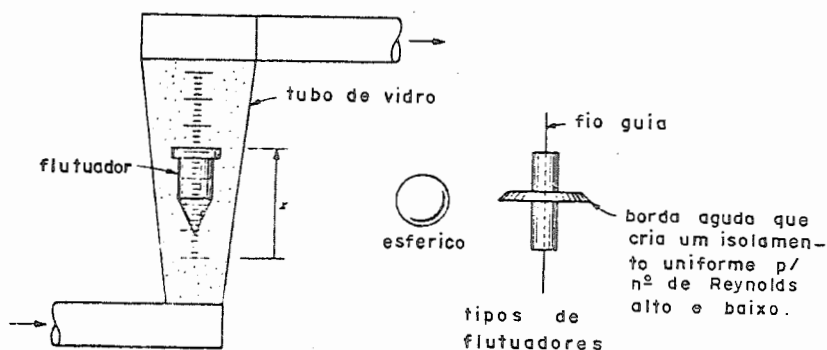
Os coeficientes de descarga dos bocais e venturis são maiores que os dos orifícios e variam com o dos números de Reynolds, assim para $N_R = 10^4$ tem-se 0,94 e para $N_R = 10^6$ tem-se 0,99. Os coeficientes para os tu

bos de Dall se aproximam mais dos coeficientes para os orifícios. Em geral para esses dispositivos é necessária uma calibração individual pois suas formas relativamente complicadas tornam sua reprodução difícil.

Quando se compara as perdas permanentes de pressão dos vários dispositivos deve-se impor que todos eles tenham o mesmo Δp . Nessas condições a perda permanente de pressão do bocal é praticamente igual a do orifício, pois para obter o mesmo Δp o bocal deve ter uma relação β menor, e as perdas aumentam com a diminuição de β . Também o venturi requer um β menor para um dado Δp , mas ^{pele} sua forma as perdas são pequenas e quase independente de β . A perda permanente de pressão é da ordem de 10 a 15% do valor medido de Δp numa faixa de 0,2 a 0,8 para β . Assim o venturi proporciona um melhoramento em relação as perdas. O tubo de Dall proporciona, de uma maneira inesperada, um grande Δp (análogo a orifício) e uma pequena perda permanente de pressão (análogo as venturis). Para este dispositivo a perda permanente de pressão é 50% aproximadamente menor que a do venturi para o mesmo Δp .

MEDIDORES DE QUEDA DE PRESSÃO CONSTANTE E ÁREA VARIÁVEL (ROTAMETROS).

Um rotametro consiste de um tubo vertical com o seu interior conico no qual um pequeno flutuador alcança uma posição vertical conforme a vazão que passa pelo tubo. Para uma dada vazão o flutuador permanece estacionário desde que as forças verticais da diferença de pressão, de viscosidade, da gravidade e de flutuação estejam equilibradas. Este equilíbrio é feito pelo próprio sistema pois a área anular entre o flutuador e as paredes do tubo varia continuamente de acordo com o deslocamento vertical. Este dispositivo pode ser visto como um orifício de área ajustável.



A força para baixo (gravidade menos flutuação) é constante e portanto a força, para cima (principalmente a força de pressão, que é a queda de pressão multiplicada pela área do flutuador) deve ser constante. Como a área do flutuador é constante a queda Δp deve ser constante. A queda Δp é mantida constante para vazões diferentes variando-se a área do escoamento. O interior conico do tubo proporciona esta área variável. A posição do flutuador é a saída do medidor e pode ser feita linear com a vazão fazendo a área do tubo variar linearmente com a distância vertical. Dessa forma os rotametros tem uma precisão bem melhor na faixa de variação 10/1 de Δp que os medidores de área constante que apresentam uma não-linearidade devido a raiz quadrada.

Considerando-se o escoamento incompressível pode-se deduzir que:

$$Q = \frac{C_d (A_t - A_f)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_t - A_f}{A_f}\right)^2}} \sqrt{2g V_f \frac{w_f - w_{ff}}{A_f w_{ff}}}$$

onde

- Q - vazão
- Cd - coeficiente de descarga
- At - área do tubo
- Af - área do flutuador
- g - gravidade
- Vf - volume do flutuador
- w_f - peso específico do flutuador
- w_{ff} - peso específico do fluido em escoamento

Se a variação de Cd com a posição do flutuador for pequena e se

$$\left[\frac{(A_t - A_f)}{A_t} \right]^2 \ll 1$$

então a equação pode ser simplificada em:

$$Q = K (A_t - A_f)$$

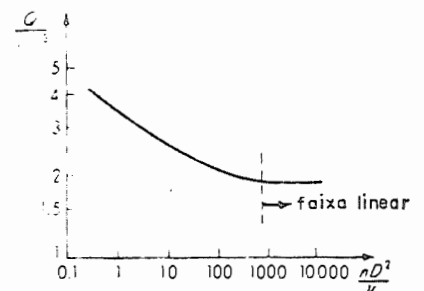
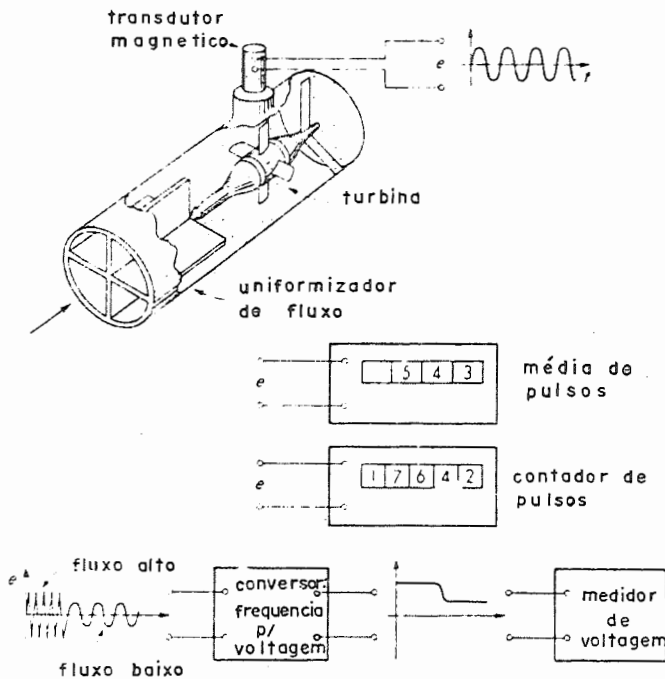
e ainda, se o tubo for feito de forma que At varie linearmente com x então tem-se a relação linear:

$$Q = K_1 + K_2 x$$

Os flutuadores podem ser feitos de diversos ^{materiais} para se obter uma desejada diferença de densidade na medição um dado líquido ou gás. A forma de alguns flutuadores não requerem guiamento no interior do tubo, por exemplo, esferas. Algumas formas reduzem os efeitos da viscosidade.

MEDIDORES DA TURBINA

Se a roda de uma turbina for colocada no tubo com um fluido em escoamento, sua velocidade de rotação depende da vazão do fluido. Reduzindo-se os atritos nos mancais e as perdas a um mínimo pode-se projetar uma turbina cuja velocidade varie linearmente com a vazão permitindo assim a sua medição. A velocidade pode ser medida de uma maneira simples, e precisa contando o número de pás que passam por um dado ponto; isto é feito usando um captador magnético que produz um pulso de voltagem cada vez que passa uma pá. Os pulsos podem ser contados ou acumulados em um contador elétrico.



CARACTERÍSTICA DO MEDIDOR DE FLUXO TIPO TURBINA

A análise dimensional do medidor de turbina (sem atritos e perdas) mostra que se pode ter a relação:

$$\frac{Q}{nD^3} = f\left(\frac{nD^3}{\nu}\right)$$

onde Q - vazão
 n - velocidade angular do rotor
 D - diâmetro do tubo
 ν - viscosidade cinemática

Na verdade, o efeito da viscosidade ocorre principalmente nas vazões pequenas, nas grandes vazões sendo o regime turbulento o efeito da viscosidade é desprezível. Nessa última condição pode-se deduzir que:

$$\frac{Q}{nD^3} = \frac{\pi L}{4D} \left[1 - \alpha^2 - \frac{2m(D_b - D_h)t}{\pi D^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi D_b}{L}\right)^2} \right]$$

onde L - passo do rotor
 α - D_h/D
 m - número de pás
 D_b - diâmetro da extremidade das pás
 D_h - diâmetro do cubo do rotor
 t - espessura das pás

Esta expressão que pode ser resumida em

$$Q = K_n$$

onde K é uma constante para um dado medidor e independente das propriedades do fluido, representa uma situação ideal. Os desvios dessa situação ideal podem ser determinados pela calibração experimental.

Medidores de turbinas são encontrados no mercado com fundo de escala desde 0,1 a 30000 gpm para líquidos e de 0,1 a 15000 ft³/min para o ar. A não-linearidade é da ordem de 0,05% para os medidores. A tensão de saída dos captadores magnéticos é da ordem de 10 mv rms no início da faixa e de 100 mv no final. A queda de pressão pelo medidor varia com o quadrado da vazão e é da ordem de 3 a 10 psi. Estes medi-

dores podem acompanhar escoamentos transitórios bastante bem uma vez constante de tempo é de 2 a 10 ms.

MEDIDORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Estes medidores são na verdade motores para fluido de deslocamento positivo onde o atrito e a inércia foram reduzidos a um mínimo. O escoamento do fluido pelas camaras de dimensões definidas causa a rotação do eixo de saída. Este tipo de medidor é usado onde interessa o fluxo total e não a vazão instantânea. Um contador mecânico simples registra o número de rotações que é proporcional ao fluxo total. Enquanto que qualquer tipo de motor de deslocamento positivo possa ser projetado como medidor de vazão, o tipo de disco de rotação é o mais usado. A precisão nesse dispositivo é da ordem de 1.5% enquanto que a queda de pressão é de 5 psi para a máxima vazão.

BOMBAS MEDIDORAS

Uma bomba de deslocamento positivo e variável, se for convenientemente projetada, pode ser utilizada para produzir o escoamento e ao mesmo tempo medir a sua vazão. Novamente o princípio é o da máquina de deslocamento positivo que, a menos dos vazamentos e compressibilidade, fornece uma vazão definida a uma dada velocidade. A maioria das bombas desse tipo operam em velocidade constante e a vazão é feita variar alterando-se o deslocamento da bomba. A precisão nessas bombas é de 1%.

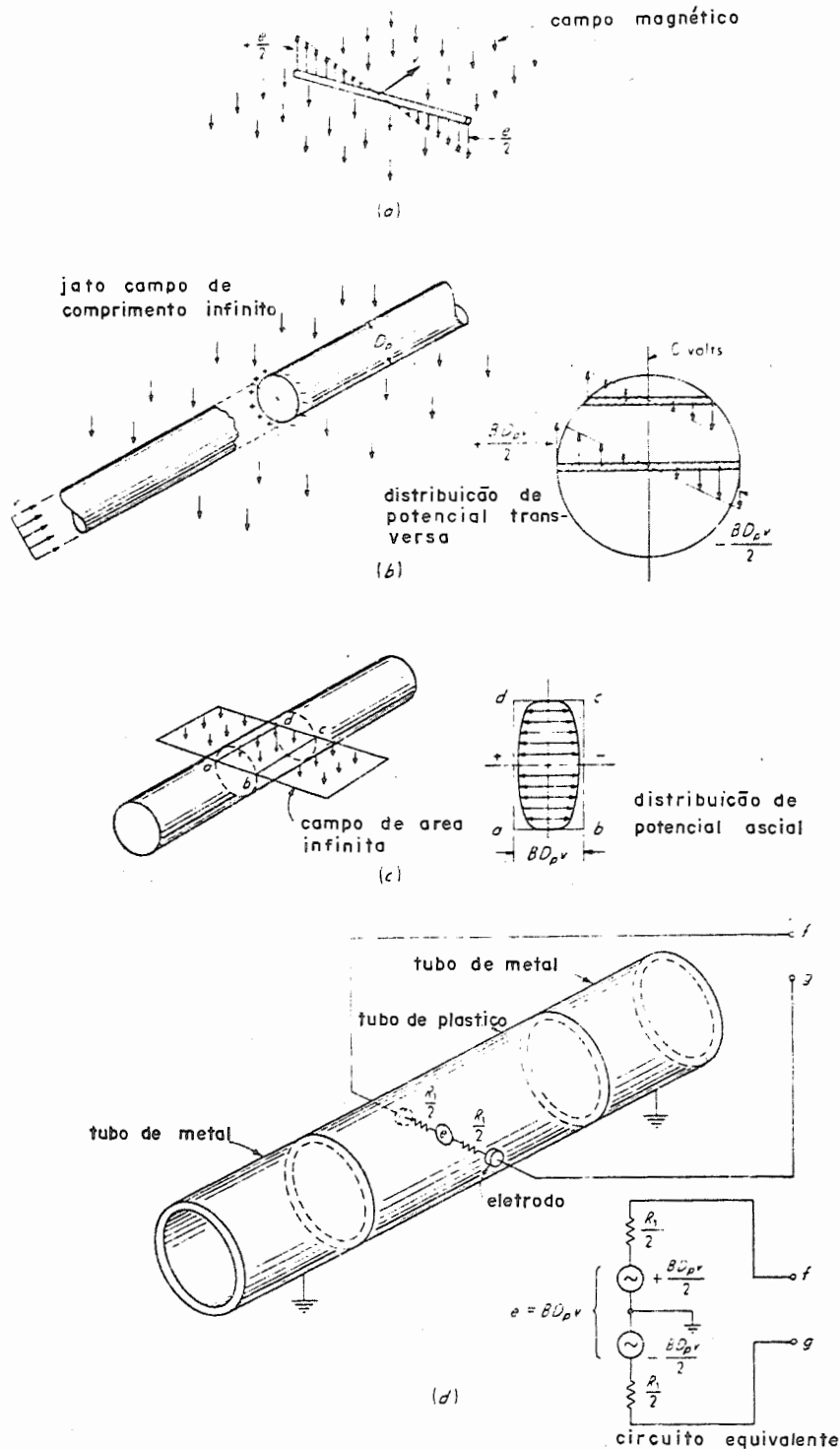
MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS

O medidor de vazão eletromagnético é uma aplicação do princípio da indução conforme aparece na figura.

Se um condutor de comprimento l se move com uma velocidade transversal v através de um campo magnético de intensidade B haverá uma força em cada partícula carregada do condutor movendo as cargas positivas para uma extremidade e as negativas para a outra. Consequentemente um gradiente potencial fica estabelecido ao longo do condutor e haverá uma diferença de potencial \mathcal{E} entre as duas extremidades. Tem-se que:

$$\mathcal{E} = Blv$$

onde B - densidade de fluxo do campo magnético.



MEDIDOR DE FLUXO ELETROMAGNETICO

Se as extremidades do condutor forem ligadas a um circuito externo que é estacionário em relação ao campo magnético, a tensão induzida provocará a passagem de uma corrente i . Esta corrente pelo condutor que tem uma resistência R causará uma queda iR , de tal forma que a tensão nos terminais do condutor fica $(e - iR)$.

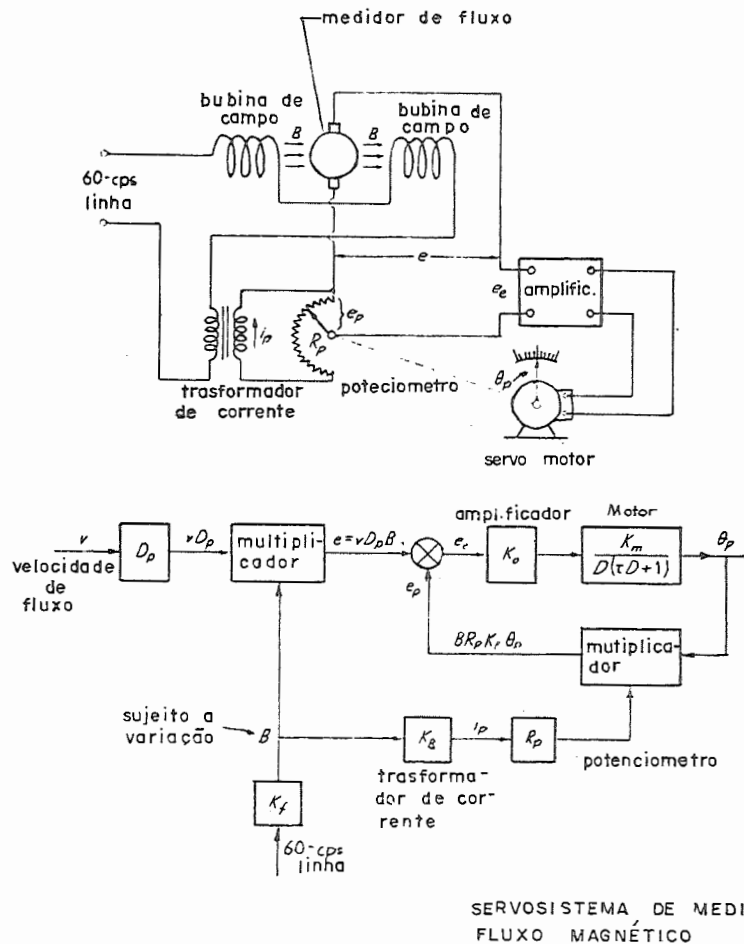
Seja agora um jato cilindrico de um fluido condutor com um per -

fil uniforme de velocidade conforme aparece na figura através de um campo magnético. No líquido condutor os ions positivos e negativos são - forçados para lados opostos no jato dando uma distribuição de potencial. A máxima diferença de potencial é obtida através de um diâmetro horizontal e é $BD \cdot v$ em modulo. No caso real, a extensão do campo magnético é limitada como mostra a figura e assim não há tensão induzida na parte do jato fora do campo. Sendo essas partes do fluido partes condutoras, e elas tendem a curto-circuitar parcialmente as tensões induzidas na seção exposta ao campo; assim a tensão é menor que o valor $BD \cdot v$. Se o campo for suficientemente longo, este efeito será pequeno no centro do comprimento do campo.

No medidor real, o "jato" está contido em tubo estacionário. O tubo deve ser não magnético para que o campo penetre no fluido e usualmente é um não condutor (plástico) pois assim não estabeleceu um curto-circuito entre os polos positivo e negativo induzidos no fluido. Este tubo não-condutor tem dois eletrodos colocados nos pontos onde a diferença de potencial é máxima. Desses eletrodos sai então o sinal de tensão para um indicador para um indicador ou registrador externo. Sendo impraticável fazer a instalação inteira de material não-condutor é inserido somente um pequeno trecho (que é o próprio medidor). Sendo o fluido condutor haverá um percurso condutor entre os eletrodos. Na figura este percurso é mostrado separado em duas partes iguais $R_1/2$ e contendo a fonte de sinal $C = BD \cdot v$. A ordem de grandeza dessa resistência determina o efeito de carga do circuito externo que será ligado aos eletrodos.

O campo magnético usado em tais medidores pode ser constante ou alternativo dando origem a um sinal de saída dc ou ac respectivamente. A forma de não é muito usada por uma série de razões, por exemplo, muitas soluções aquosas sofrem uma polarização de forma que os ions positivos vão para o eletrodo negativo e se dissociam formando uma bolsa isolante de gás hidrogênio; além disso o campo dc pode distorcer o perfil de velocidade do fluido pelo efeito magneto hidrodinâmico. Anteriormente foi considerado um perfil de velocidade uniforme, o que na realidade não acontece; entretanto demonstra-se que, para qualquer perfil simétrico de velocidade, a tensão gerada corresponde a velocidade média do escoamento, o que não acontece com perfis assimétricos e o efeito magneto hidrodinâmico pode dar tais perfis. Um campo ac (por exemplo a 60 cps) tem pouca influência no perfil de velocidades pois a inércia do fluido e as forças de atrito a 60 cps são suficientes para evitar qualquer grande movimento do fluido. Finalmente, como os sinais de tensão produzidos por esses medidores são bem pequenos, entradas interferentes de ten

são podem ser da mesma ordem de grandeza como por exemplo: efeito de termopar e ação galvânica. Como essas entradas, interferentes produzem flutuações de baixa frequência um sistema ac de 60 cps pode ter um filtro passa-alta para barrar esses sinais indesejáveis. Além disso - como os sinais da vasão são pequenos precisam ser amplificados o que é feito de uma maneira mais simples, mais barata e mais segura com amplificadores ac do que dc.



Uma limitação desses medidores é a condutividade do fluido que deve ser suficientemente alta para que o circuito externo não seja uma carga excessiva. Para medidores ac deve-se considerar a capacitância e a resistência tanto do fluido como do circuito externo. A capacitância causa ângulo de fase de atraso que produz erros de balanceamento no servosistema. Esses problemas podem ser facilmente manipulados quando a condutividade é maior que 20×10^{-6} mho/cm.

Outras características desses medidores são: não tem obstrução nenhuma ao escoamento, pode medir a vasão de escoamentos em ambos os sentidos; é insensível à viscosidade, à densidade e à perturbações no escoamento desde que o perfil de velocidade seja simétrico; linear numa larga faixa e tem resposta rápida à variações de vasão.

MEDIDORES DE FORÇA DE ARRASTO

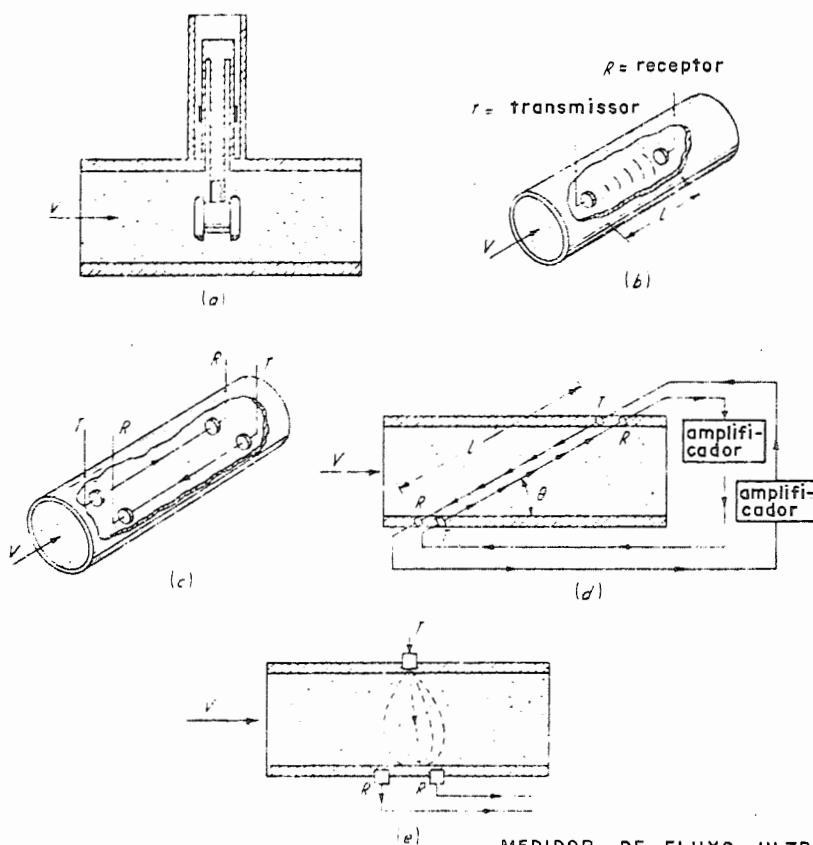
Um corpo imerso em um fluido em escoamento está sujeito a uma força de arrasto F_d dada por:

$$F_d = \frac{C_d A \rho V^2}{2}$$

onde

- C_d - coeficiente de arraste
- A - área transversal
- ρ - massa específica
- V - velocidade do fluido

Para números de Reynolds suficientemente altos e corpos de forma adequada o coeficiente de arrasto é razoavelmente constante. Portanto, para uma dada densidade, F_d é proporcional a V^2 e portanto ao quadrado da vazão. A força de arrasto pode ser medida por um transdutor de força aplicado ao suporte do corpo.



MEDIDOR DE FLUXO ULTRASONICO
DE FORÇA DE ARRASTO

MEDIDORES ULTRASONICOS

Pequenas perturbações de pressão propagam-se através de um fluído numa velocidade definida (velocidade do som) em relação ao fluído. Se o fluído tem uma velocidade, a velocidade absoluta da propagação das perturbações é a soma algébrica das duas. Sendo a vasão relacionada - com a velocidade do fluído este efeito pode ser utilizado de diversas maneiras como princípio de funcionamento dos medidores ultrasonicos. O termo ultrasonico significa que são utilizados sinais com frequência maior que 20000 cps e portanto não audíveis.

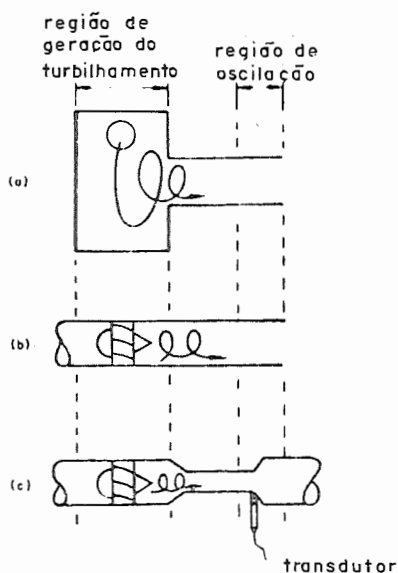
Os vários métodos de implementação do fenomeno acima dependem da existência de transmissões e receptores da energia acustica. Uma solução comum é de se utilizar transdutores piezoelétricos para ambas as funções. No transmissor a energia elétrica na forma de um pulso de tensão de alta frequência é aplicada ao cristal fazendo este vibrar. Como o cristal esta em contacto com o fluído a vibração passa para ele e se propaga através dele. O cristal receptor é exposto a essas flutuações de pressão e responde a elas vibrando. O movimento vibratório do cristal produz um sinal elétrico proporcional.

MEDIDORES DE TURBILHONAMENTO

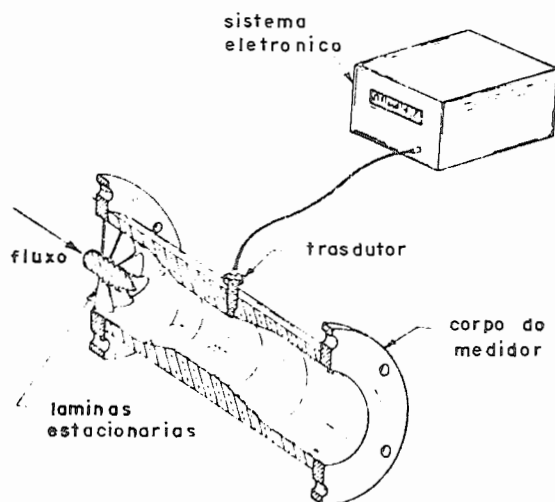
Um medidor de vasão sem partes móveis é nas vibrações que se estabelecem nos escoamentos em frequências proporcionais a vasão. Ele é baseado na modificação de uma linha de vórtice, que é causada pelo turbilhonamento instável de líquidos e gases em tubos. Inicialmente verificou-se que no escoamento onde o fluído entra tangencialmente numa camara cilíndrica e sai axialmente por um tubo de pequeno diâmetro apresenta um turbilhonamento. Conforme o escoamento se aproxima do tubo de saída ele se torna instável de tal maneira que o eixo do turbilhonamento faz um movimento de precessão em torno do eixo do tubo numa certa - frequência. Verificou-se que esta frequência que esta frequência de oscilação relaciona-se com a componente tangencial da velocidade do escoamento e não com a componente axial que seria mais desejável para a medida da vasão.

Posteriormente o turbilhonamento passou a ser provocado pela colocação de pás em um tubo retilíneo, conforme mostra a figura, no lugar da entrada tangencial. Estas pás produzem o turbilhonamento mas não - provocam as oscilações. Para isso, se faz também uma contração na secção do tubo do tipo venturi. Na região onde a área aumenta o eixo do

turbilhamento precessiona numa frequência proporcional a vazão.



Desenvolvimento do Medidor de fluxo por Turbilhamento
 (a) vortice básico; (b) vortice modificado por Turbina guia; (c) Medidor de Turbilhamento com transdutor eletromecânico.



Protótipo de Medidor de Turbilhamento com transdutor no gargalo da secção do venturi.