Instrumentação e Sensores

Aula 06 - Sensores de Vazão – Parte 2

Material Didático do Instituto Metrópole Digital - IMD
Versão 5.0 - Todos os Direitos reservados

Apresentação

Dando continuidade aos sensores de vazão, nesta aula apresentaremos outras classes desses medidores. Começaremos com os medidores lineares, passaremos pelos medidores volumétricos e fecharemos com os medidores em canais abertos.

Objetivos

- Entender as equações matemáticas e saber relacioná-las com os princípios dos medidores.
- Classificar os medidores de vazão e descrever os seus princípios de funcionamento.

Sensores de Vazão – Parte 2

Devido à variedade de processos e produtos, haverá sempre um medidor mais indicado para uma determinada aplicação. Diante disso, esta aula tem a finalidade de mostrar a diversidade dos medidores de vazão, assim como seus princípios de funcionamento. Não serão considerados nesta aula os medidores apresentados na aula anterior.

Tipos de medidores de vazão – Lineares

São medidores de vazão que produzem como saída um sinal diretamente proporcional à vazão, sendo este fator de proporcionalidade constante ou aproximadamente constante. Assim, eles se diferenciam dos medidores deprimogênios, nos quais a relação entre pressão e vazão não é linear e sim quadrática.

Medidor por área variável: rotâmetro

Os medidores por área variável oferecem uma área de passagem que é função da vazão. Em virtude da sua simplicidade e versatilidade, o rotâmetro é o medidor de vazão por área variável mais empregado na indústria e em laboratórios. Esse medidor consiste em um flutuador variando a sua posição dentro de um tubo cônico de acordo com a vazão do fluido, de acordo com a Figura 1(a). Esse deslocamento do flutuador resulta na variação da área entre a parede do tubo e o próprio flutuador.

Devido ao seu princípio de funcionamento se basear na ação da gravidade, esses medidores estão limitados a montagens na posição vertical.

O rotâmetro é constituído basicamente por duas partes:

- um tubo cônico instalado verticalmente, com a extremidade maior voltada para cima na tubulação por onde passará o fluido, cuja vazão será medida. Esse tubo pode ser de vidro ou metálico, que são usados quando o fluido não é transparente ou é incompatível com o vidro, seja devido à pressão e/ou temperatura. Nesse caso, a indicação ou transmissão se faz por acoplamento magnético.

- um elemento flutuante que pode ser uma esfera ou obturador cônico ou em forma de pistão.

O fluido entra pela parte inferior do tubo vertical e se desloca no sentido da extremidade superior. Quando essa vazão é nula o peso do flutuador faz com que ele permaneça na base do tubo. No entanto, à medida que a vazão começa a aumentar, o flutuador começa a mover-se na direção do fluxo, em decorrência de uma força vertical para cima, o empuxo. O flutuador se eleva em direção à parte mais larga do tubo até desobstruir uma área anular (área entre a parede do tubo de vidro e o flutuador) suficiente para a passagem do fluido. Quando essa área for suficiente, o flutuador assume uma posição de equilíbrio dinâmico, ou seja, a pressão diferencial através do flutuador somada ao empuxo causado deslocamento do fluxo se igualam à força peso do flutuador. Caso ocorra um aumento na vazão o flutuador se desloca para a parte superior do tubo e, caso ocorra uma redução, o flutuador se move em direção à base do tubo. A Figura 1 (b) apresenta alguns rotâmetros disponíveis comercialmente.

O tubo cônico pode ser calibrado e graduado com a escala mais adequada de forma que a vazão seja indicada com base na altura do elemento flutuante.

a) b)

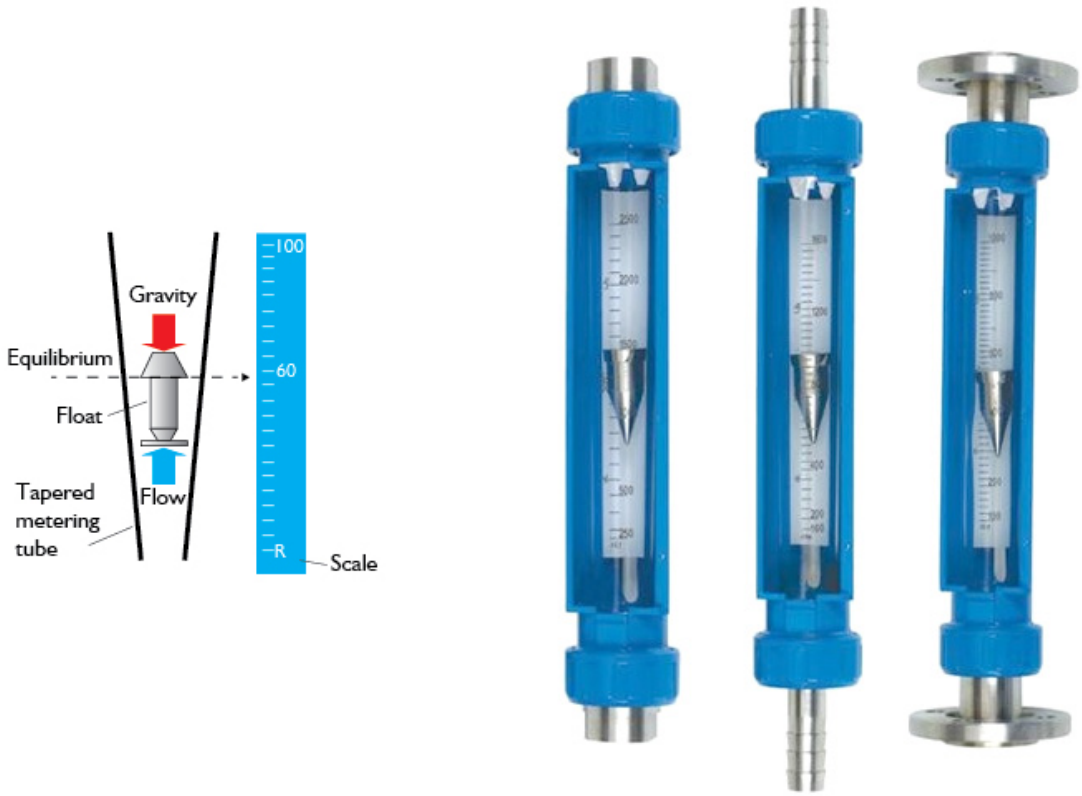


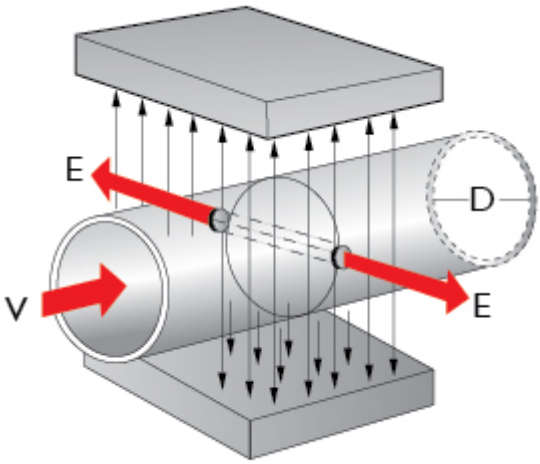
Figura 1 – (a) Parte do rotâmetro e forças que atuam nele; (b) exemplos de rotâmetros comerciais.
Fonte: (a) <http://www.globalspec.com/reference/9771/349867/rotameters-simplicity-utility>;
(b) <http://flowmeterschina.com/glass-tube-flowmeter/>.
Acesso em: 20 abr. 2013.

Eletromagnético

O medidor de vazão eletromagnético é baseado na lei de Faraday. Segundo essa lei, quando um condutor móvel se desloca perpendicularmente a um campo magnético, aparece nas suas extremidades uma força eletromotriz (*fem*) proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento. Essa *fem* induzida é, ainda, perpendicular tanto às linhas de fluxo magnético quanto à direção do movimento do fluido. A Figura 2

ilustra um esboço de um medidor de vazão eletromagnético juntamente com as direções da *fem* (E) induzida, direção do fluido (V), distância entre os eletrodos (D) e do campo magnético (B).

Figura 02 - Princípio do medidor de vazão magnético.



Fonte: http://www.instrumart.com/pages/223/magnetic-flow-meters. Acesso em: 20 abr. 2013.

O valor *fem* é descrito pela lei de Faraday:

$$V_e = \overrightarrow{B} \times L \times \overrightarrow{v}$$

Onde,

$\overrightarrow{B}$ é a densidade do fluxo magnético (T),

$\overrightarrow{v}$ é a velocidade do líquido (m/s) e

V_e é a força eletromotriz induzida (V) que pode ser medida por um par de eletrodos distantes de L (m), em contato com o fluido.

Substituindo-a na anterior, temos:

$$Q = v_e \times \left(\frac{\pi}{4}\right) \times \frac{L}{B}$$

Como visto a operação desse sensor depende do fato de que um condutor, movendo-se perpendicularmente ao campo magnético, induza uma tensão elétrica nesse condutor. Como nesse caso o condutor é o fluido, isso implica que esse fluido deva ser condutor de eletricidade.

Ultrassônico

Os medidores de vazão baseados na tecnologia de ultrassom medem a velocidade do fluido através da propagação de ondas sonoras ultrassônicas (frequência acima do audível pelo ser humano) nesse fluido. O deslocamento do fluido influencia na velocidade de propagação dessas ondas sonoras, que pode, então, ser medida para inferir a velocidade média do fluido.

Os ultrassons são produzidos por transdutores piezoelétricos, que convertem energia elétrica em energia mecânica (som). Além disso, esses transdutores são recíprocos ou reversíveis, o que significa que se for aplicada ao transdutor uma excitação mecânica ele produzirá um sinal elétrico de saída. Por isso esses transdutores são normalmente utilizados nesse tipo de medidor de vazão.

Os principais medidores que utilizam a velocidade do som como meio para medição da vazão operam por tempo de trânsito ou por efeito Doppler (frequência). O princípio de funcionamento de ambos se baseia na transmissão de uma onda sonora de alta frequência através do fluxo de fluido e a análise das ondas ultrassônicas recebida.

Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito utilizam um par de transdutores instalados em posições opostas para medir os tempos percorridos pelos sinais ultrassônicos no meio. A diferença entre esses tempos determina a velocidade do fluxo.

A Figura 3 apresenta um exemplo de instalação desses transdutores usados nos medidores de vazão por tempo de trânsito.

a) b)

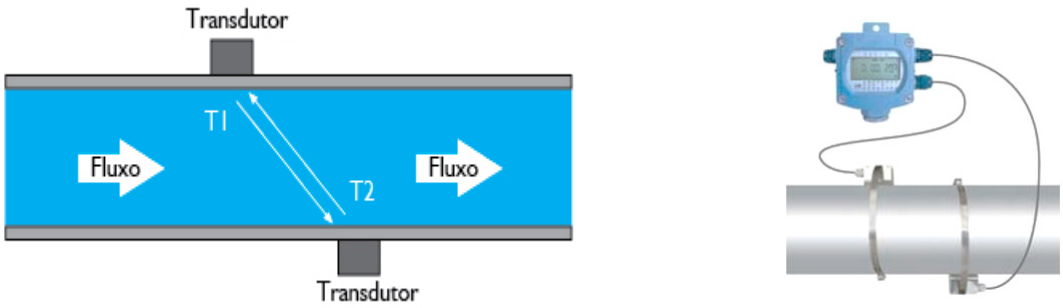


Figura 3 – (a) Exemplo de medição de vazão com um desses medidores.
(b) Instalação de medidor de vazão ultrassônico por tempo.
Fonte: (a) Autoria Própria;
(b) <http://www.ayite1973.com/sdp/1094510/4/pd-5248457/6456880.html>.
Acesso em: 20 abr. 2013.

A velocidade de propagação da onda de ultrassom é somada vetorialmente à velocidade do fluxo de fluido, ou seja, o feixe de onda transmitido pelo transdutor 1 no sentido de deslocamento do fluido tende a se propagar mais rápido até o transdutor 2 por influência da velocidade desse fluido. Já o feixe de onda que viaja no sentido contrário do fluxo, isto é, do transdutor 2 para o 1, propaga-se mais lentamente também devido à influência da velocidade do fluxo de fluido. Assim sendo, esse medidor determina o tempo diferencial entre os dois pulsos ultrassônicos, t_{12} e t_{21}, através do fluxo. Os tempos de transmissão são dados por:

$$t_{12} = \frac{d}{v_S + \vec{v} \times \cos\theta}$$

$$t_{21} = \frac{d}{v_S + \vec{v} \times \cos\theta}$$

Onde:
d é a distância entre os dois transdutores de ultrassom,
v_s a velocidade do som,
θ o ângulo entre os eixos do condutor e o caminho acústico e,
$\vec{v}$ a velocidade média do fluido na distância d.

Com a diferença entres os tempos devidamente calculada, a velocidade média, *v*, do fluxo de fluido, ao longo do caminho é dada por:

$$\overrightarrow{v} = \frac{d}{2 \cdot \cos\theta} \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right) = \frac{D}{2 \cdot \cos\theta \cdot \mathrm{sen}\theta} \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right)$$

Onde *D* é o diâmetro da tubulação.

A principal vantagem desse tipo de instalação (Figura 3 (b)) é o fato de se medir a vazão por ultrassom de forma não intrusiva, amarrando os transdutores na tubulação através da cinta apropriada.

Já os medidores ultrassons de efeito Doppler são medidores de vazão volumétrica que requerem a presença de partículas ou bolhas no fluxo de fluido. Esses medidores são ideais para águas residuais ou qualquer líquido sujo que seja condutor ou à base de água. No entanto, para água destilada ou algum outro fluido não conduto, esses medidores não apresentam comportamento satisfatório.

O princípio de funcionamento se baseia no fenômeno físico da variação na frequência, efeito Doppler, do sinal de ultrassom quando ele é refletido por partículas em suspensão ou bolhas de gás contidas em um fluxo de líquido. Assim, quando uma onda sonora de alta frequência (ultrassom) é transmitida em um tubo por onde está fluindo líquido, as partículas em suspensão e/ou bolhas de gás refletem essa onda ultrassônica com uma frequência ligeiramente diferente. A diferença entre a frequência da onda transmitida e a da onda refletida é diretamente proporcional à velocidade do fluxo de líquido.

A velocidade do fluido pode ser expressa por:

$$v = \frac{c \times (f_t - f_r)}{2 \times f_t \times \cos(\theta)}$$

Onde:
f_r é a frequência refletida,
f_t a frequência transmitida,
v a velocidade do fluxo de fluido,
θ o ângulo relativo entre o feixe de ultrassom transmitido e o fluxo de fluido e a velocidade do som na superfície do transdutor. A Figura 4 apresenta o princípio e um exemplo de aplicação desse tipo de medidor.

a) b)

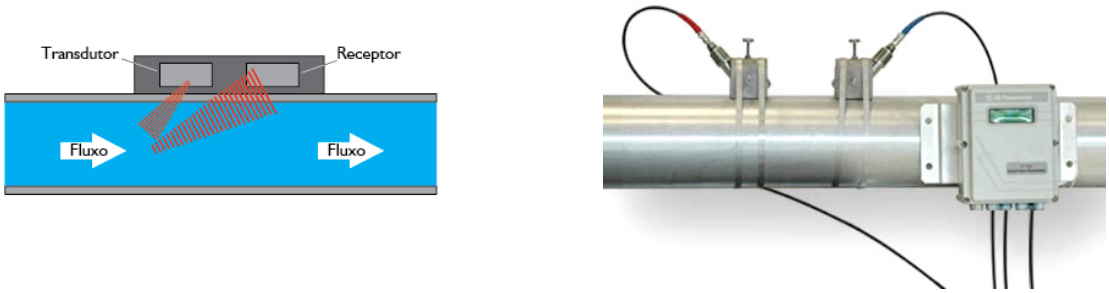
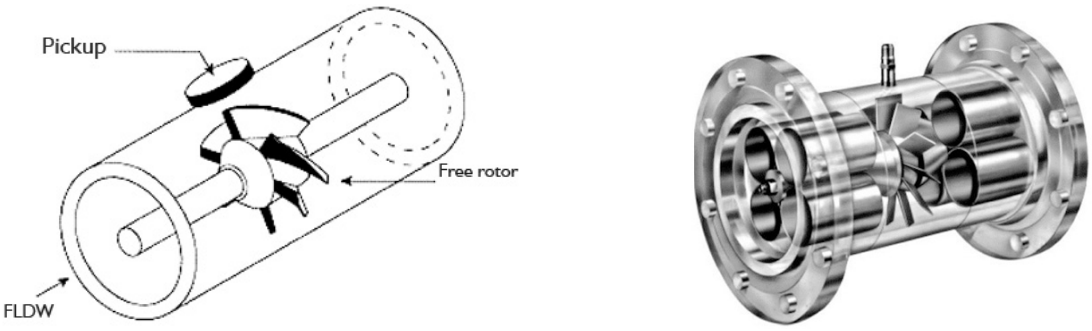


Figura 4 – (a) Exemplo de medição de vazão com um desses medidores. (b) Instalação de medidor de vazão ultrassônico por tempo. **Fonte:** (a) adaptada de <http://www.ayite1973.com/sdp/1094510/4/pd-5248457/6456880.html>; (b) <http://rshydro.co.uk/GE-Panametrics-mid-3.html>. Acesso em: 20 abr. 2013.

Turbina

O medidor de vazão tipo turbina (Figura 5) consiste em um rotor com diâmetro menor que o da tubulação, montado axialmente nessa tubulação, isto é, no centro dela. Esse rotor (turbina) é provido de palhetas fixas que o fazem girar a uma velocidade proporcional à velocidade do fluxo de líquido ou gás que passam pelo medidor.

a) b)



c) d)

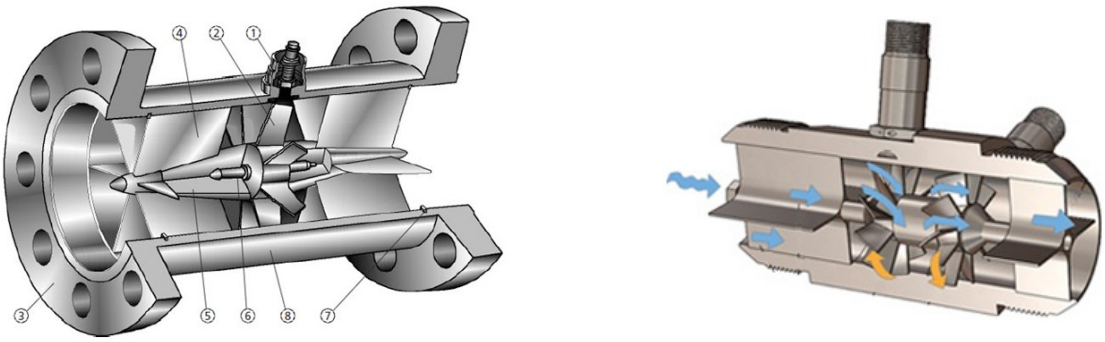


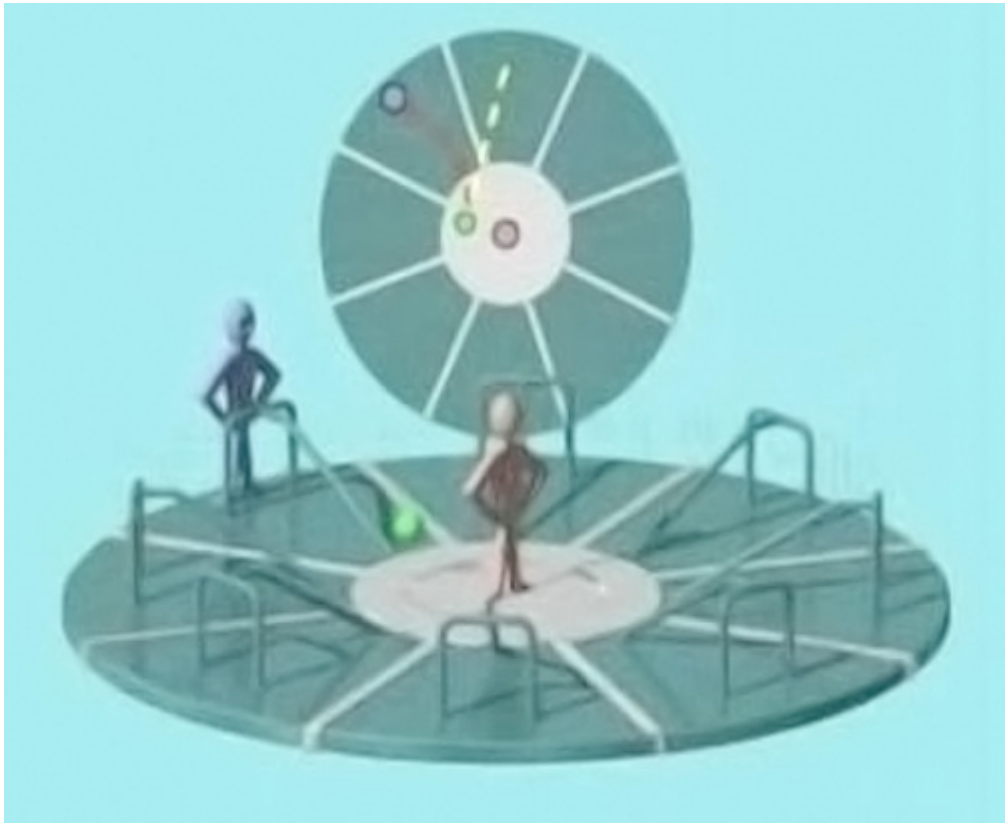
Figura 5 – (a) Visão geral da estrutura de um medido de vazão turbina; (b) Desenho de um medidor turbina sem corte e (c) com corte; (d) medidor com duas turbinas.
Fonte: (a e b)
<http://saba.kntu.ac.ir/eecd/ecourses/inst%2086/Projects/Flowmeters/Final%20Project-Alizadeh/All%20Other%20Files/Turbine%201.htm>;
(c) <http://www.proflow.ca/flow-instruments/flow-meter/nuflo-liquid-turbine-flow-meter.html>;
(d) <http://www.exactflow.com/flowmeter-dual-rotor-concept.html>.
Acesso em: 22 abr. 2013.

Coriolis

Para entender o princípio de funcionamento do medidor de vazão Coriolis é necessário que se tenha um entendimento claro da força de Coriolis, pois é nela que se baseia o funcionamento do medidor.

Para entender a força de Coriolis, imagine um sistema constituído por um disco em rotação, com velocidade angular constante, e dois jogadores (jogador A e jogador B) de bola em lados opostos no disco, conforme a Figura 6.

Figura 06 - Bola sofrendo ação da força de Coriolis.



Fonte: http://www.skeptinerd.com/2012/03/the-coriolis-effect-the-equator-and-a-tale-of-deception/. Acesso em: 26 abr. 2013.

Quando a bola é arremessada do jogador A para o jogador B, se a direção inicial da bola visar o ponto instantâneo em que estava no momento do lançamento, ela não atingirá o jogador B. Sua trajetória em relação ao disco será uma curva, chegando atrás do objetivo inicialmente visado. Esse movimento curvilíneo ocorre, em razão da existência de uma força que desvia a bola do seu objetivo. Considerando o contrário, em que o jogador B arremessa a bola para o jogador A, a bola também descreverá uma curva, devido à velocidade tangencial que tinha no momento do lançamento, e não atingirá o objetivo. Mais uma vez uma força atua desviando a direção da bola, considerando o disco como referência.

Os links a seguir ajudarão a compreender um pouco mais como a força de Coriolis age nos corpos, todos acessados em 27 de fevereiro de 2013.

Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=mcPs_OdQOYU

Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=_36MiCUS1ro

Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=49JwbrXcPjc

Portanto, a força de Coriolis é definida como sendo a força f_c que uma massa m é submetida quando ela se desloca com velocidade relativa v_r em relação a um sistema de referência, por sua vez em movimento de rotação w. Essa força pode ser calculada de acordo com a equação,

$$\overrightarrow{f_c} = 2 \cdot m \cdot \overrightarrow{w} \times \overrightarrow{v_r}$$

Obs.: o símbolo 'x' é para o produto vetorial.

Os medidores de vazão Coriolis são instrumentos que, utilizando o princípio de Coriolis, medem diretamente a taxa de fluxo de massa de um processo. O medidor é constituído por um ou dois tubos que vibram a uma determinada frequência dentro do invólucro do sensor, que além do elemento sensor (os tubos), possui um transmissor. Esses tubos podem ser normais (retos) ou com curvas em formato de U, S ou W.

Os transmissores enviam um sinal de entrada na forma de corrente pulsada para uma bobina de comando magnético dentro da unidade do sensor, fazendo os tubos vibrarem na sua frequência natural. Essa vibração permanece com uma frequência constante enquanto não existe fluxo algum passando por esses tubos. Esses sinais de entrada do sensor são processados, e como saída são geradas duas ondas senoidais em fase, uma para cada transdutor de velocidade.

Entretanto, quando o fluxo de fluido passa por esse tubo "vibrante", a ocorrência natural da força de Coriolis provoca uma ligeira rotação desse tubo, rotação que é proporcional à quantidade de massa que flui no tubo. Essa ligeira

rotação no tubo ocasiona um deslocamento de fase entre as ondas senoidais de saída e, a partir dessa defasagem, a medição é feita.

Além da vazão, o medidor é capaz de medir a densidade desse fluido através do monitoramento do período de vibração desse tubo.

Vortex

O princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo vortex é baseado na observação de um fenômeno físico que ocorre quando um corpo não aerodinâmico é imerso no fluxo de um fluido, ver Figura 7. Considerando o formato desse corpo, turbulências denominadas vórtices (também conhecidos como turbilhões) são criadas alternadamente de cada lado do corpo. O número de vórtices em um intervalo de tempo ou frequência são diretamente proporcionais ao tamanho e formado do objeto e à velocidade do líquido.

a) b)

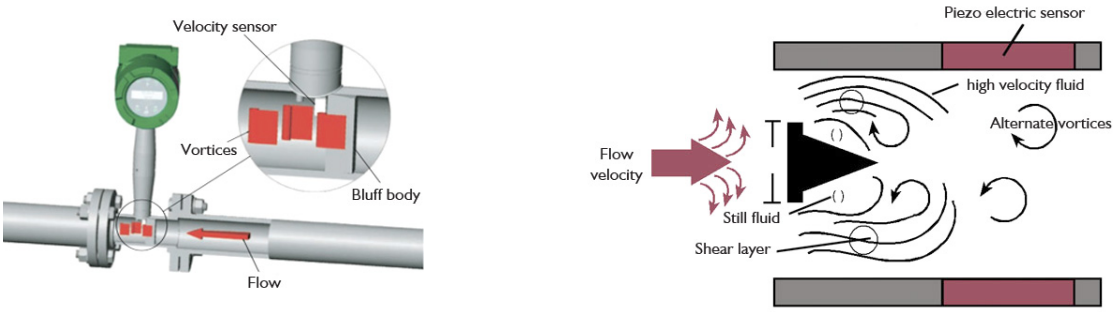


Figura 7 – Visão geral da formação dos vórtices.
Fontes: (a) <http://www.flowkom.ru/PRODUKT/Pro-VM22.html>;
(b) <http://www.aalborg.com/index.php/main_page/product_overview/id_product_overview/71">.
Acesso em: 28 abr. 2013.

Esses vórtices são detectados por sensores adequados, sendo a maioria piezoelétricos ou capacitivos, que detectam a oscilação na pressão próxima ao corpo imerso. A partir daí, dispositivos eletrônicos indicam a vazão instantânea ou vazão

total em um determinado intervalo de tempo. A Figura 8 apresenta alguns medidores vortex comerciais.

a) b)

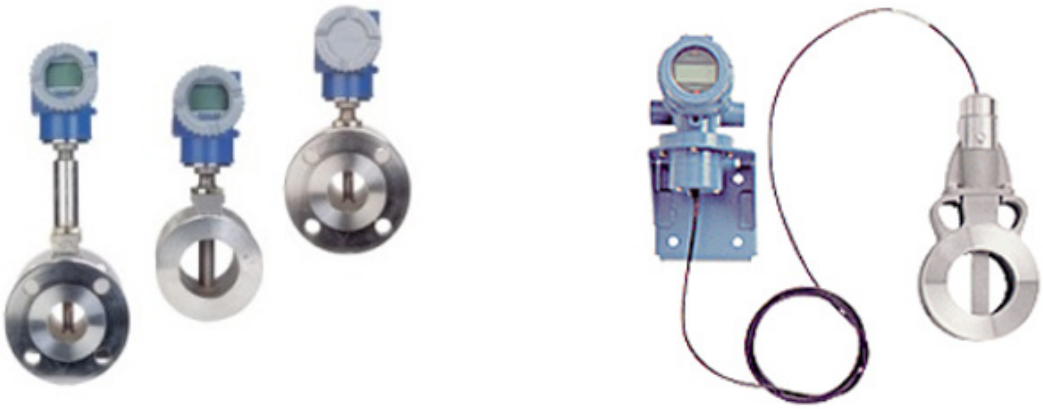


Figura 8 – Medidores vortex comerciais.
Fontes: (a)<http://www.fielddevices.foxboro.com/en/products/flow/vortex/>;
(b) <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0100-4004.pdf>.
Acesso em: 28 abr. 2013.

O número de Strouhal, S_t, uma constante usada para fenômenos oscilatórios, é utilizada para descrever a relação entre a frequência de formação do vórtice e a velocidade do fluido.

$$S_t = \frac{f \cdot d}{v}$$

Onde *f* é a frequência de formação dos vórtices, *d* a dimensão do medidor (ou corpo) e *v* a velocidade do fluido. O · é a multiplicação tradicional.

Pela equação anterior, fica claro que o número de Strouhal é adimensional, uma vez que a dimensão de *f* é T^{-1}, a de *d* é L e a de V é LT^{-1}.

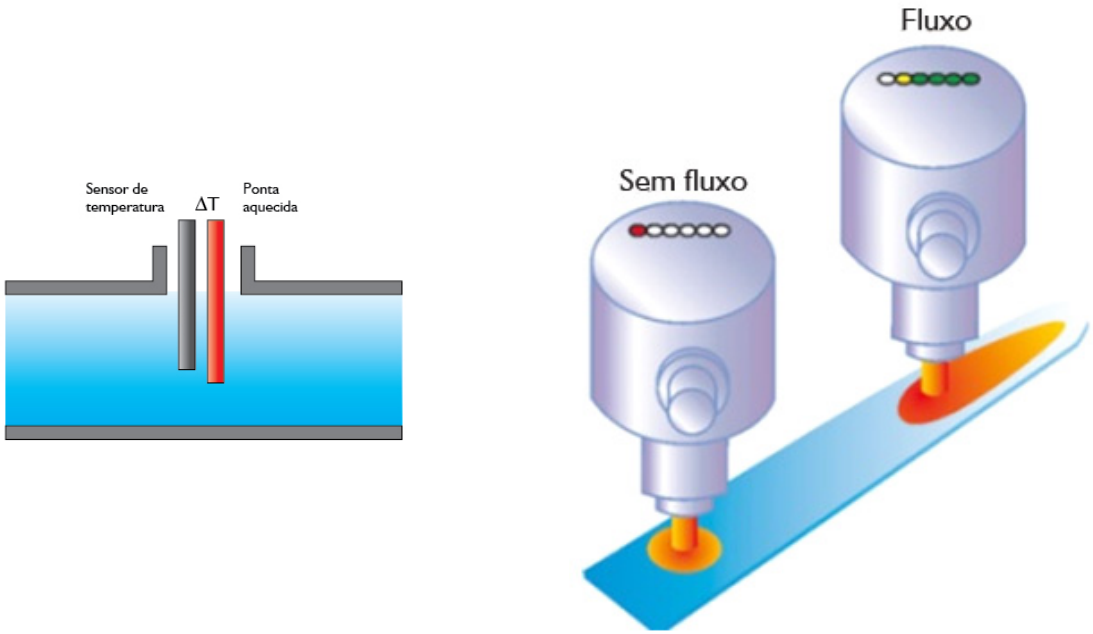
Térmicos (de fluxo de massa)

A maioria dos medidores de vazão pelo efeito térmico é baseada no princípio do desequilíbrio térmico causada pela vazão do fluido a ser medido. É colocado um objeto aquecido eletricamente no meio do fluxo de fluido de forma que, quando este passar pelo objeto aquecido, ocorra uma troca de calor entre ambos. Essa troca de calor provoca, consequentemente, uma variação na temperatura do objeto aquecido, variação essa que é proporcional ao fluxo de massa e não somente ao fluxo de fluido.

O medidor de temperatura pode ser encontrado das seguintes formas: os de alimentação constante e os de temperatura constante. No primeiro, a alimentação do elemento aquecedor é mantida constante e a vazão é medida pela diferença de temperatura entre o valor padrão (sem vazão do fluido) e a atual (onde o elemento aquecedor perde calor para o fluido em movimento). No segundo, onde a temperatura entre o elemento aquecedor e o fluido é mantida constante, a variável medida é a diferença na alimentação do aquecedor para manter essa temperatura, que é proporcional à vazão

A forma mais simples do medidor de vazão térmico é o anemômetro de fio quente, usado para medir a velocidade do ar. Esse medidor é constituído por um fio metálico, através do qual circula uma corrente elétrica necessária para manter sua temperatura (elevada) em um valor fixo. Um circuito elétrico monitora a resistência desse fio, resistência essa que é diretamente proporcional à sua temperatura. Se a velocidade do fluido que está se medindo aumenta, mais calor esse fluido "roubará" do fio, causando uma queda na temperatura desse fio. Então, o circuito sente esta mudança na temperatura (variação da resistência) e a compensa com o aumento da corrente através do fio a fim de trazer de volta e manter constante a temperatura do fio quente, por efeito Joule. A intensidade de corrente elétrica fornecida ao fio torna-se uma representação da vazão de fluido que passa pelo medidor. A Figura 9 ilustra como é o contato desse medidor com o fluido, bem como alguns exemplares comerciais dele.

a) b)



c) d)

Figura 9 – (a) Extremidade o sensor em contato com o fluido; (b) distribuição do calor quando o fluido parado e em movimento; (c) extremidades dos sensores e (d) exemplos comerciais desses sensores.

Fontes: (a) <http://www.prlog.org/12001663-thermal.jpg>;
(b) <http://www.mecatronicaatual.com.br/artigos/1434-uma-nova-tecnologia-para-medio-de-vazo>;
(c) <http://news.thomasnet.com/news/sensors-monitors-transducers/sensors-detectors/sensors-detectors-flow-level-sensors/flow-sensors/liquid-flow-sensors/20>;
(d) <http://www.eurrno.com/>.
Acesso em:28 abr. 2013.

Volumétricos

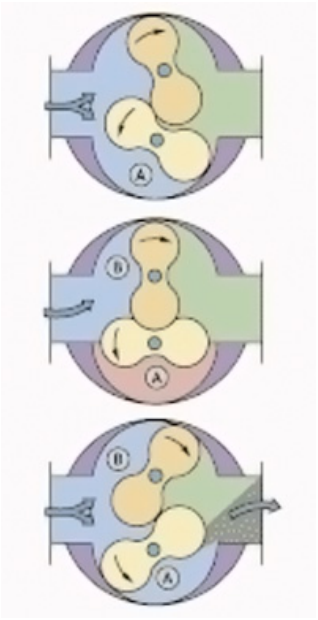
Os medidores de vazão volumétricos, também conhecido como medidores de deslocamento positivo, destinam-se essencialmente à medição de volumes, em litros ou em metros cúbicos, em vez de vazão, em litros por minuto ou em metros cúbicos por hora. Esses medidores se caracterizam por não necessitarem de alimentação para funcionar e são utilizados em aplicações de alta precisão. Além disso, o fluido que irá passar pelos medidores precisa ser limpo, já que partículas podem danificar o medidor ou gerar erros. Portanto, não são indicados para fluidos sujos ou abrasivos, devido à ação corrosiva e erosiva.

O princípio geral de funcionamento dos medidores volumétricos consiste em forçar a passagem do líquido por câmaras de volumes bem definidos. A dinâmica de cada ciclo desses medidores resume-se em três passos: admissão, etapa em que o fluido passa por uma abertura e preenche a câmara de medição; isolamento da câmara de medição, que possui um volume bem definido onde o fluido fica armazenado; e por fim, o escape, etapa na qual o fluido tem saída da câmara de medição em direção à saída do medidor.

Assim, como a cada ciclo passa um volume conhecido, ao final pode-se determinar o volume total baseado na quantidade de ciclos. Nesse caso, a vazão pode ser determinada através de acessórios mecânicos ou eletrônicos, de forma contínua, definindo o volume que passa pelo medidor por unidade de tempo. Existem diversos tipos de medidores volumétricos, entretanto destacaremos apenas três deles.

Medidor de engrenagens ovais – Engrenagens ovais são medidores de deslocamento positivo preciso, incorporando um par de rotores ovais engrenados (Figura 10 (a)). Esses medidores são capazes de medir a vazão de uma ampla gama de líquidos. Seu princípio de funcionamento baseia-se no fato de que a passagem do líquido faz com que duas engrenagens (rotores) ovais rotacionem dentro de uma câmara de medição precisa e a cada rotação um volume fixo de líquido é deslocado, passado através do medidor, Figura 10 (b). Um sensor detecta a rotação das engrenagens para determinar o volume deslocado e a vazão.

a) b)



c)

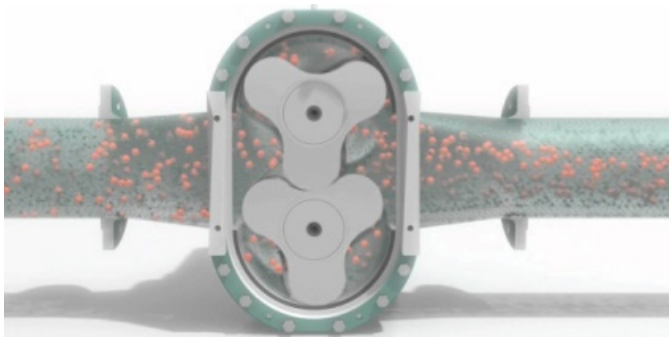


Figura 11 – (a) Ciclo de medição de vazão; (b) exemplo de aplicação desse medidor e (c) medidor de lóbulos comercial.
Fontes: (a) <http://saba.kntu.ac.ir/eecd/Ecourses/instrumentation/projects/pd.htm8.gif>;
(b) <http://i3.ytimg.com/vi/NSp-klqdF20/maxresdefault.jpg>
(c) <http://por-br.aerzen.com/var/aerzen/storage/images/media/ressources_meta/products/type-of-construction/aerzen-positive-displacement-blower/2792-9-eng-DE/Aerzen-Positive-Displacement-Blower_large.jpg>.
Acesso em: 28 abr. 2013.

Disco de nutação – O medidor disco de nutação é constituído por um disco montado excentricamente, que oscila dentro de uma câmara de medição de lados esféricos, permitindo a passagem de um volume definido a cada oscilação. Cada ciclo (movimento completo) do disco de medição desloca um volume fixo de líquido, que entra do lado esquerdo do medidor, alternadamente por cima e por baixo do disco. A pressão que esse líquido exerce força o disco a "nutar" ou oscilar em um

movimento circular, porém sem rotação em torno do seu próprio eixo. Esse movimento faz com que o líquido armazenado na câmara esquerda passe para a câmara direita, permitindo que outro volume de líquido preencha novamente a câmara esquerda e o líquido armazenado na câmara direita seja então descarregado, saindo do medidor (Figura 12 (a)). Um pequeno eixo ligado à esfera traça um percurso circular que é usado para acionar um contador mecânico ou eletrônico e, a partir dessa contagem, definir o volume total de líquido. A Figura 12 (b) mostra um desses medidores "aberto" e a 12 (c) um exemplar comercial dele.

a) b) c)

Figura 12 – (a) Ciclo do disco de nutação; (b) exemplo de aplicação desse medidor nos hidrômetros residenciais (c) hidrômetro comercial com disco de nutação.
Fontes: (a) <http://www.anagrammer.com/scrabble/nutating>;
(b) <http://www.redsealmeasurement.com/a-nutating-disc-meter/>;
(c) <http://www.badgermeter.de/fileadmin/content/badgermeter/images_docs/RCDL-M70.jpg>.
Acesso em: 28 abr. 2013.

O disco de nutação, também conhecido como medidor de disco, é usado extensivamente para o serviço de medição de água residencial. Ele é construído para pequenos tamanhos e sua capacidade máxima é de 570 l/min.

Atividade 01

1. Pesquise outros tipos de medidores de vazão volumétricos. Explique o princípio de funcionamento, aplicações, vantagens e desvantagens de pelos menos dois desses medidores.

Em canais abertos

Fluxos de canais abertos são definidos como sendo o fluxo em qualquer canal no qual o líquido flui com uma superfície livre devido à ação da gravidade. Podemos citar como exemplos os rios e canais de irrigação. Alguns canais fechados, como esgotos, quando flui parcialmente cheio e não apresenta pressão são também classificados como canais abertos. Os canais abertos são utilizados para conduzir líquidos na maioria dos sistemas de esgotos, estações de tratamento de água, aplicações de resíduos industriais e sistemas de irrigação.

Nesses tipos de medidores uma restrição calibrada inserida no canal controla a forma e a velocidade do fluxo de líquido. A taxa de fluxo é então determinada através da medição do nível do líquido dentro ou próximo à restrição.

a) b)

Figura 13 – (a) Vertedor em canal aberto e (b) à esquerda vertedor de forma simples (retangular) e à direita seção composta (retangular e triangular).
Fonte: (a) <http://www.openchannelflow.com/blog/article/weir-plate-materials>; (b) <http://www2.ufersa.edu.br/APRESENTA%C3%87%C3%83O%20VERTEDORES.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2013.

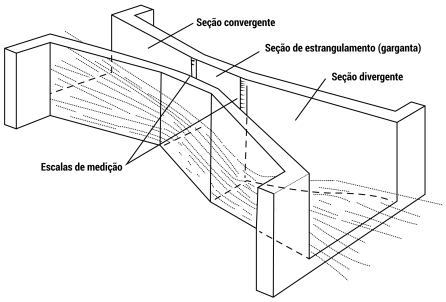
Os vertedouros são simples e baratos de construir e instalar. No entanto, eles apresentam uma perda de carga significativa e não são adequados para a medição de fluxos de líquidos com sólidos, pois estes podem ser represados ao ponto de

causar erro na medição da vazão.

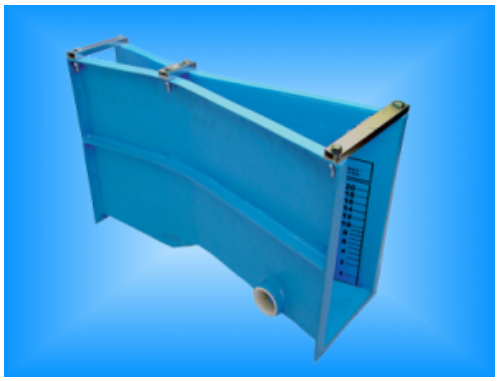
Calhas Parshall

Outra forma de se medir vazão de líquidos em canais abertos consiste em inserir nesse canal uma calha padronizada que apresente uma contração nas paredes do canal e/ou uma mudança na inclinação do canal, proporcionando uma aceleração no fluxo de líquido (Figura 14). A taxa e fluxo no canal são determinados em um ponto específico na calha, através da medição do nível naquele ponto.

a)



b)



c)

Figura 14 – (a) Partes de uma calha Parshall, (b) unidade de uma calha não instalada (c) aplicação das calhas Parshall.
Fonte: (a) <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e06.htm>;
(b) <http://www.filtrando.com.br/equipamentos/calhas-parshall.html>;
(c) <http://farm2.staticflickr.com/1141/801886071_daf593230f.jpg>.
Acesso em: 24 set. 2013.

Calhas Parshall são mais caras e mais difíceis de instalar do que os vertedouros. No entanto, as calhas não possuem obstáculos, que podem represar as partículas sólidas e prejudicar a medição, apresenta uma redução acentuada na perda de carga, além de necessitarem de menos manutenção.

Leitura Complementar

Livro “Manual de Medição de Vazão”, Gérard J. Delmée. Leitura das páginas 144 a 171.

Resumo: essas páginas apresentam outros tipos de medidores e tipos de escoamentos não discutidos nessa aula, e fecha discutindo detalhes sobre elementos deprimogênios.

Livro “Instrumentação e Fundamentos de Medidas” - volume 2, Alexandre Balbinot e Valner João Brusamarello. Leitura das páginas 302 a 314.

Resumo: essa leitura trata-se do capítulo de medição de vazão deste livro, porém estas páginas cobrem até o medidor tubo de Pitot. Esse capítulo apresenta uma leitura objetiva, com diversas ilustrações, além de apresentar conceitos não abordados nesta aula.

Blog “Controle e Automação” <https://sites.google.com/site/automacao0/mvp>, acessada em 20 de fevereiro de 2013. Leitura do tópico 2.4, “Medição de variáveis de processo - Vazão”.

Resumo: blog com excelente material, com apresentação das aulas (slides) e exercícios. Tudo isso disponível para download.

Resumo

Nesta aula, vimos outras famílias de medidores de vazão, apresentação dos seus princípios de funcionamento, bem como algumas aplicações.

Autovaliacao

1. Explique o princípio de funcionamento do medidor eletromagnético.
2. Cite os dois tipos de medidores ultrassônicos e explique o princípio de funcionamento de um deles.
3. Onde é aplicado o medidor por efeito Doppler?
4. Qual o princípio de funcionamento do medidor de vazão tipo turbina?
5. Explique o funcionamento do medidor de vazão por efeito Coriollis.
6. Cite dois tipos de medidores em canais abertos.
7. Explique o princípio de funcionamento do Vertedor.

Para verificar suas respostas, clique aqui.

Respostas

1. Explique o princípio de funcionamento do medidor eletromagnético.

   O medidor de vazão eletromagnético é baseado na lei de Faraday, na qual, quando um condutor móvel se desloca perpendicularmente a um campo magnético, aparece nas suas extremidades uma força eletromotriz (fem) proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento.

2. Cite os dois tipos de medidores ultrassônicos e explique o princípio de funcionamento de um deles.

   Os dois tipos são o de tempo de trânsito e efeito Doppler. Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito utilizam um par de transdutores instalados em posições opostas para medir os tempos percorridos pelos sinais ultrassônicos no meio.A velocidade de propagação da onda de ultrassom é somada vetorialmente à velocidade do fluxo de fluido, ou seja, o feixe de onda transmitido pelo

transdutor 1 no sentido de deslocamento do fluido tende a se propagar mais rápido até o transdutor 2 por influência da velocidade desse fluido. Já o feixe de onda que viaja no sentido contrário do fluxo, isto é, do transdutor 2 para o 1, propaga-se mais lentamente também devido à influência da velocidade do fluxo de fluido. A diferença entre esses tempos determina a velocidade do fluxo.

3. Onde é aplicado o medidor por efeito Doppler?

   Esses medidores são ideais para águas residuais ou qualquer líquido sujo que seja condutor ou à base de água. No entanto, para água destilada ou algum outro fluido não conduto, esses medidores não apresentam comportamento satisfatório.

4. Qual o princípio de funcionamento do medidor de vazão tipo turbina?

   Consiste em um rotor com diâmetro menor que o da tubulação, montado axialmente nessa tubulação, isto é, no centro dela. Esse rotor (turbina) é provido de palhetas fixas que o fazem girar a uma velocidade proporcional à velocidade do fluxo de líquido ou gás que passam pelo medidor.

5. Explique o funcionamento do medidor de vazão por efeito Coriollis.

   Os medidores de vazão Coriolis são instrumentos que utilizam o princípio de Coriolis, sendoconstituídos por um ou dois tubos que vibram a uma determinada frequência dentro do invólucro do sensor, que além do elemento sensor (os tubos), possui um transmissor. Os transmissores enviam um sinal de entrada na forma de corrente pulsada para uma bobina de comando magnético dentro da unidade do sensor, fazendo os tubos vibrarem na sua frequência natural. Essa vibração permanece com uma frequência constante enquanto não existe fluxo algum passando por esses tubos. Esses sinais de entrada do sensor são processados, e como saída são geradas duas ondas senoidais em fase, uma para cada transdutor de velocidade. Entretanto, quando o fluxo de fluido passa por esse tubo "vibrante", a ocorrência natural da força de Coriolis provoca uma ligeira rotação desse tubo, rotação que é proporcional à quantidade de massa que

flui no tubo. Essa ligeira rotação no tubo ocasiona um deslocamento de fase entre as ondas senoidais de saída e, a partir dessa defasagem, a medição da vazão é feita.

6. Cite dois tipos de medidores em canais abertos.

   Vertedouros e Calhas Parshall.

7. Explique o princípio de funcionamento do Vertedor.

   Nesses tipos de medidores uma restrição calibrada inserida no canal controla a forma e a velocidade do fluxo de líquido. A taxa de fluxo é então determinada através da medição do nível do líquido dentro ou próximo à restrição. São simples e baratos de construir e instalar. No entanto, eles apresentam uma perda de carga significativa e não são adequados para a medição de fluxos de líquidos com sólidos, pois estes podem ser represados ao ponto de causar erro na medição da vazão.

Referências

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. v 2. p.314-329.

CHAVES, C. R. **Curso de formação de operadores de refinaria: instrumentação básica.** Curitiba, 2002. Treinamento Petrobras. p. 42-47.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2003. p.144-171.

DUNN, W. C. **Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control**. Norwood: Artech House, 2006. p. 139-148.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. **Sampling Guide for Enviromental Analisys: Booklet 7 - Flow Measurement Methods in Open Channels.** Centre d' expertise en analyse environnementale du Québec. May, 2007. p.11-27.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações.** 5. ed. São Paulo: Érica, 2005. p.151-171.