

Instrumenta o e Sensores

Aula 05 - Sensores de Vazão - Parte 1

Apresentação

Nesta aula abordaremos os instrumentos utilizados para medir os volumes e as quantidades (massa) de um produto qualquer que escoar em um duto ou canal, ou seja, os medidores de vazão. Entretanto, antes de discutir sobre esses medidores, faremos uma breve introdução destacando a sua importância e, rapidamente, falaremos um pouco sobre a parte matemática que fundamenta os princípios de medição desses instrumentos. Por fim, apresentaremos a primeira parte dos medidores de vazão, os medidores deprimogênios.

Objetivos

- Compreender a importância da variável vazão para os processos industriais, assim como para o nosso dia a dia.
- Diferenciar e compreender os tipos de vazão.
- Entender as equações matemáticas e saber relacioná-las com os princípios dos medidores.
- Listar as unidades de vazão e realizar a conversão entre elas.
- Listar os medidores de vazão deprimogênios e descrever os seus princípios de funcionamento.

Sensores de vazão

A vazão é uma das grandezas mais utilizadas na indústria, sendo também uma das principais variáveis de processo. Medições de vazão são essenciais em muitas aplicações, tais como: transporte de gás natural comprimido em tubulações (transferência de custódia), medição de gases industriais e combustíveis; sistemas de água e fornecimento de gás para os consumidores domésticos; sistema de irrigação; transporte de sólidos granulados; e uma série de sistemas de controle de processos industriais.

O custo de muitos líquidos e gases é baseado na vazão medida através de um duto, tornando-se necessário medir com precisão e controlar essa taxa de fluxo, permitindo, assim, uma contabilidade mais exata na venda ou transferências desses produtos. Para se ter uma dimensão do quão importante é a medição de vazão no setor comercial, vamos usar o exemplo do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), que é uma via de transporte de gás natural entre Brasil e Bolívia e tem uma capacidade de transporte de 30 milhões de metros cúbicos por dia. Considerando-se um custo de venda de U\$ 0,50 por metro cúbico, então um erro sistemático de apenas 1% em um medidor de vazão está associado a uma quantia em torno de U\$ 150.000 por dia.

Está disponível no mercado uma enorme gama de tecnologias de medição de vazão, cada uma tendo as suas aplicações mais adequadas conforme as condições impostas pelo processo.

Medição de vazão

A vazão é definida como sendo a quantidade de líquidos, gases ou sólidos que passa por uma determinada instalação por unidade de tempo. A sua medição implica na determinação dessas quantidades, que pode ser representada pelo valor instantâneo (vazão instantânea) ou pela quantidade total movimentada em um intervalo de tempo. Como exemplo de vazão, imagine a água que se movimenta dentro da tubulação da rede hidráulica da concessionária responsável pelo fornecimento de água em sua cidade.

As unidades para expressar os valores de vazão são as mais diversas possíveis, podendo ter como base unidades de volume (litros, mm^3 , cm^3 , m^3 , galões, pés cúbicos etc.) ou unidades de massa (g, Kg, toneladas, libras, entre outros). São exemplos de unidades

de vazão: polegadas cúbicas por minuto (in^3/min), centímetros cúbicos por segundo (cm^3/s), litros por minuto (l/m), galões por minuto (gpm), pés cúbicos por minuto (ft^3/min).

Tipos de vazão

Como vimos, a vazão pode ser definida como a quantidade **volumétrica** ou **mássica** de um fluido que passa através de um meio por unidade de tempo. Assim, podemos definir:

Vazão volumétrica

É definida como sendo a quantidade em volume que escoar através de determinada seção em um intervalo de tempo. É representada pela letra Q e expressa pela seguinte equação:

$$Q_v = \frac{V}{t}$$

Sendo:

V - volume que se desloca;

t - o tempo.

A vazão volumétrica é normalmente expressa: m^3/s , m^3/h , cm^3/min , l/h , gpm , entre outras.

Na medição da vazão volumétrica as condições normais de temperatura e pressão são necessárias para definir as condições de referência padrão, pois o volume de líquidos e gases e suas vazões, conseqüentemente, podem variar significativamente com a temperatura e a pressão, principalmente para os gases.

Vazão mássica

É definida com sendo a quantidade de massa de uma determinada substância que se desloca através de um duto ou área por unidade de tempo. É representada por Q_m e expressa pela seguinte equação:

$$Q_m = \frac{m}{t}$$

Sendo:

m - o valor da massa que se desloca;

t - o tempo.

A vazão mássica é normalmente expressa em: kg/s, kg/h, g/min, T/h e Lb/h, entre outras.

Unidades de vazão

Considerando que a vazão pode assumir diferentes unidades tomando como base o volume ou a massa, as tabelas abaixo apresentam como podemos transformar essas unidades em outra correspondente.

	m³/h	m³/min	m³/s	GPM	BPD	pé³/h	pé³/min
m³/h	1	0,016667	0,00027778	4,440287	150,956	35,314	0,588579
m³/min	60	1	0,016667	264,1721	9057,34	2118,8802	35,3147
m³/s	3600	60	1	15.850,33	543.440,7	127.132,81	2118,884
GPM*	0,22712	0,0037854	$63,09 \cdot 10^{-6}$	1	34.2857	8,0208	0,13368
BPD*	0,0066245	0,00011041	$1,8401 \cdot 10^{-6}$	0,029167	1	0,23394	0,0038990
pé³/h	0,0283168	0,00047195	$7,8657 \cdot 10^{-6}$	0,124676	4,2746	1	0,016667
pé³/min	1,69901	0,028317	0,00047195	7,480519	256,476	60	1

* GPM = galão por minuto; BPD = barril por dia

Tabela 1 – Conversão de unidades de vazão volumétrica.

Fonte: [link](#).

Acesso em: 21 jul. 2013.

	t/dia	t/h	Kg/h	Kg/s	lb/h	lb/min	lb/s
t/dia**	1	0,041667	41,667	0,011574	91,858	1.5310	0,025516
t/h**	24	1	1000	0,27778	2204,6	36,7433	0,61239
Kg/h	0,0240	0,001	1	0,000278	2,2046	0,03674	0,000612
Kg/s	86,400	3,6	3600	1	7936,6	132,276	2,2046
lb/h**	0,01089	0,0004536	0,4536	0,000126	1	0,01667	0,000278
lb/min**	0,65317	0,02722	27,216	0,00756	60	1	0,016667
lb/s**	39,1907	1,63295	1.632,95	0,45360	3600	60	1

** t = tonelada; lb = libra

Tabela 2 - Conversão de unidades de vazão mássica.

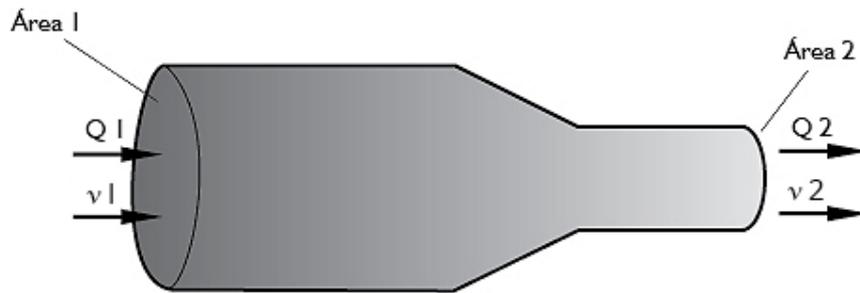
Fonte: [link](#).

Acesso em: 21 jul. 2013.

Equação da continuidade

Os fluidos ideais obedecem à equação da continuidade, que é a lei de conservação da massa aplicada à mecânica dos fluidos. Para fluidos ideais, característica que será considerada durante toda a aula, a vazão volumétrica deve ser constante, assim como sua densidade (ρ), ou seja, a massa de fluido que entra em um duto tem que ser igual à massa que sai, no mesmo intervalo de tempo. Neste caso a equação da continuidade, baseada na Figura 1, expressa-se como:

Figura 01 - Sistema hidráulico com fonte e sumidouro.



Fonte: Autoria Própria.

$$Q_1 = v_1 \times A_1 \times \rho$$

E

$$Q_2 = v_2 \times A_2 \times \rho$$

Logo

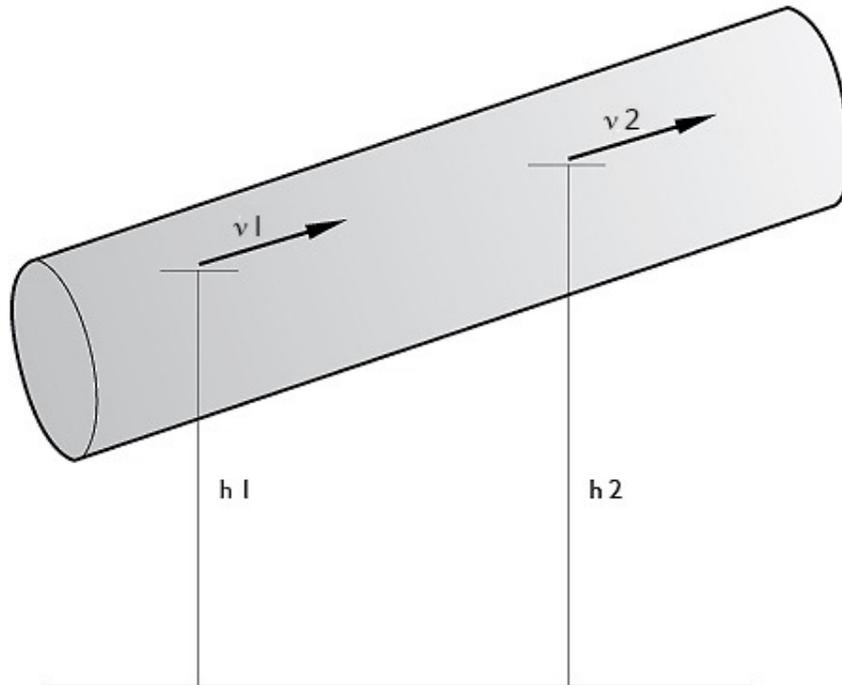
$$v_1 \times A_1 \times \rho = v_2 \times A_2 \times \rho$$

Onde v se refere a velocidade do líquido, A é a área da seção transversal do tubo ocupada pelo líquido e ρ é a densidade do líquido.

Equação de Bernoulli

As equações de Bernoulli determinam a relação entre a velocidade do fluido (v), a pressão do fluido (P), a massa específica do fluido (ρ), a gravidade (g) e a altura (h) de pontos fixos em uma tubulação de área de seção variável (ver Figura 2).

Figura 02 - Fluxo de fluido com massa específica ρ através de uma tubulação inclinada.



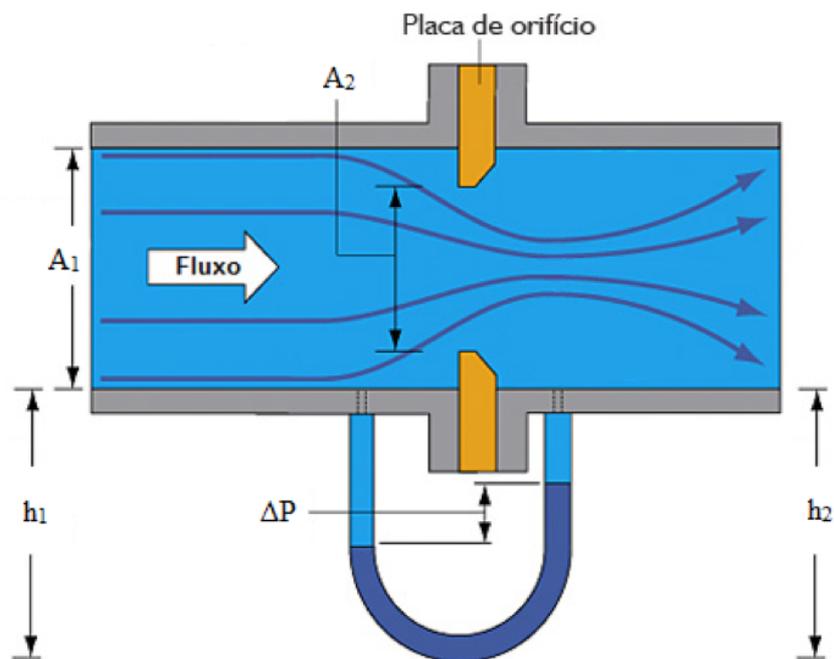
Fonte: Balbinot e Brusamarello (2011, p. 297).

A equação de Bernoulli é descrita como:

$$P_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 + \rho \times g \times h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 + \rho \times g \times h_2$$

A maioria dos instrumentos de pressão diferencial utilizam uma equação simplificada para relacionar a vazão a diferença de pressão medida entre o tubo sem e com restrição . Dado um tubo como mostrada na figura 3.

Figura 03 - Medição de vazão pela pressão diferencial.



Fonte: Adaptado de <<https://www.withfriendship.com/images/f/27471/Orifice-plate-picture.gif>> Acesso em: 02 fev. 2018.

Utilizando-se a equação da continuidade conjuntamente com a equação de Bernoulli, podemos deduzir tal equação simplificada com se segue:

$$v_1 \times A_1 \times \rho = v_2 \times A_2 \times \rho$$

Como ρ é comum aos dois lados pois se trata de uma constante, podemos eliminá-lo e isolar tudo em função de v_2 :

$$v_2 = v_1 \times \frac{A_1}{A_2}$$

Reequacionando Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 + \rho \times g \times h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 + \rho \times g \times h_2$$

$$\frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 + \rho \times g \times h_1 - \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 - \rho \times g \times h_2 = P_2 - P_1$$

Como as alturas dos pontos de medição num tubo horizontal são as mesmas, temos que $h_1 = h_2$, assim, podemos eliminar os termos correspondentes ficando com:

$$\frac{\rho \times v_1^2}{2} - \frac{\rho \times v_2^2}{2} = P_2 - P_1$$

$$\frac{\rho}{2} \times (v_1^2 - v_2^2) = P_2 - P_1$$

$$v_1^2 - v_2^2 = \frac{2}{\rho} \times (P_2 - P_1)$$

Substituindo v_2 temos:

$$v_1^2 - v_1^2 \times \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{2}{\rho} \times (P_2 - P_1)$$

Botando v_1^2 em evidência:

$$v_1^2 \times \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) = \frac{2}{\rho} \times (P_2 - P_1)$$

$$v_1^2 \times \left(\frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2}\right) = \frac{2}{\rho} \times (P_2 - P_1)$$

Mas temos que:

$$Q = v \times A$$

Logo:

$$Q_1 = v_1 \times A_1$$

$$v_1 = \frac{Q_1}{A_1}$$

Substituindo v_1 temos:

$$\frac{Q_1^2}{A_1^2} \times \left(\frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2}\right) = \frac{2}{\rho} \times (P_2 - P_1)$$

$$Q_1^2 \times \frac{2}{\rho} \times \left(\frac{A_2^2 - A_1^2}{A_1^2 \times A_2^2}\right) = (P_2 - P_1)$$

Isolando Q_1^2 :

$$Q_1^2 = \frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2}{A_2^2 - A_1^2} \times (P_2 - P_1)$$

Multiplicando a fração das áreas por (-1) tanto no numerador quanto no denominador teremos:

$$Q_1^2 = \frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2 \times (-1)}{(A_2^2 - A_1^2) \times (-1)} \times (P_2 - P_1)$$

$$Q_1^2 = \frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2 \times (-1)}{A_1^2 - A_2^2} \times (P_2 - P_1)$$

Utilizando o (-1) do numerador com as pressões teremos:

$$Q_1^2 = \frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2}{A_1^2 - A_2^2} \times (P_1 - P_2)$$

Mas temos que:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

Logo:

$$Q_1^2 = \frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2}{A_1^2 - A_2^2} \times \Delta P$$

Como Q_1 é a vazão do tubo antes da restrição, então $Q_1 = Q$ e assim obtemos Q como:

$$Q_1 = Q = \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}} \times \sqrt{\Delta P}$$

Mas como a primeira raiz possui apenas termos constantes (áreas e o ρ) então chamamos essa raiz de :

$$k = \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \frac{A_1^2 \times A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}} = (\text{constante})$$

Simplificando a equação toda para:

$$Q = k \times \sqrt{\Delta P}$$

Esse valor de K pode ainda agregar outras particularidades referentes a construção dos tubos, posição das tomadas de medição ou tipos de medidores diferenciais. Cada um dos casos deve ser avaliado para se calcular corretamente essa constante.

Atividade 01

1. Pesquise e defina o que é o número de Reynolds.

Clique [aqui](#), para a ver as respostas.

Respostas

1. O coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. É utilizado, por exemplo, em projetos de tubulações industriais e asas de aviões.

O conceito foi introduzido por George Gabriel Stokes em 1851, mas o número de Reynolds tem seu nome oriundo de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro hidráulico irlandês (1842–1912), quem primeiro popularizou seu uso em 1883.

O seu significado físico é um quociente de forças: forças de inércia ($v\rho$) por forças de viscosidade ($\frac{\mu}{D}$). É expressado como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Sendo:

v - velocidade média do fluido.

D - longitude característica do fluxo, o diâmetro para o fluxo no tubo.

μ - viscosidade dinâmica do fluido.

ρ - massa específica do fluido.

A significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo) e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso de um fluxo de água num tubo cilíndrico, admite-se os valores de 2.000 e 2.400 como limites. Desta forma, para valores menores que 2.000 o fluxo será laminar, e para valores maiores que 2.400 o fluxo será turbulento. E para valores entre eles o fluxo será transitório.

O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos reduzidos.

Um exemplo comum é o túnel aerodinâmico onde se medem forças desta natureza em modelos de asas de aviões, automóveis, edificações. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. D refere-se em geral, a qualquer dimensão do sistema, por exemplo a corda de asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício. Geralmente, nos túneis aerodinâmicos a semelhança mais utilizada é a de Mach. Tipicamente, por valores experimentais, costuma-se caracterizar um fluido com escoamento laminar com $Re < 2100$ e escoamento turbulento com $Re > 4000$.

(fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Reynolds)

Tipos de medidores de vazão

Os medidores de vazão se baseiam, em quase todos os casos, em medições indiretas. Ou seja, eles medem outro tipo de grandeza, que é convertida em vazão através de um transdutor. Como consequência, há na literatura uma gama de métodos empregados na medição da vazão. Dentre eles, podemos destacar os medidores de pressão diferencial, deslocamento positivo, turbina, eletromagnetismo, ultrassom, área variável, efeito Coriolis e massa térmica.

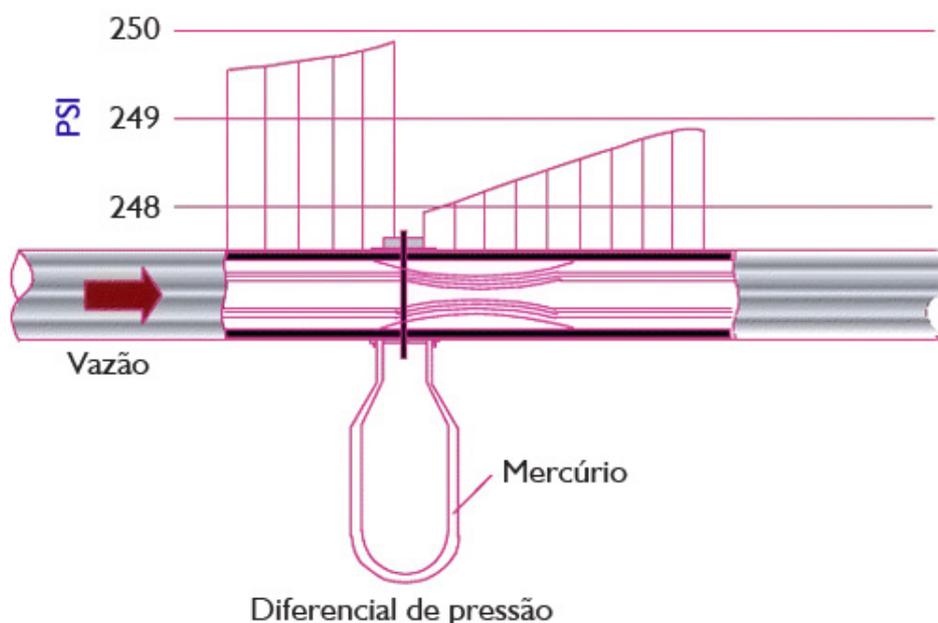
Cada tipo ou modelo de medidor é capaz de medir diferentes tipos de fluidos, de diferentes faixas e custos. Portanto, a escolha correta de qual medidor de vazão utilizar numa determinada aplicação depende de fatores como: tipo de fluido a ser medido e suas características (densidade, viscosidade, limpeza, condutividade), local da medida (no

próprio local ou local remoto), faixas de vazão, pressão e temperatura do processo a ser medido. Quanto à tubulação do processo deve-se levar em consideração o tipo, diâmetro, rugosidade, trecho reto e direção, entre outros.

Elementos deprimogênicos

São elementos que medem a vazão através de dados da pressão diferencial produzida quando o fluido passa por elementos primários inseridos na tubulação. Esses elementos reduzem a área da seção em um pequeno comprimento, resultando em um aumento da velocidade do fluido, que é acompanhada pela queda de sua pressão. A correlação da diferença de pressão com a velocidade fornece um meio para medir a vazão volumétrica.

Figura 04 - Comportamento da pressão ao passar por uma restrição.



Fonte: [link](#). Acesso em: 5 abr. 2013.

Os medidores de vazão por diferencial de pressão podem ser empregados em uma gama de aplicações, cujas medições podem assumir os mais variados valores. Os fluidos envolvidos podem ser gás ou líquido, inclusive os mais viscosos e aqueles com sólidos em suspensão em uma faixa de pressão e temperatura ampla.

Os tipos mais comuns de medidores de vazão por pressão diferencial são: placa de orifício, tubo de Venturi, medidor tipo bocal e tubo de Pitot.

Placa de orifício

Considerado o dispositivo mais simples para medir pressão por diferencial de pressão, a placa de orifício consiste em uma chapa metálica em formato de disco, que apresenta uma pequena abertura (0,2 a 0,85 do diâmetro da tubulação) precisa e calculada, por onde passa o fluido. A Figura 5 apresenta exemplos desse medidor.



Figura 5 – (a) Placas de orifício comerciais; (b) Esboço de uma placa de orifício instalada em uma tubulação.

Fonte: (a) <<http://www.power-technology.com/contractors/pressure/euromisure/euromisure2.html>>
(b) <<http://www.nwfp.org/nwfp.info/component/content/article/53-steam-systems/291-review-of-orifice-plate-steam-traps>>.

Acesso em: 5 abr. 2013.

O fluxo de fluido se contrai ao passar pelo orifício, assumindo uma área de seção transversal mínima a qual se dá o nome de *vena contracta* ou veia contraída. É nessa região que a vazão de fluido apresenta o menor valor de pressão. A Figura 6 exemplifica uma ocorrência da veia contraída. O cálculo da vazão é, portanto, baseado na diferença entre as pressões tomadas antes e depois da placa de orifício.

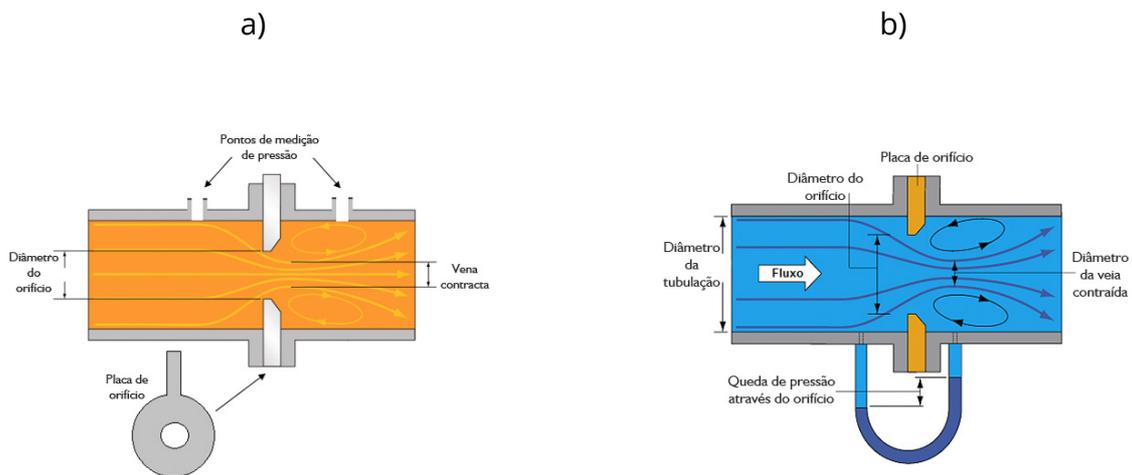


Figura 6 – Representações da placa de orifício destacando a "veia contraída".

Fonte: (a) <<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/flowmetering/types-of-steam-flowmeter.asp>>;

(b) <<http://withfriendship.com/user/levis/orifice-plate.php>>.

Acesso em: 5 abr. 2013.

A placa de orifício pode ser fabricada a partir de chapa de aço inoxidável ou de material compatível com o fluido a ser medido. A posição do orifício, sua dimensão e formato variam de acordo com a aplicação onde serão instalados. Os orifícios normalmente encontrados são de três tipos: concêntrico, excêntrico e segmentado, conforme mostra a Figura 7.

- Orifício concêntrico: tipo de placa utilizada para líquidos, gases e vapores que não contenham sólidos em suspensão.
- Orifício excêntrico: tipo de placa aplicada nas condições em que bolhas de gás ou partículas sólidas possam estar presentes no fluxo de líquido, ou em que gotículas líquidas ou partículas sólidas estejam presentes no fluxo de gás. O seu orifício se localiza fora do centro, para permitir que as partículas indesejadas do fluido se acumulem.
- Orifício segmental: tipo de placa na qual o orifício não apresenta um formato circular, mas um segmento de círculo concêntrico. Ela tem o mesmo propósito do orifício excêntrico, porém considerando proporções mais elevadas de partículas. Dependendo da aplicação, o segmento pode estar localizado na parte superior ou inferior.

Figura 07 - Placas de orifício mais comuns.



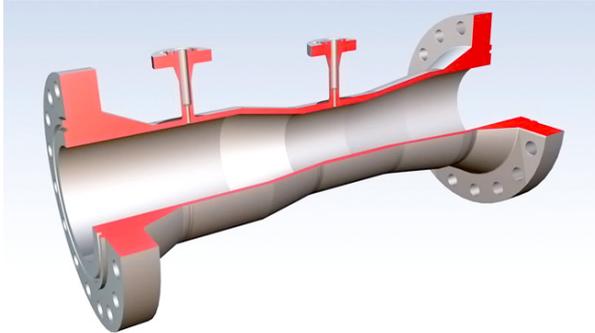
Fonte: Autoria Própria

Tubo de Venturi

O princípio básico de funcionamento do tubo de Venturi é semelhante ao da placa de orifício, que é reduzir a área da seção transversal da passagem do escoamento (Figura 8), acarretando um diferencial de pressão e a partir da medição dessa diferença de pressão, determinando o valor da vazão.

A seção de entrada do medidor de Venturi tem o mesmo diâmetro da tubulação e é seguido por um cone convergente. Esse cone é um tubo curto que afunila a partir do tamanho original do tubo até o diâmetro da “garganta” do medidor, que é um pequeno tubo que possui uma seção transversal menor que o da tubulação. Após a “garganta” vem o cone divergente do medidor, que é um tubo cuja seção transversal diverge gradualmente do valor da seção da “garganta” até atingir o tamanho original da tubulação. A Figura 9 mostra o comportamento da pressão e da velocidade do fluido ao passar pelo tubo de Venturi.

a)



b)



Figura 8 – (a) Estrutura de um tubo de Venturi; (b) um tubo de Venturi comercial.

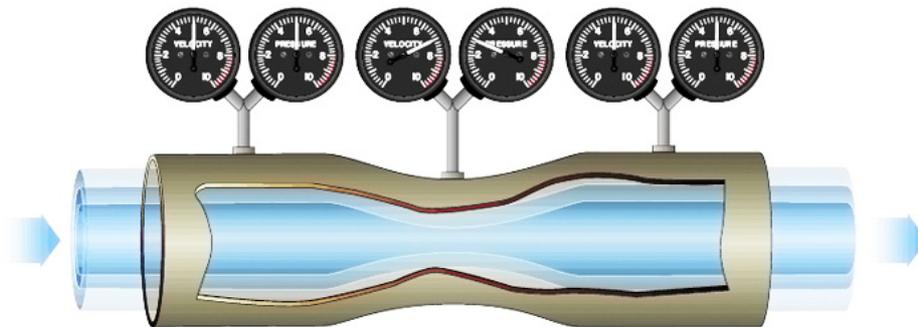
Fonte: (a) <[link](#)>;

(b) <[link](#)>.

Acesso em: 5 abr. 2013.

No entanto, apesar de o tubo de Venturi oferecer melhor precisão e menor perda de carga em relação à placa de orifício – uma vez que apresenta uma restrição mais suave e gradual – eles têm a desvantagem do tamanho e do custo de fabricação.

Figura 09 - Comportamento da velocidade e da pressão do fluido no tubo de Venturi.



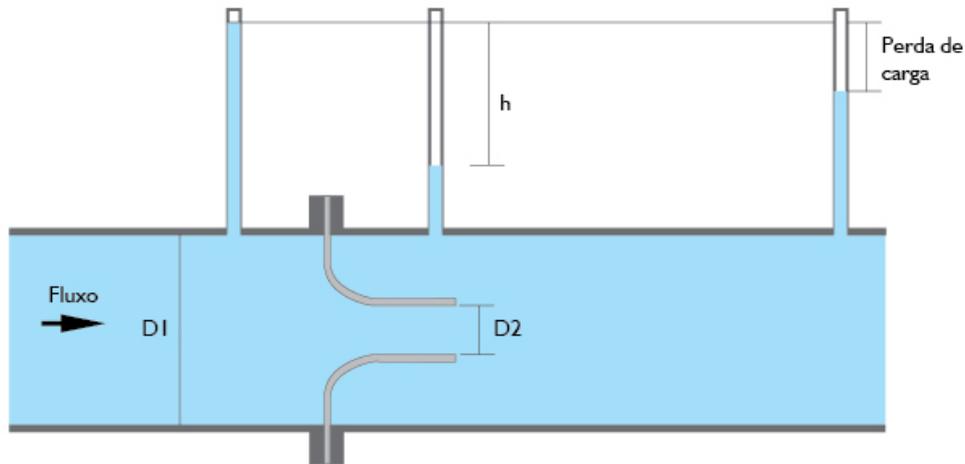
Fonte: [link](#). Acesso em: 5 abr. 2013.

Medidor tipo bocal

O medidor de vazão tipo bocal possui o mesmo princípio de operação do tubo de Venturi. Além disso, suas estruturas físicas são bastante semelhantes, com a diferença de que o medidor bocal tem um tamanho menor e não possui o cone divergente (ver Figura 10). Devido à ausência dessa seção de saída, esse medidor apresenta uma maior perda de

carga em relação ao tubo de Venturi. Já com relação à placa de orifício, o bocal de vazão provoca uma pressão diferencial menor e, conseqüentemente, uma menor perda de carga nas mesmas condições de temperatura, pressão e vazão.

Figura 10 - Medidor de vazão tipo bocal.



Fonte: Autoria Própria

O bocal de vazão é considerado um medidor de vazão por pressão diferencial de qualidade intermediária entre a placa de orifício e o tubo de Venturi. Seu custo é menor do que os medidores de Venturi e, apesar da qualidade inferior, pode fornecer uma precisão equivalente. A Figura 11 ilustra medidores do tipo bocal disponíveis comercialmente.

Figura 11 - Medidor de vazão por pressão diferencial do tipo bocal



Fonte: http://www.general-flowproducts.com/flow_nozzle.html. Acesso em: 5 abr. 2013.

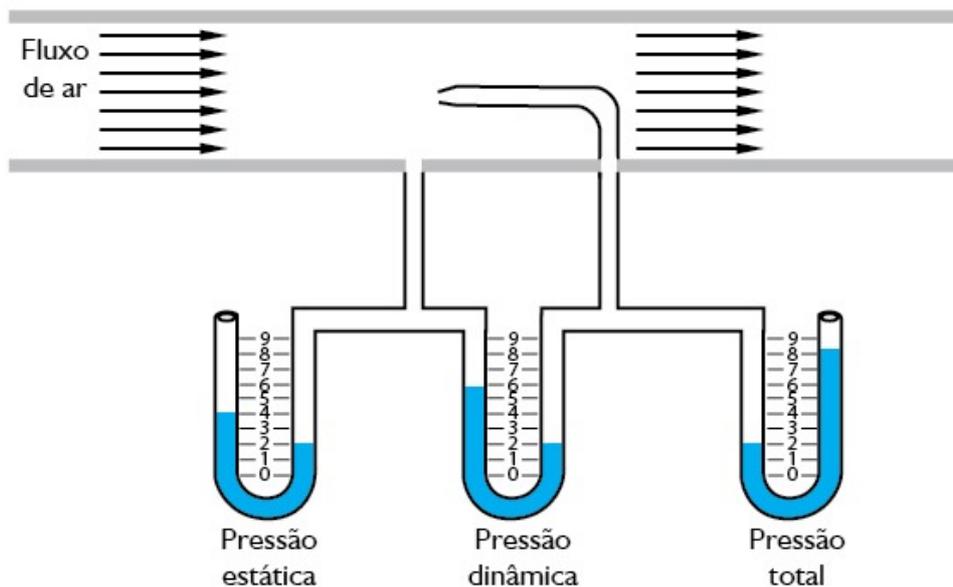
Esse tipo de medidor é muito utilizado em aplicações nas quais se deseja determinar a vazão de vapor, líquidos limpos ou sujos (contendo sólidos em suspensão) e com relativa perda de pressão média.

Tubo de Pitot

Esse medidor de vazão já foi introduzido na primeira aula de Sensores de pressão, na seção "Saiba mais". Na ocasião, definimos o tubo de Pitot como sendo um dispositivo usado para medir vazão (velocidade do fluxo) por meio da diferença entre as pressões dinâmica e estática, também chamada de pressão total.

Apesar de já ter sido introduzida, vamos aqui relembrar seu princípio de funcionamento, utilizando uma abordagem mais detalhada. Primeiramente vamos rever como calcular as pressões envolvidas de acordo com a figura 12, que ilustra uma forma de medir as pressões estática, dinâmica e total através de tubos corretamente posicionados em relação ao fluxo.

Figura 12 - Pressões estática, dinâmica e total.



Fonte: Autoria Própria

A primeira posição do tubo mede apenas a pressão estática, uma vez que a tomada é feita próxima à parede do tubo. Já a segunda posição mede apenas a pressão total, visto que a tomada é realizada no centro de deslocamento do fluido. A terceira medida é

implementada como uma combinação das duas primeiras de tal modo que a saída indica a diferença entre as pressões estática e total, ou seja, a pressão dinâmica.

O tubo de Pitot é um instrumento constituído por um tubo curvado em formato de "L", como mostra a Figura 13. Ele possui uma abertura em sua extremidade, a qual é colocada na direção da corrente do fluido. As outras aberturas estão localizadas próximas à parede do duto, isto é, próximas à superfície.



Figura 13 – (a) Esquema de um tubo de Pitot; (b) Fotografia de um tubo de Pitot em uma aeronave.

Fonte: (a) Autoria própria; (b)

<http://ocw.usu.edu/civil_and_environmental_engineering/fluid_mechanics/lect12.htm>.

Acesso em: 15 jul. 2013.

Leitura Complementar

Livro “Manual de Medição de Vazão”, Gérard J. Delmée. Leitura da página 44 à 144.

Essas páginas descrevem detalhadamente o que são medidores de vazão deprimogênios e quais são eles, incluindo alguns que não foram apresentados nesta aula, suas aplicações e como calibrar esses instrumentos.

Livro “Instrumentação e Fundamentos de Medidas” - volume 2, Alexandre Balbinot e Valner João Brusamarello. Leitura da página 294 à 302.

Essa leitura abrange o capítulo de medição de vazão do livro, no entanto, o capítulo aborda apenas até o medidor tubo de Pitot. O texto apresenta uma leitura objetiva com diversas ilustrações, além de apresentar conceitos não abordados nesta aula.

<<https://sites.google.com/site/automacao0/disciplinas/instr2009/mvp>>. Leitura do tópico 2.4, “Medição de variáveis de processo - Vazão”.

Blog com excelente material, que expõe a apresentação das aulas (slides) e exercícios. Tudo isso disponível para download.

Resumo

Nesta aula discutimos as vazões de líquidos e gases em locais fechados. Vimos que as vazões podem ser relacionadas ao volume ou à massa do fluido deslocada em um determinado trecho. A equação da continuidade garante que, considerando fluidos ideais, a massa de fluido que entra é a mesma que sai. Essa equação, em conjunto com a equação de Bernoulli, fornece uma fórmula usada para calcular a vazão dos fluidos em função de sua pressão. Vimos também que o cálculo de vazão por diferencial de pressão possibilitou o desenvolvimento de alguns tipos de sensores baseados nesse princípio: os medidores deprimogênios. Os valores de vazão podem se dar em vazão instantânea, volume ou vazão mássica. A escolha do sensor adequado dependerá de fatores como precisão, velocidade do fluxo, range, presença de partículas etc.

Autoavaliação

1. Defina o que é vazão.
2. Indique 3 situações nas quais é necessária a medição de vazão.
3. Defina vazão volumétrica.
4. Um sistema hidráulico enche uma caixa d'água de 5000 litros a cada 8 horas. Calcule a vazão de água que passa pela tubulação ligada diretamente à caixa, em l/h, l/m e l/s.
5. Faça a conversão das unidades de vazão volumétrica:
 - a. $28 \text{ m}^3/h$ em *GPM*
 - b. 56 GPM em Pe^3/h
 - c. 39 BPD em Pe^3/min
 - d. $98 \text{ l}/\text{min}$ em *BPH*
 - e. $45 \text{ l}/h$ em m^3/min
6. Defina vazão mássica.
7. Faça a conversão das unidades de vazão mássica:
 - a. $78 \text{ kg}/s$ em lb/s
 - b. $764 \text{ t}/h$ em kg/min
 - c. $542 \text{ kg}/h$ em lb/min
 - d. $230 \text{ t}/\text{dia}$ em t/min
 - e. $890 \text{ lb}/\text{min}$ em kg/h
8. Defina a placa de orifício e cite os 3 tipos de placa, indicando a utilização de cada uma delas.

Clique [aqui](#), para a ver as respostas.

Respostas

1. A vazão é definida como sendo a quantidade de líquidos, gases ou sólidos que passa por uma determinada instalação por unidade de tempo. A sua medição implica na determinação dessas quantidades, que pode ser representada pelo valor instantâneo (vazão instantânea) ou pela quantidade total movimentada em um intervalo de tempo.
2.
 - Medição do volume de água gasta, por um consumidor, pela concessionária de água da cidade.
 - Medição do volume de gás utilizado por um consumidor residencial.
 - Medição de gasolina injetada no tanque de combustível durante o abastecimento.
3. É definida como sendo a quantidade em volume que escoar através de determinada seção em um intervalo de tempo. É representada pela letra Q e expressa pela seguinte equação:

$$Q_v = \frac{V}{t}$$

Onde:

V é o volume que se desloca.

t é o tempo.

4.
$$Q = \frac{V}{t}$$

Logo:

$$Q(l/h) = \frac{5000}{8} = 625 l/h$$

Como 1h tem 60 min, temos:

$$Q(l/min) = \frac{625}{60} \cong 10,42 l/min$$

Como 1 min tem 60 s, novamente:

$$Q(l/s) = \frac{10,42}{60} \cong 0,174 l/s$$

5. a. 124,33 *GPM*
b. 449,17 *Pe³/h*
c. 0,152 *Pe³/min*
d. 36,98 *BPH*
e. 0,00075 *m³/min*
6. É definida com sendo a quantidade de massa de uma determinada substância que se desloca através de um duto ou área por unidade de tempo. É representada por Q_m e expressa pela seguinte equação:

$$Q_m = \frac{m}{t}$$

Onde:

m é o valor da massa que se desloca.

t é o tempo.

7. a. 171,96 lb/s
b. 12733,33 kg/min
c. 19,91 lb/min
d. 159,72 t/min
e. 24222,24 kg/h
8. Considerado o dispositivo mais simples para medir pressão por diferencial de pressão, a placa de orifício consiste em uma chapa metálica em formato de disco, que apresenta uma pequena abertura (0,2 a 0,85 do diâmetro da tubulação) precisa e calculada, por onde passa o fluido. Os orifícios normalmente encontrados são de três tipos: concêntrico, excêntrico e segmentado.
- Orifício concêntrico: tipo de placa utilizada para líquidos, gases e vapores que não contenham sólidos em suspensão.

- Orifício excêntrico: tipo de placa aplicada nas condições em que bolhas de gás ou partículas sólidas possam estar presentes no fluxo de líquido, ou em que gotículas líquidas ou partículas sólidas estejam presentes no fluxo de gás. O seu orifício se localiza fora do centro, para permitir que as partículas indesejadas do fluido se acumulem.
- Orifício segmental: tipo de placa na qual o orifício não apresenta um formato circular, mas um segmento de círculo concêntrico. Ela tem o mesmo propósito do orifício excêntrico, porém considerando proporções mais elevadas de partículas. Dependendo da aplicação, o segmento pode estar localizado na parte superior ou inferior.

Referências

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. p. 294-314. v 2.

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

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. p. 44-144.

DUNN, W. C. **Introduction to instrumentation, sensors, and process control**. Norwood: Artech House, 2006. p. 129-139.

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

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005. p.147-151.