



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Química

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA

INTRODUÇÃO À
INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Prof. Maurício A. da Motta Sobrinho

Prof. Nelson L. Medeiros

RECIFE

1998

1. TEMPERATURA

A temperatura, como variável intensiva, é uma medida importante na indústria de processos, sendo exigida nos casos em que a aplicação de calor ou frio é necessária para o controle de um processo de fabricação.

O ponto de ebulição e o ponto de fusão da água e o ponto de fusão do enxofre são alguns dos pontos fixos utilizados na definição da escala de temperatura internacional.

É citado na literatura pontos de referência para se calibrar os termômetros de acordo com a faixa de temperatura em que se irá trabalhar [1].

Existem vários fenômenos que podem ser utilizados na medição de temperatura, dentre os quais destacam-se :

- Variação de volume
- Variação da resistência em um condutor
- Força eletromotriz criada na união de dois metais distintos
- Intensidade da radiação emitida por um corpo

A opção por um deles far-se-á de acordo com o tipo de aplicação, pela precisão do resultado, velocidade de captação da temperatura, distância entre o elemento de medida e o receptor e pelo tipo de instrumento indicador, registrador ou controlador.

1.1. VARIAÇÃO DE VOLUME

Dentre os termômetros que utilizam a influência da temperatura na variação de volume podem-se destacar :

I. TERMÔMETRO DE VIDRO

O termômetro de vidro é formado basicamente por um bulbo, onde se deposita o líquido que irá se expandir sob ação do calor, e um tubo capilar graduado, onde o líquido se projetará indicando a temperatura.

O fluido mais comumente usado neste tipo de termômetro é o mercúrio, por possuir um coeficiente de expansão uniforme, não molhar o vidro, purifica facilmente e ser de fácil leitura. Podem também ser empregados o pentano, o álcool e o tolueno, dependendo da faixa de operação do termômetro.

Um caso particular do termômetro de vidro é o termômetro de Beckmann. Ele tem uma escala com variação de 0,01 °C, podendo ainda estimar a 0,001 °C. Seu intervalo é somente de 5 a 6 °C, mas se pode ajustar para qualquer temperatura mediante o ajuste do mercúrio na parte superior da escala.

II. TERMÔMETROS DE SISTEMA TERMAL

O sistema termal é definido como um conjunto selado composto por :

- Um bulbo oco metálico, que é exposto ao meio cuja temperatura se deseja medir. Ele é o reservatório do fluido.

- Um tubo capilar, que serve como elemento de ligação
- Uma espiral ou hélice tipo “Bourdon” que converte as variações de pressão ou de volume em movimentos mecânicos

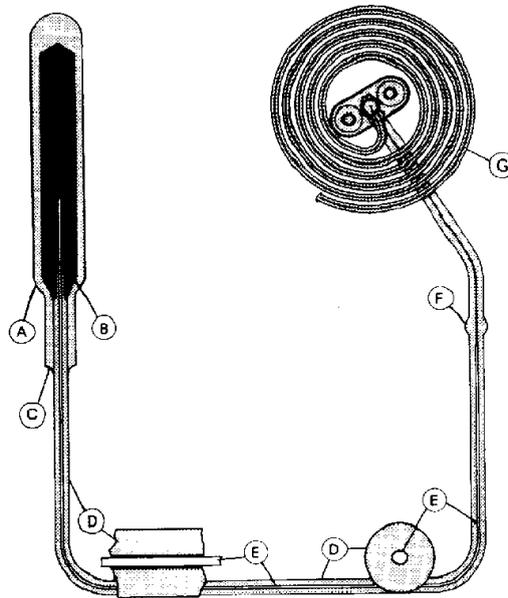


Figura 01 - Sistema Termal

O sistema termal existe em três tipos, que são:

II.1. SISTEMA TERMAL COM LÍQUIDO OU TERMÔMETRO DE LÍQUIDO EM METAL

Este tipo é preenchido totalmente por um líquido, que pode ser o mercúrio ou um líquido orgânico como o álcool metílico e o etilbenzeno. Ao ser aquecido este líquido expande-se, fazendo com que o tubo de Bourdon se dilate provocando o seu estiramento. Conseqüentemente o elemento indicador mover-se-á proporcionalmente ao aumento de pressão, indicando assim a temperatura.

O termômetro líquido em metal funciona baseado no aumento da pressão em um volume relativamente fixo. Segundo os fundamentos da física básica isto pode ser representado idealmente por:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

onde : P_1 = Pressão menor T_1 = Temperatura menor V_1 = Volume menor
 P_2 = Pressão maior T_2 = Temperatura maior V_2 = Volume maior

mas $V_1 = V_2$ temos que

(2)

A variação da temperatura em função da pressão pode ser vista claramente pela Equação 2.

II.2. SISTEMA TERMAL DE GÁS OU TERMÔMETRO DE GÁS

Estes termômetros operam baseados na lei de Charles dos gases ideais, expressa pela equação 2. Geralmente o gás utilizado é o nitrogênio, porém outros gases podem ser utilizados. O funcionamento deste tipo de termômetro é semelhante ao sistema termal de líquido.

II.3. SISTEMA TERMAL DE VAPOR OU TERMÔMETROS ACIONADOS A VAPOR

Este tipo de termômetro pode funcionar de duas maneiras : com o líquido volátil ou com o vapor atuando no tubo de Bourdon. Quando a temperatura ambiente é a mesma ou próxima da temperatura medida, não se deve utilizar este sistema acionado por vapor.

O funcionamento do sistema termal de vapor é semelhante ao do sistema termal líquido. O líquido volátil ao ser aquecido passa para a fase vapor aumentando a pressão no interior do tubo de Bourdon. Em qualquer temperatura haverá uma condição de equilíbrio entre o líquido volátil e a fase vapor, utilizados como meio sensor.

III. TERMÔMETRO BIMETÁLICO

Os termômetros metálicos tem seu funcionamento baseado na diferença entre os coeficientes de dilatação dos metais. São construídos com duas lâminas finas de metais diferentes que são fixados uma à outra em toda a sua extensão e modelados na forma de espiral ou hélices. Uma extremidade da espiral ou hélice é presa ao eixo do ponteiro e a outra ao tubo de proteção.(Figura 2)

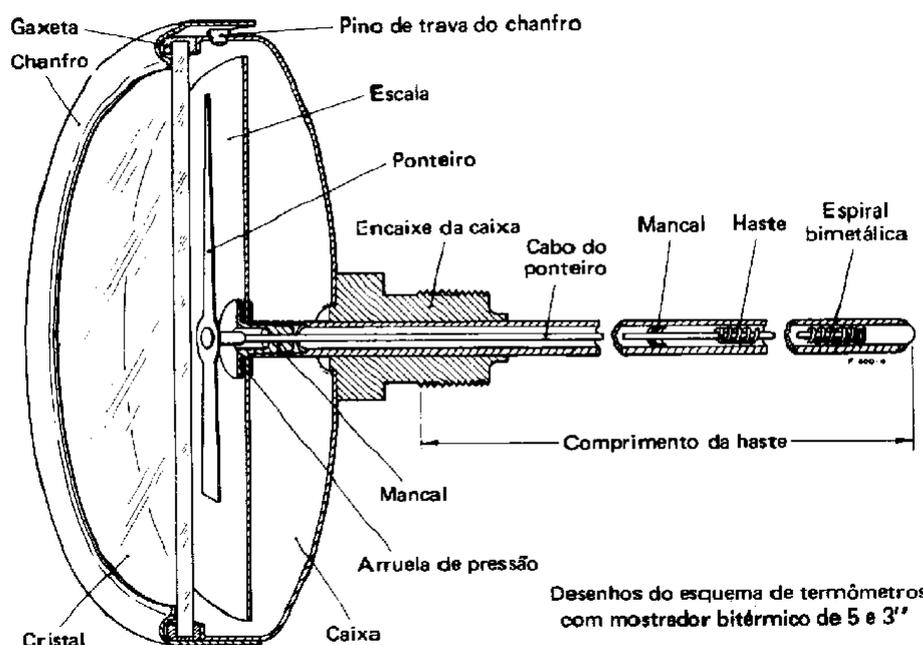


Figura 2 - Termômetro Bimetálico

A espiral bimetálica é formada colocando-se o metal com maior coeficiente de dilatação no lado externo. Ao receber calor, o metal externo irá se expandir mais que o interno, fazendo a espiral girar e deslocar o ponteiro, indicando assim o aumento da temperatura.

1.2. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM CONDUTOR

I. TERMÔMETRO DE RESISTÊNCIA

Este tipo de termômetro tem seu funcionamento baseado na variação da resistência elétrica de um material sujeito a variação de temperatura. O termômetro de resistência é basicamente um instrumento utilizado para se medir a resistência elétrica, e que foi calibrado para indicar a temperatura em graus, ao invés de Ohms.

É constituído por uma bobina sensora, enrolada dentro ou em volta de armações de material isolante. Os fios são arranjados nas molduras de modo a promover boa condutividade térmica do sistema e uma elevada taxa de transferência de calor.

Quanto maior for a variação de resistência por grau para um dado valor de resistência, maior será a sensibilidade. Além desta característica, deve ter boa estabilidade.

O metal escolhido deve ter uma variação praticamente linear com a temperatura. A maioria dos metais puros possuem esta característica. A relação entre resistência e temperatura pode ser expressa por:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (3)$$

onde : R_0 = Resistência na temperatura de referência, [Ohms].

R_T = Resistência na temperatura T, [Ohms].

T = Temperatura, [kelvin].

α = Coeficiente de resistência do material usado, [1/Kelvin] .

A medição da resistência elétrica do material é realizada através de algum tipo de ponte. A mais usada é a de Wheatstone, mas existem outras como a de Muller, a de fio correção duplo e a de Collendar-Griffths.

II. TERMISSOR

Ao contrário dos termômetros resistivos, nos termissores a elevação de temperatura faz com que a corrente elétrica diminua. Ele utiliza material semicondutor como elemento sensor. Em alguns casos, a resistência diminui de mais de 5% para cada °C de acréscimo de temperatura, demonstrando assim uma grande sensibilidade para medição de temperaturas em faixas de medição estreitas.

1.3. FORÇA ELETROMOTRIZ CRIADA NA UNIÃO DE DOIS METAIS DISTINTOS

I. TERMOPARES

Um termopar é formado por dois metais diferentes, soldados em suas extremidades, que quando colocadas a temperaturas diferentes, geram corrente elétrica (Figura 3). Uma destas extremidades é chamada de junta quente ou união de medição e a outra, que estará ligada a um instrumento de medição de FEM, junta fria ou união de referência.

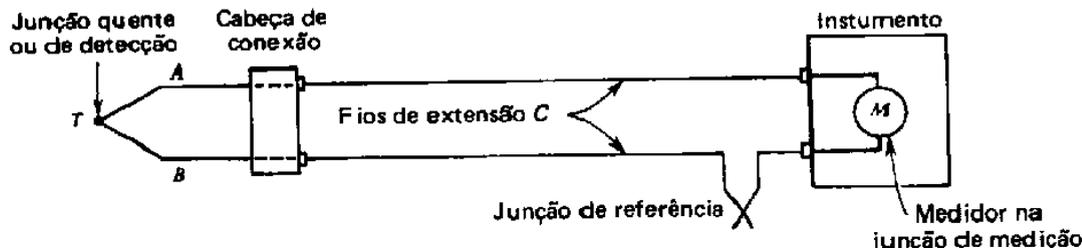


Figura 3 - Esquema de um Termopar

Este fenômeno é chamado de termoeletricidade e foi observado por Seebeck em 1821 quando ao fundir um fio de cobre a um de ferro e aquecer a extremidade fundida, obteve-se uma F.E.M..

Posteriormente descobriu-se que a corrente termelétrica observada por Seebeck era causada por dois fenômenos, chamados de F.E.M. de Peltier, gerada pela união de dois metais diferentes e F.E.M. de Thomson, gerada pelo aquecimento de um condutor.

Existem vários tipos de termopares, dentre os quais pode-se destacar :

- f.1. Tipo "T" : constituído de cobre e constantan, apresenta grande resistência a corrosão, podendo assim ser utilizado em meios oxidantes ou redutores.
- f.2. Tipo "J" : constituído de ferro e constantan, é recomendado para se utilizar em ambientes com pouco oxigênio livre devido a presença do ferro que pode se oxidar.
- f.3. Tipo "K" : constituído de cromel e alumínio, pode ser utilizado em ambientes oxidantes.
- f.4. Tipo "R,S" : constituído de platina e platina + rodio , é recomendado para uso em atmosferas oxidantes , sendo facilmente contaminado em outro tipo de atmosfera. O tipo "R" possui 3% a mais de rodio e uma potência termelétrica 10% maior que o tipo "S".

Em um termopar típico utilizado na indústria os condutores são isolados com missangas de porcelana e na extremidade tem-se a junta quente ou união de medição, formada a partir da solda dos condutores.

A medição da corrente elétrica gerada pode ser realizada utilizando-se um potenciômetro ou um milivoltímetro.

1.4. INTENSIDADE DA RADIAÇÃO EMITIDA POR UM CORPO

I. PIRÔMETRO ÓTICO

O pirômetro ótico é de fácil manuseio e sua operação baseia-se no fato que a energia de radiação emitida por um corpo quente é uma função da temperatura e pode ser expressa pela lei de Stefan-Boltzmann, também conhecida como lei da quarta potência (Equação 4).

$$W = kT_o^4 \quad (4)$$

onde : W = energia radiante de um corpo negro emitida por unidade de área.

k = constante de Stefan-Boltzmann

T_o = temperatura absoluta

Esta equação só é válida para corpos negros (radiadores ideais) e radiações térmicas.

Dentre os diversos modelos existentes, o pirômetro ótico de desaparecimento do filamento é um dos mais práticos. Este tipo funciona através da comparação do brilho entre o corpo emissor de radiação e o filamento de uma lâmpada padrão (Figura 4).

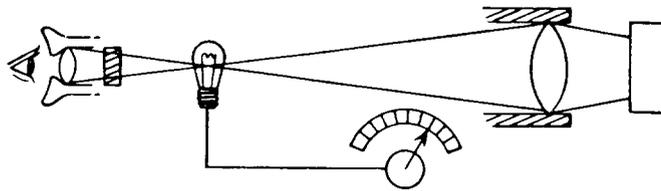


Figura 4 - Pirômetro Ótico

A medida é feita através da regulação da corrente que vai para a lâmpada, aumentando ou diminuindo a intensidade da luminosidade do filamento, até a sua luminosidade se confundir com a imagem da fonte. A corrente necessária, medida no miliamperímetro, para fazer o filamento desaparecer corresponde a temperatura do corpo e é dada mediante uma tabela fornecida pelo fabricante da lâmpada.

II. PIRÔMETRO DE RADIAÇÃO

Para se medir a temperatura por radiação é necessário converter a energia radiante em uma indicação de temperatura, para tal faz-se uso de uma termopilha.

Uma termopilha é um tipo de termopar usado como receptor de radiação, ela é formada por termopares conectados em série. Para que haja maior absorção da radiação as uniões de medição são achatadas e escurecidas.

Na unidade de detecção há uma lente que irá focalizar a energia radiante na termopilha, causando um aumento de temperatura que irá gerar uma F.E.M. e uma corrente de saída proporcional a temperatura do corpo radiante, da mesma maneira que no caso do termopar. Essa corrente pode ser medida utilizando-se milivôltemetro ou potenciômetro (Figura 5).

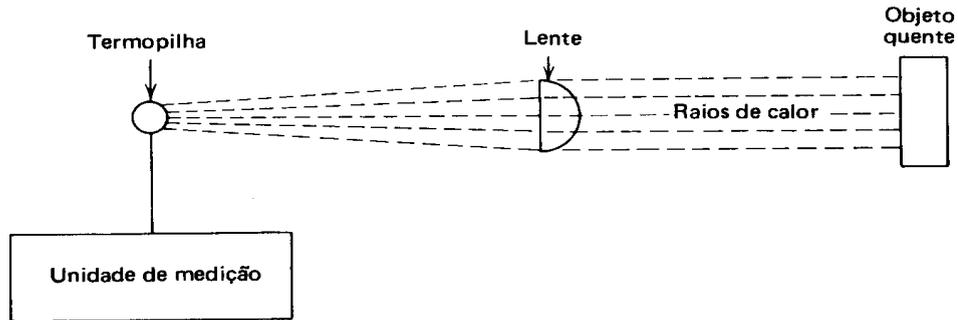


Figura 5 - Pirômetro de radiação

2. MANÔMETROS

A pressão é definida como a força exercida dividida pela área sobre a qual a força está aplicada. Pode ser medida em valores absolutos ou diferenciais.

A pressão absoluta é a força total exercida, ou seja, é a pressão medida a partir do vácuo absoluto.

A pressão diferencial é a diferença entre duas pressões, isto é, a diferença entre o valor absoluto e o valor devido à atmosfera circundante no instante da medida. Quando esta pressão circundante é a atmosférica, a pressão é dita pressão relativa.

A pressão pode ser medida através de várias formas, baseadas em alguns princípios como o equilíbrio entre pressão e força e a elasticidade de um material submetido a uma força.

Dentre os manômetros baseados no equilíbrio entre forças, destacam-se :

2.1. MANÔMETRO DE COLUNA LÍQUIDA

O mais comum deste tipo é o tubo em U, existe também o tubo em L e o de ramo inclinado, dentre outros.

I. MANÔMETROS DE TUBO EM “U”

É construído por um tubo de vidro ou outro tipo de material transparente e possui uma escala graduada, Figura 6a. A pressão exercida sobre a coluna líquida, geralmente mercúrio, faz com que a coluna líquida desloque-se. Como a coluna possui uma escala graduada, faz-se a leitura nos dois ramos para se conhecer a altura do líquido deslocado. Para transformar esta altura em pressão, utiliza-se a seguinte expressão:

$$P = kd (h_1 - h_2) \quad (5)$$

onde : P = pressão do sistema. [kg/cm^2]

d = densidade do líquido. [kg/cm^3]

k = constante de proporcionalidade para correção de unidades e fatores.

h_1 = altura do líquido associada a P_1 . [cm]

h_2 = altura do líquido associada a P_2 . [cm]

Se um dos ramais estiver no vácuo, a pressão lida será a absoluta; caso esteja aberto para atmosfera será a relativa e caso esteja submetido a outra pressão será a diferencial.

II. MANÔMETRO DE TUBO EM “L”

O manômetro de tubo em “L” pode ter o ramo vertical reto ou inclinado e tem o mesmo princípio de funcionamento que do tubo em U, porém possui um reservatório para se armazenar o líquido, Figuras 6.b e c.

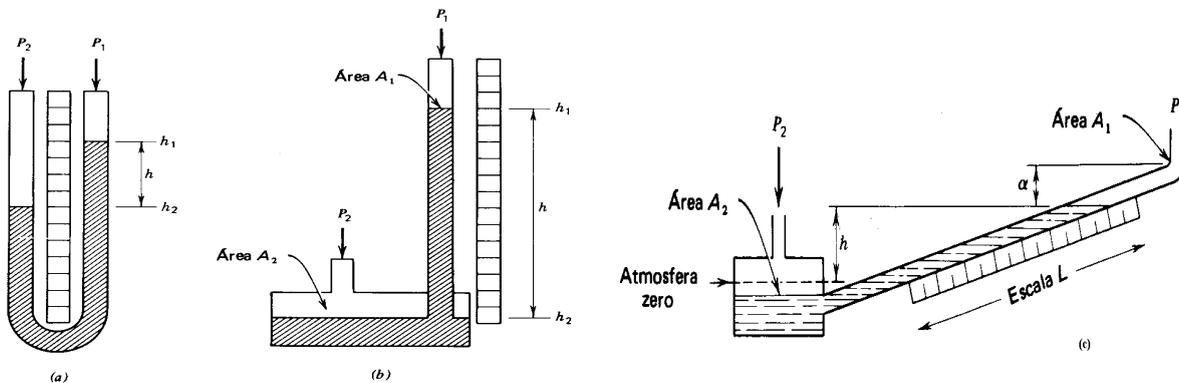


Figura 6 - Termômetro em U (a), Termômetro em L (b) e Termômetro de ramo inclinado

Como há grande diferença entre as áreas, pequenas variações de altura no reservatório causarão grandes variações na escala, aumentando assim a sensibilidade do equipamento.

III. BARÔMETRO

É um tipo de manômetro em L, onde a extremidade do tubo vertical está submetida ao vácuo. A pressão irá forçar o mercúrio a penetrar no tubo, indicando a pressão atmosférica absoluta do local, Figura 7.

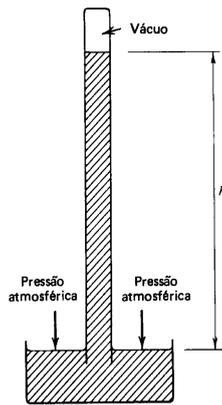


Figura 7 - Barômetro

2.2. MANÔMETRO DE CAMPÂNULA

O manômetro de campânula dupla ou balancim é um tipo de manômetro de campânula que opera baseado no princípio do equilíbrio de pressões. Ele é semelhante a uma balança e é composto por uma haste balanceada em cujas extremidades estão apoiadas duas campânulas invertidas, que estão submersas em um líquido de selagem. Utiliza-se ainda um contra-peso, para equilibrar a deflexão do sistema posto logo abaixo do pivô, e um ponteiro. As pressões P_1 e P_2 causam uma deflexão no balancim, indicada pelo ponteiro, proporcional a diferença entre as mesmas. A pressão é calculada baseando-se no ângulo de deflexão a partir da equação abaixo:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{wd}{sA} \text{sen}\theta \quad (6)$$

onde : w = peso do contrapeso [kg].

d = distância do pivô ao contrapeso [cm].

A = seção das campânulas [cm^2].

s = distância do apoio de cada campânula ao pivô [cm].

θ = ângulo de deflexão do balancim [graus].

P = pressão diferencial [kg/cm^2].

P_1 = pressão aplicada sob a campânula 1 [kg/cm^2].

P_2 = pressão aplicada sob a campânula 2 [kg/cm^2].

2.3. MANÔMETROS COM ELEMENTOS ELÁSTICOS

Estes manômetros tem seu funcionamento baseado na lei de Hooke. Como elemento elástico, pode-se utilizar diafragmas, fole ou tubo de Bourdon.

I. MANÔMETROS DE DIAFRAGMA

Este tipo de manômetro utiliza diafragmas metálicos (Figura 8), cuja deflexão indica uma pressão, e não metálicos (Figura 9), que geralmente utilizam uma mola ou outro elemento elástico para indicar a pressão contida no seu interior.

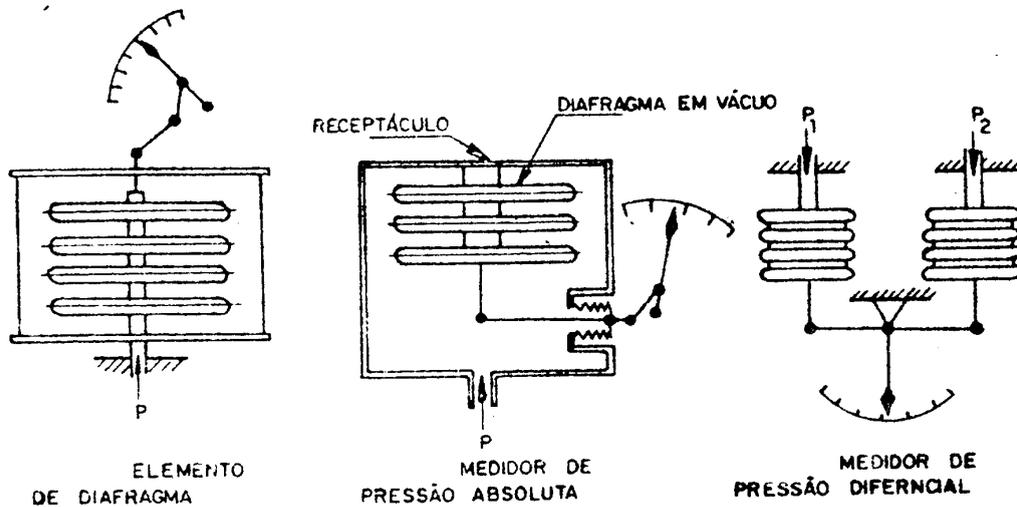


Figura 8 - Tipos de Diafragma Metálico

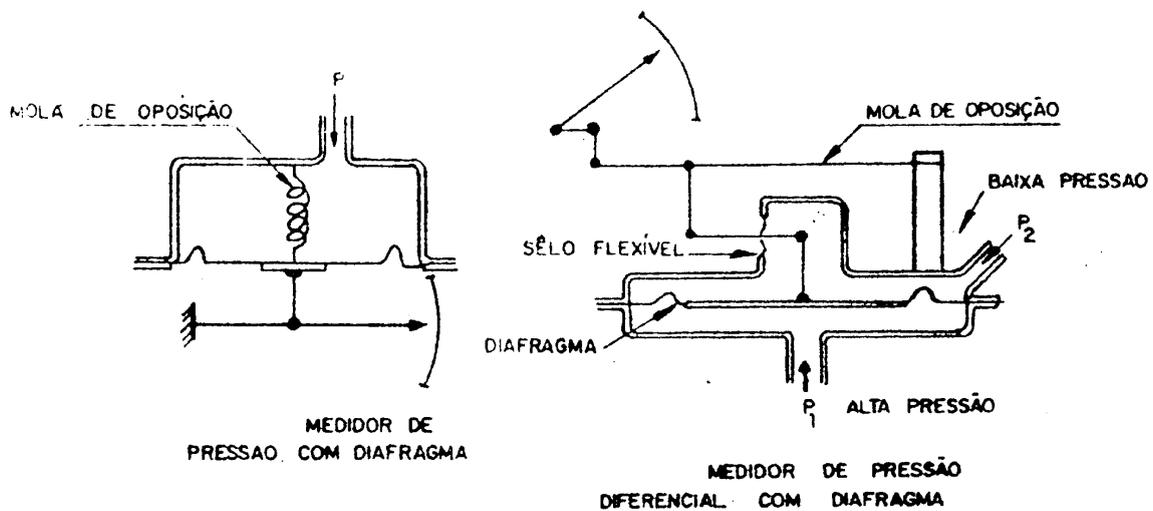


Figura 9 - Diafragma não Metálico

Os diafragmas metálicos são formados por duas lâminas de metal em forma de concha e soldadas entre si, tomando a forma de uma capsula.

O manômetro de diafragma flácido e o de Dwyer são exemplos de manômetros que utilizam diafragmas não metálicos em seus mecanismos.

O manômetro de diafragma flácido suporta sobrecargas repentinas graças a carcaça que protege o diafragma do deslocamento excessivo, podendo assim ser empregado na medição da pressão de descarga de gases de combustão (Figura 10). O diafragma é feito de couro maleável sendo equilibrado por uma mola que se deforma na proporção direta à intensidade da pressão.

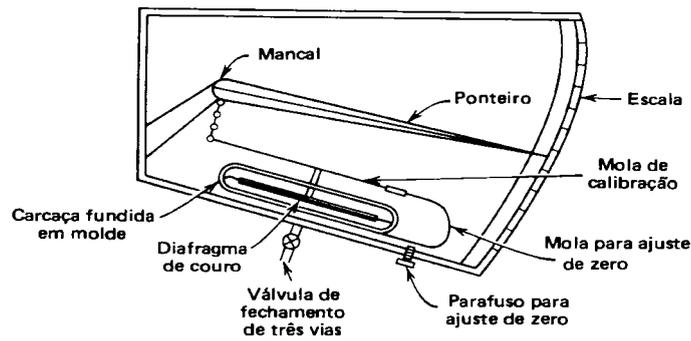


Figura 10 - Manômetro de diafragma flácido.

II. MANÔMETRO DE FOLE

Este tipo de manômetro é limitado para baixas escalas de pressão relativa e absoluta, porém pode operar a altas pressões diferenciais. O fole metálico é formado por peças circulares ligadas de tal forma que se contraem ou expandem quando sujeitos a variação de pressão. O fole tem capacidade de expandir-se mais do que a exigida na aplicação, faz-se necessário então o uso de uma mola de regulação que pode ser calibrada para uma determinada faixa de pressões de forma a opor-se ao movimento (Figura 11).

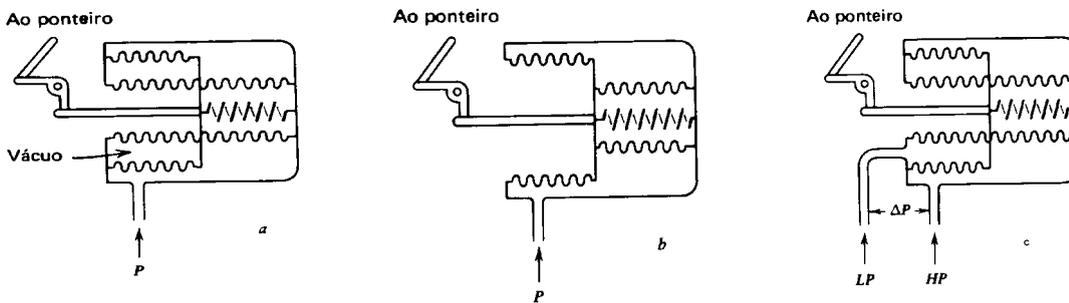


Figura 11 - Arranjos de manômetros de foles para medir a pressão absoluta (a), pressão relativa(b) e pressão diferencial (c).

O curso do fole pode ser aumentado usando-se um número maior de segmentos, e sua força pode ser aumentada usando-se foles de diâmetro maior, de modo que a pressão tenha uma área maior para agir.

Os transmissores de pressão também utilizam foles em seu mecanismo, conforme pode ser visto na Figura 12 :

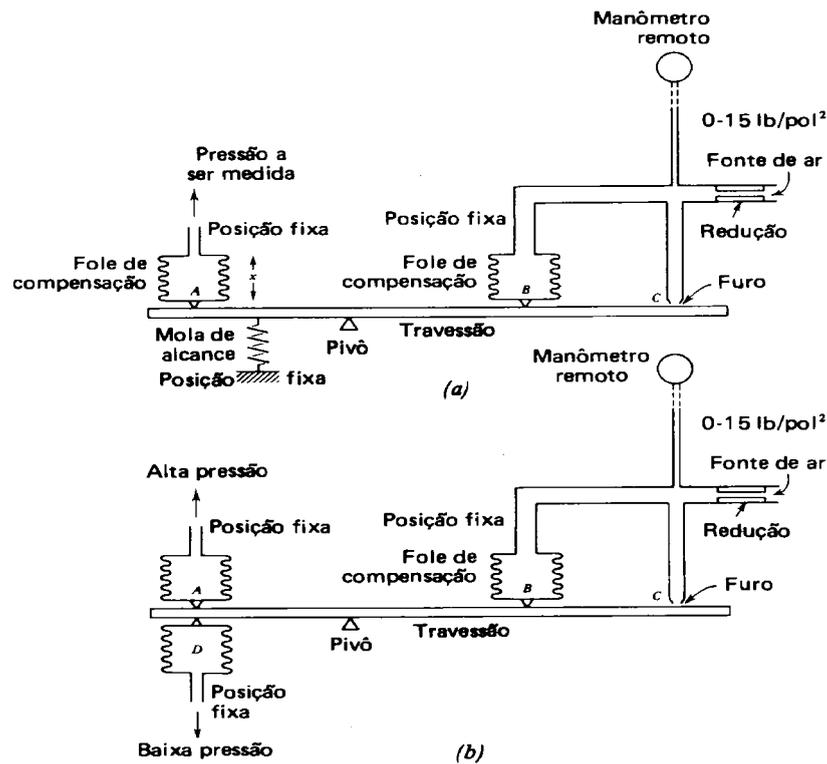


Figura 12 - Transmissores de pressão com foles

III. MANÔMETROS DE BOURDON

Este é provavelmente o manômetro mais usado na indústria e assim como o de diafragma metálico e o de fole pode ser utilizado em separado ou em um manômetro composto.

O tubo de Bourdon pode ter a forma de um C, uma espiral ou uma hélice. Ele é formado pelo achatamento de um tubo redondo que posteriormente é dobrado em alguma de suas formas. Os diversos tipos de tubo de Bourdon podem ser visto na Figura 13 .

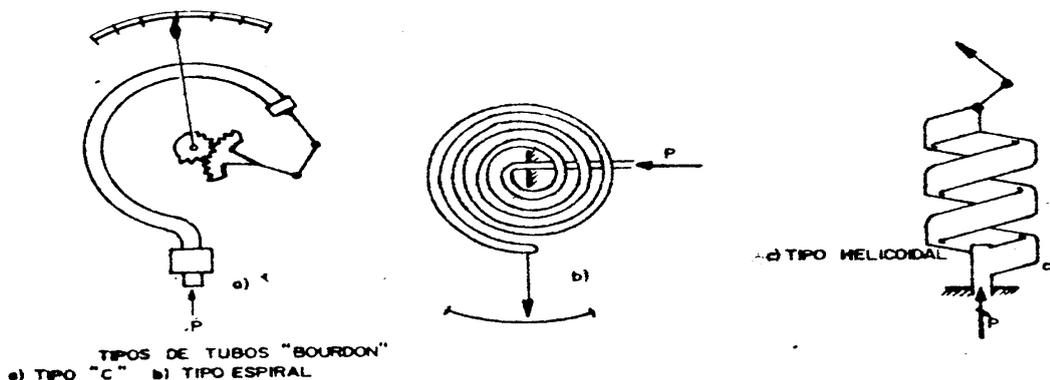


Figura 13 - Tipos de tubos de Bourdon

Ao aplicar-se a pressão à extremidade aberta, o tubo flexiona-se e produz um movimento no mecanismo de controle ou medição localizado na extremidade fechada. Setores dentados e arranjos com setor excêntrico e roletes são exemplos de mecanismos usados para multiplicar a

intensidade do movimento do tubo, com a finalidade de tornar mais fácil e precisa a leitura da medida.

IV. MANÔMETROS ELETROMECAÂNICOS

Estes dispositivos são na realidade combinações de foles, diafragmas metálicos ou manômetros de Bourdon, acoplados a sensores elétricos ou dispositivos de medição, registro ou transmissão.

Quando se deseja realizar a leitura em um local distante do ponto de medição, faz-se necessário o uso de transmissores e transdutores de pressão. Os transdutores são dispositivos que convertem um tipo de movimento ou sinal em outro.

2.4. TIPOS DE TRANSDUTORES

I. TRANSDUTORES PNEUMÁTICOS

Os transmissores pneumáticos convertem o movimento do elemento de medição em um sinal pneumático através de um sistema bico-palheta (Figura 14). Este sistema é formado por um tubo pneumático, que será alimentado por uma pressão constante P , com uma redução em sua saída no formato de um bico. Uma lâmina, chamada palheta, irá criar resistência a saída do ar, podendo mesmo chegar a obstruí-la.

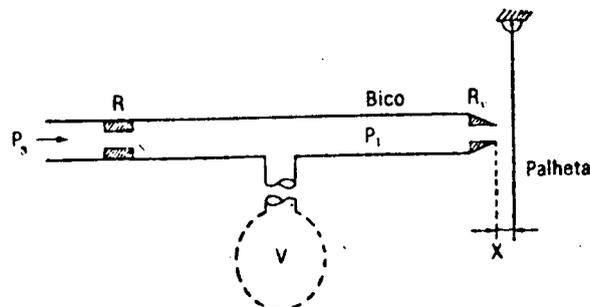


Figura 14 - Sistema bico-palheta.

II. TRANSDUTORES DE EXTENSÔMETROS

No extensômetro, o sinal elétrico produzido é proporcional a variação de resistência causada pela distorção de uma membrana flexível a qual é ligado. São projetados para que a saída elétrica seja diretamente lida em alguma unidade de pressão. Podendo ser usados em qualquer faixa de pressão e medir pressões absolutas, manométricas ou diferenciais.

III. TRANSDUTOR POTENCIOMÉTRICO

Este tipo de transdutor também utiliza membranas flexíveis e variação da resistência para medir a pressão. Ele é indicado para aplicações onde existam variações lentas de pressão ou pressão permanente.

O potenciômetro é ligado a um diafragma ou fole, quando este se expande, devido a pressão, a resistência do potenciômetro aumenta e quando se contrai a resistência diminui.

IV. TRANSDUTOR INDUTIVO

Os transdutores indutivos podem ser utilizados para medir pressões manométricas ou diferenciais. Estes transdutores são unidades de acoplamento magnético constituída basicamente por um diafragma ou algum tipo semelhante de acionador acoplado magneticamente a um sistema classificador elétrico balanceado. Seu funcionamento é semelhante ao de uma bóia no manômetro indutivo visto na Figura 15 . A campânula flutuante, sujeita a variações, move uma barra de ferro verticalmente no interior de uma bobina. A saída elétrica é proporcional ao movimento da bóia.

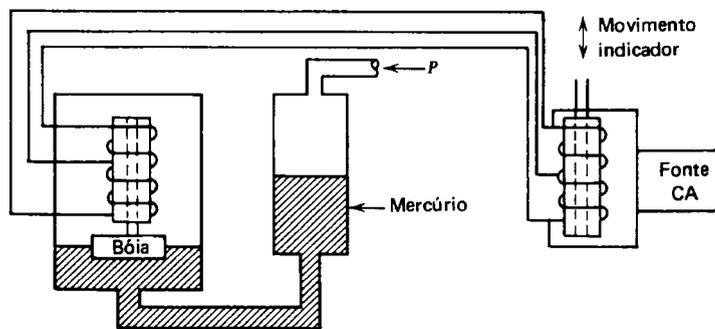


Figura 15 - Transdutor Indutivo

V. TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Os transdutores piezoelétricos funcionam baseados no fenômeno observado nos cristais de quartzo ou de titanato de bário que ao serem deformados fisicamente por pressão geram corrente elétrica. Da mesma forma, quando são carregados eletricamente eles se deformam.

VI. TRANSDUTOR CAPACITIVO

Funciona baseado no princípio da variação da capacitância quando a placa de um capacitor simples é deslocada. É formado por um diafragma metálico, que faz o papel de uma placa móvel, a qual é separada da placa fixa por um dielétrico compressível. Sob ação da pressão o diafragma flexiona e varia a capacitância, indicando a medida de pressão.

3. VAZÃO

Vazão pode ser definida como a quantidade de material que passa por uma determinada seção em um certo intervalo de tempo, ou seja, é o produto da velocidade pela área da seção por onde o material escoar. Quando esta velocidade é expressa em unidades de massa, tem-se a vazão mássica e caso seja expressa em termos de volume tem-se a vazão volumétrica. Existem vários métodos para se medir a vazão, a escolha por um deles se fará tomando em conta os seguintes fatores: natureza do material, volume, precisão e controle exigido.

Os principais métodos empregados na indústria são: piezoelétricos, de área variada, eletromagnéticos, de massa, de deslocamento positivo e de canal aberto.

3.1. PIEZOELÉTRICOS

Os medidores de vazão piezoelétricos utilizam uma restrição a passagem do fluido para gerar uma diferença de pressão que é a variável medida. A partir desta diferença de pressão calcula-se a velocidade do fluido utilizando o teorema de Bernoulli (Equação 7) e da equação da continuidade (Equação 8), ou seja:

$$\frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta p}{r} = 0 \quad (7)$$

onde: r = Peso específico do fluido [kg/cm^3]
 Dv = Diferencial de velocidade do fluido [m/s]
 Dp = Diferencial de pressão [kg/cm^2]
 Dz = Diferencial da altura da tubulação [m]
 g = Aceleração da gravidade [m/s^2]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} r dV + \int_{SC} r v dA = 0 \quad (8)$$

onde : r = Densidade do fluido
 dV = Diferencial de volume
 dA = Diferencial de área
 t = tempo
 ∂ = Derivada parcial
 VC = Volume de controle
 SC = Superfície de controle

Admitindo-se as hipóteses de regime permanente, fluido incompressível, ausência de atrito e $z_1 = z_2$ obtém-se:

$$p_1 - p_2 = \frac{r}{2}(v_1^2 - v_2^2) = \frac{r v_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

e da equação da continuidade, obtém-se

$$0 = -\rho v_1 A_1 + \rho v_2 A_2 \quad (10)$$

ou

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (11)$$

donde

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad (12)$$

substituindo a Equação 12 na Equação 9, obtém-se:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \right] \quad (13)$$

calculando o valor de v_2 ,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho [1 - (A_2 / A_1)^2]}} \quad (14)$$

O cálculo da vazão volumétrica é feita multiplicando-se a velocidade pela área da tubulação e para vazão mássica, multiplica-se a vazão volumétrica pela densidade do fluido.

Para se criar um diferencial de pressão, utilizam-se restrições como um tubo de Venturi, um bocal de fluxo, uma placa de orifício ou um tubo de Pitot. Estes medidores tem seu funcionamento baseado no princípio da conservação de energia.

I. TUBO DE VENTURI

O tubo de Venturi é indicado para :

- 1) Sistemas bifásicos cuja fase fluida possui elevada concentração de sólidos em suspensão.
- 2) Se necessita de uma perda de carga mínima.
- 3) quando se faz necessário uma melhor precisão.

A desvantagem deste equipamento é o seu elevado custo, sendo o mais caro de todos os redutores.

A Figura 16 mostra um tubo de Venturi e as tomadas de alta pressão, localizada no anel piezométrico, e baixa pressão, na garganta do tubo. Além do tubo de venturi clássico, circular concêntrico, existe ainda o excêntrico, o retangular e o de inserção.

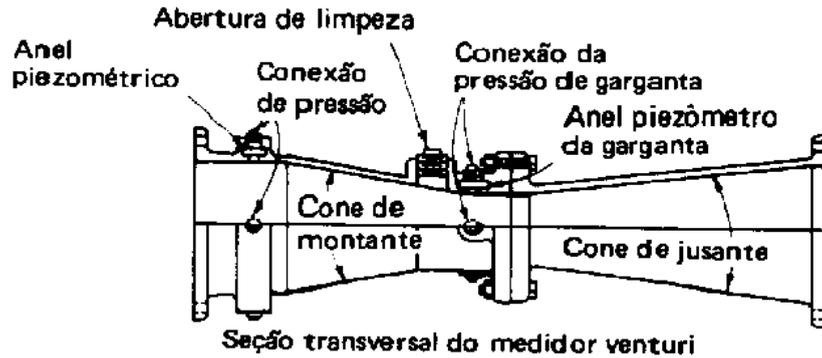


Figura 16 - Tubo de Venturi

II. TUBO DE VENTURI DE INSERÇÃO

Este medidor de vazão é uma variação do tubo de venturi normal (ver Figura 17). Apresenta um menor custo porém uma maior perda de carga. É inserido no interior da tubulação e fixado por um anel, onde é feita a conexão de baixa pressão. A tomada de alta pressão é localizada a cerca de um diâmetro de comprimento no sentido de montante a partir do cone de entrada.

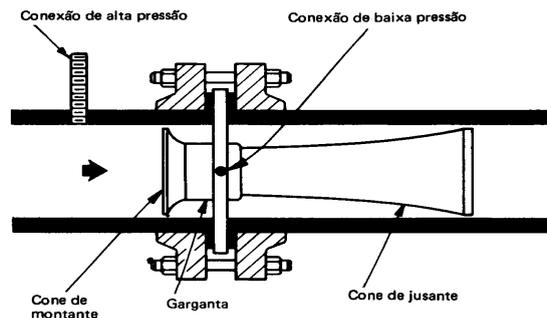


Figura 17 - Tubo de Venturi de Inserção

III. BOCAL DE FLUXO

O bocal de fluxo, Figura 18, é semelhante ao tubo de venturi de inserção, porém não possui o cone de recuperação, fazendo com que ele tenha uma perda de carga maior, porém um menor custo. É indicado para medição de líquidos de alta velocidade e vapor.

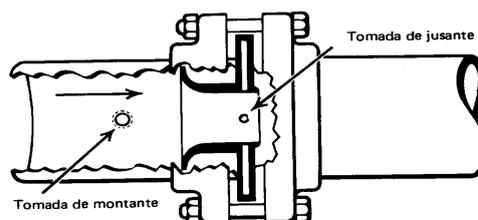


Figura 18 - Bocal de Fluxo

IV. PLACA DE ORIFÍCIO

A placa de orifício possui um baixo custo e facilidade de instalação, sendo assim bastante utilizada nas indústrias, apesar de provocarem uma elevada perda de carga. Consiste de uma placa de metal com um orifício por onde passa o fluido e um pequeno furo para servir como dreno ou para ventilação. O orifício por onde passa o fluido pode ser concêntrico, excêntrico ou segmentado (Figura 19).



Figura 19 - Placas de orifício concêntrica (a), excêntrica (b) e segmentada (c).

Quando o fluido contém material suspenso, deve-se utilizar uma placa com orifício excêntrico ou segmentar para evitar o acúmulo deste material atrás da placa o que causaria leituras errôneas.

Os pontos das tomadas de pressão dependem do diâmetro da tubulação e da razão entre este diâmetro e o orifício.

3.2. TUBO DE PITOT

O tubo de Pitot é empregado principalmente no laboratório, tendo pouca utilidade na indústria. Mede a diferença entre a pressão total e a pressão estática através das duas tomadas de pressão, uma localizada no centro da tubulação com a abertura voltada para o sentido do fluxo e a outra perpendicular ao fluxo (Figura 20).

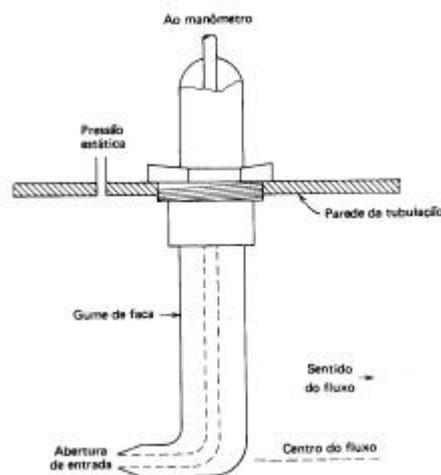


Figura 20 - Tubo de Pitot

Este medidor apresenta algumas limitações para o seu emprego, como a necessidade do fluxo ser laminar e que esteja localizado em um trecho reto da tubulação. A medida da velocidade é feita através das pressões tomando-se a equação abaixo.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1)} \quad (15)$$

onde: p_1 = Pressão estática do líquido que flui em unidades absolutas.

p_2 = Pressão de impacto do fluido em unidades absolutas.

ρ = Peso específico do fluido

v_1 = Velocidade do fluido em um ponto alinhado com a abertura de impacto do tubo de pitot

v_2 = Velocidade em $P_2 = 0$

3.3. ELEMENTO DE FLUXO ANNUBAR

Visando superar as limitações do tubo de pitot e torná-lo aplicável na indústria, foi desenvolvido pela Dietrich Standard Corporation o elemento de fluxo annubar, Figura 21.

É composto basicamente por um par de barras sensoras de pressão montadas no sentido perpendicular ao fluido. Na barra sensora montante existem orifícios distribuídos de tal maneira que cada um deles meça a pressão de uma seção de mesma área da tubulação. A Figura 22 mostra o elemento de fluxo com as seções. No interior desta barra tem um elemento sensor que irá tirar a média das pressões nas diversas seções. A barra sensora de pressão jusante mede a pressão do fluxo a jusante localizado no centro da tubulação.

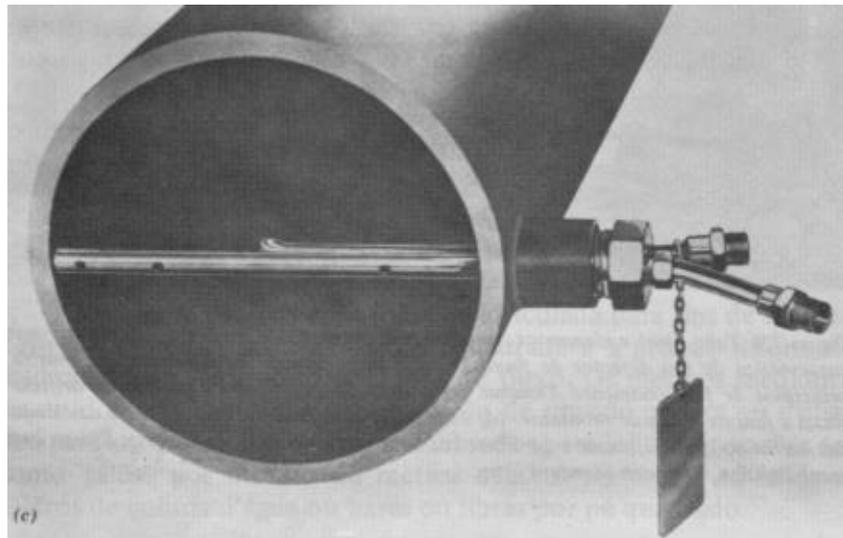


Figura 21- Elemento do fluxo annubar

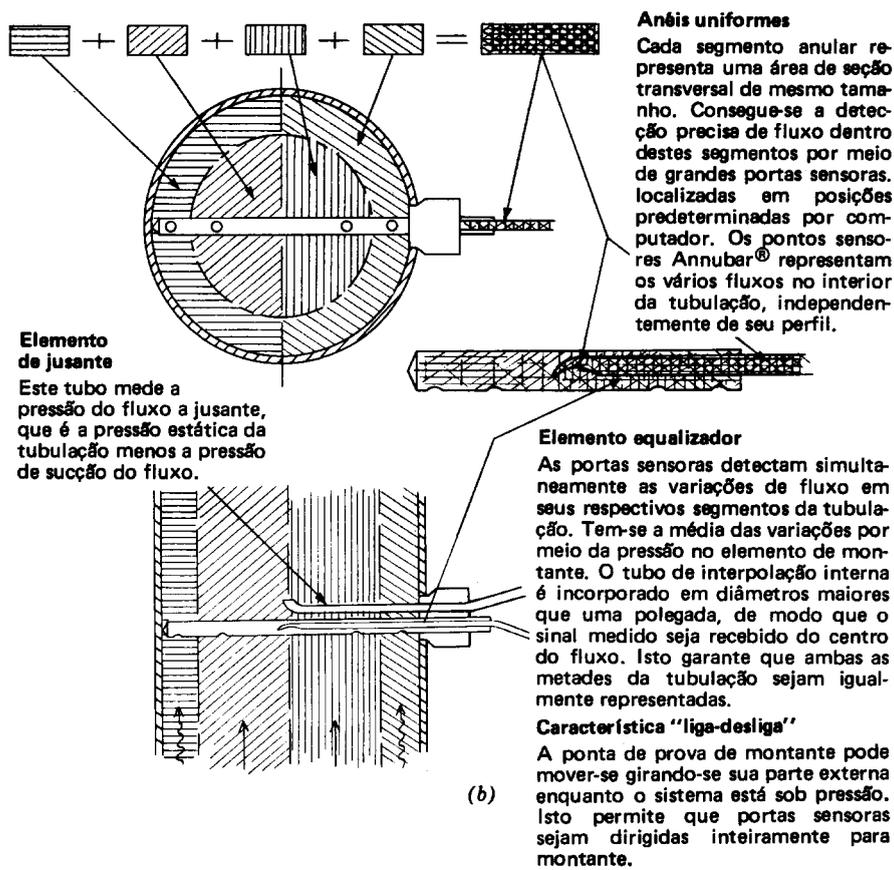


Figura 22 - Seções da tubulação medidas pelo elemento do fluxo annubar.

3.4. MEDIDORES DE VAZÃO DE PRESSÃO DIFERENCIAL

Estes dispositivos medem a vazão baseados na pressão diferencial gerada por uma restrição. Os medidores de pressão diferencial podem ser desde um simples tubo em "U" a medidores indutivos ou capacitivos.

A relação entre a pressão diferencial e a vazão é dada pela equação básica descrita abaixo.

$$Q = K\sqrt{H} \quad (16)$$

onde: Q = Vazão

K = Constante que depende das condições de cada instalação

H = Queda de pressão ou pressão diferencial

Os medidores utilizados devem ser calibrados para leitura de vazões, tais como m³/h ou gal/mim.

3.5. MEDIDORES MECÂNICOS E ELÉTRICOS DE VAZÃO

Estes dispositivos utilizam os elementos medidores de vazão, através da diferença de pressão, acoplados a sistemas elétricos ou mecânicos que irão indicar, registrar e/ou integrar estas medidas. Na verdade são medidores de pressão diferencial calibrados para indicarem vazão.

3.6. MEDIDORES DE VAZÃO DE ÁREA

I. ROTÂMETROS

Os rotâmetros, figura 23, são compostos de um tubo cônico em vidro com flutuador esférico ou cilindro com base cônica. O fluido circula da base ao alto do rotâmetro que deve subir na posição vertical.

O fluido ao escoar de baixo para cima irá deslocar o flutuador para cima, até uma posição onde ocorrerá o equilíbrio entre o peso do flutuador e as forças de arraste e de empuxo do fluido sobre o flutuador. A leitura é feita diretamente, através de uma escala graduada fixada no tubo de vidro.

Na operação do rotâmetro, deve-se observar as seguintes considerações :

- 1- No caso do flutuador esférico a vazão é lida no meio do mesmo, depois do alinhamento tangencial sobre a linha de referência vertical ;
- 2- A resposta do rotâmetro de seção variável é logarítmica ;
- 3- As medidas são precisas e reprodutivas na faixa de 10 à 100% da escala.

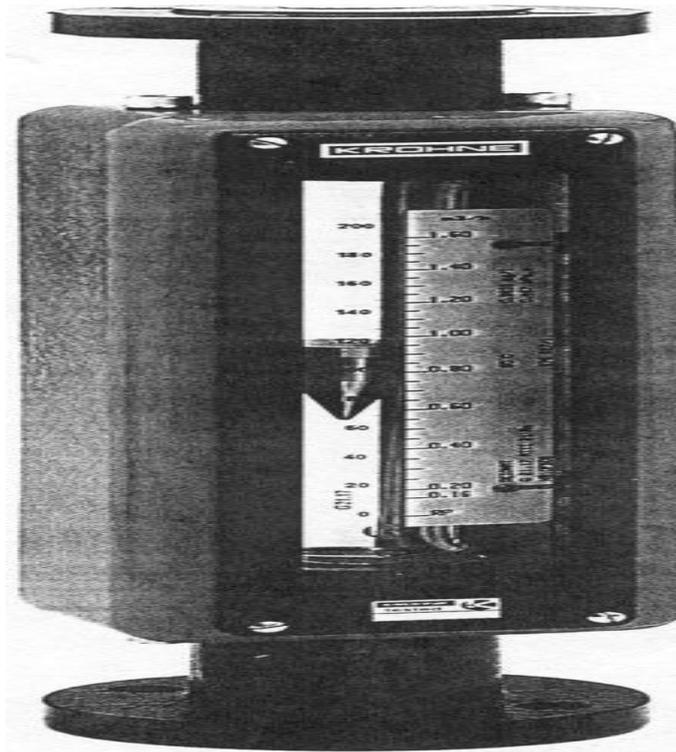
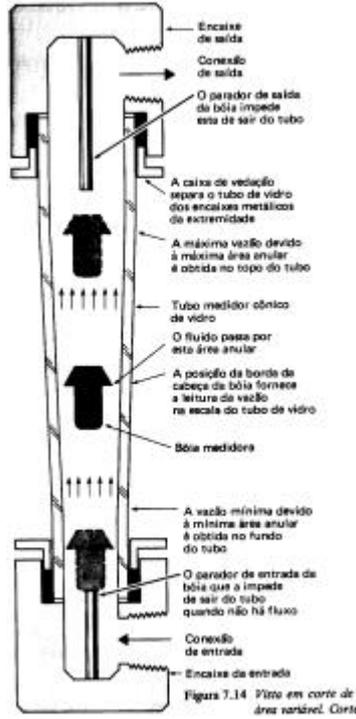
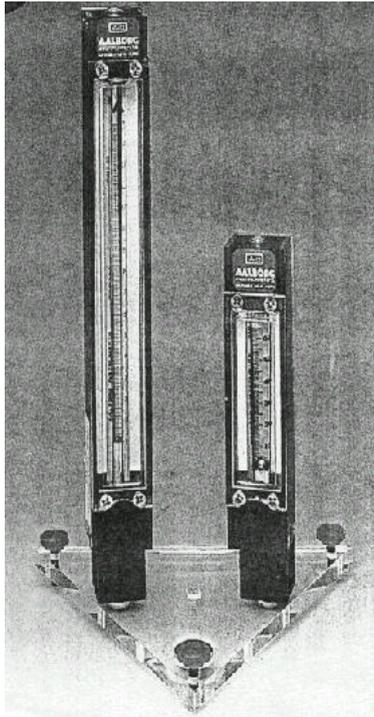


Figura 23 - Rotômetros

A figura 24 mostra os principais componentes de um rotômetro e a vista da entrada de fluido.

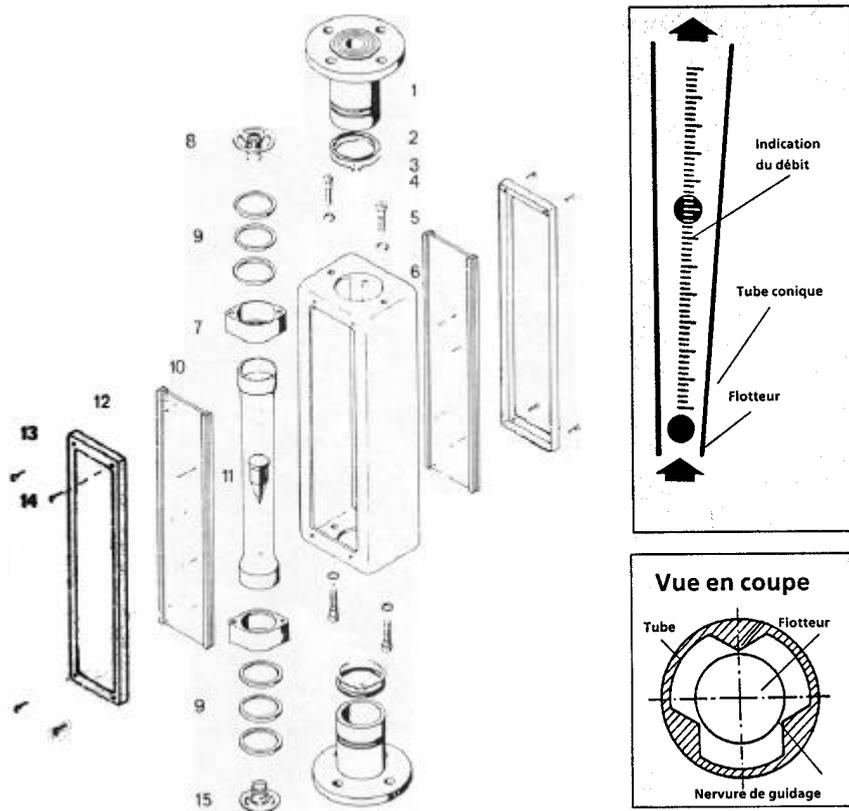


Figura 24 - Componentes do rotâmetro

Os rotômetros são construídos com os seguintes materiais :

Tubo: vidro borossilicato com graduação em cerâmica e fundo do tubo de cor amarela para melhorar o contraste.

Flutuador: vidro , aço inox, tantalo e safira.

Material em contato com o fluido: teflon ® para fluido de composto ultra puros;

alumínio/buna N ® para fluido não corrosivos;

aço inox/viton ® para altas temperaturas e pressões.

Válvulas de regulação "opcionais aos rotômetros" : válvulas tipo agulha;

válvulas altas pressões.

As escalas dos rotômetros lineares são dadas pelas medidas das vazões do "Ar ou Água" na temperatura e pressão dadas pelo construtor.

Os fatores de correções determinados resultam de formulas de cálculos simplificados. Permitindo a escolha unicamente do tamanho do rotâmetro.

Para uma padronização precisa nas condições de ensaios, utiliza-se os métodos convencionais, medidas volumétricas para os líquidos, medido pelo método das bolhas de sabão.

FATOR DE CORREÇÃO PARA GÁS

$$Q_{Ar} = K_{gás} \times Q_{max} \quad K_{gás} = (d_{real} \times (T_u \cdot P_n / T_n \cdot P_u))^{1/2}$$

onde:

- Q_{Ar} vazão do ar equivalente a vazão do gás nas condições de serviço
 Q_{max} vazão máxima do gás medido
 d_{real} densidade relativa do gás em relação ao Ar
 T_u temperatura de utilização do gás em K
 T_n temperatura de serviço fixado pelo construtor K
 P_u pressão de utilização em bar
 P_n Pressão atmosférica 1,013 bar

FATOR DE CORREÇÃO PARA LÍQUIDO

$$Q_{água} = K_{liq} \times Q_{max} \quad K_{liq} = (((d_f - d_{água}) \times d_{liq}) / ((d_f - d_{liq}) \times d_{água}))^{1/2}$$

onde:

- $Q_{água}$ vazão da água equivalente a vazão do líquido nas condições de serviço
 Q_{max} vazão máxima do líquido medido
 d_f densidade do flutuador em g/ml
 d_{liq} densidade do líquido em g/ml
 $d_{água}$ 1,0 g/ml nas condições de serviço

ROTÂMETRO A SEÇÃO VARIÁVEL

- Conveniente e indiferentemente para gás ou líquido
- Nenhuma origem elétrica é necessária
- Tubos volumétricos
- Baixas perda de carga independente da vazão
- Possibilidade de montagem multitubos

II. MEDIDOR DE CILINDRO E PISTÃO

A operação é semelhante a do rotâmetro, só que este é constituído por um cilindro com uma série de furos na parede dispostos de forma helicoidal. A medida que o fluido desloca o pistão para cima, aumenta o número de furos e, conseqüentemente, a área de passagem do fluido, até que a pressão no interior do cilindro se equilibre com o peso do pistão. É empregado na medição de vazão de líquidos de alta densidade tais como óleo combustível, óleo baiano, etc.

3.7. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS

No medidor de vazão eletromagnético, Figura 25, um campo magnético atua no sentido perpendicular a tubulação por onde circula o fluido, induzindo uma tensão (F.E.M.), que é expressa segundo a lei de Faraday.

$$e = BDv \quad (17)$$

onde : e = FEM induzida no líquido [Weber / s].

B = indução magnética, [Weber / m²].

D = diâmetro interno da tubulação, [m].

v = velocidade média do fluxo de fluido, [m/s].

Conforme pode ser observado pela Equação 17 , a F.E.M. induzida é proporcional a vazão do fluido e sua medição é feita por dois eletrodos situados na parede da tubulação, acoplados a um indicador eletrônico, voltímetro ou potenciômetro.

Este medidor de vazão só pode ser utilizado em fluidos que apresentem uma boa condutividade, sendo bastante útil na medição de metais líquidos, fluidos corrosivos e pastas.

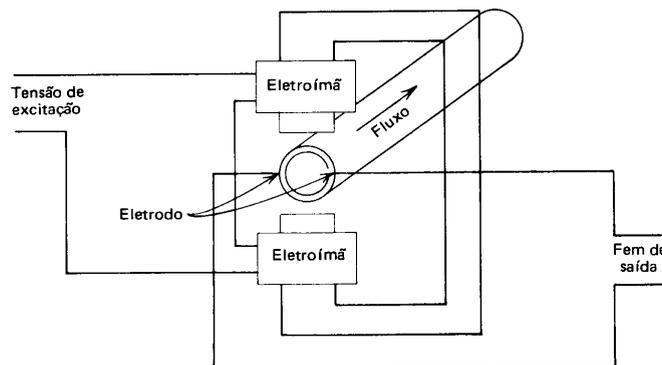


Figura 25 - Medidor de vazão eletromagnético

3.8. MEDIDORES DE VAZÕES MÁSSICA

Os medidores de vazões mássica podem ter contato direto com o fluido a ser medido, como o tipo pistão ou diafragma que serão abordados posteriormente nos medidores de deslocamento positivo, ou estes medidores podem ser externos a tubulação, como o eletrotérmico.

I. MEDIDOR ELETROTÉRMICO

Este tipo de medidor baseia-se no princípio da elevação da temperatura de um fluido quando é injetado calor, através das paredes de tubo por uma fonte de calor.

Os elementos sensores são localizados a montante e a jusante, indicando a temperatura inicial e final do fluido, Figura 26. A fonte de calor é isolada do resto da tubulação por isolantes térmicos. A diferença de temperatura aumenta com o aumento do fluxo que é proporcional à massa que circula pelo tubo.

Este dispositivo pode ser projetado para medir vazões nos regimes laminar ou turbulento.

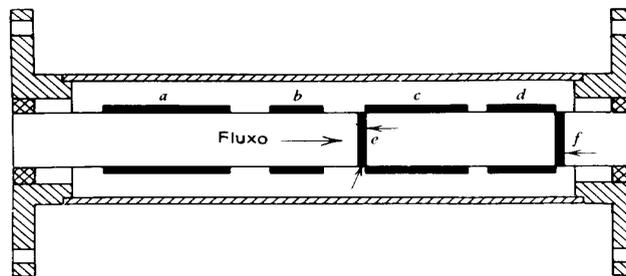


Figura 26 - Medidor de Vazão Eletrotérmico

II. MEDIDORES DE VAZÃO A TURBINA

Os medidores de vazão a turbina, Figura 27, consiste de um rotor, que gira com velocidade diretamente proporcional a vazão do fluido e cilindros concêntricos utilizados para orientar o fluxo e posicionar os rotores no interior da tubulação.

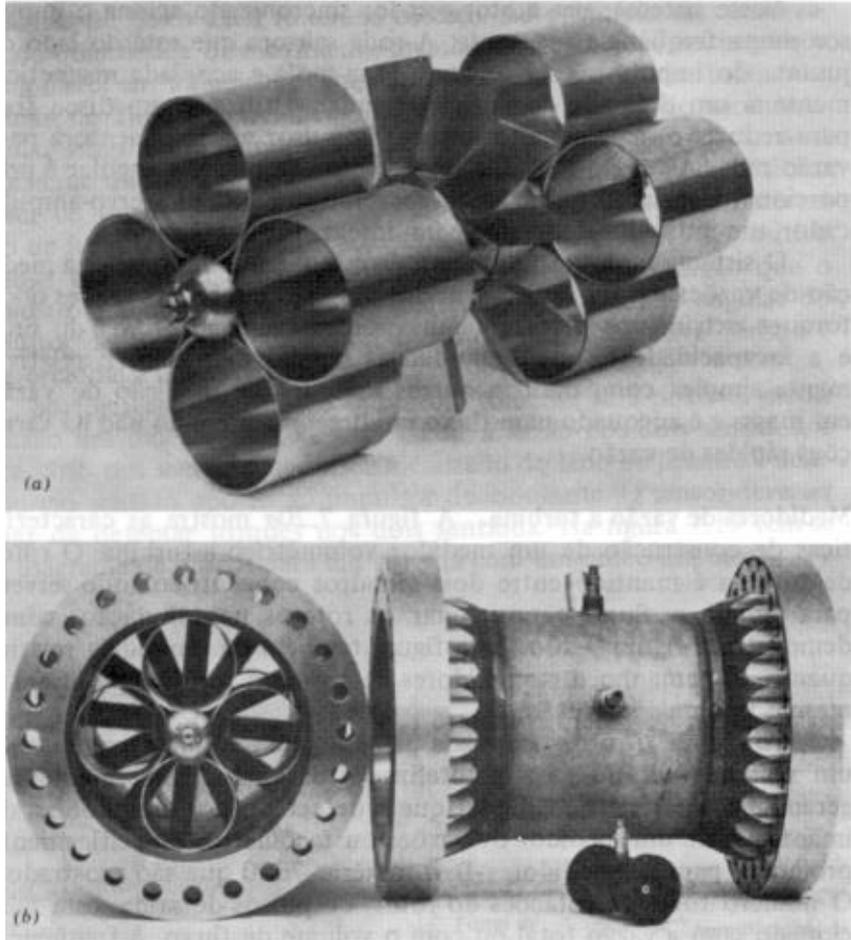


Figura 27 - Medidor tipo turbina

Para se medir a velocidade do rotor da turbina são usados conversores, que podem ser do tipo de relutância ou indutivo. No tipo de *relutância*, a velocidade é determinada pela passagem das pás da turbina por um campo magnético criado por um ímã permanente montado em uma bobina captadora externa. No tipo *indutivo* o rotor tem incorporado um ímã permanente e o campo magnético giratório originado, induz uma corrente alternada em uma bobina captadora externa, Figura 28.[2]

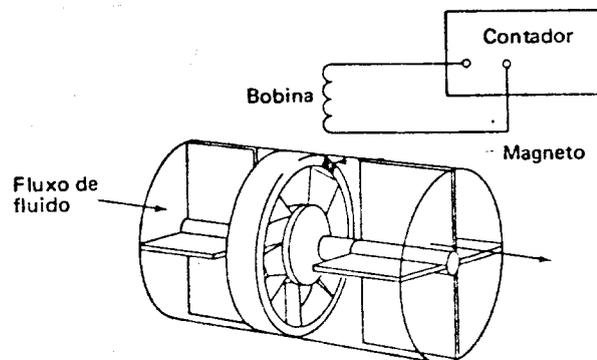


Figura 28 - Medidor turbina com converso tipo indutivo.

É recomendado que fique completamente submerso quando o fluxo cessar e deve ser usado só para fluidos limpos, ou seja, aqueles que não possuem material em suspensão..

3.9. MEDIDORES DE VAZÃO DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Este tipo de medidor de vazão utiliza um volume fixo conhecido, que enche e esvazia alternadamente impulsionado pelo próprio fluido a uma certa frequência. Esta frequência dará a vazão do fluido, bastando-se dividir o volume deslocado em cada ciclo pelo tempo do ciclo.

I. PISTÃO ALTERNATIVO

É constituído geralmente por quatro pistões opostos, dois a dois, ligados a um eixo central que está acoplado a um integrador que irá somar o volume deslocado em cada ciclo dividindo-o pelo tempo. O volume deslocado pode ser variado, alterando-se o volume ou o comprimento do curso do pistão (Figura 29).

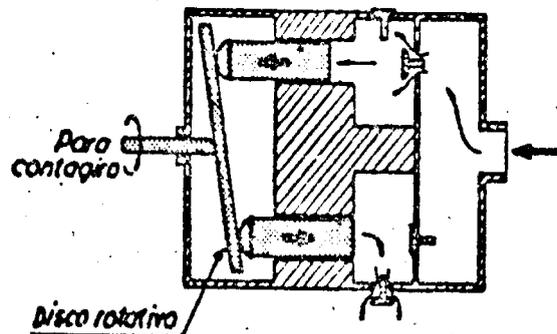


Figura 29 - Pistão Alternativo

II. BOMBAS COM PISTÃO DE NUTAÇÃO

Este tipo de medidor é bastante utilizado para medições do consumo de água em residências. É formado por uma câmara de medição circular, em cujo interior encontra-se o pistão de nutação (A), que é o único elemento móvel na câmara de medição. O movimento do pistão é controlado por um eixo (B) que se move em torno de um excêntrico cônico (C). Desta forma um lado do pistão estará sempre tocando o fundo da câmara enquanto o outro lado diametralmente oposto tocará a parte superior. O movimento do disco parece com o de uma moeda girando antes de cair. O giro do disco é transmitido através de um conjunto de engrenagens até um contador (Figura 30).

O medidor de fluxo com pistão de natação produz um fluxo contínuo, sem pulsações, a medida que os compartimentos separados da câmara de medição vão se enchendo e esvaziando sucessivamente.

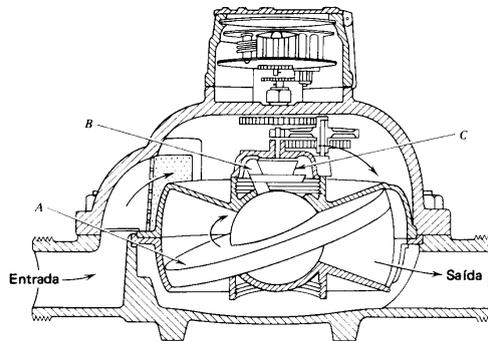


Figura 30 - Medidor de vazão com pistão de natação

III. MEDIDORES DE VAZÃO DE ENGRENAGENS OVAIS

Estes medidores possuem no interior da câmara de medição duas engrenagens acopladas entre si, deslocando uma certa quantidade de fluido.

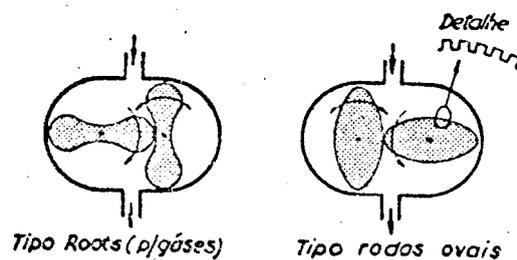


Figura 31 - Medidor de vazão de engrenagens ovais

IV. CONTADOR DE TAMBOR

É composto por um tambor, com uma câmaras de medição internas iguais, apoiado em um eixo, Figura 32. Por um tubo concêntrico ao eixo, flui o líquido para o interior do tambor enchendo a câmara que se encontra abaixo. Quando ela está cheia, começa a extravasar o fluido para a próxima câmara, que irá deslocando-se para baixo da alimentação à medida que vai enchendo-se, enquanto isso a primeira câmara já começa a esvaziar-se. Este mecanismo acarretará no movimento giratório do tambor que será transmitido para um mecanismo integrador que indicará a vazão.

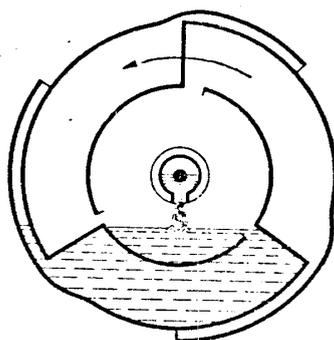


Figura 32 - Medidor de vazão tipo tambor

V. MEDIDOR DE VAZÃO DE PÁS ROTATIVAS

Este equipamento dispõe de 4 pás que giram no interior de um tambor em torno de um eixo principal e apoiadas a um excêntrico fixado no centro do tambor que irão fazê-las retrair toda vez que passam pela parte superior no tambor (Figura 33). A cada ciclo completo, uma quantidade fixa de líquido é transportada. Através do número de ciclos tem-se a vazão do líquido.

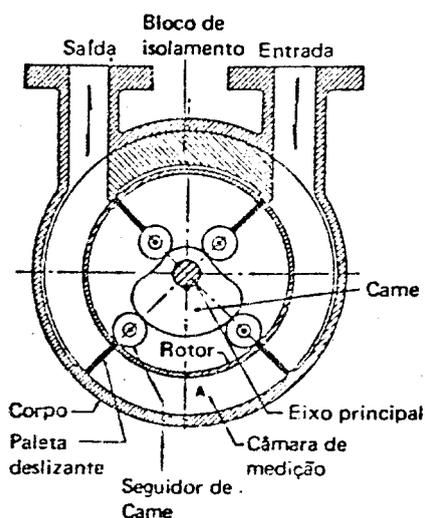


Figura 33 - Medidor de vazão de pás rotativas

3.10. MEDIDORES DE VAZÕES DE CANAL ABERTO

Estes medidores podem trabalhar com grandes variações de vazão, sendo largamente empregado na irrigação e na medição da vazão de dejetos.

I. VERTEDOUROS

Os vertedouros medem a vazão através do nível de água acima do nível zero, que varia conforme o tipo de entalhe, medido através de uma bóia. Utilizam entalhes em forma de V, retangular e trapezoidal. Para o entalhe em V o nível zero é a base do entalhe, já para o entalhe retangular, sua base será a referência zero quando não houver fluxo (Figura 34).

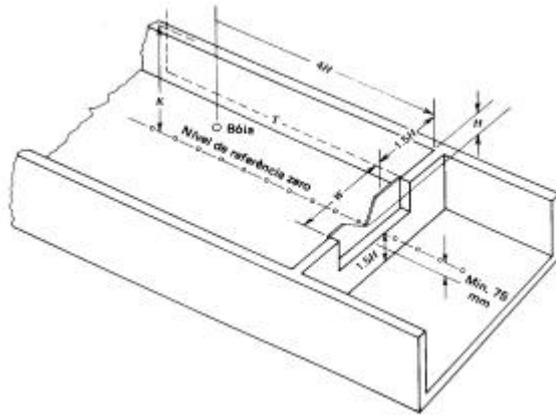


Figura 34 - Medidor de vazão tipo vertedouro

II. CALHA DE PARSHALL

A calha de Parshall é um tubo de Venturi aberto. Mede a altura do fluido, que é uma função da vazão. Este dispositivo apresenta uma pequena perda de carga, é de autolimpeza e é recomendado para fluxos que contém sólidos pesados, que se acumulariam caso fosse utilizado o vertedouro (Figura 35).

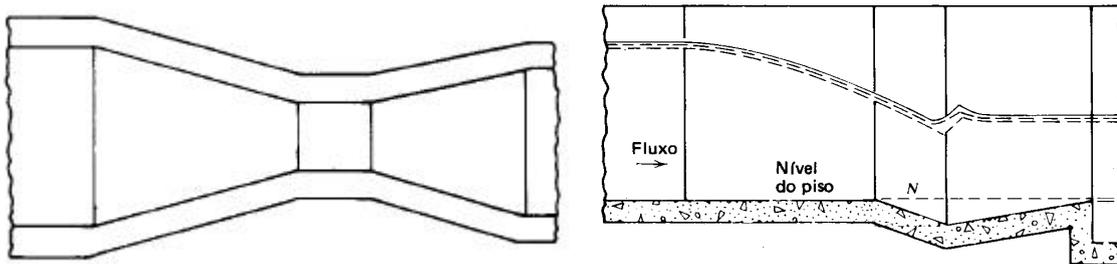


Figura 35 - Calha de Parshall