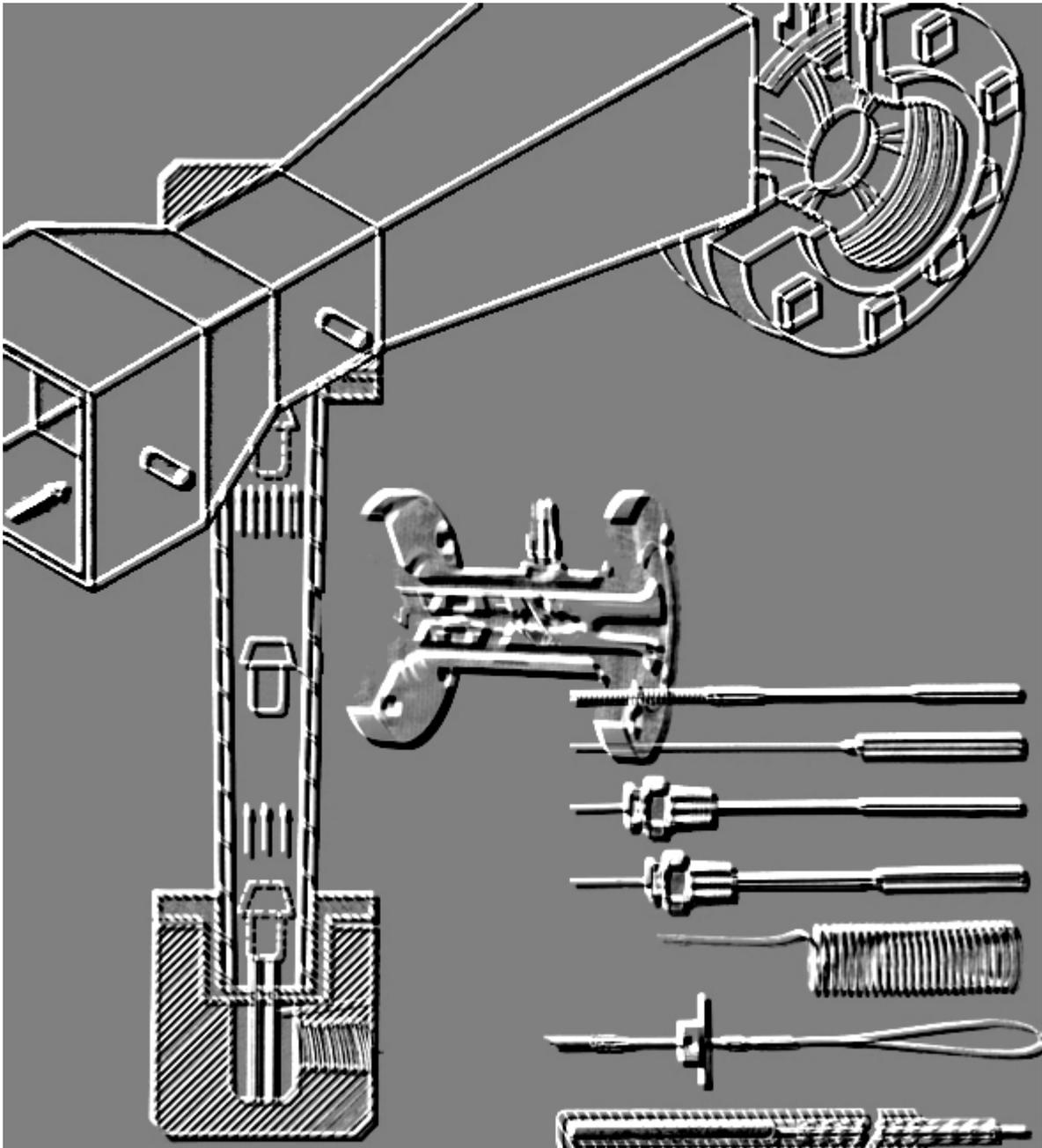


# Instrumentação

## Instrumentação Básica II

### Vazão, Temperatura e Analítica



© SENAI – ES, 1999

Trabalho realizado em parceria SENAI / CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão)

**Coordenação Geral** Evandro de Figueiredo Neto (CST)  
Robson Santos Cardoso (SENAI)

**Supervisão** .....(CST)  
Fernando Tadeu Rios Dias (SENAI)

**Elaboração** .....(CST)  
Ulisses Barcelos Viana (SENAI)

**Aprovação** (CST)  
(CST)  
Wenceslau de Oliveira (CST)

**SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial**

CTIIAF – Centro Técnico de Instrumentação Industrial Arivaldo Fontes  
Departamento Regional do Espírito Santo  
Av. Marechal Mascarenhas de Moraes, 2235  
Bento Ferreira – Vitória – ES  
CEP  
Telefone: (027)  
Telefax: (027)

CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão  
Departamento de Recursos Humanos  
Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, s/n, Jardim Limoeiro – Serra – ES  
CEP 29160-972  
Telefone: (027) 348-1286  
Telefax: (027) 348-1077

## Índice

Assunto	Página
<b>Medição de Vazão.....</b>	<b>6</b>
Definição.....	6
Conceitos Físicos Básicos para Medição de Vazão.....	8
Tipos e características dos medidores de Vazão.....	10
Medição de Vazão por Diferencial de Pressão .....	10
Medição de Vazão por Área Variável.....	42
Medidores de vazão tipo deslocamento positivo.....	47
Medidores de Vazão por Impacto do Fluido.....	51
Medidores Especiais.....	53
<b>Medição de Temperatura.....</b>	<b>68</b>
Conceito de Temperatura.....	68
Escalas de Temperatura.....	69
Medidores de Temperatura.....	76
Termômetro de Dilatação de Líquido.....	78
Termômetro a Dilatação de Sólido.....	84
Termômetro a Pressão de Gás.....	85
Termômetro à Pressão de Vapor.....	87
Termômetro Tipo Bulbo de Resistência.....	93
Termômetro tipo Termopar.....	106
Termômetros de Contato Indireto.....	145
<b>Analísadores Industriais.....</b>	<b>148</b>
Sistema de Amostragem.....	148
Analísadores de Gases por Condutibilidade Térmica.....	169
Analísadores por absorção de Raios Infravermelhos.....	184
Analísadores por Paramagnetismo.....	202
Cromatografia.....	225
Analísador de Líquidos.....	231
Medidor de pH.....	231
Medidor de densidade específica.....	237

## MEDIÇÃO DE VAZÃO

### 1 - INTRODUÇÃO

Na maioria das operações realizadas nos processos industriais é muito importante efetuar a medição e o controle da quantidade de fluxo de líquidos, gases e até sólidos granulados, não só para fins contábeis, como também para a verificação do rendimento do processo.

Assim, estão disponíveis no mercado diversas tecnologias de medição de vazão cada uma tendo sua aplicação mais adequada conforme as condições impostas pelo processo.

Neste capítulo abordaremos algumas destas tecnologias, suas aplicações, e os princípios físicos envolvidos, bem como os testes, calibração e suas interligações elétricas em forma de malhas de medição, registro, indicação e controle.

### 2 - DEFINIÇÃO

Vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica, mássica ou gravitacional de um fluido que passa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo.

*Observação:*

A vazão também pode ser obtida pelo resultado da multiplicação da área seccional pela média da velocidade do fluido.

#### 2.1 - Vazão Volumétrica

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

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

Onde:

V = volume

t = tempo

##### 2.1.1 - Unidades de Vazão Volumétricas

As unidades de vazão volumétricas mais utilizadas são: m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/h, l/h, l/min GPM, Nm<sup>3</sup>/h e SCFH.

Na medição de vazão volumétrica é importante referenciar as condições básicas de pressão e temperatura, principalmente para gases e vapor pois o volume de uma substância depende da pressão e temperatura a que está submetido.

## 2.2 - Vazão Mássica

É definida como sendo a quantidade em massa de um fluido que atravessa a seção de uma tubulação por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_m$  e expressa pela seguinte equação:

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

Onde:

$m$  = massa

$t$  = tempo

### 2.2.1 - Unidades de Vazão Mássica

As unidades de vazão mássica mais utilizadas são: kg/s, kg/h, T/h e Lb/h.

## 2.3 - Relação Entre Unidades

A relação entre as unidades de medição de vazão volumétrica e mássica pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

Onde:

$\rho$  = massa específica

## 2.4 - Vazão Gravitacional

É a quantidade em peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_p$  e expressa pela seguinte equação:

$$Q_p = \frac{W}{t}$$

Onde:

$W$  = peso

## 2.5 - Unidade Gravitacional

As unidades de vazão gravitacional mais utilizadas são: kgf/h e lbf/h.

### 3 - CONCEITOS FÍSICOS BÁSICOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

#### 3.1 - Calor Específico

Define-se calor específico como o quociente da quantidade infinitesimal de calor fornecido a uma unidade de massa duma substância pela variação infinitesimal de temperatura resultante deste aquecimento.

*Na prática, temos: A quantidade de calor necessária para mudar a temperatura de 1 grama de uma substância em 1°C.*

O conhecimento do calor específico de determinada substância é muito importante para um bom controle da vazão.

Para exemplificar, podemos citar o caso em que se deseja controlar a vazão de um fluido no estado gasoso, tendo uma placa de orifício como elemento primário.

É necessário que se conheça a relação “k” do calor específico do gás a ser medido, para podermos calcular o seu coeficiente de correção da expansão térmica, e posteriormente dimensionar a placa de orifício.

Esta relação do calor específico K é a relação do calor específico de um volume constante CV relativo ao calor específico da pressão constante CP do gás.

$$k = CP/CV$$

Equação ( 1 )

Onde:

k = relação dos calores específicos

CP = calor específico à pressão constante J/Kg x K

CV = calor específico a volume constante J/kg x K

K → Temperatura em Kelvin

#### 3.2 - Viscosidade

É definida como sendo a resistência ao escoamento de um fluido em um duto qualquer. Esta resistência provocará uma perda de carga adicional que deverá ser considerada na medição de vazão.

##### 3.2.1 - Viscosidade absoluta ou dinâmica

Define-se como sendo o atrito interno num fluido, que se opõe ao movimento relativo de suas moléculas e ao movimento de corpos sólidos que nele estejam. É representada pela letra grega  $\mu$  (mi).

##### 3.2.2 - Unidade absoluta ou dinâmica

As unidades de viscosidade dinâmicas mais utilizadas na indústria são:

$$\text{Pa} \cdot \text{s}, \quad \text{Poise} \left( \frac{\text{dyna} \cdot \text{S}}{\text{cm}^2} \right) \text{ e centipoise}$$

### 3.2.3 - Viscosidade cinemática

É a relação entre a viscosidade absoluta e a massa específica de um fluido, tomados à mesma temperatura. É representada pela letra  $\nu$  (ni).

### 3.2.4 - Unidade de Viscosidade Cinemática

As unidades de viscosidade cinemática mais utilizadas na indústria são:

$m^2/s$ , stoke ( $cm^2/s$ ) e centistoke.

## 3.3 - Tipos de Escoamento

### 3.3.1 - Regime Laminar

Se caracteriza por um escoamento em camadas planas ou concêntricas, dependendo da forma do duto, sem passagens das partículas do fluido de uma camada para outra e sem variação de velocidade, para determinada vazão.

### 3.3.2 - Regime Turbulento

Se caracteriza por uma mistura intensa do líquido e oscilações de velocidade e pressão. O movimento das partículas é desordenado e sem trajetória definida.

## 3.4 - Número de Reynolds

Número adimensional utilizado para determinar se o escoamento se processa em regime laminar ou turbulento. Sua determinação é importante como parâmetro modificador dos coeficiente de descarga.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Onde:

V - velocidade (m/s)

D - diâmetro do duto (m)

$\nu$  - viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

*Observação:*

- Na prática, se  $Re > 2.320$ , o fluxo é turbulento, caso contrário é sempre laminar.
- Nas medições de vazão na indústria, o regime de escoamento é na maioria dos casos turbulento com  $Re > 5.000$ .

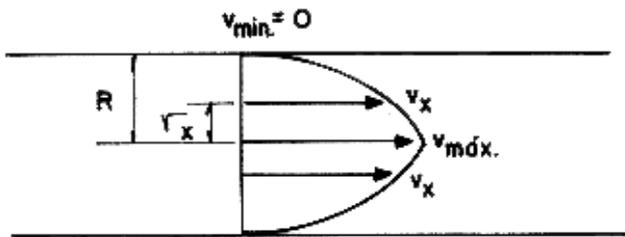
### 3.5 - Distribuição de Velocidade em um Duto

Em regime de escoamento no interior de um duto, a velocidade não será a mesma em todos os pontos.

Será máxima no ponto central do duto e mínima na parede do duto.

#### 3.5.1 - Regime Laminar

É caracterizado por um perfil de velocidade mais acentuado, onde as diferenças de velocidades são maiores.

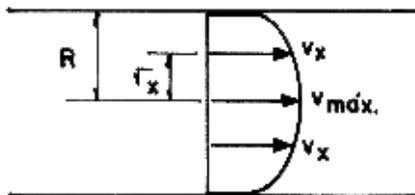


$$V_x = V_{máx} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sqrt{x}}{R} \right)^2 \right]$$

Fig. 01

#### 3.5.2 - Regime Turbulento

É caracterizado por um perfil de velocidade mais uniforme que o perfil laminar. Suas diferenças de velocidade são menores.



$$V_x = V_{máx} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sqrt{x}}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

Fig. 02

#### Observação:

Por estas duas fórmulas percebe-se que a velocidade de um fluido na superfície da seção de um duto é zero (0). Podemos entender o porque da velocidade nas paredes da tubulações considerando também o atrito existente entre o fluido e a superfície das tubulações.

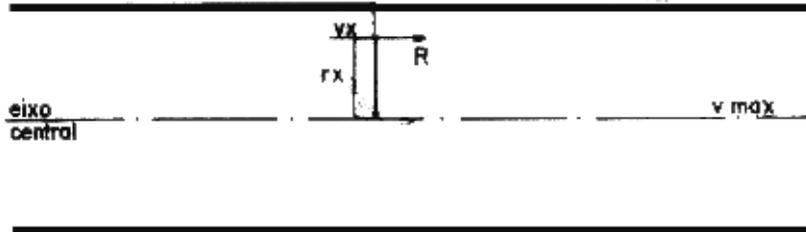


Fig. 03

$V_x$  = velocidade num ponto qualquer da seção

$V_{máx}$  = velocidade no eixo central da seção

$r_x$  = raio da seção

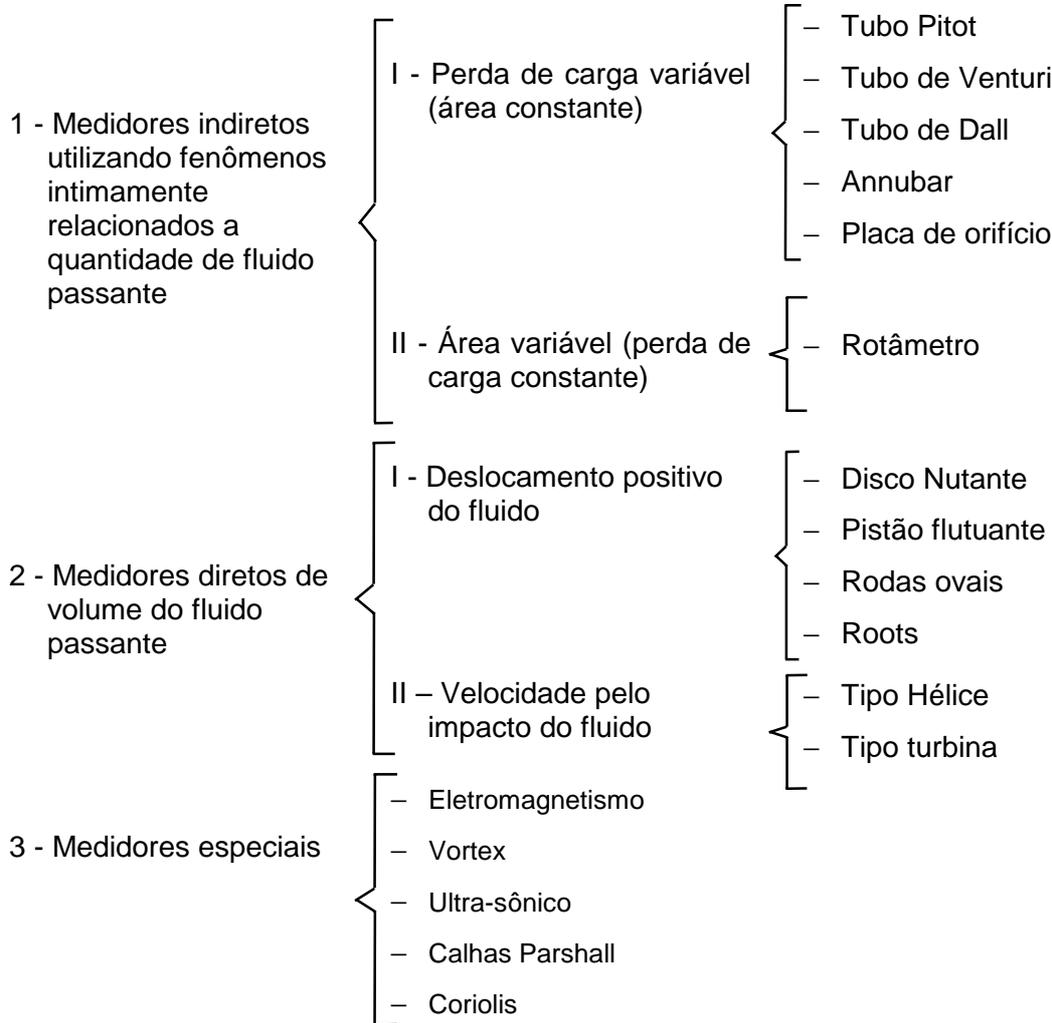
$n$  = coeficiente variável que depende do número de Reynold.

TABELA - Relação entre Red e N

Nº REYNOLDS Red x 10 <sup>4</sup>	n	Nº REYNOLDS Red x 10 <sup>4</sup>	n
2 . 55	7 . 0	64 . 00	8 . 8
10 . 54	7 . 3	70 . 00	9 . 0
20 . 56	8 . 0	84 . 40	9 . 2
32 . 00	8 . 3	110 . 00	9 . 4
38 . 40	8 . 5	152 . 00	9 . 7
39 . 56	8 . 5	198 . 00	9 . 8
42 . 80	8 . 6	235 . 20	9 . 8
53 . 60	8 . 8	278 . 00	9 . 9
57 . 20	8 . 8	307 . 00	9 . 9

#### 4 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS MEDIDORES DE VAZÃO

Existem três tipos fundamentais de medidores de vazão: indiretos, diretos e especiais.



##### 4.1 - Medição de Vazão por Perda de Carga Variável

Considerando-se uma tubulação com um fluido passante, chama-se perda de carga dessa tubulação a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessá-la. As causas da perda de carga são: atrito entre o fluido e a parede interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, etc.

Os diversos medidores de perda de carga variável usam diferentes tipos de obstáculos ao fluxo do líquido, provocando uma queda de pressão. Relacionando essa perda de pressão com a vazão, determina-se a medição de vazão pela seguinte equação:

$$Q = K * \sqrt{\frac{P1}{Pp} * \frac{Tp}{T1}} * \sqrt{\Delta p}$$

Onde:

$Q$  = vazão do fluido do local do estreitamento

$K$  = constante

$P_1$  = Pressão Medida

$P_p$  = Pressão de Projeto

$T_1$  = Temperatura medida

$T_p$  = Temperatura de projeto

$\Delta P$  = perda de carga entre o fluxo, a montante e jusante do estreitamento.

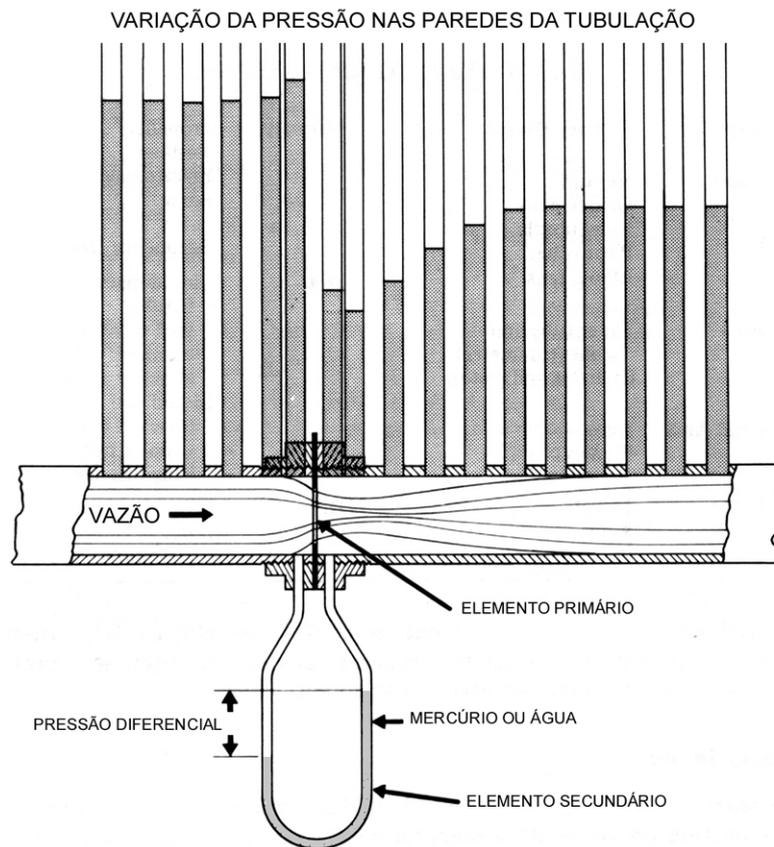


fig 4

#### 4.1.1 - Medição de Vazão através do Tubo de Pitot

É um dispositivo utilizado para medição de vazão através da velocidade detectada em um determinado ponto de tubulação.

O tubo de Pitot é um tubo com uma abertura em sua extremidade, sendo esta, colocada na direção da corrente fluida de um duto, mas em sentido contrário. A diferença entre a pressão total e a pressão estática da linha nos fornecerá a pressão dinâmica a qual é proporcional ao quadrado da velocidade.

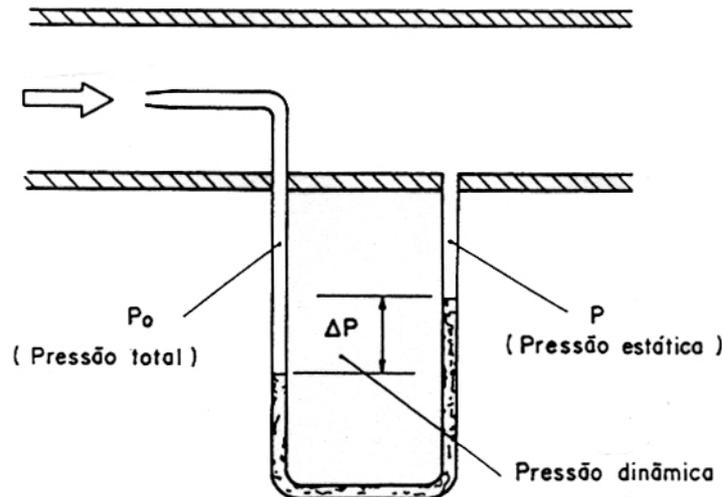


Fig. 05 - Pressão total, pressão estática e pressão dinâmica

Utilizando o tubo pitot, determina-se um diferencial de pressão, que corresponde a pressão dinâmica e com o valor dessa pressão através da fórmula abaixo, obtemos a velocidade de um ponto de medição.

$$PD = \frac{\delta V^2}{2g} \text{ ou } V^2 = \frac{PD \times 2g}{\delta} \text{ para fluidos incompressíveis}$$

Onde:

- PD = pressão dinâmica em kgf/cm<sup>2</sup>
- $\delta$  = peso específico do fluido em kgf/m<sup>3</sup>
- V = velocidade do fluido em m/s
- g = aceleração da gravidade m/s<sup>2</sup>

O tubo de Pitot mede apenas a velocidade do ponto de impacto e não a velocidade média do fluxo. Assim sendo, a indicação da vazão não será correta se o tubo de impacto não for colocado no ponto onde se encontra a velocidade média do fluxo.

Pesquisadores, concluíram que o valor da velocidade média seria 0,8 da velocidade máxima do duto.

$$\text{Velocidade média} = 0,8 * \text{Velocidade máxima}$$

Através deste dado podemos concluir que para determinarmos a vazão em uma tubulação a partir da velocidade máxima da mesma bastaria multiplicarmos este valor ( $v_{\text{máx}}$ ) pelo fator 0,8 e em seguida multiplicarmos pela seção do tubo. Para a determinação da velocidade média em uma tubulação recomenda-se medir pelo menos em dois pontos perpendiculares conforme figura 06, fazendo a média destas velocidades teremos a velocidade média da tubulação.

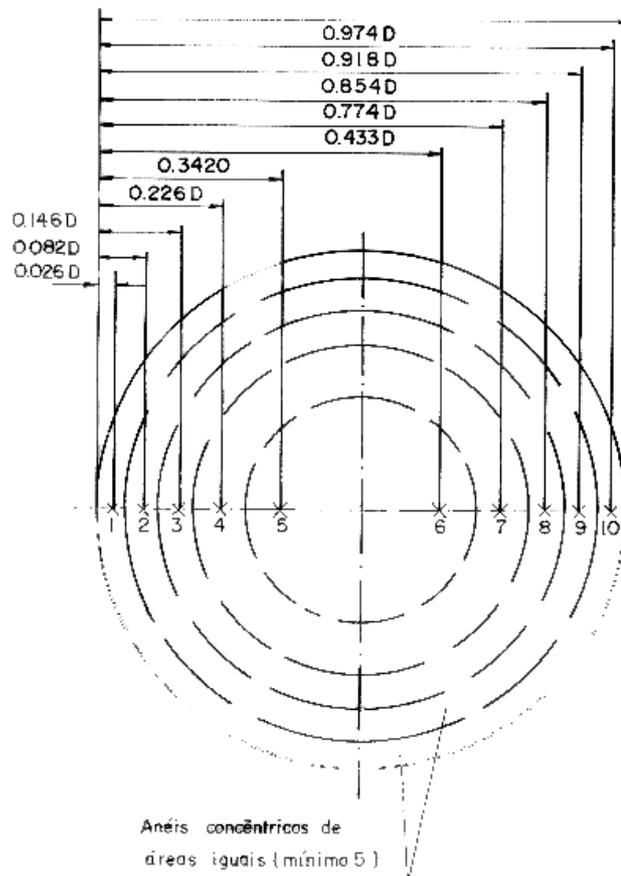


Fig. 06 - Determinação de velocidade média

Em termos práticos, para se determinar a velocidade média do fluido no interior de um duto, utiliza-se a tomada de impacto do tubo de pitot entre  $0,25 \times D$  e  $0,29D$  em relação a parede do duto, pois nesta posição a velocidade do fluido se iguala à velocidade média do fluido.

**Observação:**

1. O eixo axial do tubo de pitot deve ser paralelo ao eixo axial da tubulação e livre de vibrações.
2. O fluido deverá estar presente em uma única fase (líquido, gás ou vapor) e ter velocidade entre 3 m/s a 30 m/s para gás e entre 0,1 m/s e 2,4 m/s para líquidos.

#### 4.1.2 - Annubar

Este dispositivo consiste em um pequeno par de pontos de prova sensoras de pressão montadas perpendicularmente ao fluxo.

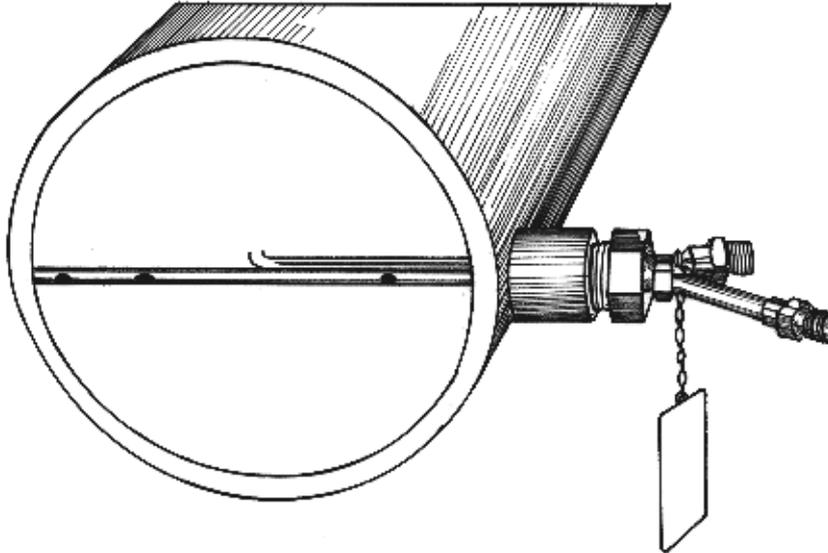


Fig. 07 - Annubar

#### Características do Annubar

A barra sensora de pressão a jusante possui um orifício que está posicionado no centro do fluxo de modo a medir a pressão do fluxo a jusante. A barra sensora de pressão de montante possui vários orifícios, estes orifícios estão localizados criteriosamente ao longo da barra, de tal forma que cada um detecta a pressão total de um anel. Cada um destes anéis tem área da seção transversal exatamente igual às outras áreas anulares detectadas por cada orifício.

Outra característica do elemento de fluxo tipo Annubar é que quando bem projetado tem capacidade para detectar todas as vazões na tubulação a qual está instalado, sendo a vazão total a média das vazões detectadas.

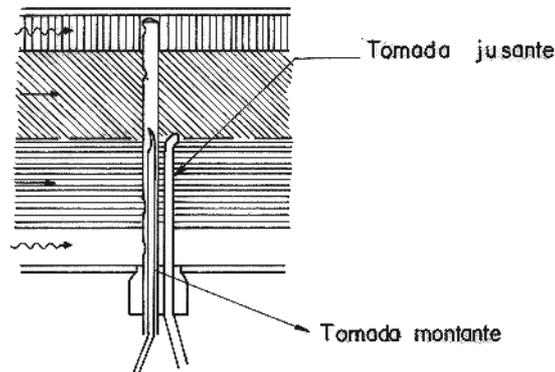


Fig. 08 - Distribuição das tomadas de fluxo para Annubar

#### 4.1.3 - Tubo Venturi

A lei de VENTURI, como é chamada o princípio, foi formulada em 1797, como resultado das investigações de GIOVANNI BATISTA VENTURI, sobre problemas de hidráulica. Tem ela o seguinte enunciado:

*“Os fluidos sob pressão, na passagem através de tubos convergentes; ganham velocidade e perdem pressão, ocorrendo o oposto em tubos divergentes”.*

Foi somente na última metade do século XIX que CLEMENS HERSHEL, um engenheiro civil americano, percebeu o valor prático deste princípio, provou o respectivo emprego e adaptou-o na indústria.

Caso seja utilizado um tubo convergente ou restrição, num conduto através do qual passa um fluido, a sua velocidade aumenta enquanto passa pela seção menor, já que num dado tempo a mesma quantidade do fluido passa pelo tubo, tanto na seção menor como no trecho de diâmetro mais largo. Devido a velocidade maior do fluido ao passar através da seção estreita, possui ele mais energia potencial ou de pressão que, por conseguinte, cai. Se, portanto, for feita uma derivação no tubo de diâmetro maior e outra na seção que contém a restrição e medidores de pressão forem ligados às derivações, a pressão da seção, com restrição, será menor do que a pressão da seção com o diâmetro maior, e a diferença da pressão depende da vazão do fluido.

O tubo VENTURI combina dentro de uma unidade simples uma curta “*garganta*” estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalada entre duas flanges, numa tubulação seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática.

São fornecidas conexões apropriadas de pressão para observar a diferença nas pressões entre a entrada e a porta estreitada ou garganta.

A figura 09 nos mostra as principais partes que formam o tubo VENTURI.

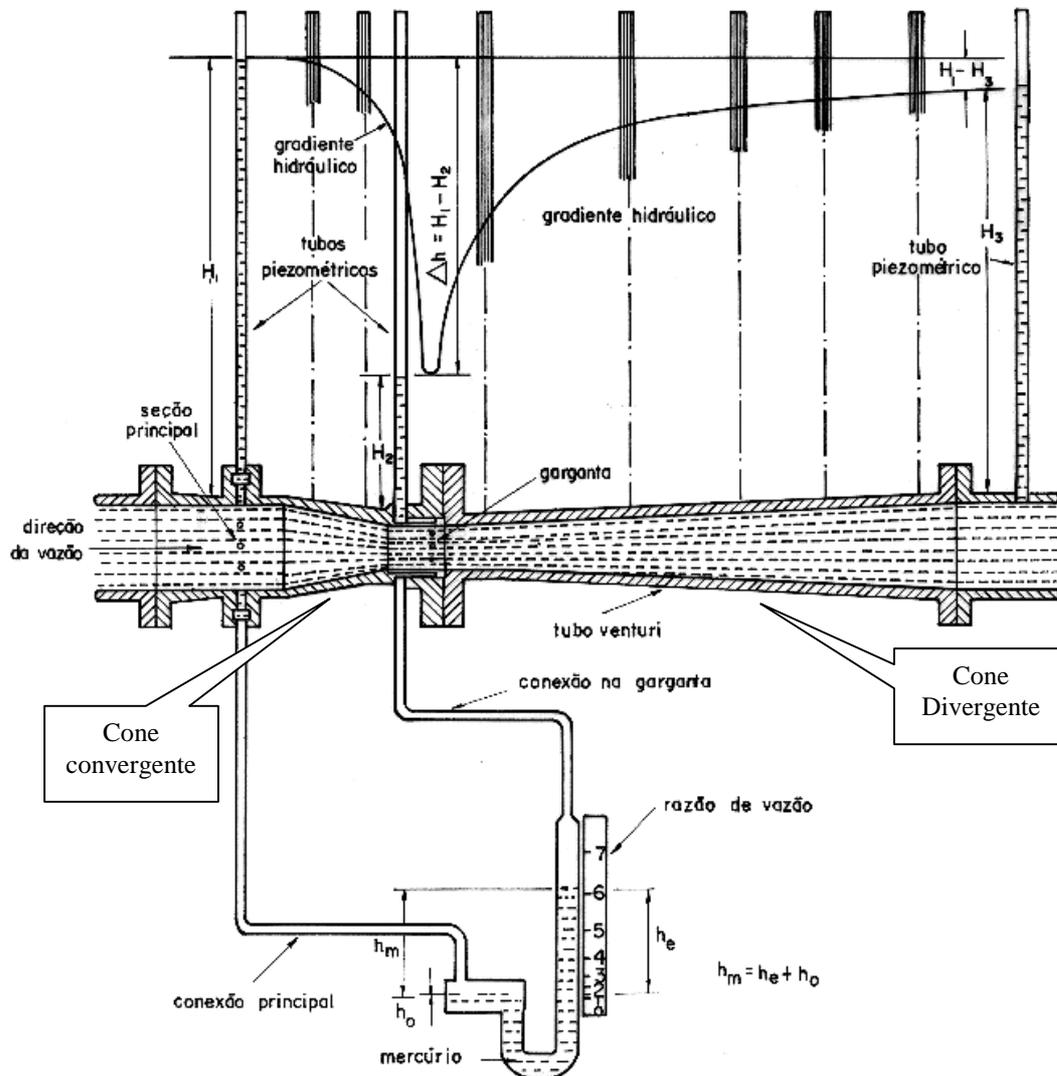


Fig. 09

#### 4.1.3.1 - Tipos de tubo Venturi

Os dois tipos mais utilizados de tubo Venturi são:

- a - Clássico (longo e curto)
- b - Retangular

a.1 - Clássico longo

O difusor aumenta progressivamente até igualar-se ao diâmetro da tubulação.

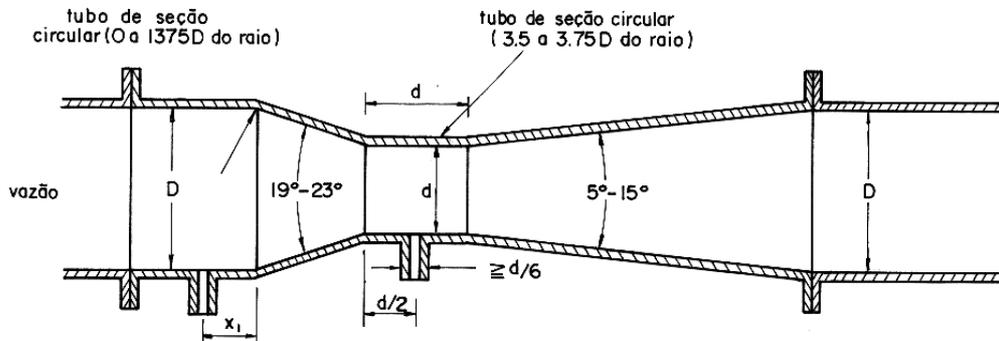


Fig. 10 - Tubo Venturi com difusor longo

a. 2 - clássico (tipo curto)

O tipo curto tem o difusor truncado.

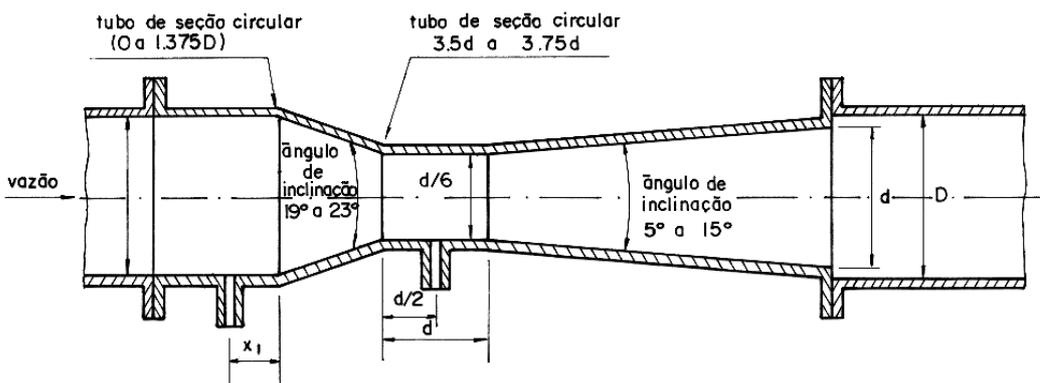


Fig. 11 - Tubo de Venturi com difusor curto

b) Tipo retangular

O tipo retangular é utilizado em dutos de configuração retangular como os utilizados para ar em caldeira a vapor.

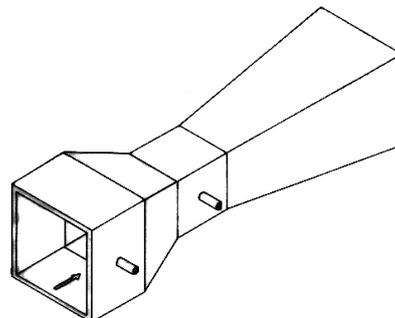


Fig. 12 - Tubo de Venturi tipo retangular

#### 4.1.3.2 - Dimensões de um tubo Venturi

A figura 13, a seguir, mostra as proporções recomendadas para tubos Venturi. Pequenas variações destas proporções podem ou não afetar apreciavelmente as medições de fluxo. Por exemplo, pequenas mudanças do ângulo de convergência do cone de entrada desde seu valor usual, 27 graus podemos esperar uma leve influência no coeficiente de descarga.

Uma característica essencial é a transição do cone para a garganta que é feita por uma curva tangencial.

Quando o ângulo do cone de saída exceder a 15 graus, as diferenciais resultantes são muito instáveis, torna-se difícil a leitura correta nos manômetros da pressão diferencial.

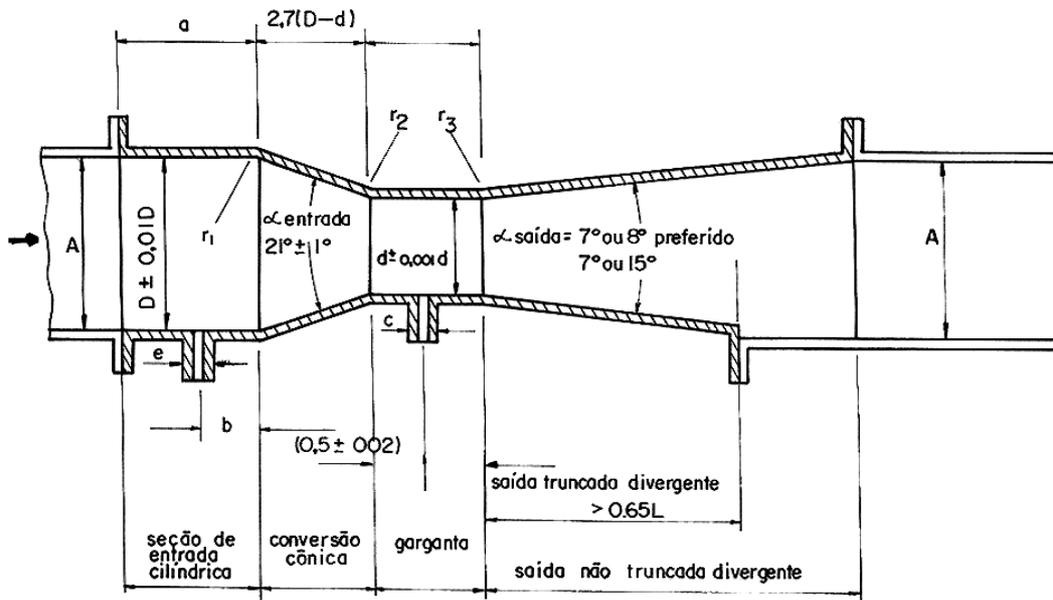


Fig. 13

#### 4.1.3.3 - Características do tubo VENTURI

O tubo VENTURI apresenta algumas vantagens em relação a outros medidores de perda de carga variável como:

- boa precisão ( $\pm 0,75\%$ );
- resistência a abrasão e ao acúmulo de poeira ou sedimentos;
- capacidade de medição de grandes escoamentos de líquidos em grandes tubulações;
- Permite medição de vazão 60% superiores à placa de orifício nas mesmas condições de serviço, porém com perda de carga de no máximo 20% do  $\Delta P$ .

Algumas das desvantagens no tubo VENTURI:

- custo elevado (20 vezes mais caros que uma placa de orifício);
- dimensões grandes e incômodas;
- dificuldade de troca uma vez instalado.

#### 4.1.4 - O tubo de DALL

Em época mais recente foi desenvolvido um dispositivo conhecido como tubo de DALL, para proporcionar uma recuperação de pressão muito maior do que a obtida por um tubo VENTURI. Diferentemente do tubo VENTURI, que apresenta garganta paralela, o tubo de DALL é desprovido de garganta, é menor e mais simples. Possui um curto cone convergência, que começa em diâmetro algo inferior diâmetro de conduto.

Há a seguir um espaço anular na “garganta”, seguido pelo cone divergente. O fluido ao passar pelo tubo, pode entrar pelo espaço anular entre o tubo de DALL que funciona como um revestimento interno do tubo e, este último transmitindo assim, uma pressão média, do “gargalo”, ao instrumento de medida através de uma derivação no tubo, nesse ponto.

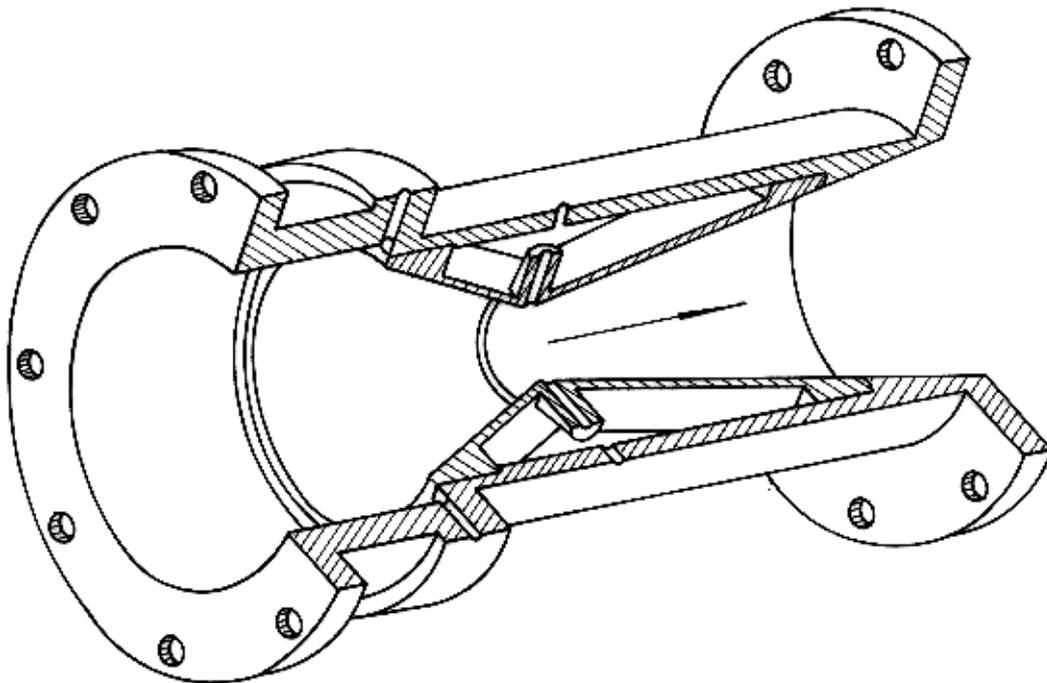


Fig. 14 - Tubo de DALL

#### 4.1.5.1 - Característica do tubo de DALL

- Para tubulações de diâmetro pequeno o limite do número de REYNOLDS é 50.000, para tubulações com diâmetros superiores, o número de REYBOLDS é ilimitado.

- Não utilizável para fluidos contendo sólidos, o qual sedimenta-se na garganta ovalada e causa erosão no canto vivo.
- A tomada de alta pressão do tubo de DALL, encontra-se localizada na entrada da parte convergente do tubo.
- A tomada de baixa pressão encontra-se localizada no final do cone convergente, "gargalo", início do cone divergente.

A mesma é disposta através de um anel perfurado do qual nos dá a média das pressões medidas.

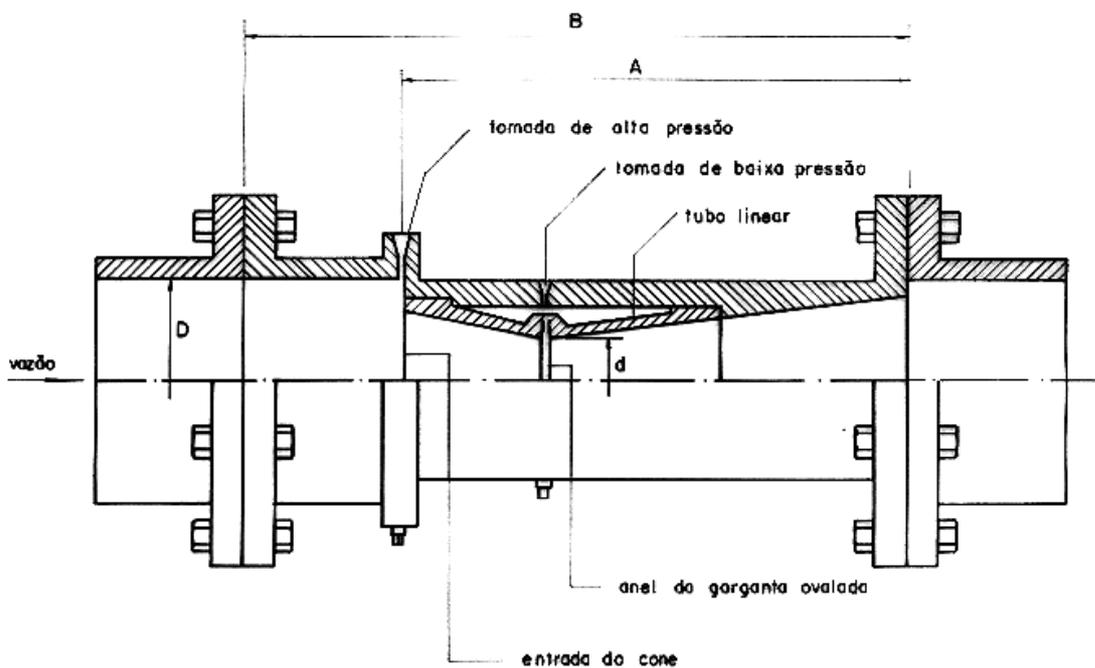


Fig. 15 - Ilustra os pontos onde tem-se as tomadas de alta e baixa pressão no tubo de DALL

#### - Placa de Orifício

De todos os elementos primários inseridos em uma tubulação para gerar uma pressão diferencial e assim efetuar medição de vazão, a placa de orifício é a mais simples, de menor custo e portanto a mais empregada.

Consiste basicamente de uma chapa metálica, perfurada de forma precisa e calculada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação entre flanges. Sua espessura varia em função do diâmetro da tubulação e da pressão da linha, indo desde 1/16" a 1/4".

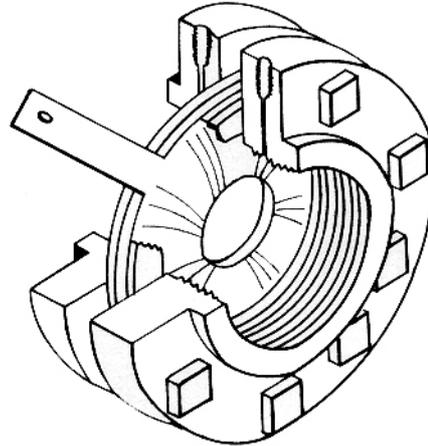


Fig.

16 - Placa de Orifício e Flange de União

O diâmetro do orifício é calculado de modo que seja o mais preciso possível, e suas dimensões sejam suficientes para produzir à máxima vazão uma pressão diferencial máxima adequada.

É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque, se ficarem gastas, corroídas pelo fluido, a precisão da medição será comprometida. A placa de orifício pode ser ajustada mais convenientemente entre flanges de tubo adjacentes e pontos de tomadas de impulso feitos em lugares adequados, uma montante da placa e o outro em um ponto no qual a velocidade, devido à restrição, seja máxima. Este ponto não é próprio orifício porque, devido à inércia do fluido, a área de sua secção transversal continua a diminuir após passar através do orifício, de forma que sua velocidade máxima está a jusante do orifício, na vena contracta. É neste ponto que a pressão é mais baixa e a diferença de pressão a mais acentuada. Outros tipos de tomadas de pressão conforme veremos mais adiante, também são utilizadas.

As placas de orifício são costumeiramente fabricadas com aço inoxidável, monel, latão, etc. A escolha depende da natureza do fluido a medir.

#### 4.1.5.1 - Tipos de orifícios

##### a) Orifício Concêntrico

Este tipo de placa de orifício é utilizado para líquido, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão. Podemos ver sua representação a seguir:

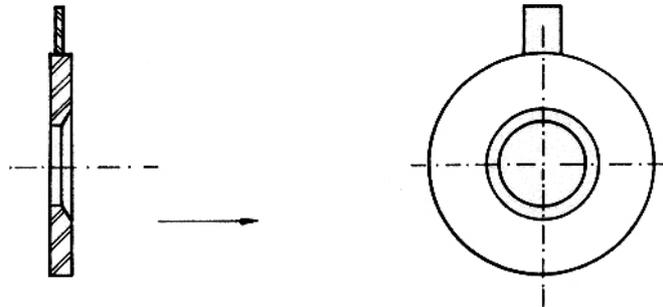


Fig. 17 - Placa de Orifício Concêntrico

A face de entrada deverá ser polida. O ângulo de entrada do orifício deverá ser de 90° com aresta viva e totalmente isenta de rebarbas e imperfeições.

*Observação:*

Em fluido líquidos com possibilidade de vaporização a placa deve ter um orifício na parte superior para permitir o arraste do vapor. Em fluidos gasosos com possibilidade de formação de condensado o furo deve ser feito na parte inferior para permitir o dreno.

b) Orifício Excêntrico

Este tipo de orifício é utilizado em fluido contendo sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa; nesses casos, o orifício pode ser posicionado na parte baixa do tubo, para permitir que os sólidos passem.

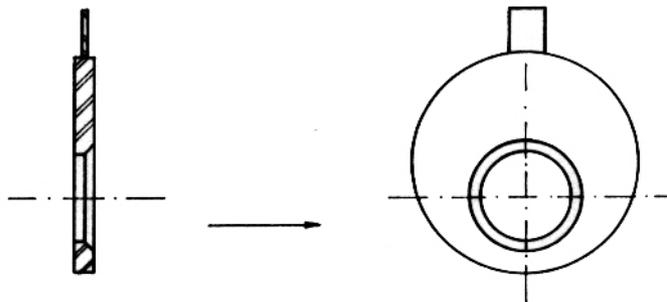


Fig. 18 - Placa de Orifício Excêntrico

Este tipo de orifício é usado especialmente em tubulações horizontais.

Ao contrário do que aconteceria com a placa de orifício concêntrica, neste não teríamos problemas de acúmulo de impurezas na entrada da placa.

Durante sua instalação o orifício deverá ser tangente inteiramente ao tubo, porém admite-se que o orifício fique ligeiramente afastado do círculo inteiro do tubo sendo que este afastamento não poderá exceder 1/16" ou seja 1,6 mm.

### c) Orifício Segmental

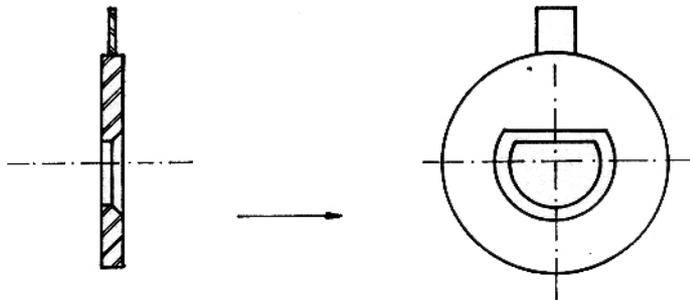
Este tipo de placa de orifício tem a abertura para passagem do fluido disposta em forma de segmentos de círculo.

A placa de orifício segmental é destinada para uso em fluidos em regime laminar e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

Existem duas maneiras para confeccionarmos orifícios segmentais.

Para tubulações pequenas o orifício é geralmente preso entre dois flanges na tubulação.

Fig. 19 - Placa de Orifício Segmental



Para tubulações grandes (superiores a 24") o orifício segmental é geralmente soldado inteiramente ao tubo.

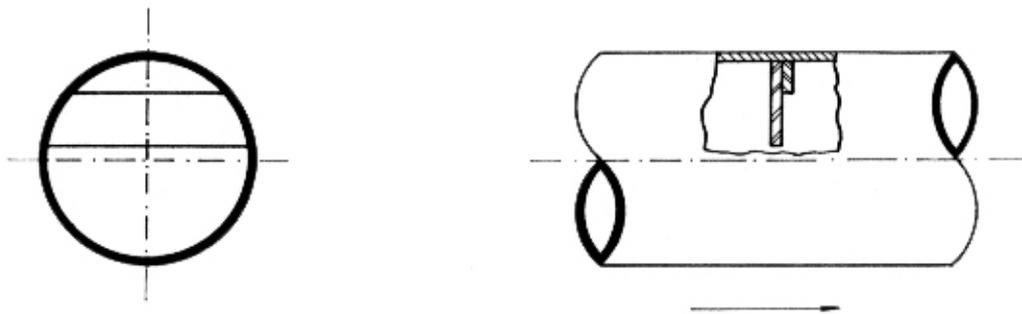


Fig. 20 - Placa de Orifício Segmental para Tubulações de  $\varnothing > 24''$

#### 4.1.5.2 - Tipos de Contorno do Orifício

##### a) Orifício com bordo quadrado

Sua superfície interna forma um ângulo de  $90^\circ$  com ambas as faces da placa, é empregado em tubulações maiores que 6". Não é utilizada para medições de vazão de fluidos com número de REYNOLDS baixo.

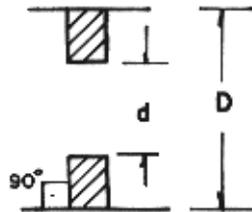


Fig. 21

##### b) Orifício com bordo arredondado

É utilizado para fluidos altamente viscosos onde o n° de REYNOLDS está em torno de 300.

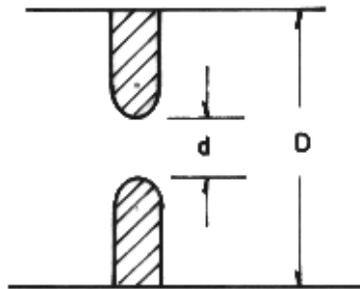


Fig. 22

##### c) Orifício com bordo quadrado e face da jusante em ângulo de $45^\circ$ . É de uso geral.

###### Observação:

O chanfro na face jusante serve para diminuir a turbulência e seu ângulo pode variar a  $30^\circ$  a  $45^\circ$ , sendo também utilizado em placas espessas para que tenhamos a "garganta" dentro de medidas recomendáveis.



Fig. 23

d) Orifício com bordo quadrado com rebaixo na fase jusante.

É usado quando se requer uma grande precisão em uma tubulação menor que 4".

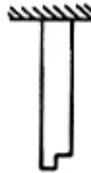


Fig. 24

e) Orifício especiais

Os orifícios abaixo descritos são utilizados para medições de vazão com “baixo” número de REYNOLDS.

Em medições nas quais tenhamos variações na viscosidade temos uma conseqüente alteração na pressão diferencial, estudos em laboratórios chegaram a determinado tipos de orifícios que permitem uma maior variação na viscosidade provocando uma pequena alteração no coeficiente de descarga.

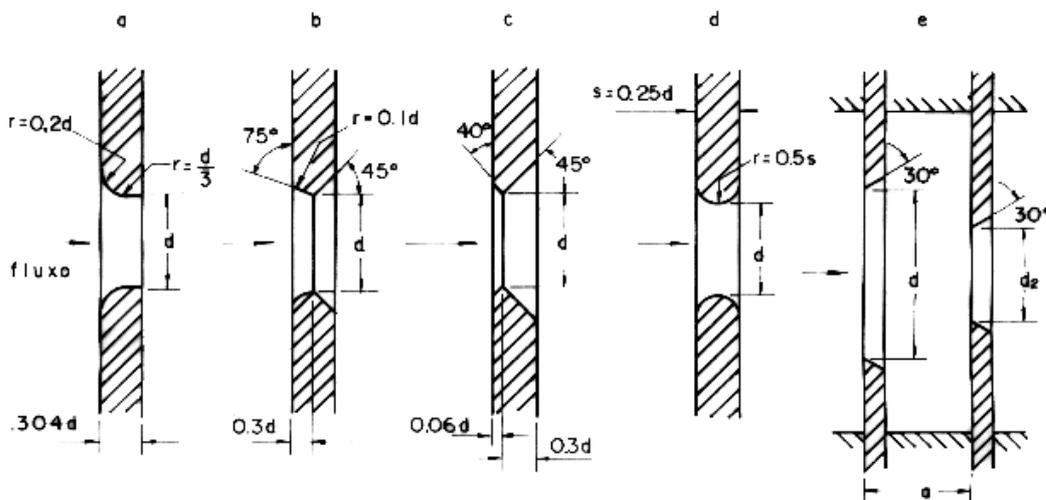


Fig. 25 - Bordos Especiais

#### 4.1.5.3 - Tomadas de Impulso em Placas de Orifício

a) Tomas de Flange

As tomadas de flange são de longe as mais populares. Os flanges para placas de orifício, já são feitos com os furos das tomadas, perfurados e com rosca. Os flanges podem ser do tipo rosqueado ou soldado.

Após os flanges serem rosqueados ou soldados na tubulação é necessário perfurar através da parede do tubo usando o próprio furo da flange como modelo e acesso. Os furos devem ser isentos de rebarbas e faceados com o tubo. No caso de flange tipo "WELDING NECK" não é necessário refurar, mas deve-se tomar o cuidado com a soldagem deste com a tubulação. Eles devem estar concêntricos com a tubulação, e as rebarbas de solda dentro da tubulação devem ser eliminadas para evitar distúrbios na passagem do fluido os quais poderiam causar imprecisões na medição.

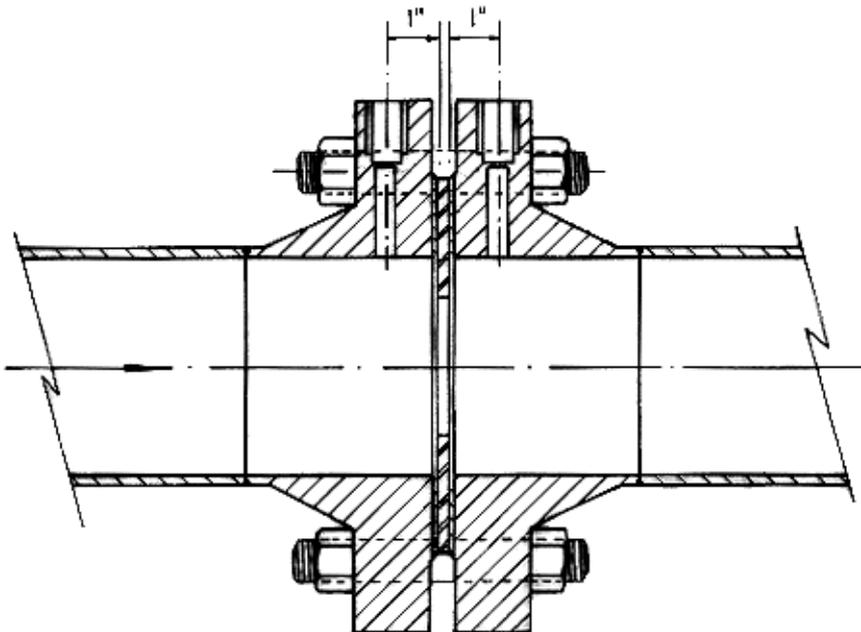


Fig. 26 - Tomada de Flange

a. 1) Vantagens da tomada de flange

1. Podem ser facilmente inspecionadas, dada sua localização próxima à face do flange.
2. Os flanges podem ser adquiridos prontos, dentro de normas com grandes precisão.
3. As tomadas são simétricas, podendo ser utilizadas para fluxo nos dois sentidos.
4. Esse tipo de tomada apresenta excelente precisão.

a.2) Desvantagens da tomada de flange

1. Os flanges utilizados são especiais, portanto são caros.
2. Não se recomenda o uso desse tipo de tomada para casos em que a relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação é grande e em tubulações menores que 2", devido ao fato de que a tomada de baixa pressão se situa numa região altamente instável da curva de recuperação de pressão.

### b) Tomadas de Vena Contracta

As tomadas de Vena Contracta permitem o uso de flanges comuns, pois são normalmente acopladas diretamente na tubulação, podendo ser também soldadas ao tubo. A parede do tubo é perfurada e o acabamento interno é feito como descrito anteriormente. Quando as conexões são colocadas diretamente no tubo, o "NIPPLE" deve estar exatamente perpendicular ao tubo e não deve penetrar no mesmo. A espessura do flange da placa de orifício não permite que a tomada a jusante seja colocada próxima à placa, em linhas de pequenos diâmetros. Por esta razão este tipo de tomadas são mais indicados para tubos de diâmetros acima de 4 polegadas. O centro da tomada de alta pressão deverá estar localizado entre  $\frac{1}{2}$  e  $2D$  do plano de entrada da placa.

O centro da tomada de baixa pressão estará colocado no ponto em que a pressão é mínima "Vena Contracta". Essa distância depende da relação  $d/D$ .

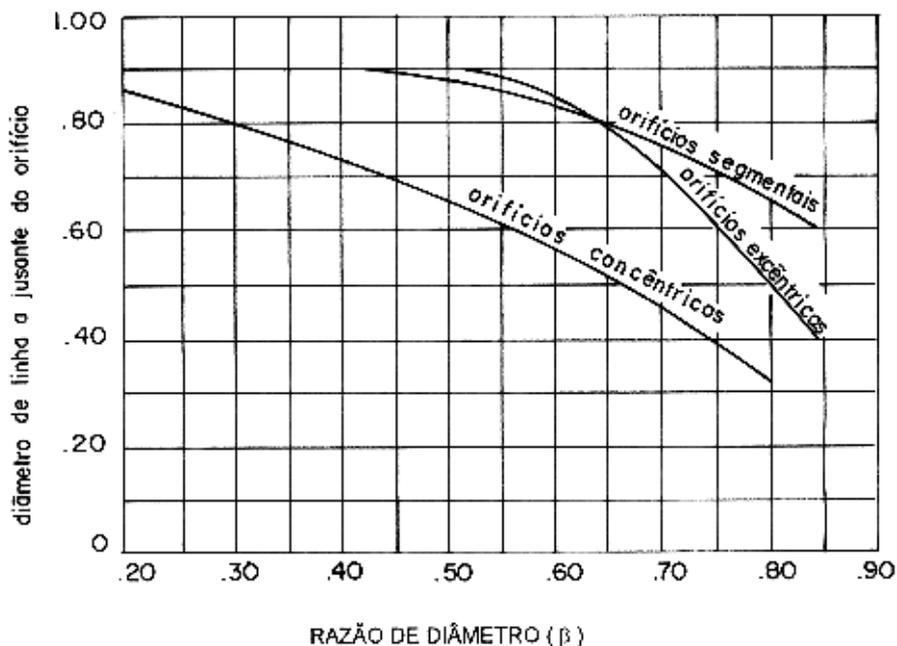


Fig. 27 - Gráfico da tomada a jusante da Vena Contracta

Para relações  $d/D$  menores que 0,72 a tomada de baixa pressão poderá ser feita a uma distância  $D/2$  após a placa com um erro desprezível. Porém, quando tivermos tubulações com diâmetros menores que 6" a tomada de baixa pressão deverá ser feita no próprio flange o que poderá ser um inconveniente.

Uma das vantagens deste tipo de tomada é o fato de não necessitarmos de flanges especiais.

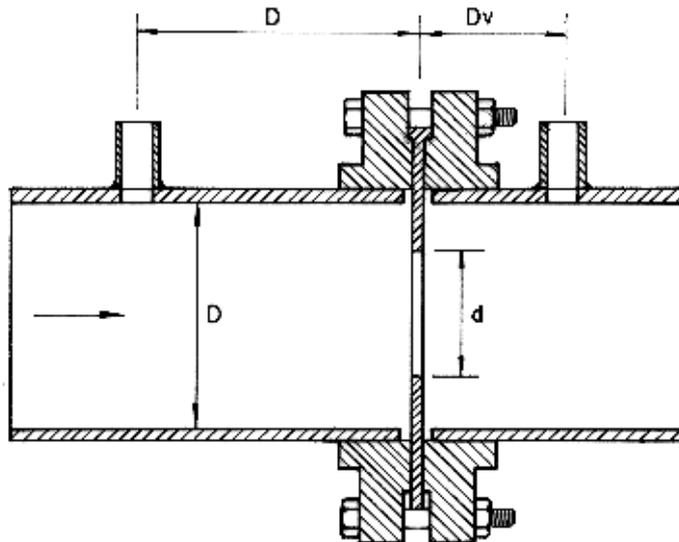


Fig. 28 - Tomada de Vena Contracta

*Observação:*

A distância  $D_v$  dependerá de  $\beta$ , o qual determinará o ponto de Vena Contracta.

### c) Tomadas de Tubulações (Pipe Taps)

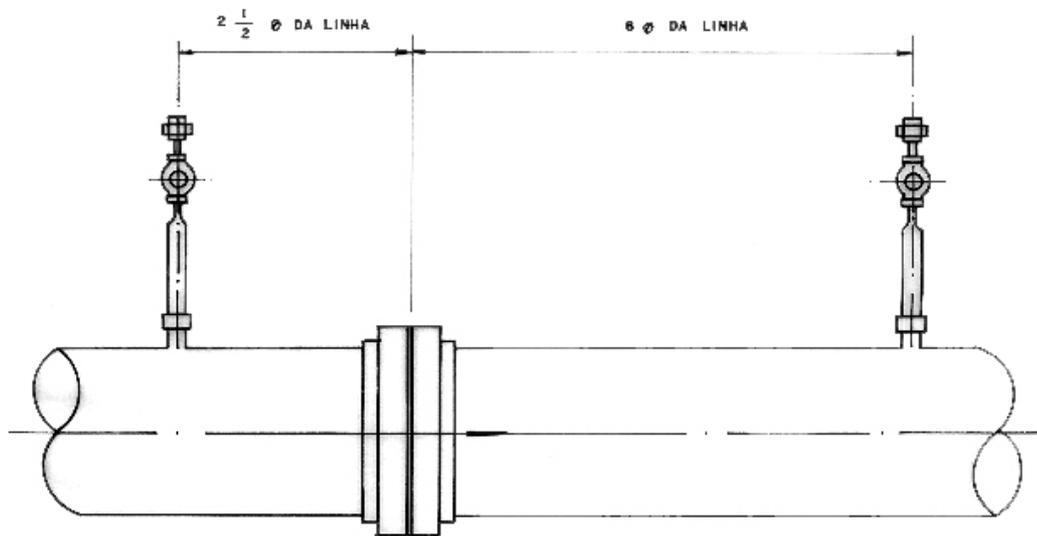


Fig. 29 - Tomada de tubulações (PIPE - TAPES 2 1/2 e 8 D)

As tomadas de tubulação (montante: 2,5 diâmetro do tubo distante da placa, jusante; 8 diâmetro de distância), permitem a medição direta da perda de carga permanente atual. O diferencial é menor que em outros tipos de tomada, para a mesma vazão o mesmo diâmetro de orifício.

A rugosidade da parede a jusante pode criar uma perda de carga adicional e ocasionar erros na medição.

Não são necessários flanges especiais, não podemos utilizar para fluxos bidirecionais.

#### d) Tomada de Canto (CORNER TAPS)

As tomadas de canto são constituídas nas flanges de placa e são usadas principalmente para tubos abaixo de 2 polegadas de diâmetro. A placa de orifício situa-se numa reentrância dos flanges. A tomada de pressão feita através de uma estreita passagem concêntrica num anel piezométrico entalhado na face do flange.

Suas vantagens são as mesmas das tomadas nos flanges, porém são mais sujeitas a entupimentos que as tomadas de flanges.

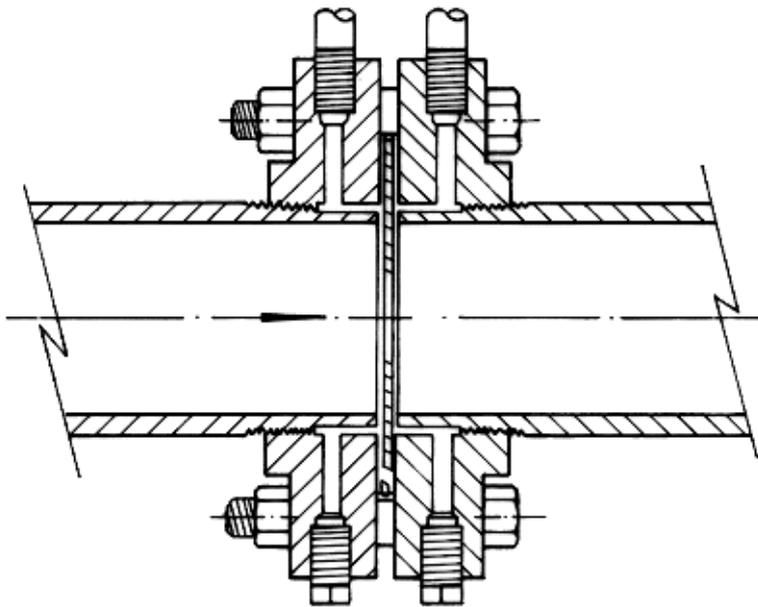
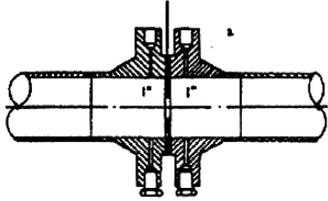
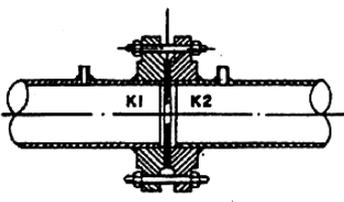
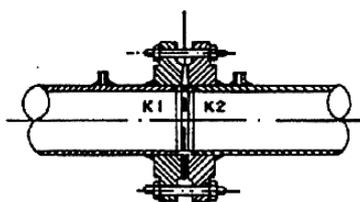
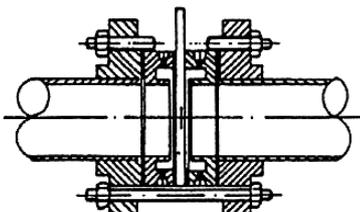
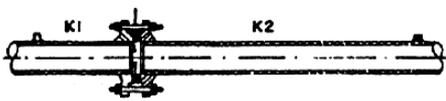


Fig. 30 - Tomada de canto

#### e) Tomadas tipo RADIUS/TAPS

É similar à Vena Contracta, exceto o fato da tomada de baixa pressão estar situada a meio diâmetro da face montante da placa de orifício. Existem diferenças quanto à precisão e também limites referentes ao N<sup>o</sup> de REYNOLDS entre elas e portanto seu uso não é frequente, embora apresente a vantagem de ter sua distância da tomada de baixa pressão independente da relação entre os diâmetros ( $\beta$ ).

TABELA 2 - Tipos de Tomadas de Impulso para Placas de Orifício Concêntrico.

Denomi- nação na literatura inglesa	Denomi- nação sugerida em português	Distância da tomada à face montante K1	Distância da tomada a jusante K2	
Flange taps	Tomadas em flanges	1"	1"(J)	
Radius taps	Tomadas a D e 1/2 D	1 D	1/2 D (M)	
Vena contracta taps	Tomadas em vena contracta	1/2 a 2 D	*	
Corner taps	Tomadas em canto	Junto	Junto	
Pipe taps	Tomadas de tubulação	2 1/2 D	8 D (M)	

(M) = medido a partir da face montante (J) = medido a partir da face jusante

\* Depende da relação d/D.

## 4.2 - Dimensionamento de Placa de Orifício

### a) Introdução

Os cálculos necessários para a fabricação de uma placa de orifício, bem como as recomendações gerais para a escolha adequada da sua geometria construtiva, do tipo de tomada de impulsos e outras, são normalmente baseados na norma ISO 5167. As fórmulas para o seu dimensionamento foram desenvolvidos a partir das equações da continuidade e de Bernoulli, sendo feitas as devidas adequações para atender os requisitos práticos de escoamento dos fluidos líquidos, gasosos e vapores.

Para a obtenção dos cálculos são levados em consideração as condições de trabalho que são aquelas em que ocorre o escoamento do fluido (temperatura, pressão, umidade, etc.), as condições de projeto que são adotadas teoricamente, e as condições de leitura que relaciona volume e massa a determinados valores de pressão e temperatura, principalmente em fluidos gasosos ou vapores.

### 4.2.1 - Critérios empregados em projetos de elementos deprimogênios

Determinados critérios são comumente empregados nos procedimentos gerais de projeto de elementos primários de vazão. Estes critérios são baseados em considerações práticas, seja para facilitar a interpretação da medida, seja para tornar mais racional o sistema de medição.

#### 4.2.1.1 - Escolha do gerador de pressão diferencial

A escolha adequada do gerador de pressão diferencial decorre principalmente da análise das condições de serviço no ponto de medição.

Os seguintes pontos devem ser analisados:

- A - características do fluido
  - A1 - impurezas ou materiais em suspensão
  - A2 - viscosidade
  - A3 - característica erosiva
  - A4 - possibilidade de incrustação
- B - características de processo
  - B1 - perda de carga possível
  - B2 - pressão diferencial disponível
- C - características da instalação
  - C1 - disponibilidade de trecho reto
  - C2 - forma da canalização (tamanho, forma)
- D - outras
  - D1 - precisão necessária
  - D2 - considerações econômicas
  - D3 - necessidade de instalação em carga

Tipicamente a escolha adequada do gerador deve recair nos seguintes elementos primários:

(L = líquido, V = vapor e G = gás)

placa de orifício concêntrico	LVG limpos
placa de orifício concêntrico, VG, com possibilidade de condensação de com furo de dreno líquidos	
placa de orifício concêntrico, com furo de respiro	L, com possibilidade de bolhas
placa de orifício excêntrico	L, com poucos sólidos em suspensão G, com formação constante de condensação
placa de orifício segmental	L, com materiais em suspensão (água de adutora) G, com muitas poeiras (gás de alto forno)
placa de orifício ¼ de círculo	L, V, G, com número de Reynolds baixo
placa de orifício com entrada cônica	L, V, G, com número de Reynolds muito baixo
placa de orifício para pequenos nos diâmetros	L, V, G, para diâmetros $D < 50$ mm

#### 4.2.1.2 - Escolha da pressão diferencial e da relação $\beta$

No projeto de uma placa de orifício, certos parâmetros são interdependentes. É o caso da pressão diferencial correspondente à vazão máxima e da relação dos diâmetros  $\beta$ . A escolha de uma pressão diferencial alta resultará numa relação  $\beta$  pequena e vice-versa.

No desenvolvimento do “projeto”, é geralmente adotado um determinado valor de pressão diferencial, sendo a relação  $\beta$  calculada em consequência.

É prática comum visar a obtenção, no fim do cálculo, de um valor  $\beta$  compreendido entre 0,50 e 0,70 sendo, entretanto, permitido ultrapassar estes valores, já que as tabelas fornecem coeficientes para valores compreendidos entre 0,15 e 0,75, na maior parte dos casos.

A limitação recomendada abaixo de  $\beta = 0,70$  se justifica sabendo-se que a tolerância sobre o valor do coeficiente de descarga aumenta a partir deste valor. Quanto ao limite inferior recomendado de  $\beta = 0,50$ , a justificativa é que, para este valor, a área livre já é ¼ da área do tubo, o que representa uma restrição importante, supondo-se que a tubulação tenha sido corretamente dimensionada.

Em consequência dessas limitações recomendadas, seria possível proceder o cálculo da placa de orifício no sentido de se encontrar a pressão diferencial, partindo de uma relação  $\beta$  determinada, digamos igual a 0,6. Esta prática entretanto, não é recomendada, pois, considerando uma planta industrial completa com dezenas de medidores de vazão, cada

medidor teria uma pressão diferencial diferente, o que dificultaria a padronização na calibração dos transmissores e, conseqüentemente, a manutenção da instalação.

Neste sentido é que, no caso de projeto de grande porte, envolvendo grande quantidade de pontos de medição de vazão em fluidos e condições de operação dos mais variados, são estabelecidos critérios iniciais de pressões diferenciais para placas de orifício. Como exemplo, a tabela a seguir fornece as pressões diferenciais recomendadas em uma siderurgia.

Fluido	Pressão diferencial mmH <sub>2</sub> O					
Gases em baixa pressão		50	150		500	
Gases pressurizados		500	1000		2500	
Líquidos		1000	2500		5000	
Vapor		1000	5000			
Resumo das pressões diferenciais	50	150	1000	2500	2500	5000

É claro que, procedendo de forma acima recomendada, ter-se-á uma padronização relativa das pressões diferenciais, porém valores de  $\beta$  diferentes para cada caso, de forma que placas de orifício para tubulações de mesmo diâmetro terão dimensões geométricas diferentes. A não-padronização das placas de orifício é, entretanto, considerada um problema menor devido à pouca incidência de manutenção que apresenta este instrumento e à facilidade na fabricação das mesmas.

#### 4.2.1.3 - Perda de carga permanente

Ao passar pelo elemento primário gerador de depressão, o fluido, tem sucessivamente uma aceleração, aumentando a velocidade até um máximo, que ocorre no plano da *vena contracta*, e uma desaceleração. Voltando a velocidade a ser sensivelmente igual à inicial. A variação da pressão conseqüente à variação de velocidade é mostrada na figura 31, no caso de uma placa de orifício.

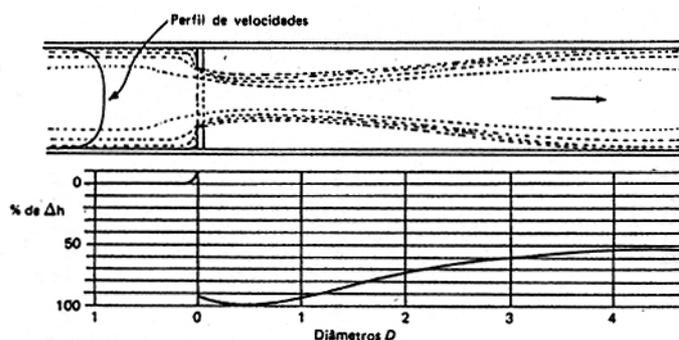


Fig. 31 - Variações de pressão numa linha devido à placa de orifício.

A *perda de carga permanente* é o nome dado ao valor da queda de pressão provocada pela presença do elemento deprimogênio. Este valor é geralmente expresso de forma percentual com relação ao valor da pressão diferencial medida pelo medidor de vazão.

#### 4.2.2 - Fórmulas de Cálculo

Em geral, o cálculo de uma placa de orifício ou de um outro elemento deprimogênio se destina a encontrar o diâmetro da restrição, partindo da vazão a ser medida, dos parâmetros do fluido, das características geométricas da tubulação ou do duto e de uma pressão diferencial estimada conforme esquema a seguir:

Dados de Entrada	Valor Calculado
Vazão máxima ( $Q_L$ ) Parâmetro do fluido (P, T, etc.) Características geométricas (D, etc.) Pressão diferencial ( $\Delta p$ )	$\beta \rightarrow d$

Em outros casos, mais raros, o cálculo pode ser feito em sentido contrário, conforme um dos esquemas abaixo:

Dados de Entrada	Valor Calculado
$d \rightarrow \beta$ Vazão máxima ( $Q_L$ ) Parâmetro do fluido (P, T, etc.) Características geométricas (D, etc.)	Pressão diferencial ( $\Delta p$ )

Ou ainda:

Dados de Entrada	Valor Calculado
$d \rightarrow \beta$ Parâmetro do fluido (P, T, etc.) Características geométricas (D, etc.) Pressão diferencial ( $\Delta p$ )	Vazão máxima ( $Q_L$ )

#### 4.2.2.1 - Fórmulas de cálculo para líquido

$$CE \cdot \beta^2 = \frac{Q_L \cdot \delta_L}{N \cdot D^2 \cdot Fa \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\delta p}}$$

Onde:

N = 0,012522 - Número para adequação de unidade

$Q_L = m^3/h$  - vazão máxima de leitura

$\delta_L = kgf/m^3$  - peso específico

D = mm - diâmetro da linha

$\Delta P = mmH_2O$  - valor da pressão diferencial correspondente ao máximo valor do transmissor.

Quando a densidade relativa é utilizada na fórmula esta passa a ser:

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{Q_L \cdot \rho_L}{N \cdot D^2 \cdot Fa \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\rho p}}$$

Onde:

N = 0,0003962

$\rho$  = adimensional (densidade relativa)

$Q_L = m^3/h$

D = mm

$\Delta P = mmH_2O$

Para o número de Reynolds, podem ser empregados as seguintes equações:

$$R_{DU} = \frac{353.400 \cdot Q_{UL} \cdot \delta_L}{D \cdot \gamma \cdot \delta p}$$

Onde:

$Q_{UL} = m^3/h$

$\delta_L = kgf/m^3$

$\gamma = cst$

D = mm

ou

$$R_{DU} = \frac{353.400 \cdot Q_{UL} \cdot \rho_L}{D \cdot \gamma \cdot \mu_p}$$

Onde:

$\rho_L$  = adimensional

$\mu_p$  = Centipoise

#### 4.2.2.2 - Fórmulas de cálculo para gás

a) Vazão em volume

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{Q_p \cdot \sqrt{\delta p}}{N \cdot D^2 \cdot Fa \cdot \xi \cdot \sqrt{\Delta P}}$$

Onde:

$$N = 0,012522$$

b) Vazão em volume

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{Q_L \cdot P_L \cdot \sqrt{T_P} \cdot \sqrt{\rho}}{N \cdot D^2 \cdot \sqrt{P_P} \cdot T_L \cdot Fa \cdot \xi \cdot F_S \cdot F_U \cdot \sqrt{\Delta P}}$$

Onde:

$$N = 0,00067748$$

c) Vazão em peso

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{Q_u}{N \cdot D^2 \cdot Fa \cdot \xi \cdot \sqrt{\delta p} \cdot \sqrt{\Delta P}}$$

Onde:

$$N = 0,012522$$

$Q_g$  = kgf/h - vazão em peso

$Q_p$  = m<sup>3</sup>/h - vazão na condição de projeto

$Q_L = m^3/h$  - vazão na condição de leitura  
 $\delta p = kgf/m^2$  - peso específico, condição de projeto  
 $D = mm$  - diâmetro da tubulação  
 $F_a$  - fator de dilatação térmica  
 $\xi$  - fator de expansão isentrópica  
 $\Delta P = mmH_2O$  a  $4^\circ C$  - pressão diferencial  
 $P_L; p = kgf/m^2A$  - pressão do fluido  
 $T_L; p = K$  - temperatura do fluido  
 $\rho$  - densidade relativa  
 $F_s$  - fator de supercompressibilidade  
 $F_a$  - fator de unidade

O nº de Reynolds deve ser calculado por uma das seguintes equações:

$$R_{DU} = \frac{120,83 \times Q_{UL} (P_L - P_{\vartheta L}) \cdot \rho \cdot [(P_P - P_{\vartheta p}) \left(\frac{0,622}{\rho}\right) \cdot P_{\vartheta p}]}{(P_P \cdot P_{\vartheta p}) \cdot T_L \cdot Z_L \cdot D \cdot g \mu p}$$

ou

$$R_{DU} = \frac{0,3537 Q_{gu}}{D \cdot g \mu p}$$

Onde:

$Q_{UL} = m^3/h$   
 $Q_{gu} = kgf/h$   
 $D = mm$   
 $P_L; P_{\vartheta L}; P_P; P_{\vartheta p} = kgf/cm^2$   
 $g \mu p = kgf/m.s$   
 $T_L = K$

#### 4.2.2.3 - Fórmulas de cálculo para vapor

$$C \cdot E \cdot \beta^{2=} \frac{Q_g}{N \cdot D^2 \cdot F_a \xi \sqrt{\delta p} \cdot F_{\vartheta} \cdot \sqrt{\Delta P}}$$

Onde:

$N = 0,012522$  para  $Q_g$  em  $kgf/h$   
 $N = 12522 \times 10^{-6}$  para  $Q_g$  em  $ton/h$   
 $Q_g = kgf/h$  ou  $ton/h$  - vazão em peso  
 $D = mm$   
 $\delta p = kgf/m^3$   
 $F_{\vartheta}$  - fator de vapor saturado

O nº de Reynold deverá ser calculado pela seguinte equação:

$$R_{DU} = \frac{353,7 \cdot Q_{gu}}{D \cdot \mu p}$$

Onde:

Q<sub>gu</sub> = ton/h  
D = mm  
μp = kgf/m.s

#### 4.2.3 - Exemplos de cálculo de placa de orifício

a) Calcular uma placa de orifício para trabalhar nas seguintes condições:

Fluído: óleo  
Vazão máxima (Q<sub>L</sub>): 90m<sup>3</sup>/h  
ΔP: 2500 mmH<sub>2</sub>O a 0°C  
Diâmetro: 102,3 mm  
Temperatura de leitura: 0°C  
Temperatura de projeto: 40°C  
Peso específico a 0°C (δ<sub>L</sub>): 835 kgf/m<sup>3</sup>  
Peso específico a 40°C(δp): 817 kgf/m<sup>3</sup>  
Fator dilatação térmica: 1,001  
Viscosidade absoluta (μp): 3 cp  
Tipo de tomada: flange  
Tipo de placa: concêntrica

Solução:

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{Q_L \cdot \rho_L}{N \cdot D^2 \cdot Fa \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\rho p}}$$

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{90 \cdot 835}{0,012522 \cdot 10,465 \cdot 1,001 \cdot \sqrt{2500} \cdot 817}$$

$$C \cdot E \cdot \beta^2 = 0,40087$$

Cálculo do nº Reynolds

$$R_{DU} = \frac{353.400 \times Q_{UL} \times \rho_L}{D \cdot \mu p}$$

$$R_{DU} = \frac{353.400 \cdot (0,7 \cdot Q_L) \cdot \frac{\delta_L}{999,08_L}}{102,3 \cdot 3}$$

$$R_{DU} = \frac{353.400 \cdot 0,7 \cdot 90 \cdot 0,836}{306,9}$$

$R_{DU} = 60,6 \times 10^3$
-----------------------------

Na tabela de coeficientes de vazão ( $C' \cdot E \cdot \beta^2$ ) para tomadas em flange temos para  $D = 4,026''$  (102,3 mm):

$\beta$	$C' \cdot E \cdot \beta^2$	$A_f$
0,74	0,392692	1368,22
0,75	0,407930	1437,53

Por interpolação

$$\beta = 0,74526$$

$$A_f = 1404,67$$

Correção do coeficiente de vazão

$$C' \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{C \cdot E \cdot \beta^2}{1 + \frac{A_f}{R_D}} = \frac{0,40087}{1 + \frac{1404,67}{60,6 \cdot 10^3}} = 0,38868$$

Implementando entre  $\beta = 0,73$  e  $\beta = 0,74$ , temos:

$$\beta = \frac{0,38868 - 0,378253}{0,392692 - 0,278253} \times 0,01 + 0,73 = 0,73722$$

$$e \text{ d} = D \cdot \beta = 102,3 \times 0,73722$$

$$d = 75,42 \text{ mm}$$

### 4.3 - Transmissor de Vazão por Pressão Diferencial

Os transmissores de vazão por pressão diferencial se baseiam nos mesmos princípios físicos utilizados na tecnologia de medição de pressão. Assim, são utilizados os tipos piezoelétrico; strain-gauge, célula capacitiva, etc..., para medir a pressão diferencial imposta por um elemento deprimogenio cuidadosamente calculado para permitir a obtenção da faixa de vazão que passa por um duto, conforme já visto em tópicos anteriores. Como a pressão diferencial é relativamente baixa, as faixas de medição destes transmissores são expressas normalmente em mmH<sub>2</sub>O, kPa ou polegada de água.

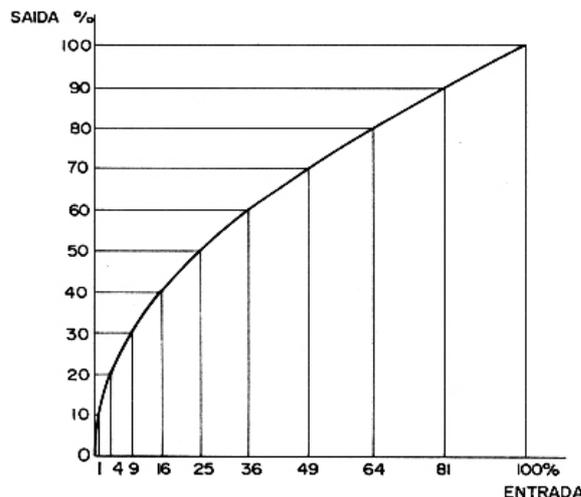
### 4.4 - Extrator de Raiz Quadrada

Uma das maneiras mais utilizadas para se medir a vazão de um fluido qualquer em um processo industrial é aproveitar-se da relação entre vazão e pressão deste fluido. Para isto, são utilizados elementos deprimogênios, tais como placas de orifício, que atuam como elementos primários e possibilitam efetuar a medição de uma pressão diferencial que é correspondente à vazão que passa por ele. Porém, essa relação não é linear e sim quadrática. Desta forma são utilizadas unidades aritméticas denominadas *Extrator de Raiz Quadrada* cuja função é a de permitir que valores medidos pelos transmissor representem a vazão medida. Esta função, extrator de raiz, pode estar incorporada ao transmissor, estar separada como um instrumento ou até mesmo ser uma função executada via software em sistema de controle, em um controlador digital ou até mesmo em um controlador lógico programável.

#### 4.4.1 - Curva teórica de um Extrator de Raiz

Percentualmente a curva teórica saída/entrada de tais acessórios é representada pela Fig. 32.

As saídas (S) correspondentes às entradas (E) de 1; 4; 9; 25; 36; 49; 64; 81 e 100% são respectivamente 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%, onde:



$$S\% = 100 \sqrt{\frac{E\%}{100}}$$

Fig. 32 - Curva teórica de extração de raiz quadrada

Qualquer que seja a tecnologia utilizada, o extrator de raiz quadrada será basicamente um amplificador de ganho variável, com ganho extremamente alto para baixos valores do sinal de entrada e ganhos baixos para altos valores do sinal de entrada.

#### 4.4.2 - Fórmulas de cálculos teóricos para o extrator

a) Valores teóricos de entrada percentual em função da saída:

$$E (\%) = \left( \frac{S(\%)}{100} \right)^2 \times 100$$

b) Valores teóricos de saída percentual em função da entrada:

$$S(\%) = \left( \sqrt{\frac{E(\%)}{100}} \right) \times 100$$

c) Valores teóricos de saída em tensão em função da entrada:

$$V_o = \sqrt{4(V_i - 1)} + 1$$

#### 4.4.3 - Ponto de corte

Este ajuste consiste em se estabelecer um ponto inicial a partir do qual o sinal recebido pelo extrator é enviado para os instrumentos de recepção (controlador, registrador, etc...). Ele é necessário devido ao alto ganho do extrator no início de sua faixa de trabalho e à instabilidade dos sinais medidos pelo transmissor em baixos  $\Delta P$ , o que resultaria em registro, totalizações ou controles inadequados e inconfiáveis.

Para efeito de calibração de extratores de raiz quadrada fisicamente constituídos pode-se usar a seguinte equação:

$$V_o = [(V_{\max} - V_{\min}) \times \frac{\%corte}{100}] + 1$$

#### 4.6 - Integrador de Vazão

As medições de vazão quase sempre tem por objetivo também apurar o consumo ao longo de um tempo pré-estabelecido de um determinado fluido usado em um processo de transformação industrial qualquer. Isto é importante pois sua quantificação permite levantar custos para conhecer gastos e efetuar cobranças de fornecimento.

Para conhecer esse consumo é feito a integração dos valores instantâneos de vazão e desta forma é obtido, após um período determinado, o total consumido. Essa operação é feita por um instrumento denominado integrador de sinal.

## 5 - MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ÁREA VARIÁVEL

Rotâmetro são medidores de vazão por área variável nos quais um flutuador varia sua posição dentro de um tubo cônico, proporcionalmente à vazão do fluido.

Basicamente um rotâmetro consiste de duas partes:

- 1) Um tubo de vidro de formato cônico que é colocado verticalmente na tubulação, em que passará o fluido a ser medido e cuja extremidade maior fica voltada para cima.
- 2) No interior do tubo cônico, um flutuador que se moverá verticalmente, em função da vazão medida.

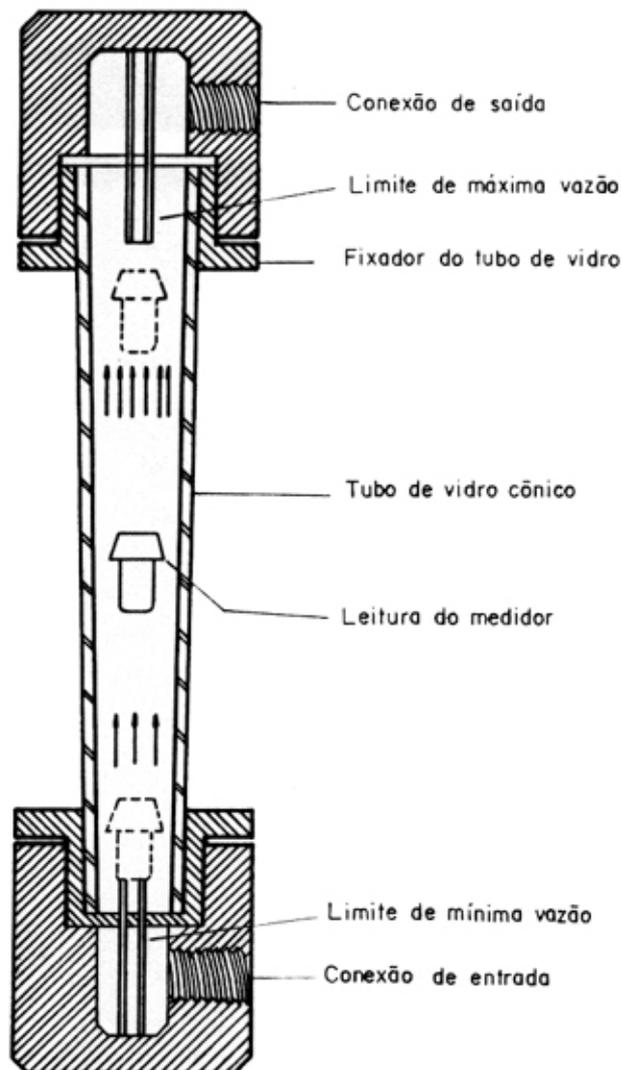


Fig. 33 - Rotâmetro

## 5.1 - Princípios Básicos do Rotâmetro

O fluido passa através no tubo da base para o topo. Quando não há vazão o flutuador permanece na base do tubo e seu diâmetro maior é usualmente selecionado de tal maneira que o bloqueia a pequena extremidade do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve, porém como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador.

Com a vazão, surge também uma força de atrito, entre o fluido e o flutuador, que tende a leva-lo para cima, a chamaremos de força de arraste. Quando a vazão atinge um valor que faça a força de arraste ser maior que a força peso do flutuador, este começará a subir. Se o tubo fosse paralelo o flutuador subiria até o topo; mas sendo cônico a força de arraste diminui a medida que o flutuador sobe até estabilizar em uma nova posição (pois aumenta a área disponível para a passagem do fluido).

Qualquer aumento na vazão movimentará o flutuador para a parte superior do tubo de vidro e a diminuição causa uma queda a um nível mais baixo. Cada posição sua corresponde a um valor determinado de vazão e somente um. É somente necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo e a vazão poderá ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

## 5.2 - Condições de Equilíbrio

As forças que atuam no flutuador estão representadas na figura a seguir.

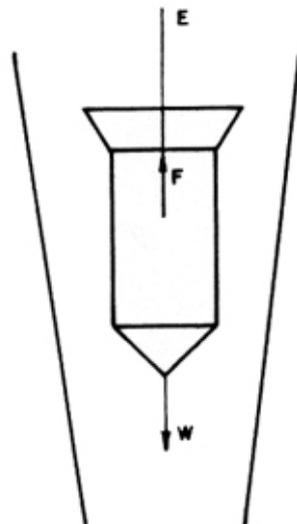


Fig. 34 - Condições de equilíbrio

Para as condições de equilíbrio empregamos as seguintes equações:

$$W = v_f \cdot \gamma_f$$

$$F = v_f \cdot \gamma_l$$

$$E = c_d \cdot \gamma_l \cdot A_f \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$F + E = W$$

Em que:

W = peso do flutuador

$v_f$  = volume do flutuador

$\gamma_f$  = peso específico do flutuador

$\gamma_l$  = peso específico do fluido

F = força de arraste do fluido sobre o flutuador

E = força de empuxo do fluido sobre o flutuador

$C_d$  = coeficiente de arraste do fluido sobre o flutuador

V = velocidade do fluido

$A_f$  = área da seção do flutuador

$A_w$  = seção interior do tubo (livre)

Resolvendo as equações anteriores, temos:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (\gamma_f - \gamma_l)}{c_d \cdot \gamma_l \cdot A_f}}$$

O valor  $C_d$  depende da viscosidade do fluido e da aerodinâmica do flutuador. Por conveniência incorporamos o termo  $\sqrt{\frac{1}{C_d}}$  a este coeficiente de descarga passando a expressão anterior para:

$$V = C_d \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (\gamma_f - \gamma_l)}{\gamma_l \cdot A_f}}$$

Como a vazão é igual a:

$$Q = V \cdot A_w$$

Sendo  $A_w$  = seção interna do tubo resulta:

Vazão em volume

$$Q_v = C_d \cdot A_w \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (\gamma_f - \gamma_l)}{\gamma_l \cdot A_f}}$$

Ou em medidas de peso

$$Q_w = c_d A_w \sqrt{\frac{2g \cdot v_f (\gamma_f - \gamma_l)}{\gamma_l \cdot A_f}}$$

Esta fórmula permite determinar a vazão do fluido que passa através de um rotâmetro conhecido.

### 5.3 - Tipos de Flutuadores

Os flutuadores podem ter vários perfis de construção. Na figura a seguir, podemos ver os tipos mais utilizados.

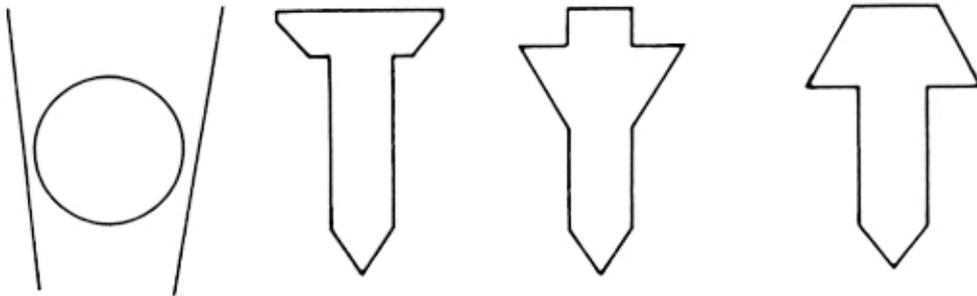


Fig. 35 - Tipos de flutuadores

#### 1 - Esférico

Para baixas vazões, e pouca precisão, sofre uma influência considerável da viscosidade do fluido.

#### 2 - Cilindro com bordo plana

Para vazões médias e elevadas sofre uma influência média da viscosidade do fluido.

#### 3 - Cilindro com bordo saliente de face inclinada para o fluxo

Sofre menor influência da viscosidade do fluido.

#### 4 - Cilindro com bordo saliente contra o fluxo

Sofre a mínima influência da viscosidade do fluido

#### 5.4 - Ponto de Leitura em Função do Formato do Flutuador

Dependendo do formato do flutuador temos um determinado ponto no qual devemos realizar a leitura.

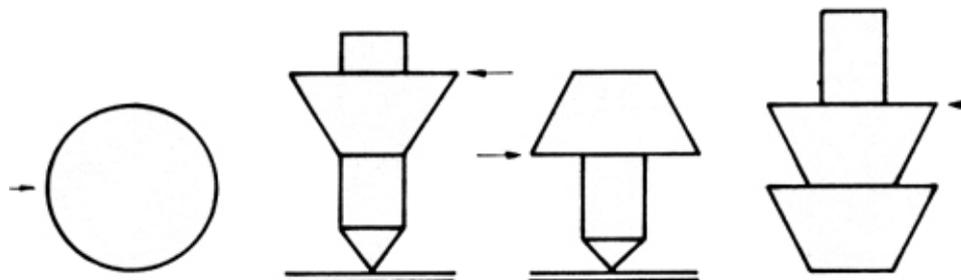


Fig. 36 - Ponto de leitura em função do formato do flutuador

#### 5.5 - Material Flutuador

O material mais empregado nos flutuadores é o aço inoxidável 316, sendo no entanto que na indústria para satisfazer exigências de resistência, corrosão, etc., se utilizam outros materiais também.

As tabelas a seguir mostram os pesos específicos de diversos materiais empregados em flutuadores.

Veja a tabela a seguir:

a) Materiais utilizados em flutuadores e seus pesos específicos

	g/cm <sup>3</sup>
Alumínio	2,72
Bronze	8,78
Durimet	8,02
Monel	8,84
Níquel	8,91
Borracha	1,20
Inox 303	7,92

	g/cm <sup>3</sup>
Inox	8,04
Hastelloy B	9,24
Hastelloy C	8,94
Chumbo	11,38
Tantalo	16,60
Teflon	2,20
Titânio	4,50

b) Materiais utilizados em flutuadores esféricos

	g/cm <sup>3</sup>
Vidro de Borosilicato	2,20
Alumínio	2,72
Safira	4,03
Inox 304	7,92

	g/cm <sup>3</sup>
Inox 316	8,04
Monel	8,64
Carboloy	14,95
Tantalo	16,60

## 5.6 - Perda de Carga no Flutuador

A perda de carga no rotâmetro é constante em todo o percurso do flutuador e pode ser determinada a partir da expressão seguinte:

$$\Delta p = \frac{W_f - v_f \cdot \gamma_1}{A_f}$$

Em que:

$W_f$  = peso do flutuador

$v_f$  = volume do flutuador

$\gamma_1$  = peso específico do flutuador

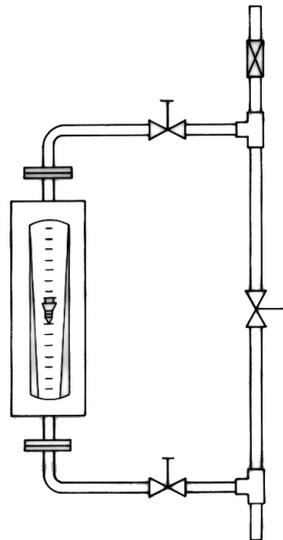
$A_f$  = área transversal máxima

## 5.7 - Instalação

Os rotâmetros são montados verticalmente na tubulação do fluido, cuja vazão se deseja medir, e de maneira tal que o fluido seja dirigido de baixo para cima. Ele pode ser colocado diretamente na tubulação ou em derivação como indicado na figura 37 e que se considera como ideal.

Nela o rotâmetro é instalado numa linha de "by-pass" e um sistema de válvulas é utilizado de tal forma que garanta o funcionamento do processo mesmo que o rotâmetro tenha que ser retirado para limpeza ou manutenção.

Fig. 37 - Rotâmetro instalado em linha



## 6 - MEDIDORES DE VAZÃO TIPO DESLOCAMENTO POSITIVO

### 6.1 - Disco Nutante

Este tipo de medidor é utilizado principalmente para medidores de vazão de água, sendo utilizado principalmente em resistências. O líquido entra no medidor através da conexão de entrada, passa por um filtro indo ao topo da carcaça principal. O fluido então se movimenta para baixo, através da câmara de medição, indo até a base do medidor e daí a conexão da saída do medidor.

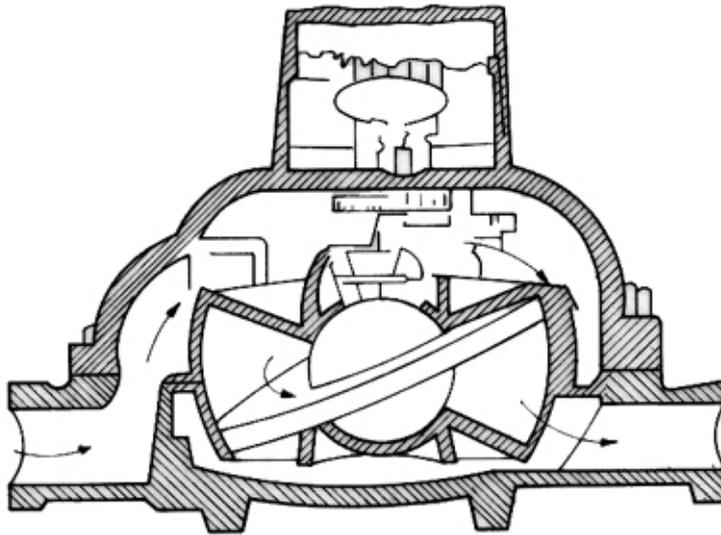


Fig. 38 - Disco Nutante

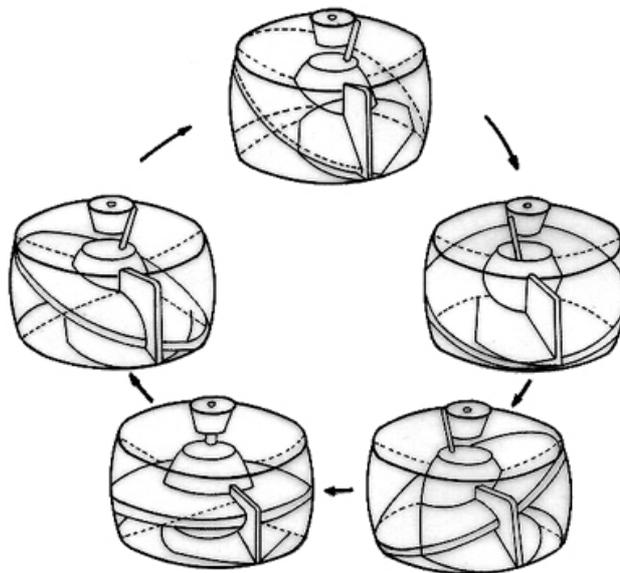


Fig. 39 - Estágios de operação do medidor de vazão tipo Disco Nutante

O movimento do disco é controlado de tal forma que quando o líquido entra na câmara de medição, impele o pistão de medição o qual efetua um movimento de natação completa em

cada rotação. Estes movimentos são transmitidos por um conjunto de engrenagens ou acoplamento magnético ao indicador.

## 6.2 - Medidores Rotativos

Este tipo de medidor de vazão aciona propulsores (rotores) internos. Sendo que sua velocidade de rotação será em função da velocidade do fluido através da câmara de medição.

3 tipos básicos podem ser destacados:

- a) Rotores de lóbulos
- b) Palhetas corrediças
- c) Palhetas Retratil

Os rotores lobulares são os mais utilizados para medições de vazões de gases. Estes dispositivos possuem dois rotores com movimentos opostos com a posição relativamente fixa internamente, a uma estrutura cilíndrica.

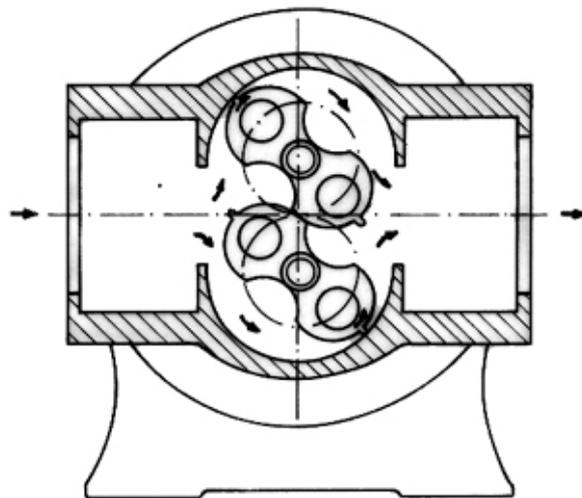


Fig. 40 - Medidor para gás com 2 lóbulos de deslocamento rotativo

A câmara de medição é formada pela parede do cilindro e a superfície da metade do rotor. Estando o rotor na posição vertical em determinado volume de gás ficará retido no compartimento de medição. Como o rotor gira devido a pequena diferença de pressão entre a entrada e saída, o volume medido do gás é descarregado na base do medidor.

Esta ação sucede-se 4 vezes em uma movimentação completa com os rotores em deslocamentos opostos e a uma velocidade proporcional ao volume do gás deslocado.

No medidor por palhetas existem muitas variedades. Palhetas podem ser movidas radicalmente (corrediça) conforme a superfície de uma came ou são articuladas como no tipo retrátil.

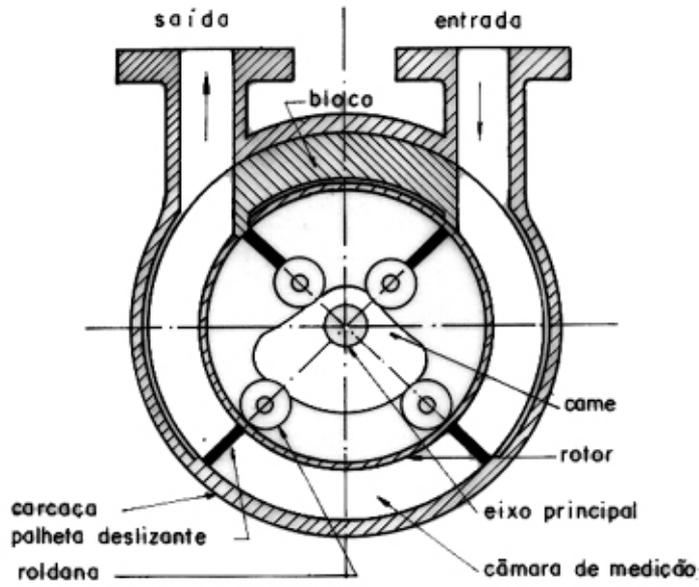


Fig. 41 - Medidor rotativo de palhetas corredeiras

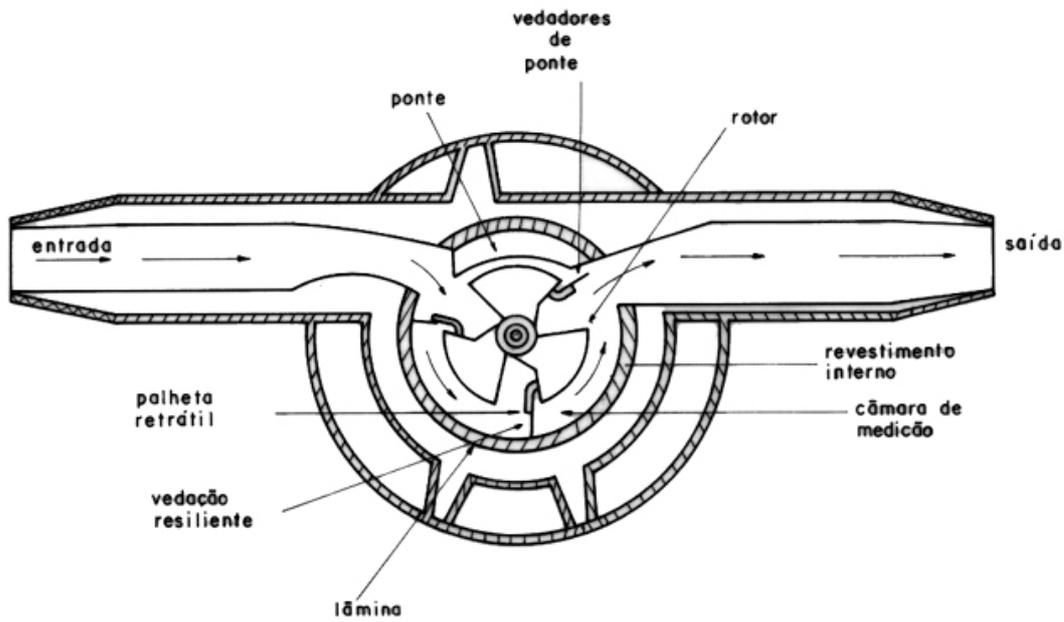
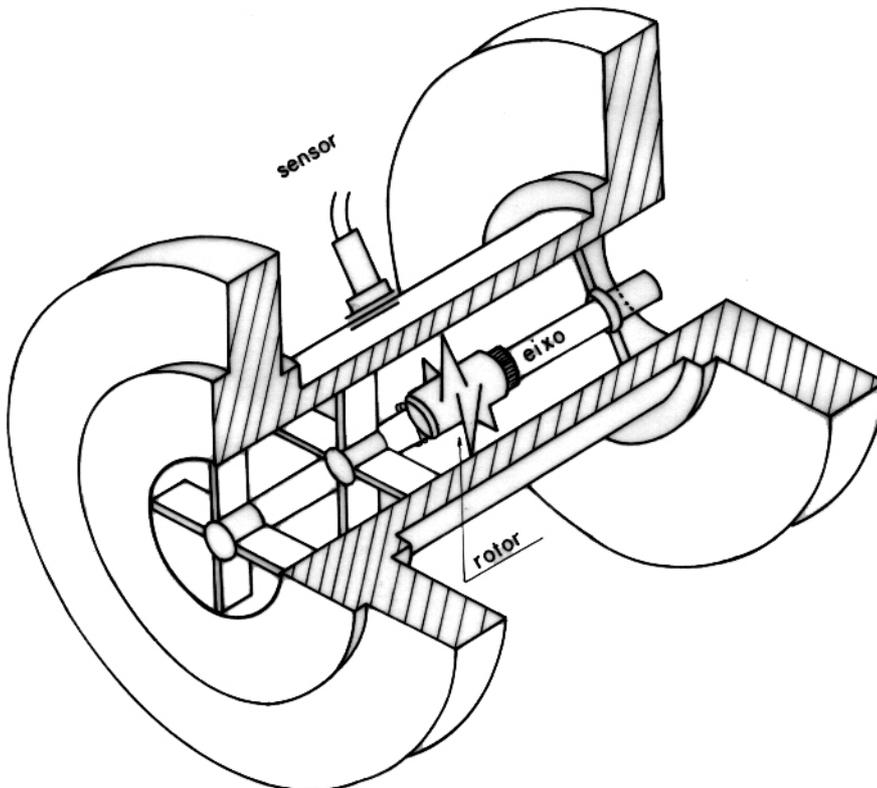


Fig. 42 - Medidor rotativo de palheta retrátil

## 7 - MEDIDORES DE VAZÃO POR IMPACTO DO FLUIDO

### 7.1 - Medidor Tipo Turbina

Um medidor de vazão tipo turbina, conforme a figura a seguir, consiste basicamente de um rotor provido de palhetas, suspenso numa corrente de fluido com seu eixo de rotação paralelo a direção do fluxo. O rotor é acionado pela passagem de fluido sobre as palhetas em ângulo; a velocidade angular do rotor é proporcional à velocidade do fluido que, por sua vez, é proporcional à vazão do volume. Uma bobina sensora na parte externa do corpo do medidor, detecta o movimento do rotor.

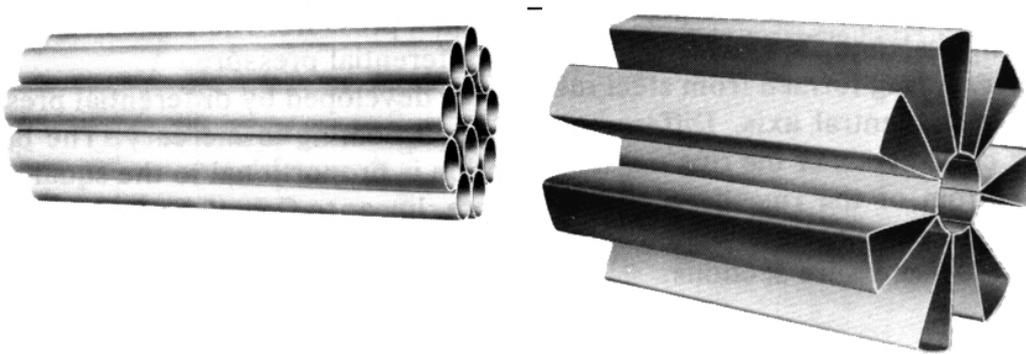


Esta bobina é alimentada, produzindo um campo magnético. Como as palhetas do rotor são feitas de material ferroso, à medida que cada palheta passa em frente à bobina corta o campo magnético e produz um pulso. O sinal de saída é uma seqüência de pulsos de tensão, em que cada pulso representa um pequeno volume determinado de líquido. O sinal detectado é linear com a vazão. Unidades eletrônicas associadas permitem indicar a vazão unitária ou o volume totalizado, podendo efetuar a correção automática da temperatura e/ou pressão e outras funções.

Embora a teoria básica de um medidor a turbina seja muito simples, o projeto detalhado é muito trabalhoso e complexo, o desempenho final depende de numerosos fatores, tais como: ângulo da palheta, o tipo de mancais, o número de palhetas, bem como a usinagem e montagem dentro das tolerâncias rígidas.

Um medidor de turbina corretamente projetado e fabricado tem uma elevada precisão numa faixa de vazão superior a 10:1 e excelente repetibilidade. Ademais, é pequeno e leve (em relação ao tubo) e tem alta capacidade de vazão para um dado tamanho de medidor. A instalação de um medidor de turbina é uma operação mais simples. Por conseguinte, os medidores de turbina são amplamente usados em medições de transferência com fins de faturamento para produtos, tais como: óleo cru, petróleo bruto, gás....

Um medidor de turbina é uma unidade versátil: possui uma faixa de pressão e temperatura muito ampla., e uma vez que o mesmo é fabricado em aço inoxidável, é compatível com uma ampla faixa de fluidos. Estes, todavia, devem ser relativamente limpos, não ter alta viscosidade e a vazão deve ser em regime laminar.



#### Linearizadores de fluidos

Para estes medidores é muito importante a linearização da vazão, acima temos dois exemplos de linearizadores que são instalados dentro da tubulação.

#### a) Fator do Medidor

O número de pulsos por unidades de volume é denominado “Fator do Medidor”.

$$\text{Fator de medidor} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de pulsos}}{\text{volume}}$$

Como exemplo podemos citar:

Se uma turbina gera 15.000 pulsos quando tivermos escoando pela mesma 3,0 m<sup>3</sup> de um produto qualquer, seu fator será:

$$\text{Fator de medidor} = \frac{15.000}{3,0} = 5.000 \text{ pulsos/m}^3$$

## 8 - MEDIDORES ESPECIAIS

Os medidores de vazão tradicionais apresentam algumas limitações como: seus sensores primários precisam ser submersos no fluxo a ser controlado, estas características tem a desvantagem de produzir perda de pressão na linha como também o acúmulo de partículas ou impurezas no sensor, proporcionando resultados incertos de medição. Os medidores de vazão do tipo especial objetivam superar exatamente essas limitações.

### 8.1 - Medidor de Vazão por Eletromagnetismo

O princípio de medição é baseado na lei de Faraday que diz que:

*“Quando um condutor se move dentro de um campo magnético, é produzida uma força eletromotriz (f.e.m.) proporcional a sua velocidade.”*

Vamos supor que nós temos um campo magnético, com densidade de fluxo magnético igual a B (gauss), aplicado a uma seção de uma tubulação com diâmetro D (cm).

Se a velocidade média do fluido que passa pela tubulação é igual a V (cm/seg), quando colocamos um par de eletrodos em uma posição perpendicular ao fluxo magnético, teremos uma força eletromotriz E(V) induzida nestes eletrodos, e a sua amplitude dada por:

$$E = B \cdot D \cdot V$$

A figura ilustra a disposição física dos componentes do medidor em uma tubulação.

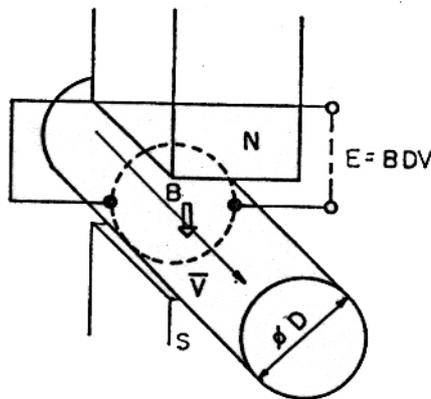


Fig. 44 - Medidor de vazão eletromagnético

B → Densidade do fluxo magnético [ weber/m<sup>2</sup>]

D → Distância entre os eletrôdos [m]

V → Velocidade do fluxo [m/s]

E → Tensão induzida [Volts]

Como nós sabemos a vazão (Q) de um fluido em um tubo é dada por:

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

Tirando o valor da velocidade (V) da equação acima e substituindo na equação anterior. Teremos a vazão (Q) dada em função da densidade de fluxo magnético (B), força eletromotriz induzida (E) e o diâmetro da tubulação.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{E}{B} \right) \cdot D$$

Como podemos observar pela equação, variações na densidade de fluxo magnético (B) provoca erro direto no valor de vazão (Q).

A influência das variações de (B) no sinal de vazão (Q) é eliminada pelo transmissor, que também amplifica o microsinal que vem do detector de modo que esse sinal possa operar os instrumentos de recepção.

O medidor de vazão eletromagnético utiliza um campo magnético com forma de onda quadrada em baixa frequência, e lê o sinal de vazão quando o fluxo magnético está completamente saturado fazendo com que não ocorra influência no sinal devido a flutuações de corrente.

Todos os detectores são ajustados de maneira que a relação da tensão induzida (E) pela densidade de fluxo magnético (B) seja mantida em um valor proporcional, somente à velocidade média do fluxo, independente do diâmetro, alimentação e frequência.

*Observações:*

- 1 - É de suma importância que a parede interna da tubulação não conduza eletricidade e que a parte do tubo ocupada pelo volume definido pelas bobinas não provoque distorções no campo magnético.
- 2 - As medições por meio de instrumentos magnéticos são independentes de propriedades do fluido, tais como a densidade, a viscosidade, a pressão, a temperatura ou mesmo o teor de sólidos.
- 3 - Que o fluxo a ser medido seja condutor de eletricidade.

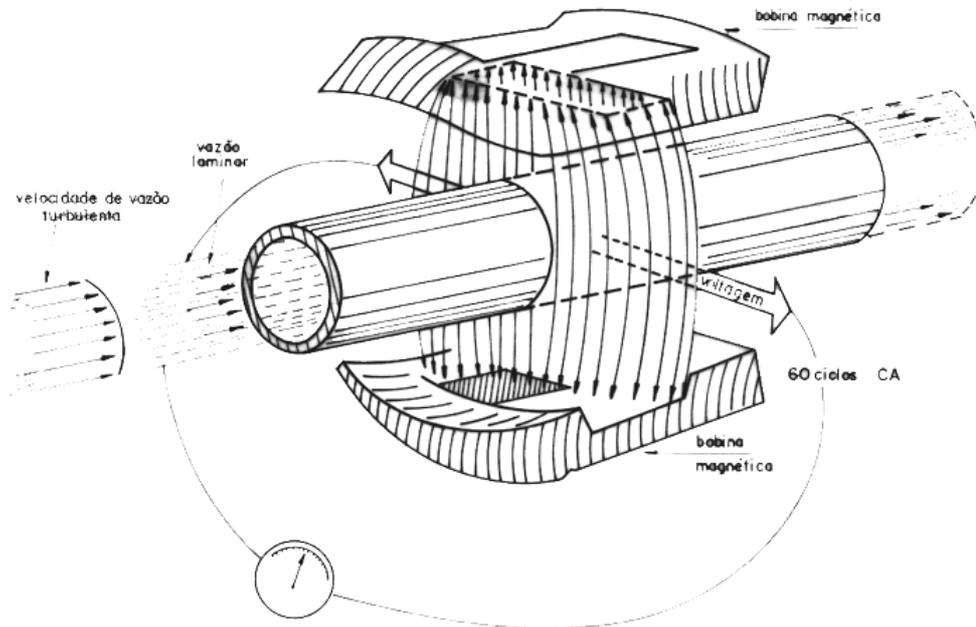


Fig. 45 - Princípio de funcionamento de medidor magnético de vazão

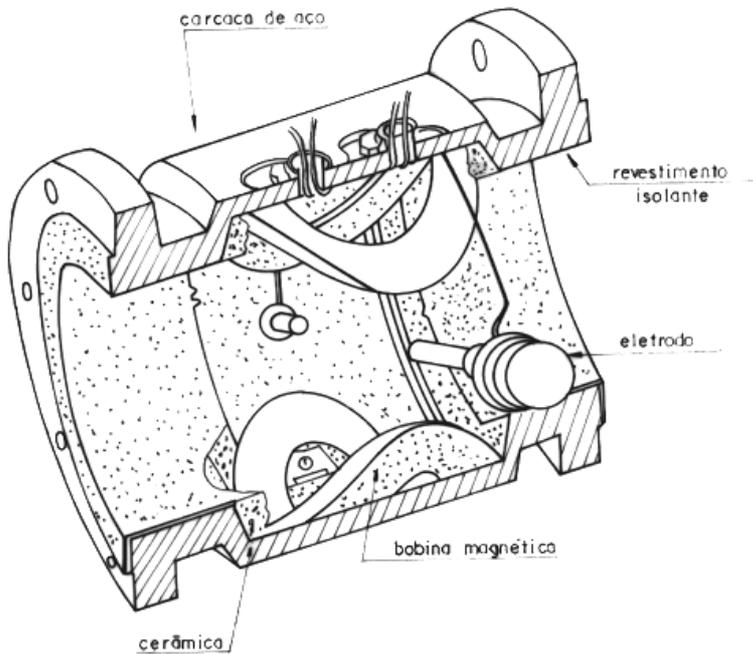


Fig. 46

## 8.2 - Medidor de Vazão por Ultra-som

A técnica de medição de vazão por ultra-som vem adquirindo crescente importância para a medição industrial de vazão de fluidos em tubulações fechadas. Como a medição de vazão ultra-som é feita, geralmente, sem contato com o fluido não há criação de turbulência ou perda de carga, que era causada pelos medidores de vazão como placas de orifício, entre outros. Além disso, possibilita a medição de vazão de fluidos altamente corrosivos, líquidos não condutores, líquidos viscosos .

Além das vantagens já mencionadas, os medidores de vazão ultrasônicos possuem ainda:

- Precisão relativamente elevada (0,5% no fim da escala)
- Maior extensão da faixa de medição com saída linear.
- Apresentam garantia elevada, pois não possuem peças móveis em contato com o fluido não sendo sujeitas a desgaste mecânico.
- Possibilita medição em tubos com diâmetros que vão de 1 a 60 polegadas.
- A medição é essencialmente independente da temperatura, da densidade, da viscosidade e da pressão do fluido.

Entre as desvantagens podemos citar:

- Custo elevado na aplicação em tubos de pequenos diâmetros.

### Tipos de medidores

Basicamente os medidores de vazão por ultra-som podem ser divididos em dois tipos principais.

- Medidores a efeito DOPPLER
- Medidores por tempo de passagem

### Princípio de Funcionamento

O medidor de vazão ultra-sônico se fundamenta no princípio da propagação de som num líquido. A noção que os pulsos de pressão sonora se propagam na água à velocidade do som, vem desde os dias do primeiro desenvolvimento do sonar.

Num medidor de vazão, os pulsos sonoros são gerados, em geral, por um transdutor piezoelétrico que transforma um sinal elétrico em vibração, que é transmitida no líquido como um trem de pulsos.

Quando um pulso ultra-sônico é dirigido a jusante, sua velocidade é adicionada à velocidade da corrente. Quando um pulso é dirigido à montante, a velocidade do impulso no líquido é desacelerada pela velocidade da corrente.

Baseado nessas informações é possível determinar a vazão de fluidos por ultra-som. Vejamos a seguir o princípio de funcionamento dos dois tipos de medidores mencionados.

a) Medição por tempo de passagem

Estes medidores não são adequados para medir fluidos que contém partículas.

Seu funcionamento se baseia na medição da diferença de velocidade de propagação dos pulsos ultra-sônicos, quando aplicados a jusante ou a montante. Essa diferença de velocidade acarreta uma diferença de tempo na passagem dos dois sentidos. A diferença dos tempos de passagem é proporcional à velocidade do fluxo e também à vazão, conhecida a geometria do fluxo. Por esta razão, instalam-se sobre uma tubulação duas unidades transmissoras/receptoras de ultra som (unidades 1 e 2 da figura 47) de tal forma que a sua linha de ligação, de comprimento  $L$ , forme um ângulo  $\alpha$  com o vetor de velocidade de fluxo no tubo (admite-se que a velocidade média de fluxo seja  $\underline{V}$ ).

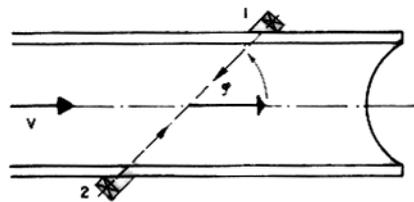


Fig. 47 - Princípio da medição ultra-sônica por tempo de passagem

O tempo de passagem de um sinal ultra-sônico de 2 para 1 no sentido da corrente (a jusante) é de:

$$T_{21} = \frac{L}{c_0 + V \cdot \cos \varphi}$$

No sentido de contracorrente (a montante), o pulso acústico necessita de um tempo maior de passagem, ou seja:

$$T_{12} = \frac{L}{c_0 - V \cdot \cos \varphi}$$

Onde:

$c_0$  = velocidade do som no fluido medido

$L$  = comprimento do feixe medidor

$\varphi$  = ângulo de inclinação do feixe medidor em relação ao vetor de  $\underline{V}$

$V$  = velocidade média do fluido.

A diferença dos tempos de passagem  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_{12} - T_{21}$ ) é proporcional à velocidade do fluxo  $\underline{V}$  bem como à velocidade do som ( $c_0$ ) no fluido. Sendo possível determinar ou compensar a velocidade do som  $c_0$  por outros meios. A diferença do tempo de passagem  $\Delta T$  fica sendo diretamente proporcional à velocidade de fluxo  $\underline{V}$ , e conseqüentemente a vazão  $\underline{QV}$ , desde que os dados geométricos do tubo sejam conhecidos. Na prática,

entretanto, para conseguirmos precisão de medidas da ordem de 1% seria necessário circuitos com velocidade de processamento de sinais muito alta.

Devido a isso foram desenvolvidos processos que permitem detectar a diferença do tempo de passagem  $\Delta T$  com a alta precisão exigida. São eles:

- processo de frequência de repetição de impulso
- medição direta por tempo de passagem

Vejamos rapidamente como funcionam estes 2 processos:

#### a) Processo de Frequência de repetição de impulso

Este método, que foi o primeiro a ser aplicado para medição ultra-sônica de vazão, consiste no seguinte:

- primeiramente um pulso de ultra-som é emitido do cabeçote 2, para o cabeçote 1. O cabeçote 1 acusa o recebimento do sinal e desta forma obtém-se a frequência  $F_2$  da emissão do pulso com a duração periódica de  $1/T_{21}$ .
- Assim que o pulso de ultra-som atinge o cabeçote 1, este, através de um pulso de disparo emite novo pulso em direção oposta. Desta forma obtém-se a frequência  $F_1$  da reflexão do pulso com duração periódica de  $1/T_{12}$ .

De posse dos dois valores de frequência podemos determinar a variação entre elas.

$$\Delta F = F_2 - F_1 = \frac{1}{T_{21}} - \frac{1}{T_{12}}$$

$$\Delta F = \frac{C_0 + V \cdot \cos \varphi}{L} - \frac{C_0 - V \cdot \cos \varphi}{L}$$

$$\Delta F = \frac{2 \cdot (\cos \varphi) \cdot V}{L} = K \cdot V$$

Onde:

$$K = \frac{2 \cdot (\cos \varphi)}{L} \text{ que é uma constante do medidor}$$

Neste método, portanto, a medição de cada um dos tempos de passagem é transformada em uma medição de diferença de frequência que, no ponto de vista técnico, oferece inicialmente maior facilidade de processamento. A diferença de frequência  $\Delta F$  é linearmente proporcional à velocidade do fluxo na tubulação e, com isso, diretamente proporcional a vazão, não dependendo mais da velocidade do som ( $C_0$ ) no fluido medido.

#### b) Medição direta de tempo de passagem

Também neste sistema o primeiro passo é a emissão de um sinal de ultra-som do cabeçote 2 para o cabeçote 1 e a conseqüente medição do tempo de passagem  $T_{21}$ . Assim que esse pulso é captado pelo receptor 1, ocorre a emissão de um sinal no sentido contrário, do cabeçote 1 para o 2, sendo então medido o tempo de passagem  $T_{12}$ , e assim por diante.

A figura 48 ilustra os dois tempos de propagação:

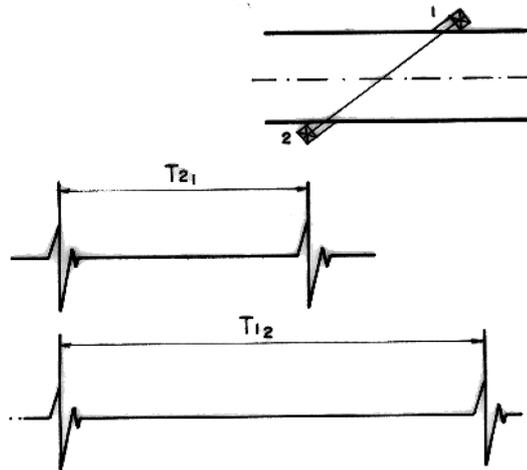


Fig. 48 - Princípio da medição direta por tempo de passagem

Desta forma tem-se que:

$$\Delta T = T_{21} - T_{12} = \frac{2 \cdot L \cdot V \cos \varphi}{Co^2 + V^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

Como o valor de  $Co$  para fluido é de aproximadamente 10.000 m/s, o termo

$V^2 \cos^2 \varphi$

pode ser desprezado em relação a  $Co^2$ . Logo, temos que:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot L \cdot V \cos \varphi}{Co^2}$$

Por outro lado, no caso de  $V = 0$  m/s, tem-se que:

$$T_{21} + T_{12} = \frac{L}{Co} + \frac{L}{Co} = \frac{2L}{Co}$$

Logo:

$$Co = - \frac{2L}{T_{21} + T_{12}}$$

Substituindo Co na equação, temos:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot L \cdot V \cdot \cos \phi}{\left( \frac{2L}{T_{21} + T_{12}} \right)^2}$$

$$\Delta T = V \cdot \frac{\cos \phi}{2L} \cdot (T_{21} + T_{12})^2$$

Ou então:

$$V = K \cdot \frac{\Delta T}{(T_{21} + T_{12})}$$

Sendo:

$$K = \frac{2L}{\cos \phi} = \text{constante do medidor}$$

Assim sendo, podemos verificar que o tempo de passagem é direta e linearmente proporcional apenas à velocidade do fluxo, tornando-se independente da velocidade do som (Co) no fluido medido.

Os medidores de vazão que operam pelo processo de tempo de passagem, podem ser utilizados em tubulações com diâmetros nominais de 25 a 3.000 mm.

#### b) Medidores a efeito DOPPLER

A freqüência de uma onda sofre alterações quando existe movimento relativo entre a fonte emissora e um receptor. A variação da freqüência em função da velocidade é chamada de efeito DOPPLER.

Quando uma partícula refletora se movimenta em relação a um receptor igualmente estacionário. A variação da freqüência é proporcional a velocidade relativa entre emissor e o receptor, ou seja, entre a partícula refletora e o receptor (figura 49).

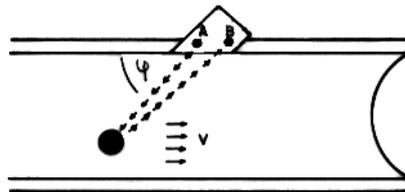


Fig. 49 - Princípio da medição Doppler

Embora à primeira vista pareça um tanto complicado, o efeito DOPPLER encontra múltiplas aplicações na vida diária. O controle de tráfego por radar, por exemplo, utiliza este efeito, servindo o veículo como refletor. O deslocamento de frequência entre o sinal emitido e refletido é proporcional à velocidade do veículo verificado. Este processo pode servir igualmente para a medição da velocidade média do fluxo e, conseqüentemente, da vazão em uma tubulação, desde que o fluido a medir contenha partículas refletoras em quantidade suficiente, tais como sólidos ou bolhas de gás, e desde que a distribuição destas partículas dentro do fluido permitirá conclusões quanto à velocidade média do fluxo.

Vejam agora, como é feita esta medição. O emissor e o receptor de ultra-som acham-se alojados lado a lado, dentro de um cabeçote medidor. O sinal de medição com frequência e amplitude constantes, é transmitido do emissor para o vetor  $\underline{V}$ , da velocidade do fluxo, no ângulo  $\varphi$ . A posição do emissor e do receptor é ajustado de tal forma que suas características direcionais formem um ângulo  $\varphi$ .

Quando o sinal emitido incide numa partícula conduzida pelo fluxo, a reflexão faz sua frequência alterar-se em:

$$\Delta F = 2 f_o \cdot \frac{\cos \varphi}{C_o} \cdot V$$

Onde:

$f_o$  = frequência de emissão

$\varphi$  = ângulo de entrada do feixe

$C_o$  = velocidade do som no fluido medido

$V$  = velocidade média do fluxo

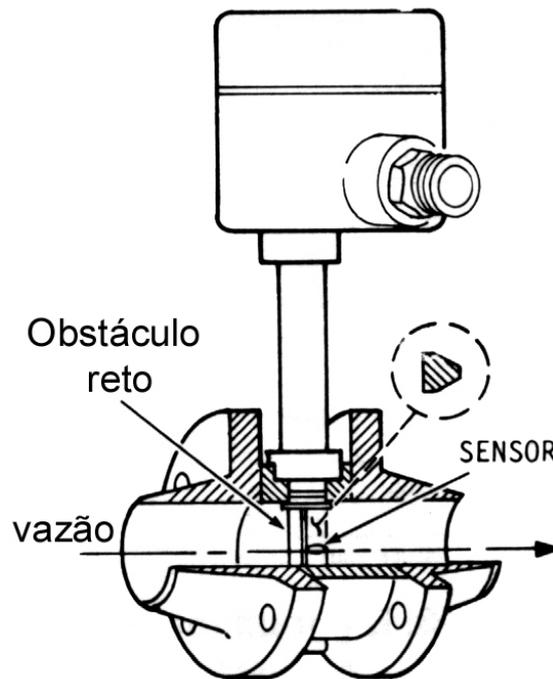
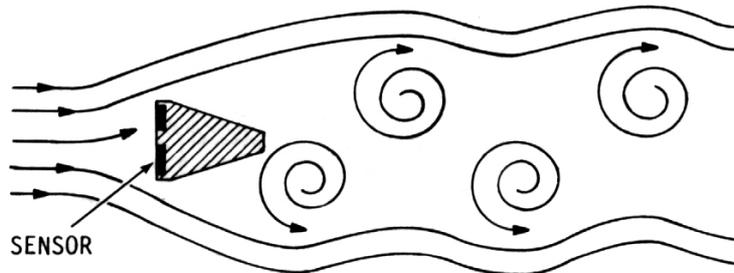
Desta forma temos que a variação de frequência  $\Delta F$  é diretamente proporcional a velocidade do fluido e conseqüentemente à vazão.

A utilização do método de medição por efeito DOPPLER implica em uma concentração mínima de 5% de partículas refletoras ou bolhas de ar dentro da corrente do fluido.

Alterações na concentração de partículas não exercem influência sobre o resultado da medição.

### 8.3 – Medidores tipo VORTEX

O efeito vortex pode ser observado no vibrar de fios ou cordas ao vento, ou ainda em uma bandeira que tremula. Os vortex gerados repetem-se num tempo inversamente proporcional à vazão.



Transmissor de vazão Vortex

Nas aplicações industriais pode-se medir a vazão de gases, líquidos incorporando ao obstáculo reto sensores que percebam as ondas dos vortex e gerem um sinal em frequência proporcional à vazão.

#### 8.4 – Medição de Vazão em Canal Aberto

A maior parte das instalações para medição de vazão implicam medições de vazão de fluidos que circulam através de tubulações fechadas, porém existe um número de aplicações cada vez maior, que precisam a medição de vazão de água através de canais abertos.

A medição de vazão em canais abertos, está intimamente associada aos sistemas hidráulicos, de irrigação, tratamento de esgotos e resíduos industriais, processos industriais, etc. Em muitos casos, essa medição se depara com problemas, tais como: líquidos corrosivos, viscosos, extremamente sujos, espumas, etc. Estas condições poderão fornecer informações errôneas, com a utilização dos antigos sistemas mecânicos de medidores de vazão.

Devido a necessidade imperiosa de melhor controle na poluição dos rios, esgotos, etc., os seguintes fatores passaram a ser críticos na escolha de um sistema de vazão:

1. Precisão
2. Baixos custos de manutenção

A medição de vazão em canais abertos necessitam de um elemento primário que atue diretamente no líquido sob medição e produza uma altura de líquido variável, que é medida por um instrumento de nível. Assim sendo, conhecida a área de passagem do fluido (determinada pelo perfil do dique) a altura do líquido sobre o bordo inferior do dique, é transformada em unidades de peso ou volume, segundo o requerido.

Os sistemas clássicos, utilizam bóias, transmissores de pressão, capacitância, borbulhadores, ultra-som, etc. Todos esses sistemas, apesar de apresentarem vantagens, perdem muito em precisão quando os líquidos medidos não são perfeitamente uniformes e limpos.

O sistema baseado na admitância dos líquidos, supera todos os inconvenientes acima indicados. Para operação, basta simplesmente fixar em uma calha, ou parede onde se mede a vazão, um elemento sensor.

Este, interliga-se por fios a um sistema eletrônico remoto.

O elemento primário mais utilizado é a calha Parshall cuja faixa de medição varia de 0 a 2.000 m<sup>3</sup>/min.

A figura 50, mostra o desenho construtivo de uma calha Parshall cujas dimensões são padronizadas a partir do tamanho da garganta (W) e encontrada em tabelas.

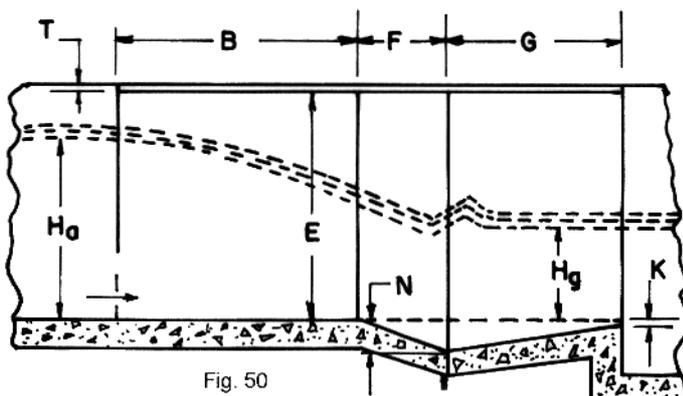
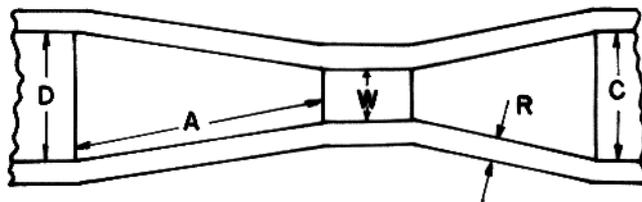


Fig. 50

Vista superior e vista lateral

Tabela - Dimensões de calha Parshall em polegada.

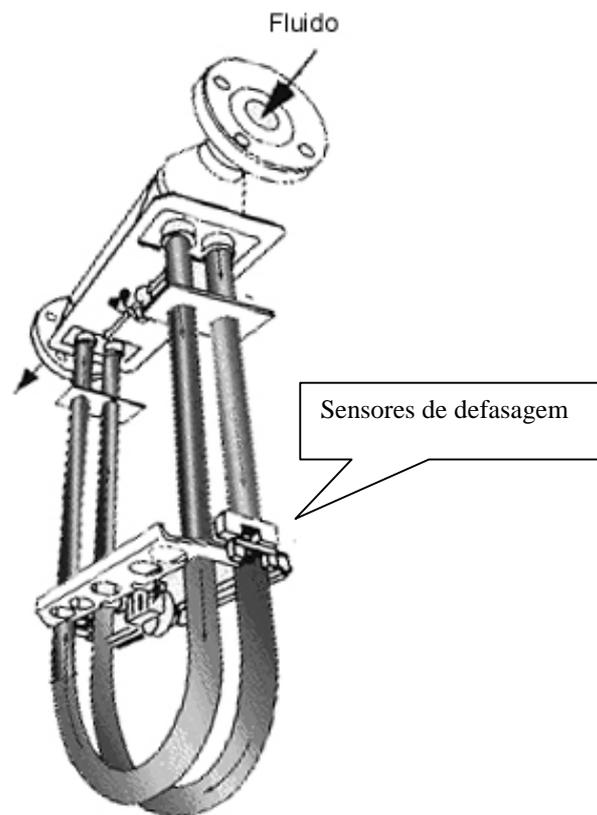
W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	T	R	Peso	Tolerância W
3	18 3/8	18	7	10 1/8	24	6	12	1	2 1/4	3/16	3/4	85	1/64
6	24 7/16	24	15 1/2	15 5/8	24	12	24	3	4 1/2	1/4	1	110	1/32
9	34 5/8	34	15	22 5/8	30	12	18	3	4 1/2	1/4	1	175	1/16
12	54	53	24	33 1/4	36	24	36	3	9	1/4	2 1/2	270	1/16
18	57	56	30	40 3/8	36	24	36	3	9	1/4	2 1/2	480	1/16
24	60	59	36	47 1/2	36	24	36	3	9	1/4	2 1/2	690	3/32
36	66	64 3/4	48	61 7/8	36	24	36	3	9	1/4	2 1/2	880	3/32
48	72	70 5/8	60	76 1/4	36	24	36	3	9	1/4	2 1/2	1100	3/32
60	78	76 1/2	72	90 5/8	36	24	36	3	9	3/8	2 1/2	1500	3/32
72	84	82 3/8	84	105	36	24	36	3	9	3/8	2 1/2	1800	3/32
84	90	88 1/4	96	119 3/8	36	24	36	3	9	3/8	2 1/2	2000	3/32
86	96	94 1/8	108	133 3/4	36	24	36	3	9	3/8	2 1/2	2100	3/32
120	—	168	144	187 1/4	48	36	72	6	13 1/2	3/8		3800	3/32

## 8.5 – Medidor tipo Coriolis

Este medidor de vazão utiliza um fenômeno físico que envolve a inércia e a aceleração centrípeta.

A vazão de uma tubulação é dividida em duas por dois tubos paralelos que possuem forma de “U”, e ao fim destes tubos a vazão volta a ser conduzida por um único tubo.

Próximo da parte inferior de cada “U” existem eletroímãs que fazem os dois tubos oscilarem em suas frequências naturais de vibração e cuja amplitude não ultrapassa alguns milímetros. Com o passar de fluido pelos tubos, em função desta oscilação, surge uma torção nos tubos cuja defasagem permite a medição da vazão mássica. Esta defasagem é medida por sensores magnéticos instalados nas partes retas dos tubos em



“U”.

Este tipo de medidor pode ser utilizado para medições de fluxos de líquidos e gases, com ou sem sólidos em suspensão.

---

## EXERCÍCIOS DE INSTRUMENTAÇÃO

- 1) Faça as seguintes conversões:
  - a) 12 m<sup>3</sup>/h para l/h
  - b) 30 l/h para GPM
  - c) 2 m<sup>3</sup>/h para cm<sup>3</sup>/h
  - d) 5 cm<sup>3</sup>/h para m<sup>3</sup>/s
  - e) 15 kg/s para Lb/h
- 2) Para que serve o número de Reynolds
- 3) Qual a diferença entre vazão em regime laminar e vazão em regime turbulento?
- 4) Cite vantagens e desvantagens do Tubo de Venturi frente a Placa de Orifício.
- 5) Qual tipo de orifício deve ser utilizado em líquidos com alto grau de sólidos em suspensão?
- 6) Cite 3 medidores de vazão para cada tipo abaixo:
  - a- vazão volumétrica
  - b- perda de carga constante
- 7) Em quais tipos de medidores de vazão se deve utilizar extratores de raiz quadrada no sinal de medição ? Por que?
- 8) Qual o motivo de se estabelecer um ponto de corte nos extratores de raiz quadrada ?
- 9) Qual a aplicação dos integradores de vazão ?
- 10) Por que os rotâmetros são considerados medidores de perda de carga constante ?
- 11) Cite vantagens, desvantagens e cuidados na instalação dos rotâmetros:
- 12) Cite 3 tipos de medidores de vazão por deslocamento positivo:
- 13) Cite 3 medidores de vazão que poderiam ser utilizados nas seguintes condições:
  - Fluido: água
  - Temp: 45°C
  - Sem sólidos em suspensão
  - Vazão : 0~700 l/h
  - Pressão: 2kgf/cm<sup>2</sup>
- 14) Cite quais tipos de medidores não apresentam perda de carga, e como funcionam :

- 15) Podemos utilizar os medidores de vazão eletromagnéticos para medir vazões de gás de exaustão? Por que?
- 16) Podemos utilizar medidores de vazão por ultra-som para medir vazões de líquidos totalmente limpos? Por que?
- 17) Cite vantagens e desvantagens entre os medidores de vazão por ultra-som e por eletromagnetismo:
- 18) Para medição de vazão sem perda de carga (queda de pressão), quais poderiam ser os medidores utilizados?
- 19) Cite 6 tipos de medidores de vazão e marque os que existem nas áreas de sua atuação:
- 21) Como funcionam os medidores de vazão com placa de orifício (RO) ?
- 22) O que são vazão volumétrica e vazão mássica ? Cite exemplos da área:
- 23) Qual o tipo de medidor de vazão por ultra-som pode ser utilizado para medir fluidos com alto grau de sólidos em suspensão?

# MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

## 1 - INTRODUÇÃO

Temperatura é sem dúvida a variável mais importante nos processos industriais, e sua medição e controle, embora difíceis, são vitais para a qualidade do produto e a segurança não só das máquinas como também do homem. Não é difícil de se chegar a esta conclusão, basta verificar que todas características físico-químicas de qualquer substância alteram-se de forma bem definida com a temperatura.

Assim sendo, uma determinada substância pode ter suas dimensões, seu estado físico (sólido, líquido, gasoso), sua densidade, sua condutividade, etc ..., alterados pela mudança conveniente de seu estado térmico.

Então, qualquer que seja o tipo de processo, a temperatura afeta diretamente o seu comportamento provocando, por exemplo:

- ritmo maior ou menor na produção
- uma mudança na qualidade do produto
- um aumento ou diminuição na segurança do equipamento e/ou do pessoal
- um maior ou menor consumo de energia
- e, por conseguinte, um maior ou menor custo de produção.

## 2 - CONCEITO DE TEMPERATURA

Ainda que a temperatura seja uma propriedade bastante familiar, é difícil encontrar-se uma definição exata para ela. Estamos acostumados à noção de “temperatura” antes de mais nada pela sensação de calor ou frio quando tocamos um objeto. Além disso, aprendemos logo, por experiência, que ao colocarmos um corpo quente em contato com um corpo frio, o corpo quente se resfria e o corpo frio se aquece. Se esses corpos permanecem em contato por um determinado tempo, eles parecerão ter o mesmo grau de aquecimento ou resfriamento. Entretanto, sabemos que essa sensação não é bastante segura. Algumas vezes os corpos frios podem parecer quentes e os corpos de materiais diferentes, que estão na mesma temperatura, parecem estar a temperatura diferentes.

Isto acontece porque a temperatura é uma propriedade de matéria que está relacionada com o movimento dos átomos de uma substância. Normalmente estes átomos possuem uma determinada energia cinética que se traduz nas formas de vibrações ou deslocamento para os líquidos e gases.

Quanto mais rápido o movimento das moléculas, mais quente se encontra o corpo, e, quanto mais lento o movimento, mais frio se apresenta o corpo. Esta condição pode ser descrita como um potencial térmico ou como uma energia efetiva da substância (energia cinética).

Baseado nisto podemos conceituar a temperatura como sendo: “A propriedade da matéria que reflete a média de energia cinética de um corpo”.

Na prática a temperatura é representada em uma escala numérica, onde, quanto maior o seu valor, maior é a energia cinética média dos átomos do corpo em questão.

### 3 - ESCALAS DE TEMPERATURA

Desde o início da termometria, os cientistas, pesquisadores e fabricantes de termômetro sentiam dificuldades para atribuir valores de forma padronizada à temperatura por meio de escalas reproduzíveis. Essa dificuldade fez com que se buscasse pontos nos quais se pudesse reproduzir de forma definida os valores medidos. Muitas escalas baseadas em pontos diferentes foram desenvolvidas ao longo do tempo. Dentre elas as mais importantes foram a Fahrenheit, a Celsius, a Rankine e a Kelvin.

A escala Fahrenheit é, ainda, utilizada nos Estados Unidos e em parte da Europa. Porém, a tendência é de se usar exclusivamente nos processos industriais de todo o mundo a escala Celsius.

A escala Rankine e a escala Kelvin, que são as escalas absolutas, são mais usadas nos meios científicos, sendo que atualmente usa-se quase que exclusivamente a escala Kelvin.

#### 3.1 - Escala Celsius

A escala Celsius é definida como sendo o intervalo de temperatura unitário igual a 1 Kelvin, numa escala de temperatura em que o ponto 0 (zero) coincida com 273,15 K.

A identificação de uma temperatura na escala Celsius é feita com o símbolo “°C” colocado após o número; exemplo: 245,36°C.

A escala Celsius tem como valor 0 (zero) o ponto de fusão de gelo e como valor 100 o ponto de ebulição da água sendo estes pontos tomados na condição de pressão igual a 1 atm.

É uma escala relativa obtida através da escala Kelvin, sendo esta relação definida pela equação.

$$t = T - T_0$$

Onde:

t = temperatura em °C

T = temperatura em K

T<sub>0</sub> = 273,15 K

### 3.2 - Escala Fahrenheit

A escala Fahrenheit é definida como sendo o intervalo de temperatura unitário igual a 1 grau Rankine, numa escala em que o ponto zero coincide com 459,67° R. A identificação de uma temperatura na escala Fahrenheit é feita com o símbolo “°F” colocado após o número; exemplo: 23,40°F.

A escala Fahrenheit tem como ponto de fusão do gelo o valor 32 e como ponto de ebulição da água o valor 212, sendo estes pontos tomados na condição de pressão igual a 1 atm. Esta escala é também relativa, obtida pela escala Rankine conforme a relação definida pela equação abaixo:

$$t_f = T' - T'_o$$

Onde:

$t_f$  = temperatura em °F

$T'$  = temperatura em °R

$T'_o$  = 459,67 °R

### 3.3 - Escala Kelvin (Temperatura Termodinâmica)

A temperatura básica é a temperatura termodinâmica (T), cuja unidade é o Kelvin (K), que é uma escala absoluta.

O Kelvin é a fração 1/273,16 temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Nota-se que, de acordo com a definição acima e a equação ( $t = T - 273,15$  K), o ponto triplo da água ocorre à 0,01°C (à pressão de 611,652 Pa).

$$K = 273,15 + ^\circ C$$

*Observação:*

Ponto triplo é o ponto em que as fases sólida, líquida e gasosa encontram-se em equilíbrio, (fig. 01).

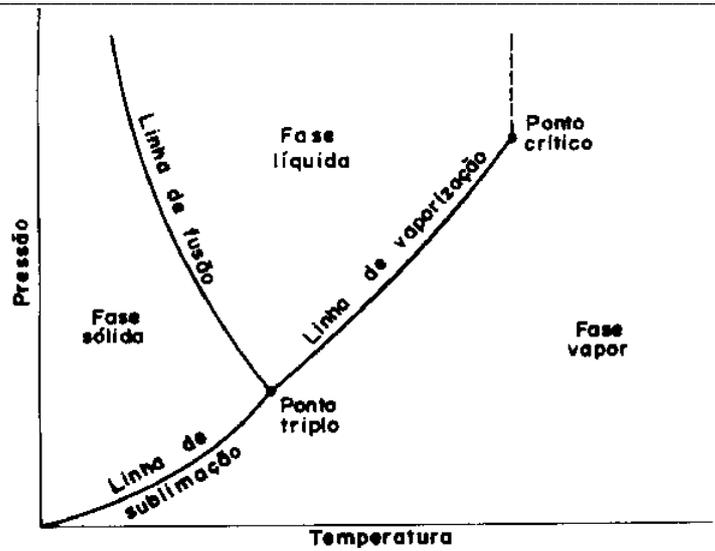


Fig. 01 - Diagrama pressão-temperatura para mudança de estado físico da água

### 3.4 - Escala Rankine

Assim como a escala Kelvin, a escala Rankine é uma escala absoluta, tendo como zero absoluto, o valor 0 (zero), porém ao ponto de fusão e ao ponto de ebulição da água foram dados os valores de 491,67 e 671,67, respectivamente.

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67$$

### 3.5 - Conversão de Escalas

A figura abaixo compara as principais escalas de temperatura.

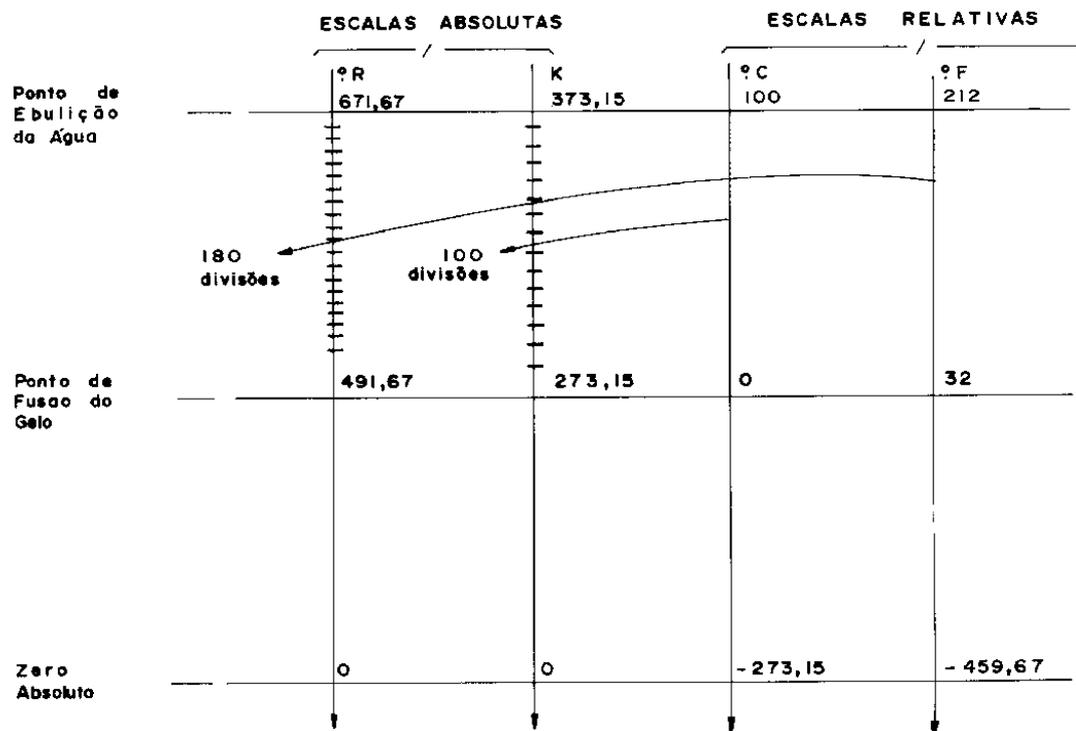


Fig. 02 - Comparação entre as escalas de temperatura

Desta comparação podemos retirar algumas relações básicas entre as escalas, colocando em um mesmo ambiente quatro termômetros: um Celsius, um Fahrenheit, um Kelvin e um Rankine.

As diferentes leituras representam, em escalas diversas, uma mesma temperatura.

A equação abaixo, nos permite relacionar a leitura de uma escala para outra, de uma mesma temperatura.

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{K - 273,15}{5} = \frac{R - 491,67}{9}$$

### 3.6 - Escala Internacional de Temperatura

Em 1968, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas adotou uma Escala Internacional de temperatura revista, a IPTS-68, que é descrita a seguir. Essa escala, semelhante às anteriores, de 1927 e 1948, teve sua faixa aumentada e se aproxima ainda mais da escala termodinâmica de temperatura. Baseia-se em alguns pontos fixos facilmente reprodutíveis, que recebem valores numéricos de temperatura definidos e em certas fórmulas que relacionam as temperaturas às leituras de determinados instrumentos de medição de temperatura, para fins de interpolação entre os pontos fixos.

Os pontos fixos principais e em resumo das técnicas de interpolação são dados a seguir:

Principais Pontos Fixos	T (°C)
1) Ponto triplo (equilíbrio entre fases sólida, líquida e vapor) do hidrogênio	- 259,34
2) Ponto de vaporização (equilíbrio entre fases líquida e vapor) do hidrogênio à pressão de 250 mmHg	- 256,108
3) Ponto de vaporização normal (pressão de 1 atm) do hidrogênio	- 252,87
4) Ponto de vaporização normal de neon	- 246,048
5) Ponto triplo do oxigênio	- 218,789
6) Ponto de vaporização normal do oxigênio	- 182,962
7) Ponto triplo da água	0,01
8) Ponto de vaporização normal da água	100
9) Ponto de solidificação normal (equilíbrio entre as fases sólida e líquida à pressão de 1 atm) do zinco	419,58
10) Ponto de solidificação normal da prata	961,93
11) Ponto de solidificação normal do ouro	1.064,43

Os meios disponíveis para medição e interpolação levam à divisão da escala de temperatura em quatro faixas:

- 1) A faixa de - 259,34 °C - é baseada nas medições com um termômetro de resistência de platina. Essa faixa é subdividida em 4 partes. Em cada uma, a diferença entre as razões das resistências medidas de um termômetro particular e a função de referência nos pontos fixos é usada para determinar as constantes numa equação de interpolação polinomial especificada.
- 2) A faixa de 0° a 630,74 °C - (ponto normal de solidificação do antimônio, que é um ponto fixo secundário) também é baseada num termômetro de resistência de platina, com as

constantes numa equação de interpolação polinomial determinadas por calibração nos 3 pontos fixos da faixa.

- 3) A faixa de 630,74 °C a 1.064,43 °C - é baseada em medições de um termopar padrão de platina e platina rhodio e uma equação de 3 termos que expressa a força eletromotriz como função de temperatura. As constantes são determinadas por uma medição com um termômetro de resistência de platina no ponto da solidificação do antimônio e por calibração nos dois pontos fixos principais da faixa.
- 4) A faixa acima de 1.064,43 °C - é baseada em medições de intensidade da radiação no espectro visível, comparada com aquela de mesmo comprimento de onda no ponto de fusão do ouro e na equação de Planck para radiação do corpo negro, (através do pirômetro óptico).

Existem várias equações que relacionam a temperatura e a propriedade termométrica utilizada nestes instrumentos (resistência elétrica, FEM termoelétrica e energia radiante). Através do uso destas equações pode-se determinar com precisão a temperatura em que se encontra um determinado corpo de prova.

Esta escala de temperatura é transferida para outros instrumentos de utilização mais simples, mantendo-se o erro dentro de faixas bastante estreitas.

Em princípio, de uma forma indireta, todo termômetro usado, na prática, tem a sua calibração relacionada à escala internacional de temperatura.

### 3.7 - Exercícios de Conversão

- 1) Um termômetro calibrado em Kelvin é instalado em um tanque. Sua escala indica 335K. Determinar esta temperatura em °R.

Solução:

$$T (^{\circ}\text{R}) = \frac{9}{5} T (\text{K})$$

$$T (^{\circ}\text{R}) = \frac{9}{5} (335\text{K})$$

$$T (^{\circ}\text{R}) = 603 ^{\circ}\text{R}$$

- 2) Exprimir a temperatura do ponto triplo do oxigênio (dado em °C) em:

a) K; b) °F; c) °R

Solução:

$$T (^{\circ}\text{C}) = - 218,789 ^{\circ}\text{C}$$

$$\text{a) } T (\text{K}) = T (^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

$$T (K) = - 218,789 + 273,15$$

$$T (K) = 54,361 K$$

$$b) T ({}^{\circ}F) = \frac{9}{5} T ({}^{\circ}C) + 32$$

$$T ({}^{\circ}F) = \frac{9}{5} (- 218,789) + 32$$

$$T ({}^{\circ}F) = - 361,82 {}^{\circ}F$$

$$c) T ({}^{\circ}R) = \frac{9}{5} x T$$

$$T ({}^{\circ}R) = \frac{9}{5} x (T ({}^{\circ}C) + 273,15)$$

$$T ({}^{\circ}R) = \frac{9}{5} x (- 218,789 + 273,15)$$

$$T ({}^{\circ}R) = \frac{9}{5} x (54,361)$$

$$T ({}^{\circ}R) = 97,8498 {}^{\circ}R$$

#### 4 - MEDIDORES DE TEMPERATURA

A temperatura não pode ser determinada diretamente, mas deve ser deduzida a partir de seus efeitos elétricos ou físicos produzidos sobre uma substância, cujas características são conhecidas. Os medidores de temperatura são construídos baseados nesses efeitos.

Podemos dividir os medidores de temperatura em dois grandes grupos, conforme a tabela abaixo:

1º grupo (contato direto)

- Termômetro à dilatação
  - de líquidos
  - de sólido
- Termômetro à pressão
  - de líquido
  - de gás
  - de vapor
- Termômetro a par termoeletrico
- Termômetro à resistência elétrica

2º grupo (contato indireto)

- Pirômetro óptico
- Pirômetro fotoelétrico
- Pirômetro de radiação

O primeiro grupo abrange os medidores nos quais o elemento sensível está em contato direto com o material cuja temperatura se deseja medir. Já no segundo grupo estão os medidores nos quais o elemento sensível não está em contato direto com o material cuja temperatura se deseja medir.

A aplicação dos diversos tipos apresentados depende em cada caso de fatores técnicos e econômicos. Através da tabela a seguir, podemos fazer algumas comparações no aspecto técnico entre o tipo indireto e direto.

**TABELA 1 - Comparação entre medidores de temperatura do tipo contato direto e indireto (não contato)**

	<b>DIRETO</b>	<b>INDIRETO</b>
Condição necessária para medir com precisão	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Estar em contato com o objeto a ser medido.</li> <li>2) Praticamente não mudar a temperatura do objeto devido ao contato do detector.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) A radiação do objeto medido tem que chegar até o detector.</li> </ol>
Característica	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) É difícil medir a temperatura de um objeto pequeno, porque este tem tendência de mudança de temperatura quando em contato com um objeto cuja temperatura é diferente.</li> <li>2) É difícil medir o objeto que está em movimento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Não muda a temperatura do objeto porque o detector não está em contato direto com o mesmo.</li> <li>2) Pode medir o objeto que está em movimento.</li> <li>3) Geralmente mede a temperatura da superfície.</li> <li>4) Depende da emissividade</li> </ol>
Faixa de Temperatura	É indicado para medir temperaturas menores que 1600°C.	É adequado para medir temperaturas elevadas (> -50 °C).
Precisão	Geralmente, $\pm 1\%$ da faixa	Geralmente 3 a 10 °C
Tempo de Resposta	Geralmente grande (> 5min)	Geralmente pequeno (0,3 ~ 3 s)

## 5 - TERMÔMETRO DE DILATAÇÃO DE LÍQUIDO

### Princípio de Funcionamento

Os termômetros de dilatação de líquido baseiam-se na lei de expansão volumétrica de um líquido com a temperatura dentro de um recipiente fechado.

A equação que rege esta relação é:

$$V_t = V_o [1 + \beta_1 (\Delta t) + \beta_2 (\Delta t)^2 + \beta_3 (\Delta t)^3]$$

Onde:

t = temperatura do líquido em °C

t<sub>o</sub> = temperatura de referência do líquido em °C (normalmente 0°C)

V<sub>o</sub> = volume do líquido à temperatura de referência

V<sub>t</sub> = volume do líquido à temperatura t em °C

$\beta_1$ ,  $\beta_2$ , e  $\beta_3$  = coeficiente de expansão do líquido

$\Delta t = t - t_o$

Teoricamente, devido aos termos de segunda e terceira ordem, esta relação não é linear. Porém, estes termos são desprezíveis e na prática consideramos esta relação como linear e utilizamos a equação a seguir.

$$V_t = V_o (1 + \beta \Delta t)$$

### 5.1 - Termômetro de vidro

#### 1) Construção

Este termômetro consta de um bulbo de vidro ligado a um tubo capilar, também de vidro, de seção uniforme e fechado na parte superior. O bulbo e parte do capilar são preenchidos por um líquido sendo que na parte superior do capilar existe uma câmara de expansão para proteger o termômetro no caso da temperatura exceder o seu limite máximo. Sua escala é linear e normalmente fixada no tubo capilar no invólucro metálico.

Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico e o tubo capilar pelo invólucro metálico.

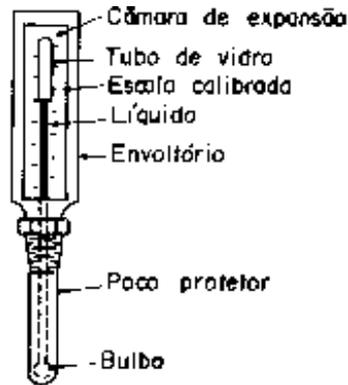


Fig. 03 - Termômetro de vidro industrial

A figura 03 apresenta um tipo de termômetro de vidro utilizado na indústria

### 2) Tipos de líquidos utilizados

Diversos líquidos tais como o mercúrio, tolueno, álcool etílico, pentano, etc., são utilizados na fabricação de termômetro de vidro.

Normalmente emprega-se o mercúrio ou álcool etílico como líquido termométrico, sendo que o mercúrio é o mais utilizado.

A tabela abaixo apresenta a faixa de utilização dos principais líquidos termométricos.

TABELA - Faixa de utilização dos principais líquidos termométricos.

LÍQUIDO	PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO (°C)	PONTO DE EBULIÇÃO (°C)	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Mercúrio	- 39	357	- 38 a 550
Álcool etílico	- 115	78	- 100 a 70
Tolueno	- 92	110	- 80 a 100

Para o caso do mercúrio, cuja faixa normal é de - 38 a 350°C, pode-se elevar este limite até 550°C mediante emprego de vidro adequado e injeção de um gás inerte sob pressão, pois isto faz com que se evite a vaporização do mercúrio.

### 3) Utilização dos termômetros de vidro

Por se tratar de um medidor barato, o termômetro de vidro industrial é utilizado na indicação de temperatura de pequena flutuação, no processo em que a leitura da temperatura no próprio local não se constitui problema, bem como para os casos em que precisão abaixo de  $\pm 1\%$  e resposta rápida não se fizerem necessárias.

#### 4) Recomendações na instalação

- Não utilizar nos pontos em que haja mudanças bruscas de temperatura, pois poderia trincar o capilar de vidro.
- Para evitar erros, devido a temperatura ambiente, o bulbo deverá estar completamente imerso.
- Instalar o bulbo dentro de um poço metálico para proteção mecânica, resistência à corrosão e permitir retirada em operação.
- O bulbo do termômetro deve ser instalado na mesma direção e sentido oposto ao do fluxo, a fim de que a vazão média do fluido seja suficiente para dar uma rápida transferência de calor.

### 5.2 - Termômetro de Líquido com Capilar Metálico

#### 1 - Construção

Este termômetro consta de um bulbo de metal ligado a um capilar metálico e um elemento sensor. Neste caso, o líquido preenche todo o instrumento e com uma variação da temperatura se dilata deformando elasticamente o elemento sensor.

A este elemento sensor é acoplado um ponteiro que pode girar livremente sobre uma escala graduada. Como a relação entre a deformação do elemento sensor e a temperatura é proporcional, este instrumento nos fornece uma leitura linear.

A figura 04 apresenta um tipo de termômetro de líquido com capilar metálico.

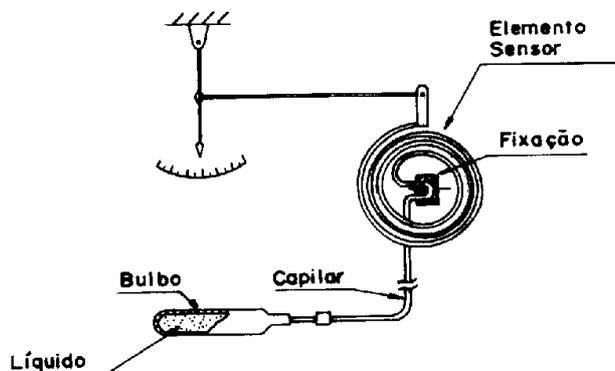
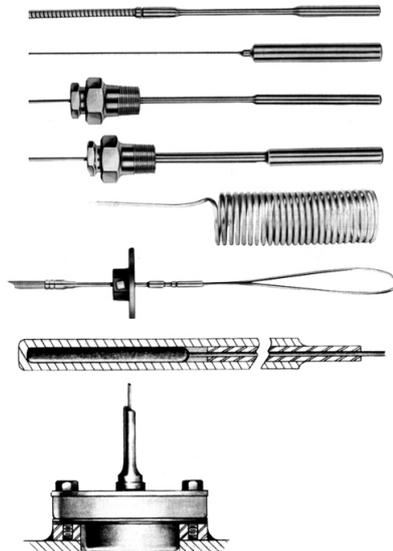


Fig. 04 - Termômetro de líquido com capilar metálico

#### 2 - Tipos de metais utilizados na construção do termômetro

- a) Bulbo - Suas dimensões variam de acordo com a sensibilidade desejada e também com o tipo de líquido utilizado na aplicação. Os materiais mais usados para sua confecção são: aço inoxidável, chumbo, monel e cobre.
- b) Capilar - Suas dimensões são também variáveis, sendo que o seu comprimento máximo é de 60 metros para líquidos orgânicos e de 15 metros para enchimento com mercúrio. Normalmente é confeccionado em aço, chumbo ou cobre.

c) Elemento sensor - Os materiais mais usados para sua confecção são: aço inoxidável e bronze fosforoso.



#### OBSERVAÇÃO:

No caso de utilizar o mercúrio como líquido de enchimento, o material do bulbo capilar e sensor não pode ser de cobre ou liga do mesmo.

#### 3 - Tipos de líquidos de enchimento

Como líquido de enchimento empregam-se mercúrio, xileno, tolueno, etc., por terem alto coeficiente de expansão.

Dentre eles, o mercúrio é o mais utilizado, pois permite medir ampla faixa de temperatura (a diferença entre o ponto de ebulição e solidificação é grande) e porque apresenta baixo coeficiente de atrito. A tabela abaixo apresenta a faixa de utilização dos principais líquidos de enchimento.

TABELA - Faixa de utilização dos principais líquidos de enchimento.

LÍQUIDO	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Mercúrio	- 38 à 550
Xileno	- 40 à 400
Tolueno	- 80 à 100

#### OBSERVAÇÃO:

A faixa de utilização dos líquidos ultrapassa os limites do ponto de ebulição porque o recipiente é preenchido sob pressão elevada (aproximadamente 40 atm).

#### 4 - Tipos de elemento sensor

Basicamente, três tipos de elemento sensor podem ser utilizados para medição de temperatura neste tipo de instrumento.

A figura 05 mostra estes três tipos.

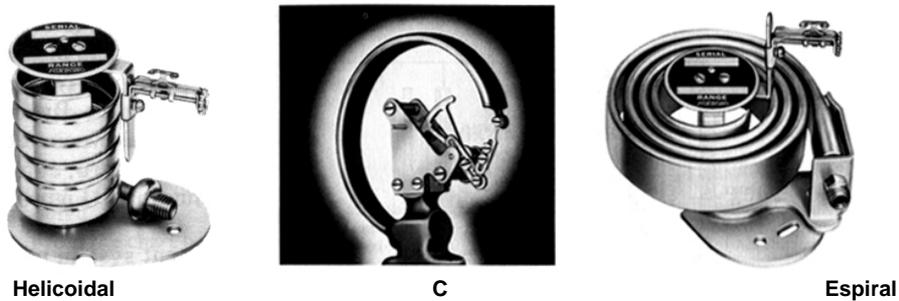


Fig. 05 - Tipos de elemento sensor

#### 5 - Sistema de compensação da temperatura ambiente

Pelo fato deste sistema utilizar líquido inserido num recipiente e da distância entre o elemento sensor e o bulbo ser considerável, as variações na temperatura ambiente afetam não somente o líquido no bulbo, mas todo o sistema (bulbo, capilar e sensor), causando erro de indicação ou registro. Este efeito da temperatura ambiente é compensado de duas maneiras que são denominadas classe IA e classe IB.

Na classe IB a compensação é feita somente na caixa do sensor através de uma lâmina bimetálica ou um espiral de compensação (figura 6 (b)). Este sistema é normalmente preferido por ser mais simples e ter respostas mais rápidas, porém, o comprimento máximo do capilar desse tipo é aproximadamente 6 metros.

Quando a distância entre o bulbo e o instrumento é muito grande, ou se deseja alta precisão, utilizam-se instrumentos da classe IA onde a compensação é feita na caixa e no capilar (compensação total) (figura 6 (a)). Neste caso a compensação é feita por meio de um segundo capilar, ligado a um elemento de compensação idêntico ao da medição, sendo os dois ligados em oposição. Este segundo capilar tem seu comprimento idêntico ao capilar de medição, porém não está ligado ao bulbo.

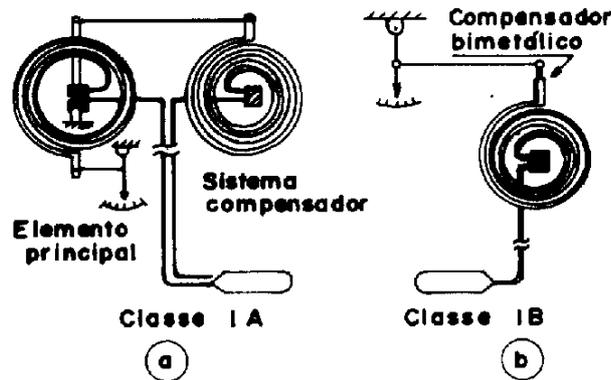


Fig. 06 - Compensação da temperatura ambiente

#### OBSERVAÇÃO:

Quando o líquido de enchimento é o mercúrio, alguns autores costumam classificar este sistema na classe VA e classe VB, porém sua construção é a mesma da classe I.

#### 6 - Utilização de termômetro de líquido com capilar metálico

É ainda utilizado em algumas indústrias para indicação e registro, pois permite leituras remotas e por ser o mais preciso dos sistemas mecânicos de medição de temperatura (sua precisão é  $\pm 0,5\%$ ), porém não é muito recomendado para controle devido seu tempo de resposta ser relativamente grande.

#### 7 - Recomendações

- Instalar o bulbo dentro de um poço protetor para permitir manutenção com o processo em operação.
- Sempre que for instalado dentro de um poço protetor, preencher o espaço entre o bulbo e o poço a fim de reduzir o atraso na resposta. Para tal, podemos usar mercúrio, óleo, grafite, glicerina, etc...
- Não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se formem restrições que prejudicariam o movimento do líquido no seu interior, causando falha no funcionamento do termômetro.
- O comprimento máximo do capilar deste sistema deve ser de 60 metros para os líquidos orgânicos e de 15 metros para enchimento com mercúrio.

## 6 - TERMÔMETRO À DILATAÇÃO DE SÓLIDO (TERMÔMETRO BIMETÁLICO)

### 1 - Princípio de Funcionamento

O termômetro bimetalício baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura.

A equação básica que rege esta relação é:

$$L_t = L_o (1 + \alpha \Delta t)$$

Onde:

t = temperatura do metal em °C

t<sub>o</sub> = temperatura de referência do metal em °C (normalmente 0°C)

L<sub>o</sub> = comprimento do metal à temperatura de referência

L<sub>t</sub> = comprimento do metal à temperatura t em °C

α = coeficiente de dilatação linear

Δt = t - t<sub>o</sub>

### 2 - Construção

Baseado no fato de que dois metais diferentes modificam as suas dimensões de modo desigual ao variar a temperatura, o termômetro bimetalício consiste em duas lâminas de metal justapostas, formando uma só peça e geralmente na forma helicoidal. Uma extremidade da hélice é fixa e a outra é ligada a um ponteiro que pode girar livremente sobre uma escala circular graduada.

Este termômetro pode ser construído de dois tipos conforme podemos ver na figura 07.



Fig. 07

### 3 - Tipos de Metais Utilizados

Para a construção de um termômetro bimetálico normalmente usa-se o Invar (64%Fe-36%Ni) como metal de baixo coeficiente de dilatação e o latão como metal de alto coeficiente de dilatação, porém, para temperaturas mais elevadas, utiliza-se também o níquel como metal de alto coeficiente de dilatação térmica.

### 4 - Utilização dos Termômetros Bimetálicos

Estes termômetros têm aplicação similar às dos termômetros de vidro, porém, por serem resistentes, admitem condições de trabalho mais pesados. São utilizados para medir temperaturas na faixa de -50 ~ + 500°C com precisão de  $\pm 1\%$ , onde respostas rápidas não são exigidas.

### 5 - Recomendações na instalação

- Utilizar sempre poço protetor metálico para evitar corrosão, dar proteção mecânica e permitir manutenção com o processo em operação.
- Em baixa temperatura a caixa do termômetro bimetálico deve ser hermeticamente selada para evitar que a penetração da umidade venha a formar gelo, prejudicando os componentes internos do instrumento.
- Para evitar erros devido à temperatura ambiente, o bimetálico deve estar completamente imerso no fluido.
- A velocidade do fluido deve ser bastante alta a fim de assegurar uma rápida transferência de calor.

## 7 - TERMÔMETRO À PRESSÃO DE GÁS

### 1 - Princípio de Funcionamento

Os termômetros à pressão de gás baseiam-se na lei de Charles e Gay-Lussac que diz: “A pressão de um gás é proporcional à temperatura, se mantivesse constante o volume do gás”.

A equação que expressa matematicamente esta lei é:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n}{T_n}$$

Onde:

$P_1; P_2; \dots; P_n$  = pressão absoluta do gás

$T_1; T_2; \dots; T_n$  = temperatura absoluta do gás

Conforme podemos observar, as variações de pressão são linearmente dependentes da temperatura, sendo o volume constante.

Devido a isso, pode-se obter uma escala praticamente linear de temperatura, pois o erro introduzido pelo fato do gás não ser ideal é desprezível.

## 2 - Construção

Sua construção é praticamente idêntica à dos termômetros de líquido com capilares metálicos, porém o bulbo é geralmente grande, a fim de obter maior força.

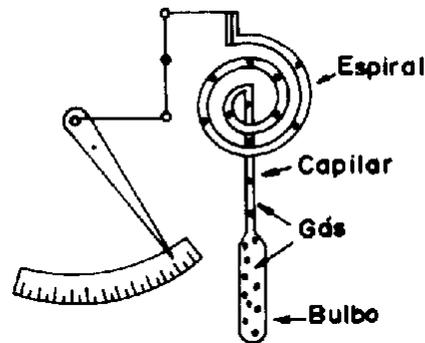


Fig. 08 - Termômetro à pressão de gás

## 3 - Tipos de metais utilizados na construção de termômetro de gás

- a - Bulbo e capilar: aço, aço inoxidável, cobre, latão e monel.
- b - Elemento de medição: cobre berílio, bronze fosforoso, aço e aço inoxidável.

## 4 - Tipos de gás de enchimento

Como gás de enchimento, utilizam-se normalmente Nitrogênio, Hélio, Neônio ou Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). Porém, por ser inerte e mais barato, o Nitrogênio é o gás mais utilizado. A faixa de medição varia de acordo com o gás de enchimento, sendo o seu limite inferior determinado pela temperatura crítica do gás, e o limite superior pelo tipo de capilar.

A tabela abaixo apresenta a faixa de utilização dos principais gases de enchimento.

TABELA - Faixa de utilização dos principais gases de enchimento.

GÁS DE ENCHIMENTO	TEMPERATURA CRÍTICA (°C)	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	- 147,1	- 130 à 550
Hélio	- 267,8	- 260 à 550
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	31,1	30 à 550

## 5 - Tipos de elemento sensor

Este sistema utiliza os mesmos tipos de sensores que o termômetro de líquido com capilar metálico, ou seja: tipo bourdon, espiral ou helicoidal.

#### 6 - Sistema de compensação da temperatura ambiente.

Devido ao grande volume do bulbo, a relação entre o seu volume e a do capilar é considerável, sendo então as variações de pressão com a temperatura desprezíveis.

Por isso não é necessário efetuarmos a compensação total. Porém a compensação na caixa às vezes se faz necessária; quando isto ocorre, é feita por um bimetálico fixada na espiral conforme figura 09 e o instrumento é denominado de classe III.

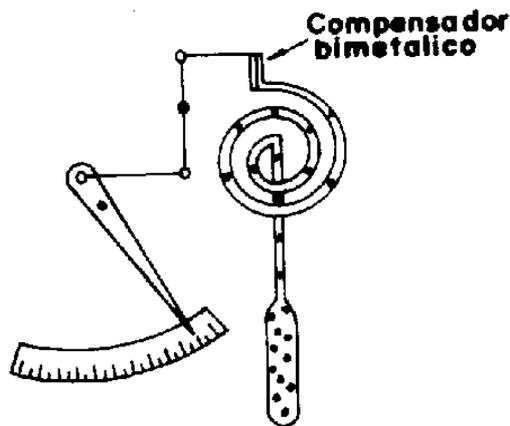


Fig. 09 - Termômetro à pressão de gás com compensação na caixa

#### 7 - Utilização de termômetro à pressão de gás

É ainda utilizado em algumas indústrias para indicação, registro e controle, pois permite leituras remotas e por apresentar um tempo de resposta pequeno. É o sistema mecânico de medição de temperatura que apresenta resposta mais rápida.

#### 8 - Recomendações

- Instalar o bulbo dentro de um poço protetor para permitir manutenção com o processo em operação.
- Não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se formem restrições que prejudicariam o movimento do gás no seu interior, causando falha no funcionamento do termômetro.
- Instalar o bulbo de modo que o comprimento máximo do capilar seja de até 30m.
- Quando usar poço protetor, preencher o espaço entre o bulbo e o poço com glicerina, óleo, etc., a fim de reduzir o atraso na resposta.

### 8 - TERMÔMETRO À PRESSÃO DE VAPOR

#### 1 - Princípio de funcionamento

Os termômetros à pressão de vapor baseiam-se na lei de Dalton que diz:

*“A pressão de um vapor saturado depende única e exclusivamente de sua temperatura e não da sua mudança de volume”.*

Por isso, para qualquer variação de temperatura haverá uma variação na tensão do vapor do gás liqüefeito colocado no bulbo do termômetro e, em conseqüência disto, uma variação na pressão dentro do capilar. A temperatura é determinada na superfície livre, entre o líquido e o vapor. Como a condição única necessária é a existente da interface entre a fase líquida e a fase gasosa dentro do bulbo, quando em funcionamento, é importante dosar o volume certo do gás liqüefeito.

Como o aumento da tensão do vapor para determinar variação de temperatura não é igual ao longo de toda a faixa, a escala de temperatura não é linear. Esse comportamento é ilustrado na figura 10 ( a ) e ( b ).

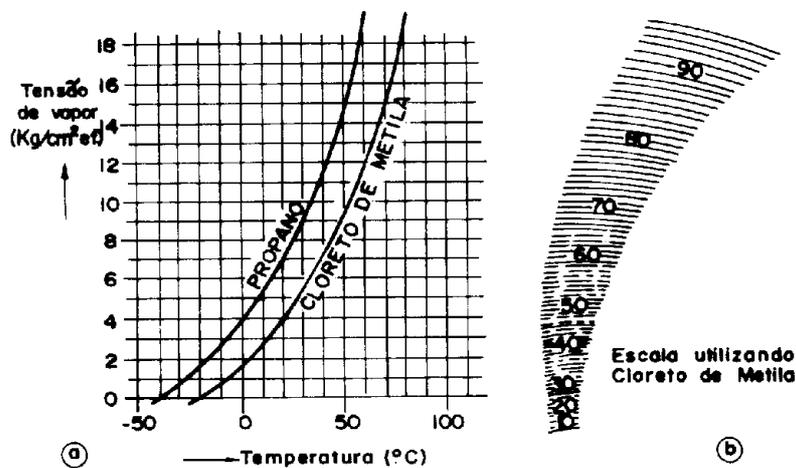


Fig. 10

## 2 – Construção

Sua construção é fisicamente idêntica a dos termômetros à pressão de gás, porém, o bulbo é relativamente pequeno. Este termômetro está ilustrado na

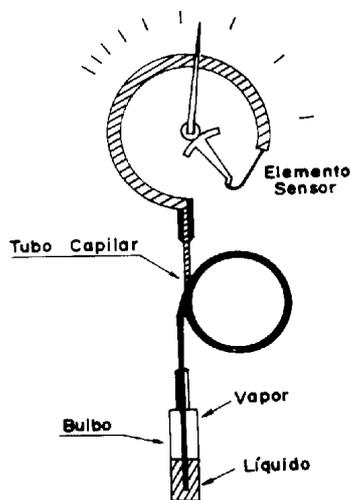


Fig. 11 - Termômetro a pressão de vapor

## 3 - Tipos de metais utilizados na construção do termômetro de vapor.

- a - Bulbo e capilar: aço inoxidável, aço, cobre e latão.
- b - Elemento de medição: cobre-berílico, bronze fosforoso e aço inoxidável.

## 4 - Tipos de líquido de enchimento

Como líquido de enchimento, utilizam-se líquidos voláteis tais como cloreto de metila, éter, propano, butano, tolueno, e dióxido de enxofre.

A tabela abaixo apresenta os líquidos mais utilizados e seus respectivos pontos de fusão e ebulição.

**TABELA** - Líquidos de enchimento para termômetros à pressão de vapor

LÍQUIDO	PONTO DE FUSÃO (°C)	PONTO DE EBULIÇÃO (°C)
Cloreto de metila	- 139	- 24
Butano	- 135	- 0,5
Éter etílico	- 119	34
Tolueno	- 95	110
Dióxido de enxofre	- 73	- 10
Propano	- 190	- 42

### OBSERVAÇÃO:

A faixa de utilização de um termômetro à pressão de vapor depende especialmente do líquido que ele contém. Entretanto, temperaturas tão baixas como - 20°C ou altas como 350°C podem ser medidas com precisão de  $\pm 0,5\%$ .

### 5 - Tipos de elementos sensor

Este sistema utiliza os mesmos tipos de sensores que o termômetro de líquido com capilar metálico, ou seja, tipo bourdon, espiral ou helicoidal.



### 6 - Classificação dos termômetros à pressão de vapor

Os termômetros à pressão de vapor podem ser divididos em quatro classes:

#### a - Classe II-D (duplo enchimento)

Este sistema é o indicado para medição de temperatura onde esta pode assumir qualquer valor (acima, abaixo ou na temperatura ambiente). Caracteriza-se por possuir um líquido não volátil no capilar e elemento de medição. Este líquido funciona somente como elemento de transmissão hidráulica, não sendo miscível ao líquido volátil. Utiliza-se normalmente glicerina ou óleo como líquido não volátil.

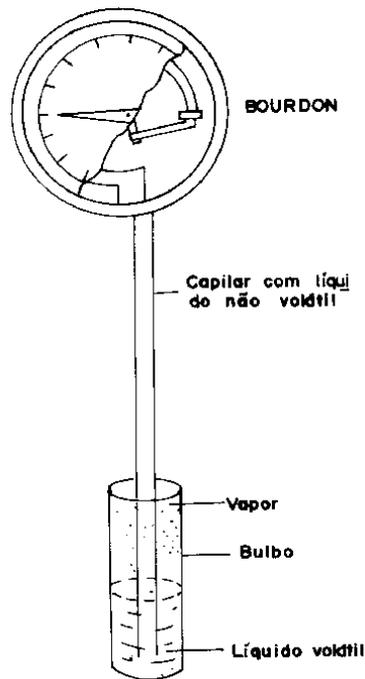


Fig. 12 - Sistema de enchimento classe II-D

b - Classe II-A

Este sistema é construído para medição de temperatura sempre acima da temperatura ambiente. Neste sistema, o líquido volátil é inserido no capilar, no elemento sensor e em parte do bulbo, sendo a outra parte do bulbo, preenchida pelo vapor. Este tipo, ilustrado na figura 13, é o mais usado.

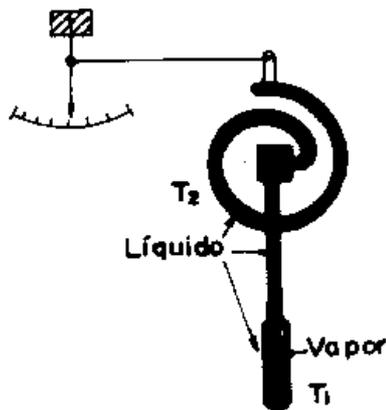


Fig. 13 - Sistema de enchimento classe II-A, onde  $T_1 > T_2$

c - Classe II-B

Este sistema é construído para medição de temperatura abaixo da temperatura ambiente. Neste sistema, o líquido volátil é inserido apenas em parte do bulbo, e o vapor preenche o restante do sistema. Este tipo está ilustrado na figura 14.

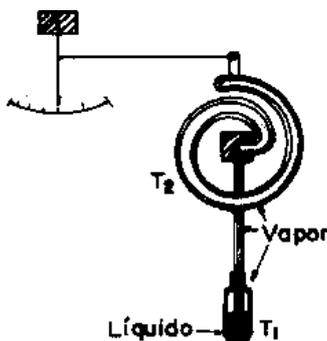


Fig. 14 - Sistema de enchimento classe II-B, onde  $T_2 > T_1$

#### d - Classe II-C

Este sistema é construído para medição de temperatura acima ou abaixo da temperatura ambiente, mas nunca em torno desta. A figura 15 ( a ) e ( b ) mostra as duas condições de medição. Quando  $T_1$  (temperatura de medição) for menor que  $T_2$  (temperatura ambiente), teremos líquido em parte do bulbo e vapor no bulbo, no capilar e no sensor. Se ocorrer uma variação brusca na temperatura de tal extensão que a temperatura ambiente seja cruzada, haverá mudança de estado do fluido no capilar e no sensor, e então teremos líquido no bulbo, no capilar e no sensor, e vapor somente no bulbo.

É importante frisar que nesta ocasião haverá uma certa instabilidade no sistema, acarretando resposta muito lenta, tendo em vista o tempo gasto na liquefação do vapor (ou vaporização do líquido) no capilar e no sensor.

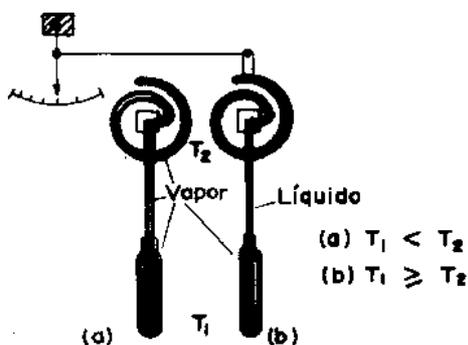


Fig. 15 - Sistema de enchimento classe II-C

### 7 - Utilização do termômetro à pressão de vapor

O termômetro à pressão de vapor é, provavelmente, o mais largamente utilizado dos termômetros à pressão por ser mais barato e mais simples de manter; assim como permite leituras remotas com um tempo de resposta relativamente rápido, porém, com uma precisão na ordem de 1%.

## 8 - Recomendações

- Instalar o bulbo dentro de um poço protetor para permitir manutenção com o processo em operação.
- Não dobrar o capilar em ângulo acentuado.
- O capilar não deve ser exposto à temperaturas muito baixas ou à temperaturas elevadas.
- Quando usar o poço protetor, preencher entre o bulbo e o poço com glicerina, óleo, etc., a fim de reduzir o atraso na resposta.
- O comprimento máximo do capilar deste sistema deve ser de 50 m.
- O bulbo e o elemento sensor devem ser instalados no mesmo nível, a fim de evitar erros devido à coluna líquida capilar.

## 10 - SENSORES DE TEMPERATURA TIPO BULBO DE RESISTÊNCIA

Um dos métodos elementares para medição de temperatura envolve mudança no valor da resistência elétrica de certos metais com a temperatura. São comumente chamados de bulbo de resistência e por suas condições de alta estabilidade e repetibilidade, baixa contaminação, menor influência de ruídos e altíssima precisão, são muito usados nos processos industriais.

Essas características aliadas ao pequeno desvio em relação ao tempo o Tornou Padrão Internacional (ITS-90) para a medição de temperatura na faixa de -259,3467°C a 961,78°C.

### 10.1 - Princípio de funcionamento

As termoresistências ou bulbos de resistência ou termômetro de resistência ou RTD, são sensores que se baseiam no princípio de variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Elas aumentam a resistência com o aumento da temperatura.

Seu elemento sensor consiste de uma resistência em forma de fio de platina de alta pureza, de níquel ou de cobre (menos usado) encapsulado num bulbo de cerâmica ou de vidro.

Entre estes materiais, o mais utilizado é a platina pois apresenta uma ampla escala de temperatura, uma alta resistividade permitindo assim uma maior sensibilidade, um alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura, uma boa linearidade resistência x temperatura e também por ter rigidez e dutibilidade para ser transformada em fios finos, além de ser obtida em forma puríssima. Padronizou-se então a termoresistência de platina.

A equação matemática que rege a variação de resistência em função da temperatura chama-se de equação Callendar-Van Dusen e que está mostrada abaixo:

Para o range de - 200 a 0°C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + At + Bt^2 + Ct^3 \cdot (t - 100)]$$

Para o range de 0 a 850°C:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

Onde:

$R_t$  = resistência na temperatura  $t$

$R_0$  = resistência a 0°C

$t$  = temperatura °C

A, B e C = coeficientes determinados pela calibração:

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

$$B = -5,802 \cdot 10^{-1} \text{ (}^\circ\text{C}^{-2}\text{)}$$

$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ (}^\circ\text{C}^{-4}\text{)}$$

O número que expressa a variação da resistência em função da temperatura é chamado de alfa ( $\alpha$ ) e se relaciona da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \text{ (}\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

Onde:

$R_{100}$  = resistência a 100°C

$R_0$  = resistência a 0°C

Um valor típico de alfa para  $R_{100} = 138,50 \Omega$  é de  $3,850 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , segundo a DIN-IEC 751/85.

## 10.2 - Construção Física do Sensor

O bulbo de resistência se compõe de um filamento, ou resistência de Pt, Cu ou Ni, com diversos revestimentos, de acordo com cada tipo e utilização.

As termoresistências de Ni e Cu têm sua isolação normalmente em esmalte, seda, algodão ou fibra de vidro. Não existe necessidade de proteções mais resistentes à temperatura, pois acima de 300°C o níquel perde suas características de funcionamento como termoresistência e o cobre sofre problemas de oxidação em temperaturas acima de 310°C.

Os sensores de platina, devido a suas características, permitem um funcionamento até temperaturas bem mais elevadas, têm seu encapsulamento normalmente em cerâmica ou vidro. A este sensor são dispensados maiores cuidados de fabricação pois, apesar do Pt não restringir o limite de temperatura de utilização, quando a mesma é utilizada em temperaturas elevadas, existe o risco de contaminação dos fios.

a) Elemento isolante tipo vidro de selagem

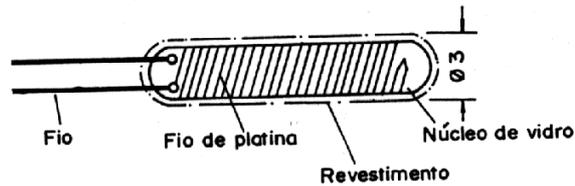


Fig. 16 - Isolante de vidro

Ao bobinar o fio de platina, deve-se manter, em cada passo, distâncias iguais, como medida de segurança, evitando, assim, quando submetidos a altas temperaturas, contactarem entre si e, por conseguinte, não entrarem em curto-circuito.

Outro fator importante em bobinar o fio com distâncias paralelas iguais, é evitar o ruído indutivo.

Por não ter contato direto com o exterior e apresentar ausência de condensação em temperaturas baixas, é utilizado para temperaturas na faixa de - 269,15°C a 450°C e funciona como elemento isolante.

Tamanho - O diâmetro varia de 1 mm a 4 mm, e o comprimento, de 10 mm a 40 mm.

b) Elemento isolante do tipo cerâmica

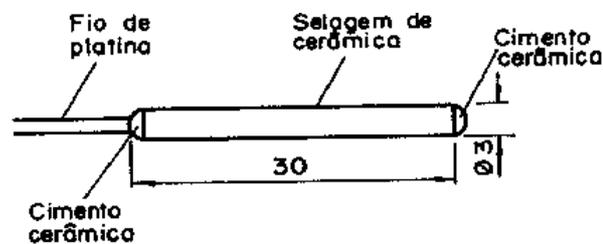


Fig. 17 - Isolante de cerâmica

Neste elemento isolante o fio de platina, após bobinar a cerâmica, é envolto por uma selagem de cerâmica.

Por ser o coeficiente de dilatação da cerâmica muito pequeno em relação à platina, ao bobinar, projetar e fazer a construção com fio de resistência, deve-se levar em consideração a deformação do mesmo, de acordo com a temperatura de utilização. A faixa de utilização do elemento isolante tipo cerâmica é de até 800°C.

Tamanho - Diâmetro 1,6 mm a 3 mm, comprimento de 20 mm a 30 mm.

c) Bulbo de resistência tipo isolamento mineral (Bainha)

Neste tipo de bulbo de resistência, coloca-se o elemento isolante e o condutor interno dentro de um tubo fino de aço inoxidável com óxido de magnésio ou outros elementos, de acordo com a necessidade do processo em síntese.

Por não possuir camada de ar dentro do tubo, tem boa precisão na resposta.

Tem grande capacidade para suportar oscilação.

Por ser dobrável, de fácil manutenção e instalação, é utilizado em lugares de difícil acesso.

O elemento usado como protetor do condutor é de tipo vidro de selagem e cerâmica de selagem.

O bulbo de resistência tipo bainha, é fino e flexível. Seu diâmetro varia de 2,0 mm a 4,0 mm.

A figura 18 mostra um bulbo de resistência tipo bainha.

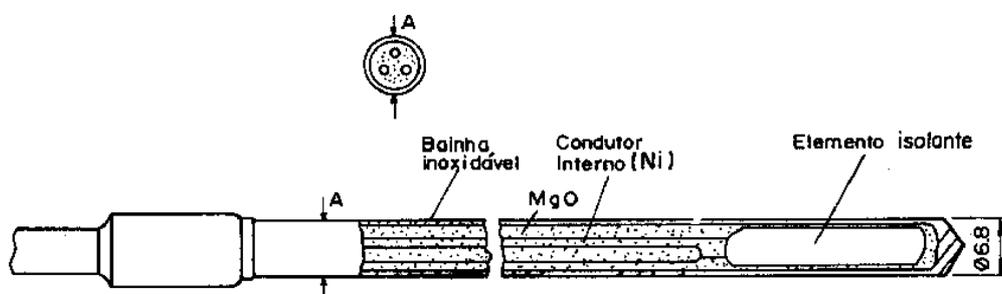


Fig. 18 - Bulbo de resistência tipo bainha

### 10.3 - Bulbo de Resistência Tipo Pt-100 $\Omega$

a) Características Gerais

A termoresistência de platina é a mais usada industrialmente devido a sua grande estabilidade e precisão. Esta termoresistência tem sua curva padronizada conforme norma DIN-IEC 751-1985 e tem como características uma resistência de 100 $\Omega$  a 0 $^{\circ}$ C.

Convencionou-se chamá-la de Pt-100, (fios de platina com 100 $\Omega$  a 0 $^{\circ}$ C).

Sua faixa de trabalho vai de -200 a 650 $^{\circ}$ C, porém a ITS-90 padronizou seu uso até 962 $^{\circ}$ C aproximadamente.

Os limites de erros e outras características das termoresistências, são referentes às normas DIN-IEC 751/1985.

A seguir encontra-se uma tabela relacionando a variação de resistência com a temperatura conforme norma DIN seguidos pelos principais fabricantes no Brasil.

TABELA - Resistência Versus Temperatura para Pt-100

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-220	10,41	0	100,00	140	153,58	280	204,88	440	260,75
200	18,53	10	103,90	150	157,31	290	208,45	480	267,52
180	27,05	20	107,79	160	161,04	300	212,02	480	274,25
160	35,46	30	111,87	170	164,76	310	215,57	500	280,93
140	43,48	40	115,54	180	168,46	320	219,12	520	287,57
120	52,04	50	119,40	190	172,16	330	222,66	540	294,16
100	60,20	60	123,24	200	175,84	340	226,18	560	300,70
80	68,28	70	127,07	210	179,51	350	229,69	580	307,20
60	76,28	80	130,89	220	183,17	360	233,19	600	313,65
50	88,75	90	134,70	230	186,82	370	236,67	620	320,05
40	84,21	100	138,50	240	190,45	380	240,15	640	326,41
30	88,17	110	142,29	250	194,07	396	243,61	660	332,72
20	92,13	120	146,06	260	197,69	400	247,08	680	338,99
10	96,07	130	149,82	270	201,29	420	253,93	700	345,21

a.1 - Limites de Erros

Apresentamos os limites de erros para as classes A e B segundo a norma DIN-IEC 751/85:

CLASSE B:  $\pm 0,30 + (0,005.t)^{\circ}\text{C}$

CLASSE A:  $\pm 0,15 + (0,002.t)^{\circ}\text{C}$

Numericamente temos:

Temperatura °C	Tolerância			
	Classe A		Classe B	
	(±°C)	(±Ω)	(±°C)	(±Ω)
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,30
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79

500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,55	1,13
700	-	-	3,8	1,17
800	-	-	4,3	1,28
850	-	-	4,55	1,34

#### a.2 - Resistência de Isolação a Temperatura Ambiente

A resistência entre cada terminal do sensor e a bainha deve ser testada com uma voltagem entre 10V a 100Vdc, sob temperatura entre 15°C a 35°C e uma umidade relativa não excedendo a 80%. A polaridade deve ser trocada em todos os terminais.

Em todos os casos, a resistência de isolação mínima é 100MΩ.

#### a.3 - Resistência de Isolação a Máxima Temperatura

Com a voltagem não excedendo a 10Vdc, a resistência de isolação entre cada terminal e a bainha não deve ser menor que mostrada na tabela:

Temperatura Máxima (°C)	Mínima Resistência de Isolação (MΩ)
100 a 300	10
301 a 500	2
501 a 850	0,5

*Nota: Dados oriundos da DIN-IEC 751 - 1985*

Segundo a ASTM E-1137, temos:

Voltagem Aplicada (VOLTS DC)	Temperatura (°C)	Resistência de Isolação Mínima (MΩ)
10 a 50	25 ± 5	100
10 a 50	300 ± 10	10
10 a 50	650 ± 15	2

#### a.4 - Auto-Aquecimento

O auto-aquecimento é causado pela corrente que passa pela resistência, oriundo do instrumento de leitura. Por efeito Joule, há a geração de calor, quando uma corrente elétrica atravessa uma resistência.

$$(P = R \cdot I^2)$$

Para uma medição de temperatura com termoresistência, este aquecimento pode levar a erros que comprometem esta medição; então este aquecimento tem que ser limitado a pequenos valores para que possa ser desprezado. Para isto deve-se limitar a corrente de excitação do sensor.

Pela norma DIN-IEC 751/85, a potência máxima desenvolvida numa termoresistência não pode ser maior que 0,1 mW, o que na faixa de atuação do sensor dá uma corrente máxima de 3 mA. Valores típicos recomendados são de ordem de 1 a 2 mA.

A elevação da temperatura equivalente ao aumento da dissipação de calor na termoresistência não deve exceder a 0,3°C.

#### b) Tipos de Montagens

Na montagem convencional com bainha preenchida, tem-se o sensor montado em um bulbo metálico com uma extremidade fechada e preenchido todos os espaços com óxido de magnésio, permitindo uma boa troca térmica e protegendo o sensor de choques mecânicos. A ligação do bulbo é feita com fios de cobre, prata ou níquel isolados entre si; sendo a extremidade aberta, selada com resina epoxi, vedando o sensor do ambiente em que vai atuar.

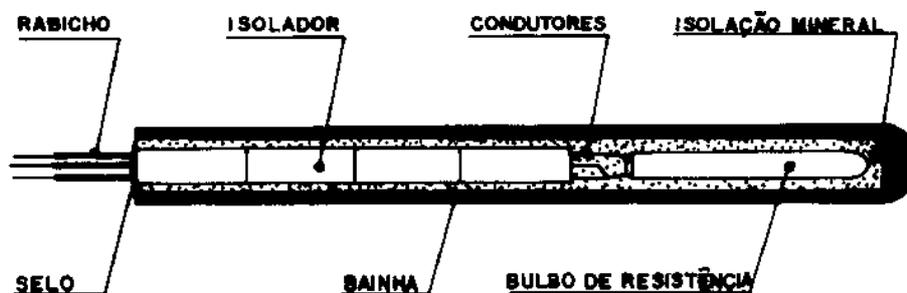


Fig. 19

Ainda assim neste tipo de montagem, a termoresistência não apresenta muita resistência mecânica e não dispõe de condições para efetuar curvas, bem como tem limitações relativas ao diâmetro externo e comprimento total.

Para suprir esse problema dimensional, foi desenvolvida a termoresistência isolamento mineral, na qual o bulbo sensor é interligado a um cabo isolamento mineral com fios de cobre comuns. Este tipo de montagem permite a redução do diâmetro, não limita o comprimento, apresenta rápida velocidade de resposta e dá uma maior flexibilidade permitindo dobras e curvas do cabo que antes era impossível, podendo ser utilizada onde o acesso não era possível.

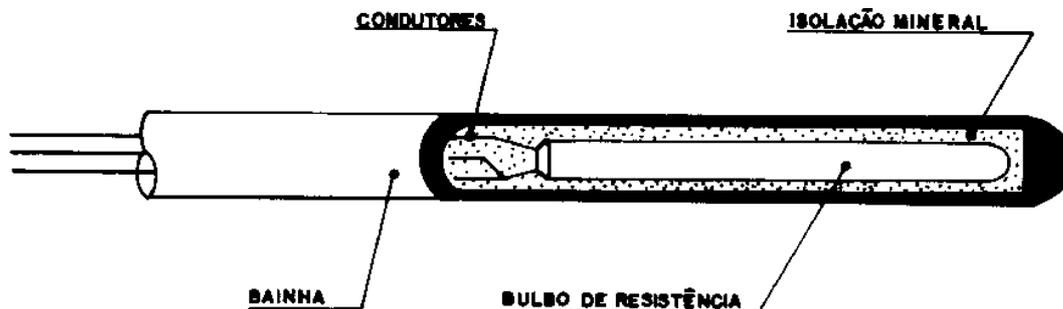


Fig. 20

Observação:

As montagens com termoresistências são feitas de maneira similar aos termopares quanto ao emprego de acessórios como cabeçotes, tubos e poços, bujins, niples, entre outros.

Apresentamos um gráfico ilustrativo de tempo de resposta de uma termoresistência isolamento mineral.

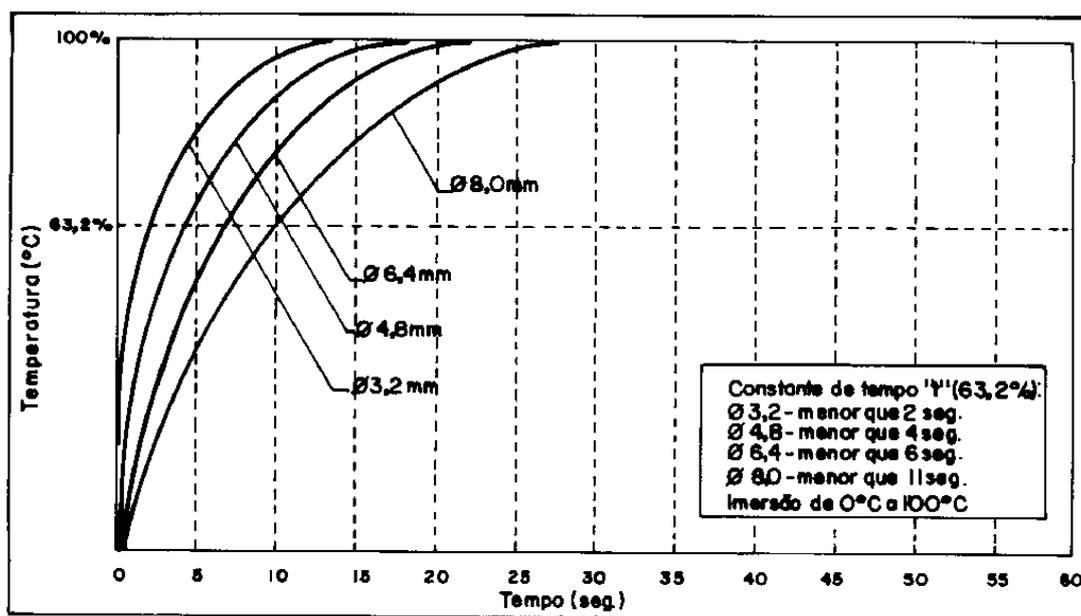


Fig. 21

### c) Circuito de medição de temperatura com bulbo de resistência tipo Pt-100Ω

A medição de temperatura utilizando bulbo de resistência é feita medindo-se a variação da resistência elétrica do elemento sensor, através de técnicas avançadas que garantem alta precisão nos valores obtidos.

Dentre essas técnicas a mais utilizada é sem dúvida a Ponte de Wheatstone, que com devidas modificações apresenta excelente performance.

O circuito em Ponte de Wheatstone inicialmente é posta em equilíbrio e desta forma não circula corrente entre os pontos A e B que se encontram com potenciais idênticos. Quando ocorre variação de temperatura a resistência do sensor varia, desequilibrando o circuito de forma proporcional à temperatura.

É fácil perceber, deste modo, que podemos efetuar a medição da temperatura através da variação de uma resistência da ponte.

$R_0$  = Resistência interna do condutor

$R_1, R_2$  = resistência fixa

$R_3$  = resistência variável

$R_4$  = resistência de medição

$R_g$  = resistência interna do galvanômetro

$i_g$  = corrente que flui

E = fonte de alimentação

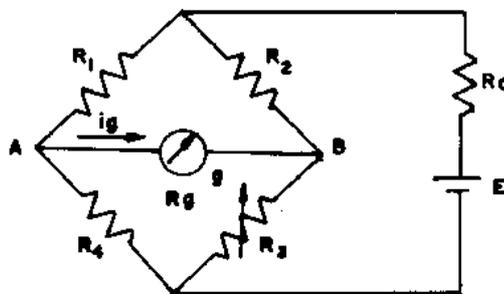


FIG. 22

Para utilizar deste circuito como instrumento de medição de temperatura, podemos ter as seguintes ligações:

- Ligação a 2 fios

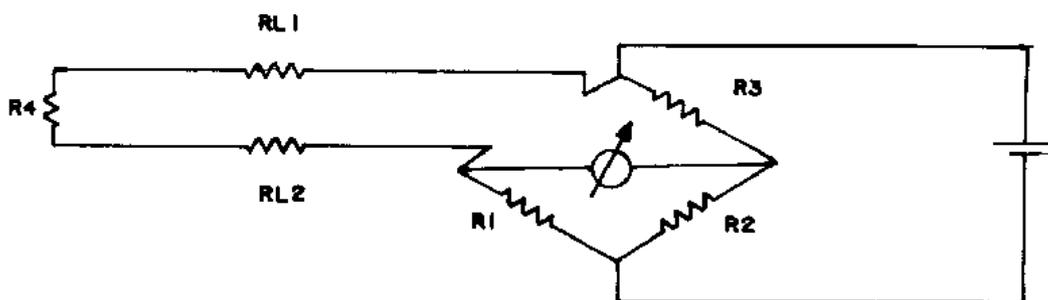


Fig. 23

Nessa montagem,  $R_4$  é a termoresistência e  $R_3$  é a resistência variável para balanceamento do circuito. As resistências indicadas como  $RL1$  e  $RL2$  são resistências de fiação e ambas estão em série com  $R_4$ . Esta resistência de fiação tende a aumentar quanto maior for a distância entre o sensor e o medidor, quanto menor a bitola do fio ou maior a temperatura ambiente. Este tipo de ligação pode ser usado com relativa precisão até uma distância do sensor ao aparelho que depende do comprimento, diâmetro e material do fio de ligação.

Temos abaixo uma tabela que mostra a relação bitola dos condutores x distância máxima, entre termoresistência a dois fios e instrumento receptor.

(AWG)	DIÂMETRO		DISTÂNCIA MÁXIMA (metros)
		(mm)	
14		1,63	18,1
16		1,29	11,4
18		1,02	7,2
20		0,81	3,0
22		0,64	1,9
24		0,51	1,8
26		0,40	1,1

- Ligação a três fios

Este é o método mais utilizado para as termoresistências na indústria. Neste circuito a configuração elétrica é um pouco diferente, fazendo com que a alimentação fique o mais próximo possível do sensor, permitindo que a RL1 passe para o outro braço da ponte, balanceando o circuito. Na ligação a 2 fios as resistências de linha estavam em série com o sensor, agora na ligação a 3 fios elas estão separadas.

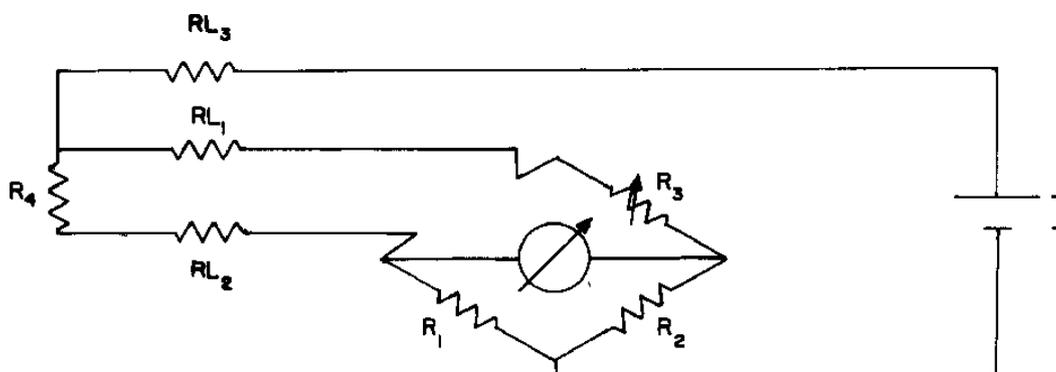


Fig. 24

- Ligação a Quatro fios

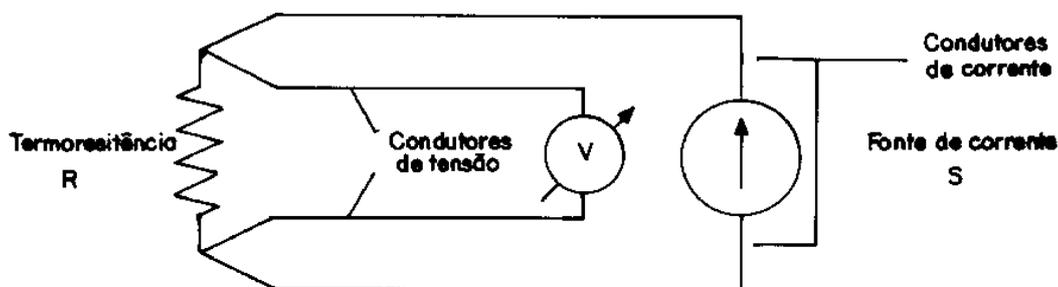


Fig. 25

A fonte de corrente S, fornece uma corrente estabilizada e conhecida através da termoresistência R e a tensão gerada é medida com um voltímetro de alta impedância ou potenciômetro. Desta forma a resistência dos condutores exerce um efeito desprezível sobre a medição.

Este tipo de medição a 4 fios é pouco usada em indústria, tendo sua maior aplicação em laboratórios e sendo usado em sensores padrões.

#### d) Poço de proteção para bulbo de resistência

Poço de proteção ou tubo protetor é uma peça cilíndrica, oca, fechada em uma extremidade e rosqueada ou soldada na outra extremidade cujo objetivo é a de garantir proteção mecânica e química ao bulbo de resistência permitindo assim aumento de sua vida útil. O poço protetor é normalmente fabricado em material metálico cuja constituição química é escolhida em função de sua compatibilidade com as condições do processo, podendo ser feito a partir de tarugo ou tubo de aço inox 304, 316, 410, monel, tântalo ou outro metal conforme requerido. Para caso em que a temperatura do processo for muito elevada, o poço deve ser construído com cerâmica.

### 10.4 - Outros Tipos de Bulbos de Resistência

Existem vários tipos de sensores com características diferentes do Pt-100 convencional. São elas:

Ni-100Ω a 0°C, com alfa de  $0,00617\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Pt-500Ω a 0°C, com alfa de  $0,003902\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Pt-130Ω a 0°C, com alfa de  $0,0039\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Ni-120Ω a 0°C, com alfa de  $0,00672\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Ni/Fe-60Ω a 0°C, com alfa de  $0,0052\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Cu-10Ω a 0°C, com alfa de  $0,00427\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

### 10.5 - Calibração de Termoresistência

Apesar de ser um sensor de extrema precisão e altíssima repetibilidade, a calibração também é necessária para a verificação dos limites de erros do sensor. O tempo de uso, alterações na estrutura cristalina da platina ou mudanças químicas no fio podem tirar o sensor de sua curva característica.

Para se realizar uma calibração de termoresistência, usa-se o Método dos Pontos Fixos ou Método de Comparação.

- Método dos Pontos Fixos

Os pontos fixos mais utilizados segundo a ITS-90 são:

Ponto Triplo do Argônio .....	-189,3442°C
Ponto Triplo da Água .....	+0,010°C
Ponto de Solidificação do Estanho .....	+231,928°C
Ponto de Solidificação do Zinco .....	+419,527°C

- Método da Comparação

Para realizar este método é necessária a utilização de um termômetro de resistência padrão com certificado de calibração.

Normalmente este padrão é um sensor Pt-25,5Ω a 0°C. A comparação é efetuada em banhos de líquido agitado num range de aproximadamente -100 a 300°C com uma excelente estabilidade e homogeneidade. A leitura dos sinais é feita em uma ponte resistiva de precisão.

### **10.6 - Recomendações na Instalação de Bulbos de Resistência**

Para que se tenha um perfeito funcionamento do sensor, são necessários certos cuidados de instalação, bem como armazenagem e transporte, conforme segue:

- Deve-se especificar materiais da proteção e ligações capazes de operar na temperatura de operação requerida.
- O sensor deve ser imerso completamente no processo, para se evitar a perda de calor por condução pelos fios e bainha. Para tal, um comprimento mínimo de imersão e o uso de materiais de proteção com boa condutibilidade térmica também são recomendados.
- Deve-se evitar choques mecânicos nas peças, pois estes podem danificar o sensor.
- Deve-se utilizar fios de cobre de mesmo comprimento e diâmetro para a interligação da termoresistência.
- Zonas de estagnação ou com baixas velocidades do fluido em contato com o sensor, não devem ser utilizadas devido ao retardo e os erros causados à medição.
- Na ligação a 3 fios, se for necessário a troca de um dos fios de interligação; recomenda-se trocar os 3 fios para que se tenha igualdade em seus valores ôhmicos.
- Em locais sujeitos a ruídos internos, recomenda-se o uso dos cabos blindados e torcidos.
- Em locais sujeitos a vibração, deve-se utilizar sensor com isolamento mineral.

### **10.7 - Vantagens e Desvantagens na Escolha do Bulbo de Resistência**

A - Vantagens

- a) Possuem maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores.
- b) Tem boas características de estabilidade e repetibilidade.

- c) Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação.
- d) Dispensa o uso de fios e cabos especiais, sendo necessário somente fios de cobre comuns.
- e) Se adequadamente protegido (poços e tubos de proteção), permite a utilização em qualquer ambiente.
- f) Curva de Resistência x Temperatura mais linear.
- g) Menos influência por ruídos elétricos.

#### B - Desvantagens

- a) São mais caros do que os outros sensores utilizados nesta mesma faixa.
- b) Baixo alcance de medição (máx. 630°C).
- c) Deterioram-se com mais facilidade, caso ultrapasse a temperatura máxima de utilização.
- d) É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta indicação.
- e) Possui um tempo de resposta elevado.
- f) Mais frágil mecanicamente.
- g) Autoaquecimento, exigindo instrumentação sofisticada.

## 11 - SENSORES DE TEMPERATURA TIPO TERMOPAR

### 11.1 - Introdução

A medição de temperatura também pode ser feita pela obtenção de uma força eletromotriz gerada quando dois metais de natureza diferente tem suas extremidades unidas e submetidas à temperaturas distintas. Isto ocorre devido aos metais distintos possuírem densidades de elétrons livres específicos e quando unidos em suas extremidades provocar migração desses elétrons do lado de maior densidade para o de menor densidade ocasionando uma diferença de potencial entre os dois fios metálicos.

Esta diferença de potencial não depende nem da área de contato e nem de sua forma, mas sim da diferença de temperatura entre as extremidades denominadas junção quente e fria. Esses sensores são chamados de termopares e serão objeto de estudo nesse capítulo.

### 11.2 - Efeitos Termoeletrônicos

Quando dois metais são unidos em suas extremidades e estas mantidas à diferentes temperaturas, três fenômenos ocorrem simultaneamente que são:

#### 11.2.1 - Efeito Seebeck

Esse efeito foi descoberto em 1821 pelo físico alemão T. J. Seebeck quando ele observou em suas experiências que em um circuito fechado formado por dois fios de metais diferentes ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura entre suas junções, e que sua intensidade é proporcional à diferença de temperatura e à natureza dos metais utilizados.

Em 1887, Le Chatelier (físico Francês), utilizou pela primeira vez na prática essa descoberta ao construir um termopar a partir de fios de platina e platina-ródio a 10% para medir temperatura. Esse termopar é ainda hoje utilizado, em muitos laboratórios, como padrão de referência.

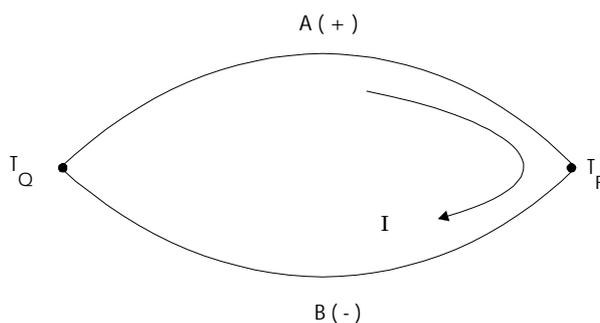


Fig. 26 - Circuito termoeletrônico de Seebeck.

#### 11.2.2 - Efeito Peltier

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoeletrônico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma fonte externa, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas das junções variam em uma quantidade não inteiramente devido ao efeito Joule. A esse acréscimo de temperatura foi denominado efeito Peltier.

O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção e não depende da temperatura de outra junção. O efeito Peltier não tem aplicação prática nos termopares e sim na área de refrigeração com a utilização de semicondutores especiais.

### 11.2.3 - Efeito Thomson

Em 1854, Thomson concluiu, que a condução de calor ao longo dos fios metálicos de um termopar, que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio e, quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição da temperatura em uma quantidade não somente devido ao efeito Joule. A essa variação adicional na distribuição da temperatura denominou-se efeito Thomson.

## 11.3 - Leis Fundamentais dos Circuitos Termoelétricos

A base da teoria termolétrica nas medições de temperatura com termopares está fundamentada em três leis que garantem a compreensão dos fenômenos que ocorrem ao se utilizar os sensores tipo termopares na obtenção de valores instantâneos de temperatura em um processo industrial específico.

### 11.3.1 - Lei do Circuito Homogêneo

A força eletromotriz (f.e.m.) termal desenvolvida em um circuito termoelétrico formado por dois metais homogêneos mas de naturezas diferentes, depende única e exclusivamente da diferença de temperatura entre as junções e de suas composições químicas, não sendo assim interferida pelo gradiente de temperatura e nem de sua distribuição ao longo dos fios.

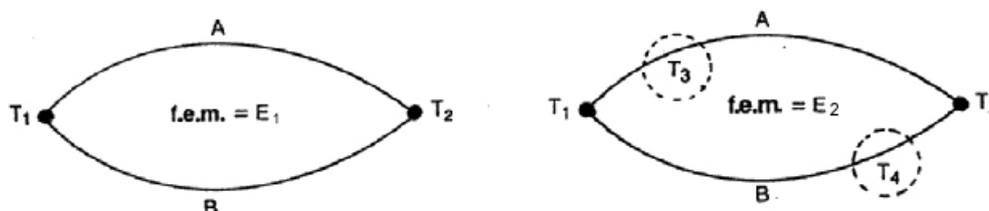


Fig. 27 - Lei do Circuito Homogêneo.

### 11.3.2 - Leis dos metais intermediários

Num circuito constituído por condutores de vários metais diferentes, a força termoeletromotriz total será zero (0) se todo o circuito estiver à mesma temperatura. Quando um circuito formado de dois fios de natureza diferente com suas junções em temperaturas diferentes, corta-se um dos fios e introduz-se em terceiro fio de outra natureza, a f.e.m. criada originalmente não é modificada, desde que as duas junções criadas pelo terceiro fio estejam à mesma temperatura.

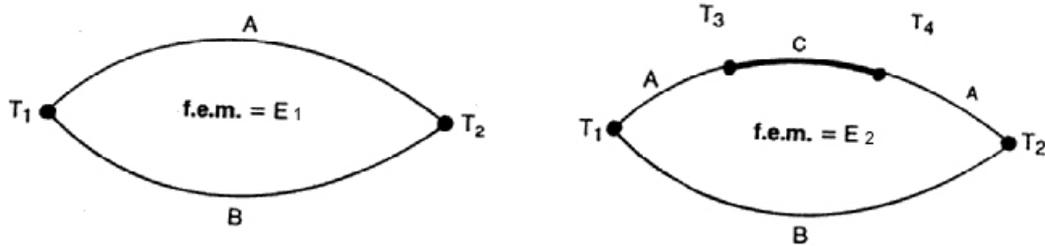


Fig. 28 - Lei dos Metais Intermediários

Onde se conclui que:

$$\text{Se: } T_3 = T_4 \Rightarrow E_1 = E_2$$

$$T_3 \neq T_4 \Rightarrow E_1 \neq E_2$$

Um exemplo de aplicação prática desta lei é a utilização de contatos de latão ou cobre, para interligação do termopar ao cabo de extensão no cabeçote.

### 11.3.3 - Lei da Temperatura Intermediária

A f.e.m. gerada num termopar de metais homogêneos, com suas junções a temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , é igual a soma algébrica da f.e.m. do termopar com uma junção na temperatura  $T_1$  e a outra numa temperatura qualquer  $T$  com a f.e.m. do mesmo termopar com suas junções a  $T$  e  $T_2$ . Assim, a f.e.m. gerada depende somente da diferença entre a junta fria, independente de qualquer temperatura intermediária f.e.m.

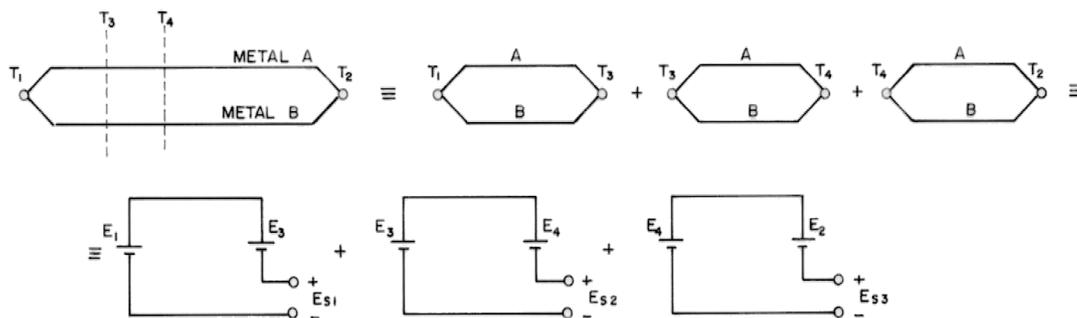


Fig. 29 - Lei da temperatura intermediária

## 11.4 - Construção de Termopares

### 11.4.1 - Termopar Convencional (Nu)

Como se pode ver na figura 30, o tipo mais simples de termopar consiste em unir dois fios de diferentes naturezas por uma de suas extremidades.

Este termopar denomina-se termopar nu.

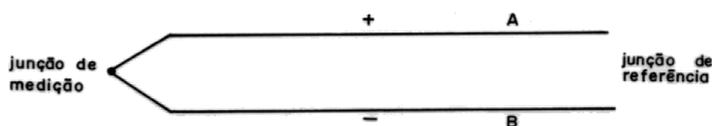


Fig. 30 - Termopar de fio nu  $A \neq B$

Para se construir a junção de medição do termopar, deve-se tomar as seguintes precauções; remover o óxido existente na superfície do fio, colocar o par termelétrico em contato por aderência e logo após, pelo método apropriado, executar a operação de soldagem.

Os métodos mais utilizados na confecção dos termopares estão apresentados na tabela seguinte onde "a, b e c" indicam a forma de junção de medição.

Tipo de Termopar	Diâmetro $\varnothing$	Soldagem a gás	Soldagem a arco	Soldagem a resistência
Cobre	maior <sup>(1)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	não apropri.
Constantan	menor <sup>(2)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	não apropri.
Ferro	maior <sup>(1)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (b)
Constantan	menor <sup>(2)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	não apropri. p/ (c)
Cromel	maior <sup>(1)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (b)
Constantan	menor <sup>(2)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (c)
Cromel	maior <sup>(1)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (b)
Alumel	menor <sup>(2)</sup>	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (a)	apropr. p/ (c)
Platina Platina-ródio	menor <sup>(2)</sup>	não apropriado	apropr. p/ (c)	apropr. p/ (c)

Nota: (1) diâmetro maior que 1,6 mm

(2) diâmetro menor que 1,6 mm

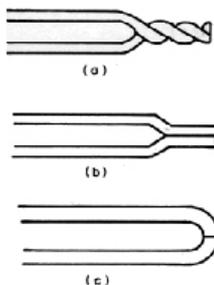


fig 31

O termopar tipo nu, normalmente, não é utilizado nessas condições, então usa-se um termopar com tubo isolante, geralmente de cerâmica, com dois ou quatro furos onde se introduz os pares termelétricos.

Como os termopares com isolantes térmicos têm facilidade para danificar-se, devido a sua fragilidade e não total proteção contra a atmosfera, costuma-se utilizá-los em raras condições. Para amenizar o problema, o termopar com isolante térmico é introduzido dentro de um poço protetor e neste estado é utilizado em larga escala. A figura 32 mostra um termopar com isolante térmico.

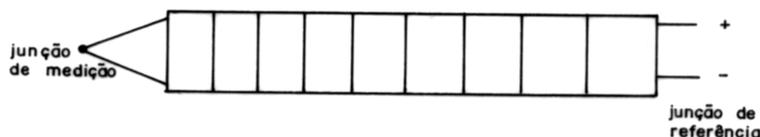


Fig. 32 - Termopar com isolante térmico

#### 11.4.2 - Termopar com Isolação Mineral

Com o desenvolvimento da energia nuclear, tornam-se severas as exigências para utilização de sensores de temperatura nessa área. Desse modo surgiu o termopar com isolação mineral, para garantir, entre outras vantagens, maior estabilidade e resistência mecânica.

O termopar com isolação mineral consiste de 3 partes básicas: um ou mais pares de fios isolados entre si, um material cerâmico compactado para servir de isolante elétrico e uma bainha metálica externa.

A figura 33 indica a construção tipo termopar com isolação mineral.



Fig. 33 - Termopar tipo isolação Mineral

O processo de fabricação dos termopares com isolação mineral começa com os termoelementos de diâmetros definidos, inseridos num tubo metálico e isolados entre si e o tubo por um material cerâmico (pó de óxido de magnésio).

Através de um processo mecânico de trefilação (estiramento), o tubo e os termoelementos são reduzidos em seus diâmetros (aumentando seu comprimento) e o óxido de magnésio fica altamente compactado, isolando e posicionando os fios em relação a bainha metálica.

O óxido de magnésio é um excelente isolante elétrico e um bom condutor térmico, de maneira que quando compactado, ocupa todos os espaços internos, isolando eletricamente os fios entre si e a bainha além de dar alta resistência mecânica ao

conjunto e proporcionar boa troca térmica.

Como este processo de trefilação ou estiramento (redução do diâmetro e aumento do comprimento proporcionalmente), cria tensões moleculares intensas no material, torna-se necessário tratar termicamente o conjunto. Este tratamento térmico alivia estas tensões e recoloca o termopar em sua curva característica; obtendo assim um produto final na forma de cabos compactados, muito reduzidos em seus diâmetros (desde 0,5mm até 8,0mm de diâmetro externo), porém mantendo proporcionalmente as dimensões e isolamento da forma primitiva.

Existe uma relação entre diâmetro da bainha para o diâmetro dos fios termopares e espessura da parede da bainha, oferecendo uma razão para a espessura da bainha (para proteção do termopar) e espaçamento interno (para garantir a elevada isolamento elétrica em altas temperaturas).

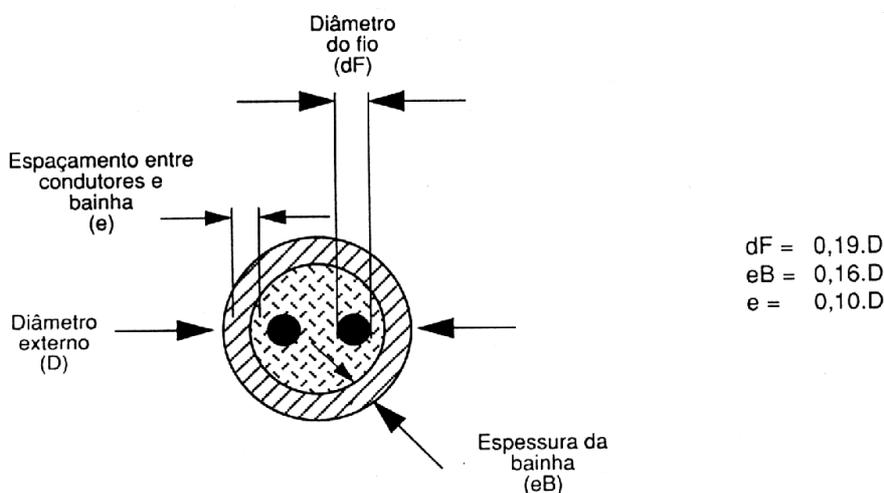


Fig. 34

Onde: **dF** é o diâmetro dos fios termopares, **eB** é a espessura da parede da bainha e **e** é o espaçamento entre os fios e a bainha.

Na tabela abaixo tem-se alguns valores de diâmetros dos fios ( $dB$ ) e espessura da bainha ( $eB$ ) em função do diâmetro externo ( $D$ ) para termopar com isolamento mineral simples:

D(mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,5	6,0	8,0
eB (mm)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,48	0,72	0,96	1,28
dF (mm)	0,10	0,19	0,29	0,38	0,57	0,57	1,14	1,52
e (mm)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,30	0,60	0,80

Nota:

A isolamento elétrica mínima típica do termopar tipo mineral admitida entre os condutores e a bainha é de  $100M\Omega$  à  $20^{\circ}C$ .

#### 11.4.3 - Tipos de Junções de Medições

Podemos classificar os termopares com isolamento mineral em relação à posição da junção de medição com a bainha metálica, em três tipos:

##### a) Junção Exposta:

Neste tipo de montagem, parte da bainha e da isolação são removidos, expondo os termoelementos ao ambiente.

Tem como características um tempo de resposta extremamente pequeno e grande sensibilidade a pequenas variações na temperatura, mas apresenta como desvantagem o rápido envelhecimento dos termoelementos devido ao contato com o ambiente agressivo, altas temperaturas e pressões.

##### b) Junção Aterrada:

Neste, os termoelementos e a bainha são soldados juntos para formar a junção de medição. Assim os fios são aterrados na bainha.

Este tipo de montagem apresenta um tempo de resposta um pouco maior que a junção exposta, mas ainda assim menor que a junção isolada; podendo ser usado em ambientes agressivos devido a isolação dos termoelementos.

Não é recomendável para ambientes sujeitos a ruídos devido à captação dos mesmos, podendo transmiti-los para o instrumento indicador gerando erros e instabilidade na leitura.

##### c) Junção Isolada:

É quando a junção de medição é isolada eletricamente da bainha. Este tipo de montagem é o mais utilizado.

Suas características são:

1. Um tempo de resposta maior que as montagens anteriores
2. Os termoelementos ficam totalmente protegidos do meio externo garantindo maior vida útil e podendo ser usado em ambientes sujeitos a campos elétricos, pois sendo isolado da bainha, fica mais imune a interferências eletrostáticas.

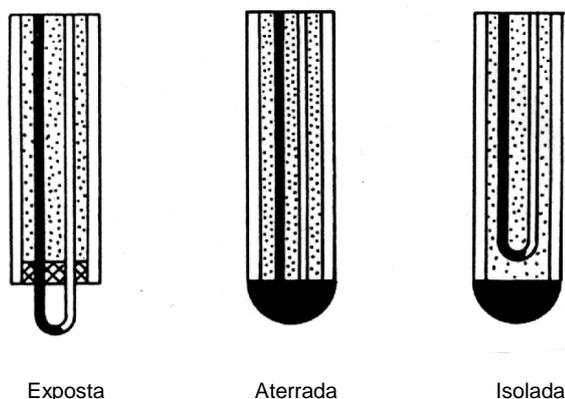


Fig. 35 - Tipos de Junção

#### 11.4.4 - Vantagens do Termopar com Isolação Mineral

a) Estabilidade na F.E.M.

Esta estabilidade é caracterizada pelos condutores estarem totalmente protegidos de ambientes agressivos que normalmente causam oxidação e envelhecimento dos termopares.

b) Resposta Rápida

O pequeno volume e alta condutividade térmica do óxido de magnésio, promovem uma rápida transferência de calor, superior aos termopares com montagem convencional.

c) Grande Resistência Mecânica e Flexibilidade

Devido a alta compactação do óxido de magnésio dentro da bainha metálica mantendo os termoelementos uniformemente posicionados, permite que o tubo seja dobrado, achatado, torcido ou estirado, suportando pressões externas e "choques térmicos" sem qualquer perdas de suas propriedades termoelétricas.

d) Facilidade de Instalação

A dimensão reduzida, a grande maleabilidade e alta resistência mecânica do termopar com isolação mineral, asseguram uma facilidade de instalação mesmo em locais de difícil acesso.

e) Resistência a Corrosão

Os termopares com isolação mineral são disponíveis com diversos tipos de capas metálicas, para garantir sua integridade em qualquer tipo de ambiente corrosivo, qualquer que seja o termopar.

f) Resistência de Isolação (a frio)

A resistência de isolação entre condutores e bainha é sempre superior a 100 MΩ (a 20°C) qualquer que seja o diâmetro, em qualquer condição de umidade.

Valores segundo norma ASTM E-608/84.

g) Blindagem Eletrostática

A bainha metálica devidamente aterrada, oferece excelente blindagem contra interferências eletrostáticas (ruídos).

#### 11.4.5 - Materiais para Fabricação da Bainha

A escolha do material da bainha é fundamental para a vida útil do termopar com isolação mineral, pois se a bainha resistir às condições do ambiente agressivo, o termoelemento também resistirá.

Material da Bainha	Temperatura Máx. Recomendada °C	Considerações Gerais
Inóx 304	900	Boa resistência a corrosão, podendo ser usada em atmosfera oxidante, redutora, neutra e no vácuo. Não recomendável o uso na presença de enxofre ou chamas redutoras.
Inóx 310	1100	Boas propriedades de resistência a oxidação em altas temperaturas, utilizável em atmosfera oxidante, redutora, neutra ou no vácuo. Bom para uso em atmosfera sulfurosa.
Inóx 316	900	Maior resistência a corrosão do que o Inóx 304, boa resistência a ácidos e álcalis.
Alloy 600	1150	Excelente resistência a oxidação em altas temperaturas. Seu uso em atmosferas com enxofre deve ser evitado.
Aço cromo 446	1100	Excelente resistência à corrosão e oxidação em alta temperatura. Boa resistência em atmosferas sulfurosas.

### 11.5 - Tipos e Características dos Termopares Comerciais

Existem várias combinações de 2 metais condutores operando como termopares. As combinações de fios devem possuir uma relação razoavelmente linear entre temperatura e f.e.m.; devem desenvolver uma f.e.m. por grau de mudança de temperatura, que seja detectável pelos equipamentos normais de medição.

Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de Ligas Metálicas, desde os mais corriqueiros de uso industrial, até os mais sofisticados para uso especial ou restrito a laboratório.

Essas combinações foram feitas de modo a se obter uma alta potência termoelétrica, aliando-se ainda as melhores características como homogeneidade dos fios e resistência à corrosão, na faixa de utilização, assim cada tipo de termopar tem uma faixa de temperatura ideal de trabalho, que deve ser respeitada, para que se tenha a maior vida útil do mesmo.

Podemos dividir os termopares em dois grupos, a saber:

- Termopares Básicos
- Termopares Nobres

#### 11.5.1 - Termopares Básicos

São assim chamados os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior.

TIPO "T"

- Nomenclaturas: T - Adotado pela Norma ANSI  
Cu - Co  
Copper-Constantan
- Liga: ( + ) Cobre - (99,9%)  
( - ) Constantan - São as ligas de Cu-Ni compreendidos no intervalo entre Cu50 e Cu65 Ni35. A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu58 Ni42.
- Identificação da polaridade: o positivo (cobre) é avermelhado.
- Características:
  - Faixa de Utilização: - 184 a 370°C
  - FEM produzida: -5,333 a 19,027 mV
  - Potência termoelétrica média: 5,14 mV / 100°C (para temperaturas positivas)  
Pode ser utilizado em atmosferas a vácuo, inertes, oxidantes ou redutoras.
  - Apresenta uma boa precisão na faixa de utilização, devido à grande homogeneidade do cobre.
  - Em temperaturas acima de 310°C o cobre começa a se oxidar e próximo de 400°C, oxida-se rapidamente.
  - Com certas precauções e devidamente calibrado, pode ser utilizado até - 262°C.
- Aplicações:  
Criometria (baixas temperaturas). Indústrias de Refrigeração, Pesquisas Agronômicas e Ambientais, Química e Petroquímica.

TIPO "J"

- Nomenclatura: J - Adotada pela Norma ANSI  
Fe-Co  
Iron-Constantan
- Liga: ( + ) Ferro - (99,5%)  
( - ) Constantan - Cu58 Ni42, normalmente se produz o ferro e a partir de sua característica casa-se o constantan adequado.
- Identificação da polaridade: o positivo (ferro) é magnético, o negativo não é magnético.
- Características:
  - Faixa de utilização: 0 a 760°C
  - FEM produzida: 0 a 42,922mV
  - Potência termoelétrica média: 5,65mV/100°C
  - Pode ser utilizado em atmosferas a vácuo, inertes, oxidantes ou redutoras.
  - Baixo custo relativo, sendo assim é um dos mais utilizados industrialmente.
  - Tem baixa homogeneidade, devido à dificuldade de obtenção do ferro com alto

teor de pureza.

- Indicado para serviços contínuos até 760<sup>o</sup>C em atmosfera neutra ou redutora.
- Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760<sup>o</sup>C, devido à rápida oxidação do ferro.
- Utilizar tubo de proteção acima de 480<sup>o</sup>C.
- Pode ser utilizado, ocasionalmente, para temperaturas abaixo de 0<sup>o</sup>C, porém, a possível ferrugem ou quebra do ferro, sob esta condição, o tornam inadequado.

- Aplicação: Centrais de Energia, Metalúrgica, Química, Petroquímica, Indústrias em geral.

#### TIPO "E"

- Nomenclatura: E - Adotada pela Norma ANSI  
NiCr-Co

- Liga: ( + ) Chromel - Ni<sub>90</sub>Cr<sub>10</sub>  
( - ) Constantan - Cu<sub>58</sub>Ni<sub>42</sub>

- Identificação da polaridade: o positivo (Chromel) é mais duro.

- Características:

- Faixa de utilização: 0 a 870<sup>o</sup>C
- FEM produzida: 0 a 66,473mV
- Potência Termoelétrica média: 7,64mV/100<sup>o</sup>C
- Pode ser utilizado em atmosferas a vácuo, inertes e oxidantes.
- Possui a maior potência termoelétrica dentre os termopares mais utilizados.
- Em temperaturas abaixo de 0<sup>o</sup>C os fios não sofrem corrosão, podendo, assim ser utilizado em temperaturas abaixo de 0<sup>o</sup>C.
- É utilizado em termopilha e em pirômetro de radiação.
- Possui alta estabilidade na f.e.m. (durabilidade) devido à sua resistência à oxidação.
- Vulnerável à atmosfera redutora.

- Aplicações: Química e Petroquímica.

#### TIPO "K"

- Nomenclaturas: K - Adotada pela Norma ANSI  
NiCr-Ni - Adotada pela Norma DIN

- Liga: ( + ) Chromel - Ni<sub>90</sub>Cr<sub>10</sub>  
( - ) Alumel - Ni<sub>95,4</sub>Mn<sub>1,8</sub>Si<sub>1,6</sub>Al<sub>1,2</sub>

- Identificação da Polaridade: o negativo (alumel) é levemente magnético, o positivo não é magnético.

- Características:

- Faixa de utilização: 0 a 1260°C
  - FEM Produzida: 0 a 50,990mV
  - Potência Termoelétrica média: 4,05mV/100°C
  - Pode ser utilizado em atmosferas inertes e oxidantes.
  - Em altas temperaturas (entre 800 a 1200°C) é mais resistente mecanicamente, do que os tipos S e R, tendo uma vida útil superior ao tipo J.
  - Vulnerável em atmosferas redutoras e sulfurosas, com gases como SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.
  - Sua mais importante aplicação ocorre na faixa de 700 a 1260°.
  - Pode ser utilizado, ocasionalmente, para temperaturas abaixo de 0°C.
- Aplicações: Metalúrgicas, Siderúrgicas, Fundição, Usina de Cimento e CaL, Vidros, Cerâmica, indústrias em geral.

#### 11.5.2 - Termopares Nobres

São aqueles que os pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoelétrica, apresentam uma altíssima precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios termopares.

##### TIPO "S"

- Nomenclaturas: S - Adotada pela Norma ANSI  
Pt Rh 10% - Pt

- Liga: ( + ) Platina Rhodio 10%  
( - ) Platina 100%

- Identificação da polaridade: o positivo (Pt<sub>90</sub>Rh<sub>10</sub>) é mais duro.

- Características:

- Faixa de utilização: 0 a 1480°C
- FEM produzida: 0 a 15,336mV
- Potência termoelétrica média: 1,04mV/100°C
- Pode ser utilizado em atmosferas inertes e oxidantes.
- Apresenta boa precisão em altas temperaturas.
- Define a Escala Internacional Prática de Temperatura/IPTS na faixa de 630,74 (ponto de fusão do antimônio) a 1064,43°C (ponto de fusão do ouro), sendo adotado como padrão nesta faixa.
- Utilizado como padrão na calibração de outros termopares.
- Foi desenvolvido em 1886 por Le Chatelier.
- Usado em medidas de alta precisão.
- Não devem ser utilizados em atmosfera redutora, requerendo substancial proteção quando aplicado neste tipo de ambiente.
- Para altas temperaturas ( $\pm 1300^\circ\text{C}$ ), devem ser utilizados isoladores e tubos protetores de alta alumina (tipo 710).

- Não deve ser utilizado em temperaturas abaixo de 0°C, pois sua curva de f.e.m. x Temperatura varia irregularmente.
  - Depois de submetido a altas temperaturas (acima 1480°C), para ser utilizado novamente, deve ser calibrado.
  - Com o uso próximo de seu limite de aplicação, a platina pura apresenta crescimento de grão acentuado, tornando-se quebradiça e isto pode tornar a vida útil do termopar curta, quando aplicado em processos sujeitos a esforços mecânicos (vibração).
- Aplicações: Siderúrgica, Fundição, Metalúrgica, Usina de Cimento, Cerâmica, Vidro e Pesquisa Científica.
- É utilizado em "Sensores Descartáveis" na faixa de 1200 a 1768, para medição de temperatura de metais líquidos em Siderúrgicas e Fundições.

#### TIPO "R"

- Nomenclaturas: R - Adotada pela Norma ANSI  
PtRh 13% - Pt
- Liga: ( + ) Platina 87% Rhodio 13%  
( - ) Platina 100%
- Identificação da Polaridade: o positivo (Pt<sub>87</sub>Rh<sub>13</sub>) é mais duro.
- Características:
- Faixa de utilização: 0 a 1480°C
  - f.e.m produzida: 0 a 17,163mV
  - Potência termoelétrica média: 1,16mV/100°C
  - Possui as mesmas características do tipo S, porém tem uso industrial menor que este.
  - Possui uma potência termoelétrica cerca de 11% maior que o tipo S.
  - É um tipo recente, surgido a cerca de 40 anos atrás, devido à necessidade de se adaptar a alguns instrumentos que apresentavam erros da ordem de 20%.
- Aplicações: As mesmas do tipo "S".

#### Tipo "B"

- Nomenclatura: B – Adotada pela Norma ANSI  
- Couple 18 (termopar 18): Na Alemanha  
- Pt Rh 30 - Pt Rh 6
- Liga: ( + ) Platina 70% Rhodio 30%  
( - ) Platina 94% Rhodio 6%
- Identificação da Polaridade: o positivo (Pt<sub>70</sub>Rh<sub>30</sub>) é mais duro.
- Características:
- Faixa de utilização: 870 a 1705°C

- FEM produzida: 3,708 a 12,485mV
  - Potência termoelétrica média: 1,05mV/10<sup>0</sup>C
  - Pode ser utilizado em atmosferas inertes, oxidantes e por curto período de tempo em vácuo.
  - É utilizado em medidas constantes de temperatura elevadas (acima de 1400°C)
  - Apresenta melhor estabilidade na FEM e resistência mecânica, do que os tipos "S" e "R" a temperaturas elevadas.
  - Não necessita de compensação da junta de referência, se a temperatura desta não exceder a 50°C.
  - Não necessita de cabo de compensação se a temperatura de seus terminais não exceder a 100°C.
  - Não pode ser utilizado em temperatura inferior a 100°C.
  - Deve-se utilizar isoladores e tubos protetores de alta alumina (tipo 710).
- Aplicações: Vidro, Siderúrgica, alta temperatura em geral.

**TABELA - Tipos e termopares e faixa de temperatura usual - vantagens e restrições.**

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temp. usual	Vantagens	Restrições
T	Cobre	Constantan	- 184 a 370°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Resiste a atmosfera corrosiva.</li> <li>2) Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C.</li> <li>3) Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Oxidação do cobre acima de 310°C.</li> </ol>
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Baixo Custo.</li> <li>2) Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro.</li> <li>2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C.</li> </ol>
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Alta potência termoelétrica.</li> <li>2) Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora.</li> </ol>
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicado para atmosfera oxidante.</li> <li>2) Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor do que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.</li> </ol>
S	Platina 10% Rhodio	Platina	0 a 1480°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicado para atmosferas oxidantes.</li> <li>2) Apresenta boa precisão a altas temperaturas.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidante.</li> <li>2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ol>
R	Platina 13% Rhodio	Platina			
B	Platina 30% Rhodio	Platina 6% Rhodio	870 a 1705°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Melhor estabilidade do que os tipos S ou R.</li> <li>2) Melhor resistência mecânica.</li> <li>3) Mais adequado para altas temperaturas do que os tipos S ou R.</li> <li>4) Não necessita de compensação de junta de referência, se a temperatura de seus terminais não exceder 50°C.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes.</li> <li>2) Utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ol>

## 11.6 - Associação de Termopares

Para uma melhor adaptação de termopares aos processos industriais e para atender os objetivos de diversos tipos de medição, costuma-se utilizar de associação de termopares, em série ou em paralelo, cada qual com suas finalidades específicas.

### 11.6.1. Associação Série

A associação em série é utilizada quando se deseja ampliar o sinal elétrico gerado pelo termopar. Como vemos na figura 36, o sinal de um termopar é a f.e.m. "E". Ao efetuarmos a associação em série (no exemplo com 4 termopares iguais) a tensão elétrica medida pelo instrumento será igual a 4E.

A aplicação mais comum desse tipo de associação é encontrada nas termopilhas dos Pirômetros de Radiação pois, como a intensidade de calor que atinge a junta de medida é muito pequena, precisamos de uma montagem em série, para que a tensão elétrica gerada seja suficiente para sensibilizar os aparelhos de medição.

### 11.6.2. Associação em paralelo

Para medirmos a temperatura média ao longo de um grande duto, em grandes fornos ou equipamentos onde a medida pontual não é significativa, podemos usar os termopares, ligando certo número deles em paralelo. A tensão elétrica no instrumento ou no ponto de conexão em paralelo é a média daquela produzida pelo número de termopares utilizados. Esta voltagem é igual à soma das voltagens individuais, dividida pelo número de termopares ou é a mesma tensão elétrica que poderia ser gerada por um único termopar, na temperatura média.

As ligações em paralelo dos termopares para medidas de temperatura média, é vantajosa, isto porque a calibração do instrumento pode ser a mesma para um único termopar.

Para se obter temperaturas médias reais, as características temperatura versus f.e.m. dos termopares devem ser lineares, através das faixas de temperaturas envolvidas, devendo o instrumento operar dentro do princípio de equilíbrio nulo, onde não existe fluxo de corrente na ocasião da medida.

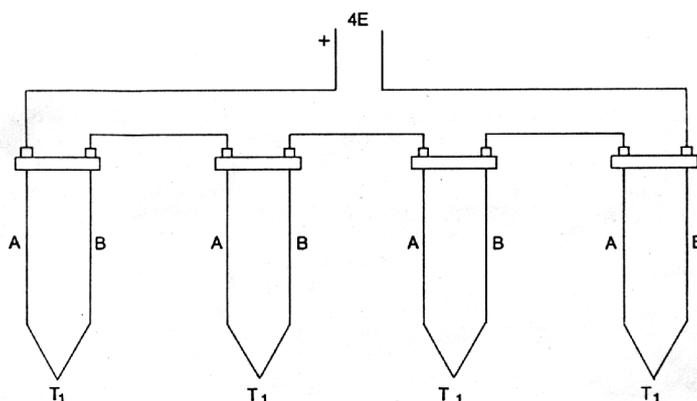


Fig. 36 - Ligação em série de termopares

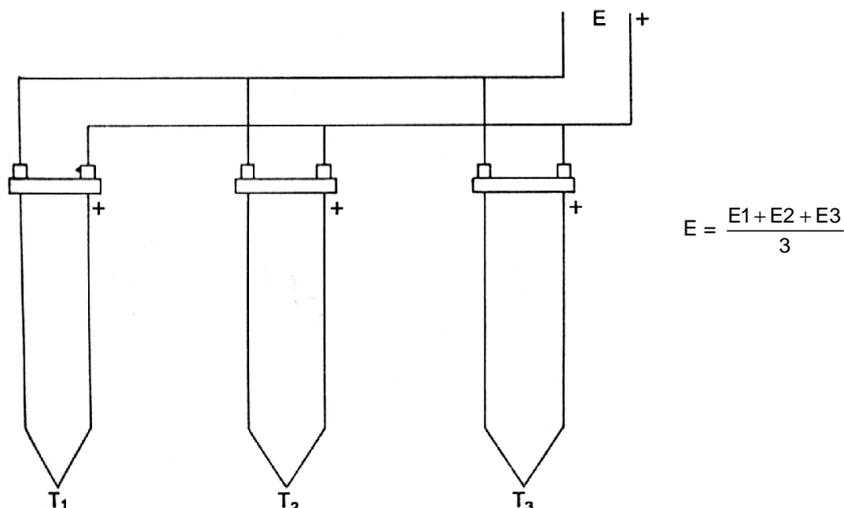


Fig. 37 - Ligação em paralelo dos termopares

### 11.6.3 - Medida de temperaturas diferenciais

Dois termopares podem ser usados na medição de temperaturas diferenciais entre dois pontos. Dois termopares semelhantes são ligados junto com o fio de extensão de mesmo material usado nos termopares.

As conexões são feitas de tal modo, que as forças eletromotrizes desenvolvidas fiquem uma contra a outra. Assim, se as temperaturas dos dois termopares forem iguais, independentemente da magnitude, a f.e.m. resultante será zero. Quando existem diferentes temperaturas, a tensão elétrica produzida corresponde a esta diferença de temperatura.

A precisão desta medida está vinculada à linearidade da curva de f.e.m. gerada em função da temperatura e do tipo de termopar utilizado para o intervalo de temperatura que se está medindo.

Cuidados especiais devem ser tomados para não haver uma interpretação errada da tensão elétrica lida, quando tivermos termopares para medida de temperatura diferencial. Devido à não linearidade da curva do termopar, para mesmos diferenciais de temperatura, teremos diferentes variações de tensão elétrica. Exemplificando, para o termopar tipo K temos:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 18^{\circ}\text{C} \rightarrow mv_1 = 0,718 \\ \Delta T = 120^{\circ}\text{C} \\ T_2 = 138^{\circ}\text{C} \quad mv_2 = 5,652 \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta mv = 4,934$$
  

$$\left. \begin{array}{l} T_1' = 1180^{\circ}\text{C} \rightarrow mv_1' = 48,095 \\ \Delta T = 120^{\circ}\text{C} \\ T_2' = 1300^{\circ}\text{C} \quad mv_2' = 52,398 \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta mv = 4,303$$

Portanto:  $\Delta T = \Delta' T$   
 $\Delta mv \neq \Delta' mv$

## 11.7 - Interligação de Termopares

A interligação dos termopares com os instrumentos de recepção (indicador, controlador, etc...) deve obedecer critérios específicos já que na sua junção não pode ocorrer o “aparecimento” de novos termopares. Para isto ou se usa cabos/fios do mesmo material ou por questões de custo se utiliza cabos que substituem os de mesmo material sem que haja interferência na medição.

### 11.7.1 - Cabos de extensão

São aqueles fabricados com o mesmo material do termopar devido ao seu baixo custo. Desse modo para os termopares tipo T, J, K e E são utilizados cabos do mesmo material para sua interligação com o instrumento receptor.

### 11.7.2 - Cabos de compensação

Para os cabos dos termopares nobres (R, S e B) não seria viável economicamente a utilização de cabos de extensão. Assim, para tornar possível a utilização desses sensores, desenvolveu-se cabos de natureza diferente porém com a característica de produzirem a mesma curva de força eletromotriz desses termopares ou ainda, mesmo que não idênticas mas que se anulem.

### 11.7.3 - Codificação para fios e cabos de extensão e de compensação.

Para facilitar a identificação do tipo e da polaridade dos condutores como cabos de extensão ou compensação na interligação de termopares é utilizado, por diversas normas, o código de cores. A tabela a seguir mostra as normas mais seguidas que são a DIN (Alemã) e ANSI (Americana).

**TABELA - Código de Cores para fios e cabos de tensão e de compensação**

Termopar tipo	Extensão ou compensação o Tipo	Material dos Condutores		Coloração da Isolação					
				Norma Americana ANSI MC-96.1 - 1975			Norma Alemã DIN 43710-4		
		Positivo	Negativo	Capa Externa	Positivo	Negativo	Capa Externa	Positivo	Negativo
T	TX	Cobre	Constantan	Azul	Azul	Vermelha	Marrom	Vermelha	Marrom
J	JX	Ferro	Constantan	Preta	Branca	Vermelha	Azul	Vermelha	Azul
E	EX	Chromel	Constantan	Roxa	Roxa	Vermelha	---	---	---
K	KX	Chromel	Alumel	Amarela	Amarela	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde
K	WX*	Ferro	Cupronel	Branca	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde
S, R	SX	Cobre	Cu/Ni	Verde	Preta	Vermelha	Branca	Vermelha	Branca
B	BX	Cobre	Cobre	Cinza	Cinza	Vermelha	---	---	---

\* Fios e Cabos WX e VX, para termopar tipo K, foram excluídos da Norma ANSI MC-96.1 - 1975.

### 11.7.4 - Ligação dos fios e cabos de extensão e de compensação

Para visualizar melhor a importância dos fios e cabos de extensão e compensação, daremos dois exemplos, sendo que no primeiro será utilizado cabo de extensão e no segundo será utilizado cabo de cobre comum.

#### Exemplo 1 - Ligação de um termopar com cabo de extensão

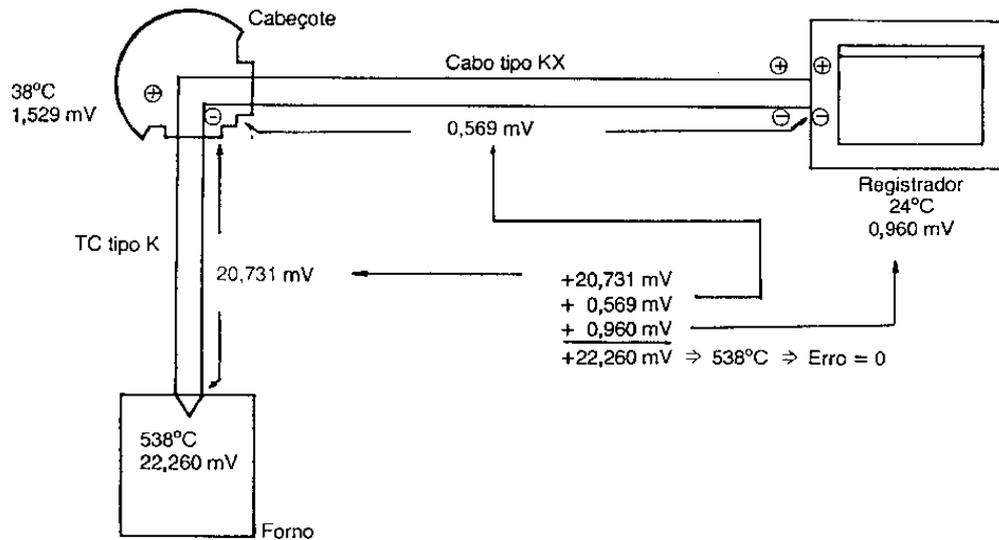


Fig. 38 - O registrador irá indicar a temperatura correta do forno.

#### Exemplo 2 - Ligação do mesmo termopar, com cabo de cobre comum.

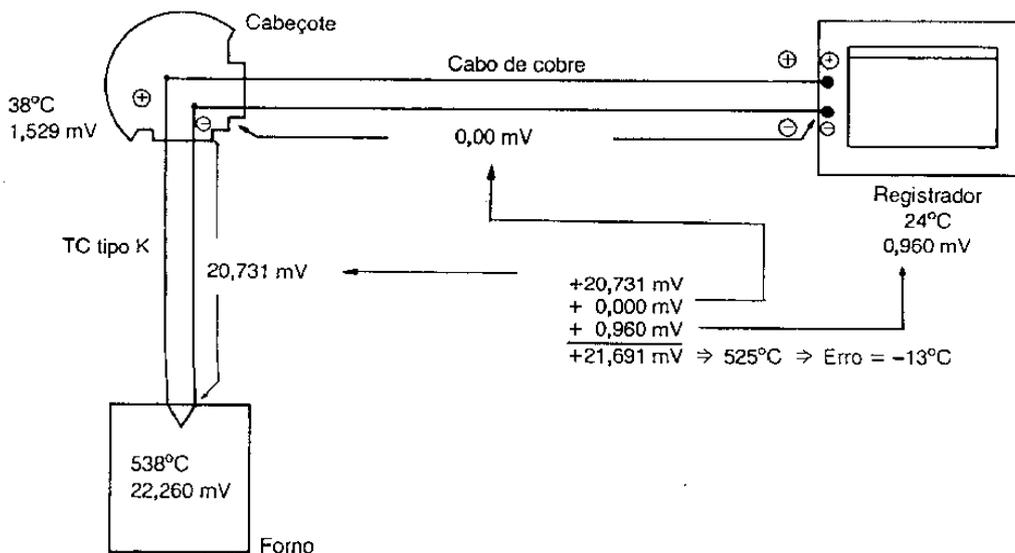


Fig. 39 - O registrador irá indicar a temperatura de 525°C, portanto com um erro de -13°C.

#### 11.7.5 - Recomendações para Instalação de fios e cabos de extensão e de compensação

Não se recomenda a utilização de cabos ou fios menores que 16 AWG, para uso em conduítes, pois estes não têm suficiente resistência à tração. No entanto, os fios de bitola 20 AWG podem ser usados quando em conjunto de feixes reforçados adequadamente (multi-cabo), para dar maior resistência à tração.

A resistência elétrica total do fio ou cabo é importante quando este for ligado a um instrumento do tipo galvanométrico. Estes instrumentos requerem, muitas vezes, um valor definido da resistência de linha, sendo este valor informado pelo fabricante do instrumento.

Para instrumentos do tipo potenciométrico, que possuem uma alta impedância interna, o valor da resistência dos fios de extensão não é crítica e, portanto, não é levada em consideração.

A isolamento usada nos cabos deve ser escolhida de tal maneira a resistir às condições do ambiente onde irá trabalhar, levando-se em consideração todas as variáveis, tais como: temperatura, solicitação mecânica, umidade, presença de óleo ou outros componentes químicos.

Os fios ou cabos devem ser sempre instalados de maneira a estarem protegidos do aquecimento excessivo, que é nocivo à isolação e aos condutores.

Sempre que possível devem ser instalados em conduítes, de tal modo que não fiquem sujeitos à flexão ou curvaturas, que podem, eventualmente, alterar suas características termoeletricas; portanto, o layout do conduíte para fio de extensão ou compensação deve ser bem planejado, sendo aconselhável o caminho mais curto.

Esse deve, ainda, ir do cabeçote até o terminal do instrumento, em um comprimento contínuo sem emendas. Quando esta for inevitável, deve ser feita de tal maneira que haja um contato íntimo entre os fios no terminal de emenda e a polaridade deve ser observada com rigor.

Os fios e cabos de extensão ou de compensação não devam ser passados paralelamente ou próximos às as linhas de força.

Quando esses forem instalados sob a terra, deve-se utilizar isolações à prova d'água.

Os fios e cabos devem ser limpos para fixação no bloco terminal e no terminal do instrumento, devendo-se obedecer, com rigor, a polaridade nas ligações.

11.7.6 - Erros produzidos pela inversão de fios e cabos de extensão e de compensação

*Inversão simples*

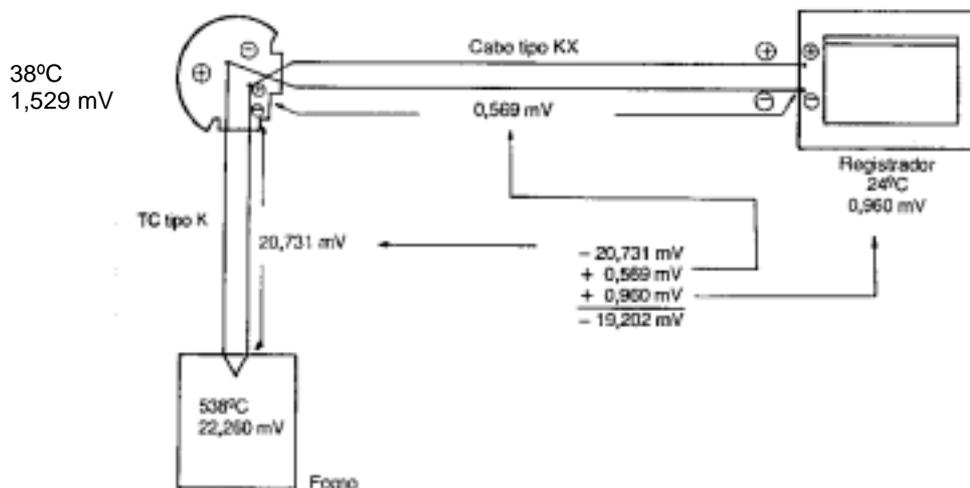


Fig. 40 - Inversão simples

A pena do registrador irá bater no início de escala, pois está recebendo uma tensão elétrica de -19,202 mV.

*Dupla Inversão*

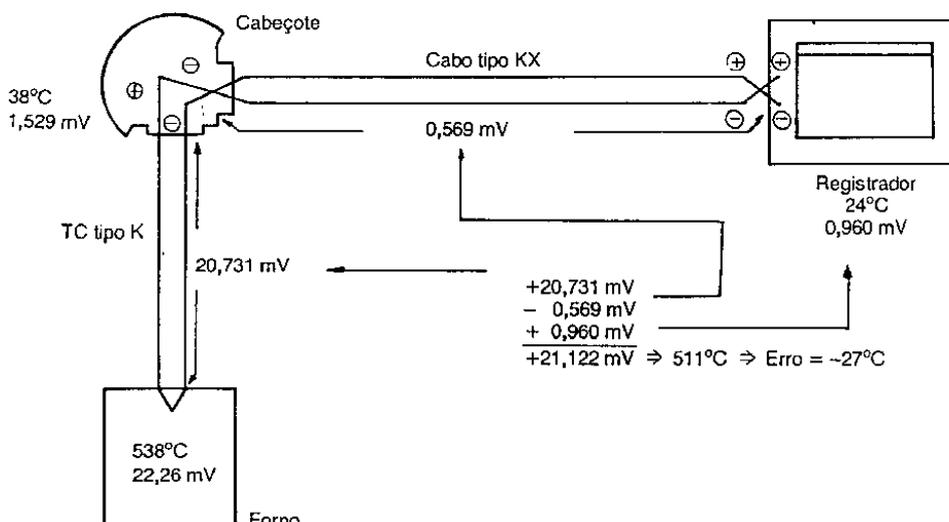


Fig. 41 - Inversão dupla

O registrador irá indicar que o forno está a 511°C, quando na realidade está a 538°C; portanto, indicará com um erro de -27°C.

A dupla inversão acontece com frequência pois, quando uma simples inversão é constatada, é comum pensar-se que uma nova troca na ligação dos terminais compensará o erro. Porém, isto não acontece. É evidente que, se o Cabeçote e o Registrador estiverem à mesma temperatura, a dupla inversa não ocasionam discrepância na medição.

### **11.8 - Seleção de Termopares**

A escolha de termopares para um determinado serviço deve ser feita considerando-se todas as possíveis características e norma exigidas pelo processo.

- a) Faixa de temperatura - A faixa de temperatura do termopar deve ser compatível com àquela do processo;
- b) Potência termelétrica - Escolher o termopar que melhor responde ao intervalo de temperatura específico do processo no qual será aplicado;
- c) Precisão - Para plena confiabilidade na medida, devemos considerar particularidades importantes que afetam a precisão da medida:
  - C<sub>1</sub>) - Homogeneidade dos fios.
  - C<sub>2</sub>) - Estabilidade do sinal do termopar.
  - C<sub>3</sub>) - Reprodutividade do termopar.
- d) Condições de trabalho - termopar R, S, E e K são fortes contra oxidação, mas fracos para redução. Já os tipos J e T são fortes contra redução e fracos contra a oxidação. Portanto, o termopar escolhido para uso deve obedecer as condições de trabalho do ambiente.
- e) Velocidade de resposta - Em certos processos, alguns parâmetros, como velocidade de resposta, definição de ponto de medida e adaptabilidade, constituem-se em pontos de importância, devendo ser cuidadosamente determinados.
- f) Custos - Deve-se proceder com rigor na escolha de um termopar em função de um melhor aproveitamento de material disponível em relação ao investimento aplicado.
- g) Vida útil - Para aumentar a durabilidade do termopar, deve-se observar as características específicas do meio a ser medido, tais como corrosividade, fluxo de massa, efeitos mecânicos e faixa de temperatura, para então definir a área seccional dos fios do termopar, seu tipo e sua proteção mais adequada.

### **11.9 - Acessórios para termopares**

Tão importante quanto a especificação correta do termopar para as condições de um determinado processo, é também a escolha dos acessórios que compõem a montagem do mesmo.

#### **11.9.1 - Isoladores**

Sua função é a de isolar eletricamente os termoelementos e resistir a altas temperaturas.

Os isoladores são feitos de cerâmica; para termopares básicos usa-se um material a base de sílica em vários tamanhos e formatos; podendo ser redondos, ovais, de pequenos tamanhos (miçangas) e tendo de 1 até 6 furos.

Já para os termopares nobres recomenda-se o uso de isoladores de alumina em uma única peça (capilar), para minimizar a contaminação dos fios com o ambiente externo.

Uma característica importante, é que os isoladores não devem desprender, a altas temperaturas, gases voláteis que contaminem os termoelementos.

Nos termopares com isolamento mineral, o material usado como isolante é um pó de óxido de magnésio altamente compactado.

Em algumas aplicações específicas usa-se isoladores de teflon, PVC, fibra de vidro, amianto e alguns tipos de plásticos, porém sempre com restrições com relação ao seu uso,

Na figura abaixo apresentamos vários tipos e formatos de isoladores:

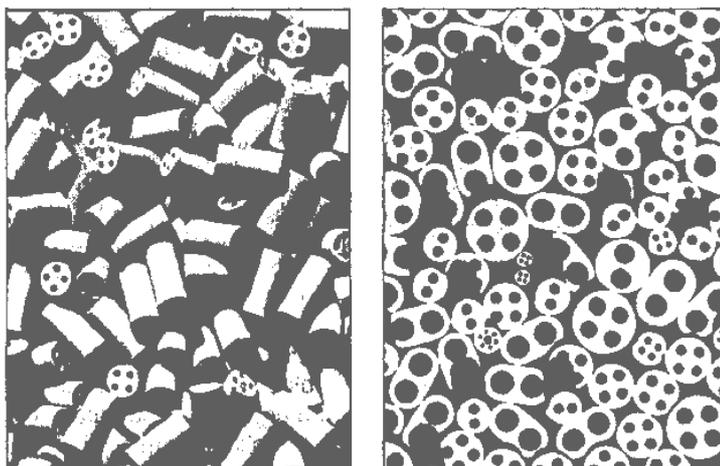


Fig. 42

#### 11.9.2 - Blocos de Ligação

A função do bloco de ligação é a de interligar o termopar ao fio ou cabo de extensão ou compensação, e prendê-los no cabeçote.

A base é feita de cerâmica isolantes e os contatos (que podem ser 2,3,4 ou 6) são feitos de latão niquelado ou cobre.

Existem diversos tamanhos e formatos, que são estabelecidos pelo tipo do termopar e cabeçote utilizados.

Na figura abaixo tem-se vários tipos e tamanhos de blocos de ligação.

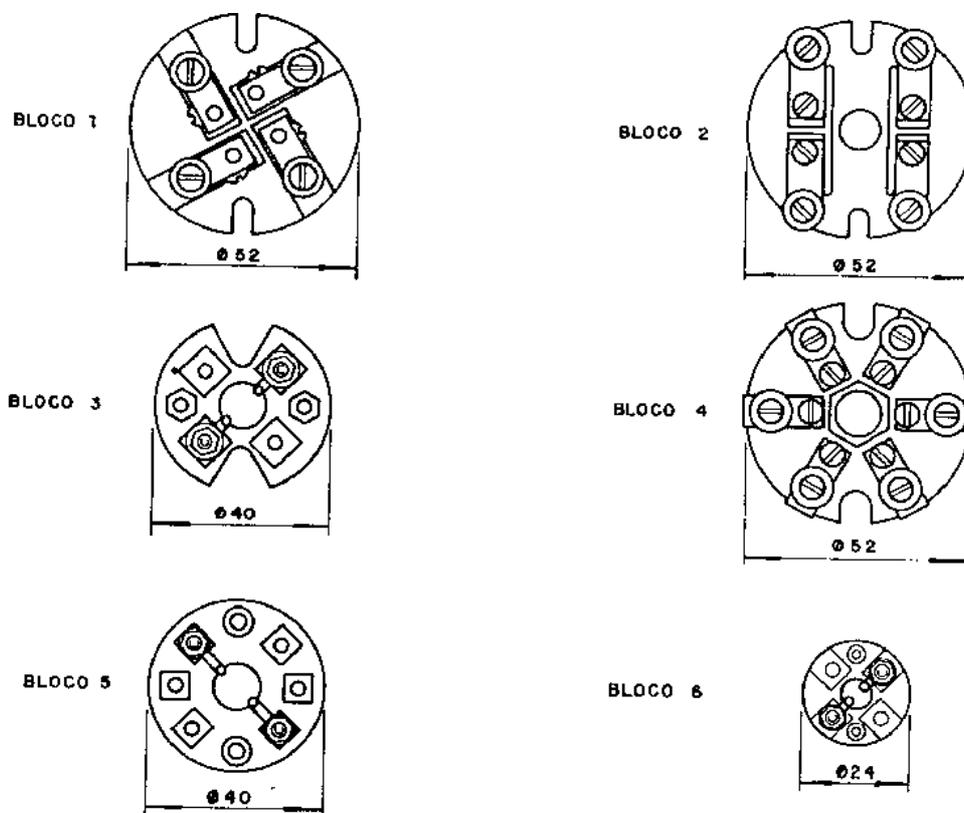


Fig. 43

### 11.9.3 - Cabeçotes

A função do cabeçote é de proteger os contatos do bloco de ligação, facilitar a conexão do tubo de proteção e do conduíte, além de manter uma temperatura estável nos contatos do bloco de ligação, para que os contatos feitos de materiais diferentes do termopar não interfiram no sinal gerado por ele.

Os cabeçotes são feitos normalmente, de alumínio ou ferro fundido, existindo também em vários tipos e formatos, dependendo do ambiente a ser aplicado.

Seus tipos são:

- Universal/miniatura
- À Prova de Tempo
- À Prova de Explosão
- À Prova de Tempo e Explosão
- Cabeçote para Multitermopares

Cabeçote Universal, é um cabeçote para uso geral em processos industriais. Seu corpo é feito em alumínio ou ferro fundido e sua tampa é parafusada ao corpo ou com fixação do tipo baioneta.

- O Cabeçote tipo miniatura tem praticamente as mesmas características do universal, somente apresentando um menor tamanho.

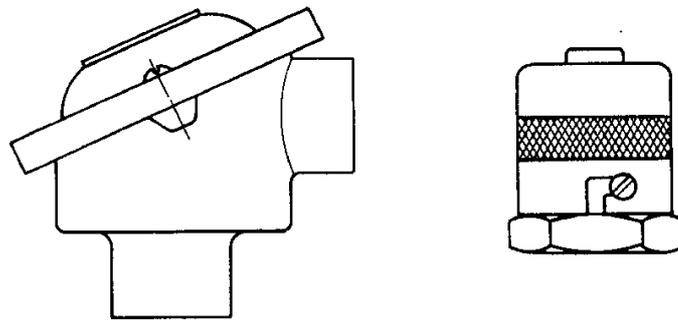


Fig. 44

- Cabeçote à Prova de Tempo, é um cabeçote mais robusto, indicado para ambientes onde é necessário a proteção contra os efeitos do meio ambiente como umidade, gases não inflamáveis, poeiras, vapores e altas temperaturas, à prova de poeira e respingos conforme norma ABNT. Possui internamente juntas de vedação (gaxetas), que fazem a vedação contra o tempo, vapor, gases e pó.

Seu corpo é feito de alumínio ou ferro fundido com sua tampa rosqueada para maior proteção.

Sua classificação é NEMA 4.

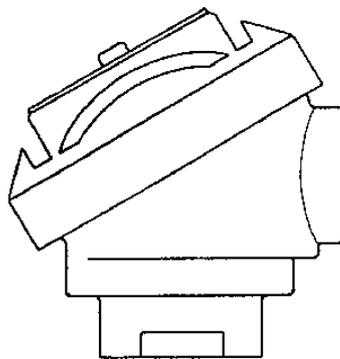


Fig. 45

- Cabeçote à Prova de Explosão, é um Cabeçote robusto, destinado a aplicações em áreas classificadas ou locais contendo gases inflamáveis sujeitos a explosão. Construídos de acordo com as normas brasileiras ABNT P-EB-239 e internacionais NEC 500 e NEMA 7 para invólucros à prova de explosão.

Tem como finalidade limitar os efeitos de uma eventual explosão ou incêndio no seu interior, evitando que seus efeitos venham a atingir áreas seguras, instalações elétricas e painéis de controle

Possui uma resistência mecânica bem superior aos anteriores, corpo em alumínio ou ferro fundido e tampa rosqueada para facilitar a manutenção.

#### 11.9.4 - Conectores Compensados

Nas aplicações onde se faz necessário efetuar medições freqüentes de temperatura, na qual a conexão do sensor ao cabo ou instrumento tornar-se-ia onerosa; faz-se uso dos conectores compensados.

Estes conectores compensados permitem uma rápida, prática e eficiente conexão entre termopares e fios e cabos de extensão ou de compensação ou entre instrumentos.

São construídos com as mesmas ligas dos termopares (exceto para os tipos S e R que são de outros materiais), para compensar gradientes de temperaturas que poderiam causar erros na medição como visto anteriormente; seguindo os mesmos limites de erros para fios e cabos de extensão e compensação segundo as normas ANSI e IEC.

Além disto eles são polarizados (o pino negativo possui um diâmetro maior ou no caso dos mini conectores é mais largo) que o positivo, evitando as freqüentes e incômodas inversões de polaridade que sempre causam transtorno ao processo. Para realçar ainda mais, no seu corpo vem marcado em relevo a polaridade de cada terminal.

Seu corpo pode ser de nylon, fibra de vidro, teflon ou cerâmica podendo ser usado em várias temperaturas, a mais comum é no mínimo 200°C.

Sua identificação é feita através da coloração externa do seu corpo, que está de acordo com a norma ANSI MC 96.1 para termopares.

Tabela de cores para os conectores compensados, segundo a norma americana ANSI MC 96.1 de 1982:

TIPO	POSITIVO	NEGATIVO	COR EXTRA
T	COBRE	COBRE - NÍQUEL	AZUL
J	FERRO	COBRE - NÍQUEL	PRETA
E	NÍQUEL – CROMO	COBRE - NÍQUEL	VIOLETA
K	NÍQUEL – CROMO	NÍQUEL - ALUMÍNIO	AMARELA
S/R	COBRE	COBRE - NÍQUEL	VERDE
B	COBRE	COBRE	BRANCA
N	NÍQUEL – CROMO - SILÍCIO	NÍQUEL - SILÍCIO	LARANJA

Existem também os mini-conectores, que tem as mesmas características dos conectores comuns, porém com dimensões menores; permitindo o uso em espaços reduzidos e sendo ideais para sensores de pequenos diâmetros

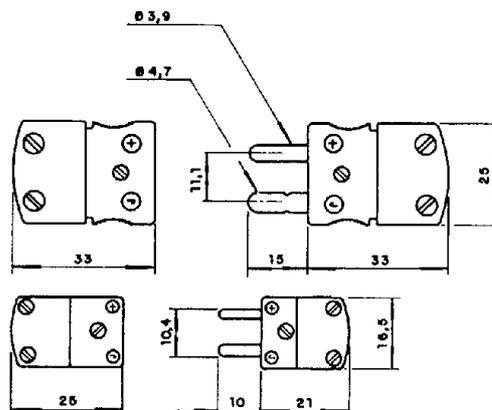


Fig. 46

### 11.9.5 - Conexões Ajustáveis ou Bucins

O bucim ou conexão ajustável permite fácil instalação dos termopares, isolamento mineral e termoresistências ao processo, facilitando o ajuste do comprimento de inserção pelo deslocamento sobre a bainha metálica.

Estes podem ser de aço inóx, latão ou latão niquelado, podendo ser usados em bainhas de 1,0; 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 8,0 mm de diâmetro com diferentes tipos e diâmetros de roscas (NPT, BSP, BSPP), para a conexão ao processo.

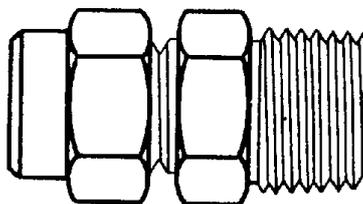


Fig. 47

O bucim é constituído por: capa, anilha e o seu corpo propriamente dito.

Seu funcionamento é bastante simples; rosqueando a capa no corpo, a anilha é pressionada contra a bainha metálica, dando uma forte fixação.

Os bucins podem ter aplicações especiais além de prender o sensor ao processo, eles podem ser usados para vedação (serem herméticos) para vácuo, altas pressões ou a prova de tempo (isolação de teflon).

Existem também o chamado bucim reajustável, no qual a anilha é feita de teflon, permitindo o ajuste em diferentes posições sem prejudicar a anilha como no caso do bucim ajustável.

#### 11.9.6 - Tubos de Proteção

Os tubos de proteção tem como função principal a de proteger os termopares do ambiente de trabalho (processo), pois na maioria das aplicações o ambiente do processo agride os termopares e caso fossem usados sem proteção, teriam uma vida útil muito reduzida.

Os tubos de proteção não são designados para ligação estanque de vasos, reatores ou qualquer outro local onde seja necessário vedação.

Na especificação dos tubos de proteção devem ser levados em consideração todas as condições de uso tais como, temperatura, atmosfera do processo, resistência mecânica, pressão, tipos de fluido em contato, velocidade de resposta entre outras.

As condições do processo que devem ser protegidas pelo tubo de proteção são o contato do termopar com metal (sólido, líquido ou vapor), gases e fumos provenientes de combustão, enxofre, óxidos metálicos, eletrólitos e outras diversas substâncias que causariam a degradação e perda da calibração do sensor.

Outro fator a se considerar é quanto à maneira e o local a ser instalado o tubo, com relação a posição, inserção e tempo de resposta.

Na figura abaixo, tem-se o esquema de um tubo de proteção:

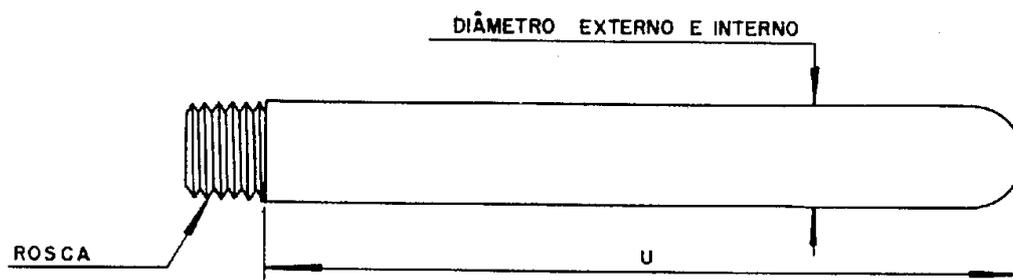


Fig. 48

Os tubos de proteção podem ser divididos em:

- a) Tubos de proteção metálicos

São constituídos a partir de uma chapa enrolada e costurada ou a partir de tubos sem costura.

Um tubo com costura provém de uma chapa metálica enrolada e soldada longitudinalmente (costurada) e polida para dar um acabamento final.

Os tubos sem costura são feitos através de um processo mecânico no qual o material metálico fica sem soldas em sua extensão (extrudados).

A extremidade do tubo (independente do modo de construção) é normalmente fechada através de caldeamento ou soldagem e rosqueado na outra extremidade para adaptação ao cabeçote.

Devemos lembrar que em temperaturas que ultrapassam 800°C aproximadamente, acelera-se o processo de corrosão, fadiga do material, dilatação e reações químicas que podem danificar a estrutura do material. Quando isto for inevitável no processo, recomenda-se o uso de tubos duplos (um tubo externo e um interno), dando maior proteção ao termopar.

A conexão do tubo ao processo pode ser feita por meio de rosca, flange ou mesmo soldada, mas normalmente o tubo de proteção não é designado para dar

estanqueidade (vedação) ao processo e sim somente proteção ao elemento sensor; sendo fixado ou colocado no meio onde vai atuar.

Os materiais metálicos mais usados nos tubos de proteção são ferro fundido, aço carbono, aço inoxidável (304, 310, 316, 321), aço cromo 446, alloy 600, hastelloy, monel entre outros.

#### A - Seleção de Materiais de Poços e Tubos de Proteção

Para correta especificação destes, é necessário levar em consideração todas as condições de uso, tais como temperatura, resistência mecânica, atmosfera de trabalho, velocidade de fluxo, tipo de fluido, velocidade de resposta, entre outros.

#### B - Características dos Materiais de Proteção Metálicos

##### B.1 - Aço Carbono:

Temperatura máxima de utilização 550°C. De uso geral com resistência à corrosão limitada, podendo não deve ser usado continuamente em ambientes oxidantes ou redutores

##### B.2 - Aço Inóx 304:

Temperatura máxima de utilização 900°C Largamente utilizado como material de proteção em baixas temperaturas. Resistente a corrosão mas não recomendável para uso em atmosferas sulfurosas ou com chamas redutoras.

Sujeito a precipitação de carbide na faixa de 482 a 871°C que pode reduzir sua resistência à corrosão. Aplicações principais estão em indústrias químicas petroquímicas, alimentícias, plásticas entre outras.

##### B.3 - Aço Inóx 310:

Máxima temperatura de uso 1100°C. Elevada resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas. Boa resistência em ambientes redutores, sulfurosos e carbonizantes. Resistência mecânica superior ao inóx 304.

##### B.4 - Aço Inóx 316:

Máxima temperatura de uso 900°C. Melhor resistência ao calor, ácidos e álcalis do que o inóx 304. Aplicável para uso na presença de componentes sulfúricos.

##### B.5 - Aço Cromo 448:

Máxima temperatura de uso 1100°C. Excelente resistência à corrosão e oxidação em atmosferas sulfurosas. Utilizado para uso em banhos de sal, metais fundidos é outras aplicações que envolvam altas temperaturas. Boa resistência em ácidos nítrico, sulfúrico e na maioria dos álcalis.

#### B.6 - Alloy 600:

Máxima temperatura de uso 1150°C. Boa aplicação em ambientes corrosivos sujeitos a altas temperaturas. Excelente resistência mecânica. Não aplicável em atmosferas contendo enxofre (sulfurosas).

#### B.7 - Alloy 800:

Máxima temperatura de trabalho no ar de 1090°C. Boa resistência à oxidação, carbonização e outros efeitos prejudiciais da exposição a altas temperaturas.

#### B.8 - Nióbio:

Boa resistência a corrosão em metais líquidos até 1000°C, Temperatura máxima de operação 2000°C em vácuo ou atmosfera neutra.

#### b) Os tubos de proteção cerâmicos

São usados normalmente em processos que envolvam temperaturas superiores a 1200°C, onde as ligas metálicas não resistiriam por muito tempo.

Poderia-se usar alguns materiais metálicos como o tântalo e o molibdênio que trabalham em temperaturas muito elevadas (até 2500°C aproximadamente), mas que oxidam rapidamente em temperaturas altas e são muito caros para o uso. Então usam-se os materiais cerâmico que na maioria dos casos são utilizados para proteger os termopares nobres.

Sua principal aplicação é em siderúrgicas, fundições, indústrias cerâmicas e de vidro.

Suas vantagens são a resistência à alta temperatura, neutralidade à reações químicas, boa resistência à abrasão entre outras características; porém suas desvantagens são baixa resistência mecânica, sensibilidade a choques térmicos, porosidade em temperaturas elevadas.

Os materiais cerâmicos mais utilizados são a alumina, quartzo, carbureto de silício entre outros.

Existem também os tubos metálicos/cerâmicos ou "Cermets", que são combinações de metais e óxidos metálicos os quais depois de um tratamento apropriado tornam-se tubos com grande resistência mecânica, resistente a corrosão e choques térmicos, bem melhores do que os tubos cerâmicos. Usado até 1400°C na maioria das atmosferas.

### C - Características dos Materiais de Proteção Cerâmicos

#### C.1 - Cerâmica Tipo 610-Mulita:

Temperatura máxima de utilização 1650°C. Contém 60% de alumina e 40% de sílica na composição. Possui boa condutibilidade térmica, boa resistência mecânica) sensível a choques térmicos (deve ser pré-aquecido). Material não poroso.

#### C.2 - Cerâmica Tipo 710-Alumina Recristalizada:

Temperatura máxima de utilização 1900°C. Contém 99% de alumina na composição. Possui condutibilidade térmica, resistência mecânica e estabilidade química superior ao tipo 610; sensível a choques térmicos (um leve pré-aquecimento é necessário).

Estes tubos são impermeáveis à maioria dos gases sob condições de processo.

### C.3 - Carbureto De Silício:

Temperatura máxima de utilização 1500°C. Material altamente poroso e de baixa resistência mecânica. Possui alta condutibilidade térmica e é resistente a choques térmicos.

### C.4 - Carbureto de Silício Recristalizado:

Temperatura máxima de utilização 1650°C. Apresenta baixa resistência mecânica e porosidade.

Possui alta condutibilidade térmica e excelente resistência a choques térmicos.

Boa resistência em ácidos e alcalis, é utilizado em metais líquidos como zinco, chumbo, alumínio, cobre entre outros.

### Nota:

Outros tipos de materiais cerâmicos podem ser fornecidos sob consulta, tais como zirconita, quartzo e outros para aplicações específicas.

### 11.9.7 - Poços Termométricos

O poço termométrico possui a mesma função básica dos tubos de proteção, que é a de proteger os termoelementos contra a ação do processo (ambientes agressivos, esforços mecânicos entre outros).

Porém sua aplicação difere dos tubos de proteção, pois é fornecido com meios para ligação estanque do processo ou seja, veda o processo contra vazamentos, perdas de pressão, contaminações e outros.

Genericamente usa-se o poço onde as condições do processos requisitam alta segurança e são críticas tais como altas temperaturas e pressões, fluidos muito corrosivos, vibrações e alta velocidade de fluxo.

O poço termométrico difere do tubo quanto a sua construção física (já que os materiais utilizados são os mesmos). Enquanto os tubos são fabricados de uma chapa metálica enrolada e soldada, os poços são leitos a partir de uma barra maciça usinada, executando um furo interno longitudinal mantendo-se assim a espessura da parede de acordo com especificações pré-determinadas, proporcionando assim ao conjunto final, resistência mecânica à pressão e deformação superiores aos tubos metálicos.

Os poços são totalmente usinados interna e externamente, e polidos para diminuir o atrito. Como não há soldas longitudinais, mesmo em altas pressões, garante-se a Integridade do poço.

Sua fixação ao processo é feita por meio de rosca externa, solda, flange ou outros meios para a fixação hermética a um vaso por exemplo, eliminando a necessidade de parada para esvaziamento do processo para troca ou manutenção dos sensores.

Um problema muito perigoso a que os poços estão sujeitos é o efeitos da vibração.

O fluido que se atrita no poço forma uma turbulência que tem uma frequência definida na relação entre o diâmetro do poço e a velocidade do fluido. É importante que o poço tenha suficiente rigidez mecânica, para que a frequência de turbulência esteja sempre abaixo da sua frequência natural (ou de ressonância) Caso a frequência de turbulência seja igual a frequência natural do poço, este vibrará e tenderá quebrar-se. Perdendo-se o poço, além de não termos mais a vedação do processo, pode haver uma contaminação, perda de carga ou trasbordamento de algum líquido também o sensor de temperatura poderá se perder.

Os poços com haste cônica são os que apresentam melhores resultados frente ao problema da vibração, pois proporcionam maior rigidez mecânica por uma mesma sensibilidade em relação aos poços de haste paralela ou reta.

Outro fator a se considerar é quanto à maneira e o local a ser instalado o poço, com relação à posição, inserção e tempo de resposta.

Na montagem de um poço termométrico, para que haja um distanciamento mínimo do cabeçote às paredes do processo e para permitir a remoção do sensor sem ter que parar o processo, utiliza-se de dispositivos que se estendem entre o poço e o cabeçote. Esta extensão pode ser lisa à qual se chama de “niple” ou com rosca e “niple” à qual se chama de união.

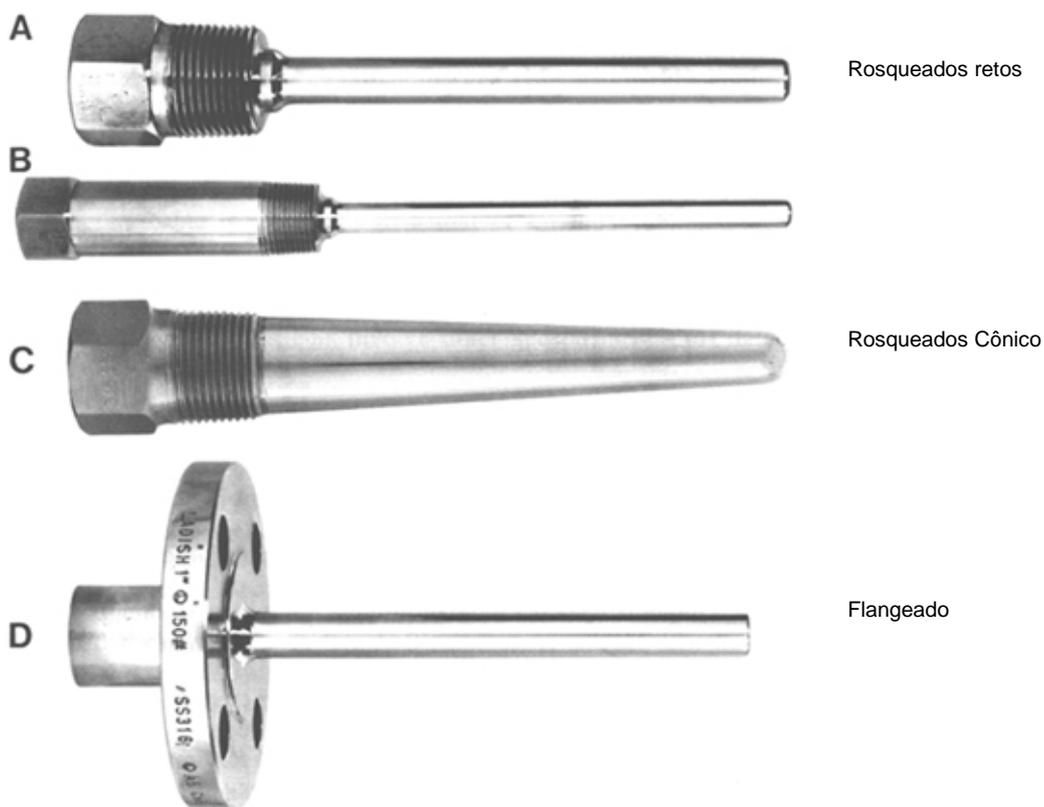


Fig. 49

Todos os poços termométricos passam por uma série de testes para verificar sua integridade e garantir a vedação do processo. Estes testes são dimensionais, líquido penetrante, pressão hidrostática, ultra-som e inspeção em raio X.

## 11.10 - Cuidados e Recomendações nas Instalações e Medições com Termopares

### 11.10.1 - Junção de Referência

Conforme já exposto, na medição de temperatura utilizando sensores tipo termopares obtém-se uma tensão cuja geração refere-se à diferença de temperatura entre suas junções. Desse modo para que não haja erro na leitura dos valores medidos, a junção que é conectada ao instrumento receptor da tensão elétrica (transmissor, indicador, registrador, cartão de PLC ou SDCD, etc...) deve estar referenciada a um valor fixo de temperatura ou compensada automaticamente. Três métodos são normalmente utilizados, são eles:

#### a - Junção de referência a 0°C

Nesse método, a junção de referência é mantida a 0°C pela utilização de uma garrafa térmica contendo gelo triturado. É o tipo utilizado para medições padrões.

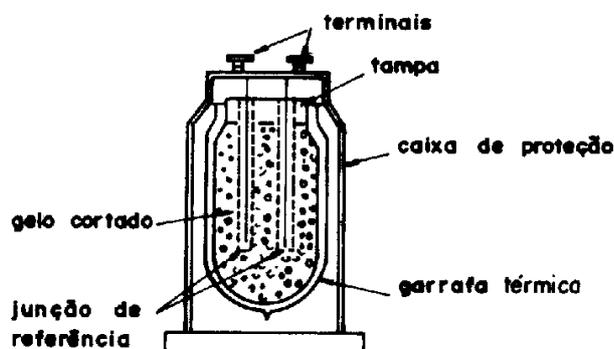


Fig. 50 - Junção de referência a 0°C.

#### b - Junção de referência com forno térmico

Nesse método, a junção de referência é mantida a uma temperatura constante, normalmente 50°C, através da utilização de um forno elétrico. Foi o método muito utilizado na indústria, face a facilidade de uso quando comparado ao método de referência a 0°C. Sua desvantagem está no fato de as tabelas de milivoltagens geradas pelos diversos tipos de termopares serem referenciados a 0°C. Desse modo, quando da calibração do instrumento receptor, deve-se ter o cuidado de acrescentar o valor de milivolt correspondente à temperatura do forno de referência.

#### c - Junção de referência com compensação automática

Esse é o método mais utilizado nas medições industriais na atualidade pois permite leituras corretas independente da temperatura da junção de referência. Sua construção típica está baseada em uma ponte de Wheatstone constituída por três resistências fixas com a temperatura e uma cujo valor ôhmico varia com a temperatura ambiente. Assim, após feito balanceamento da ponte, surgirá uma tensão elétrica equivalente à variação da temperatura na junção de referência sempre que a mesma variar, que será adicionada à tensão gerada pelo termopar.

A figura 51 mostra um exemplo típico de junção de referência tipo compensação.

$R_t$  = resistência de compensação para junção de referência  
 $r_1$ ;  $r_2$ ;  $r_3$  = resistências fixas

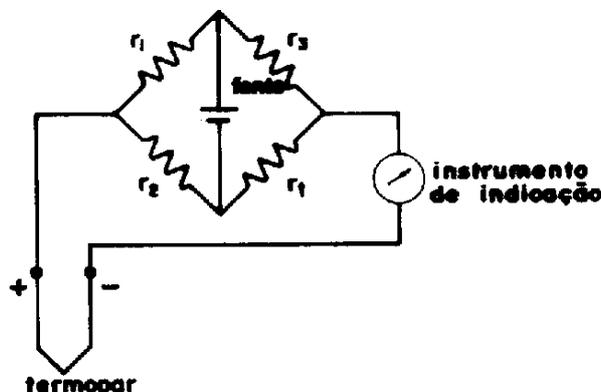


Fig. 51

### 11.10.2 - Instalação

A instalação do termopar deve ser perfeitamente adequada, para que este apresente boas características de precisão, manutenção e vida útil.

O comprimento da proteção e do elemento do termopar deve ser de tal forma que acomode a junta bem no meio do ambiente em que se deseja medir a temperatura. Um comprimento de inserção mínimo recomendado é cerca de 8 a 10 diâmetros da proteção, para minimizar o erro por condução. Esta deverá, ainda, estar internamente limpa e livre de componentes sulfúricos, óleos, óxidos e umidade.

O cabeçote é recomendado para que sejam feitas as conexões entre o termopar e o cabo de extensão, permitindo, também, a fácil substituição do elemento termopar. A proteção deverá se estender até a face externa do equipamento, cerca de 10 mm, de tal modo que a temperatura do cabeçote seja aproximadamente igual ao ambiente externo ao equipamento, devendo esta nunca exceder a faixa de utilização recomendada para fios e cabos de extensão e de compensação. Isto deve ser rigorosamente observado quando se utiliza cabos de compensação.

Em equipamentos com aquecimento a gás ou óleo combustível, a chama não deve atingir a proteção diretamente pois, caso isto ocorra, teremos uma medida incorreta da temperatura, além de reduzir a vida útil da proteção.

Quando se utilizam termopares com tubo de proteção cerâmica, antes de sua inserção em ambiente com temperatura elevada, deve-se pré-aquecer os tubos, a fim de evitar o choque térmico e, conseqüentemente, a quebra do tubo.

A proteção deve ser presa ao equipamento, de tal modo que se evite o escape de gases do processo; caso isto ocorra, estes podem vir a atacar o elemento termopar, o que diminuirá sua vida útil.

Nas medições de temperaturas elevadas deve-se, preferivelmente, colocar o termopar na vertical, para evitar, assim, a deformação da proteção, devido ao peso próprio.

### 11.10.3 - Erro de medição

#### a - Inserção inadequada

Para obter o valor correto da temperatura a ser medida, o fator básico na especificação do sensor é a definição do ponto de medição e seu comprimento de inserção.

Embora isto seja uma tarefa ingrata, é primordial para um perfeito desempenho da malha de temperatura. Para exemplificar como pode ser equivocada a medição de temperatura se o comprimento do sensor for inadequado, vamos recorrer a fig. 52. Nela aparecem situações diversas de comprimento de inserção numa medição de temperatura interna de um forno.

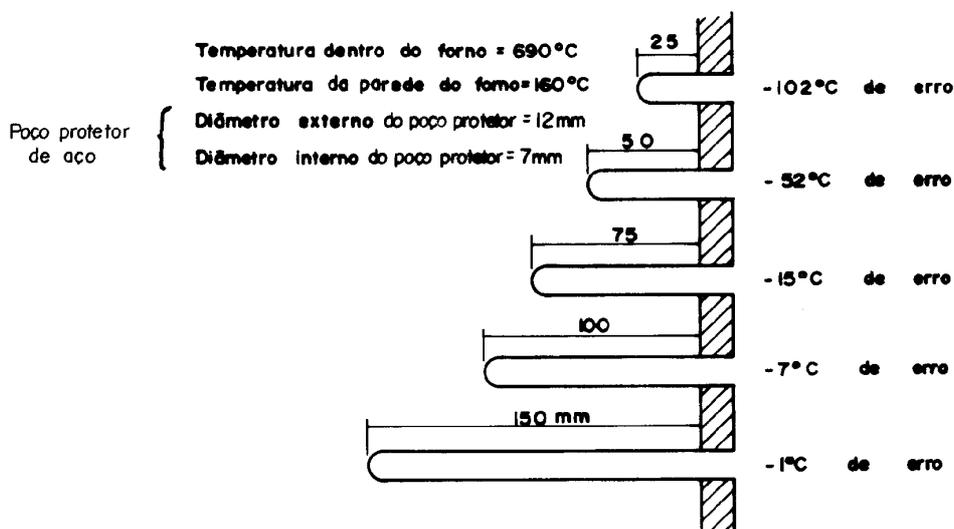


Fig. 52 - Erro por condução de calor

Já a fig. 53 indica erros por instalação quando se mede a temperatura de vapor superaquecido.

Esses erros ocorrem por queda de temperatura na junção de medição do termopar.

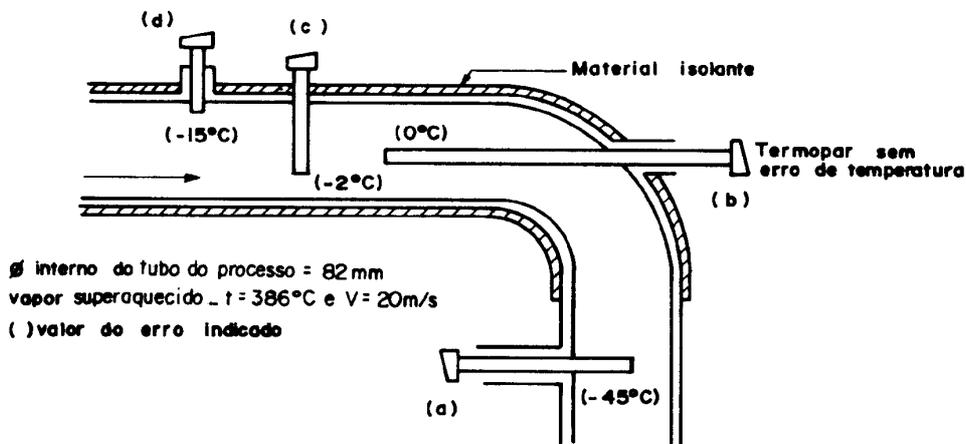


Fig. 53 - Erro de instalação

#### b - Erro devido a ruídos

Ruído é qualquer distúrbio ou sinal falso que, acoplado de diferentes maneiras numa linha de sinal de termopar e superposto ao sinal original, tende a alterar o conteúdo das informações, o que reduz a precisão das medidas, controles e registros; tornando as malhas de controle mais instáveis e menos confiáveis.

Como os termopares geram sinais de baixo nível (milivolts), qualquer campo elétrico ou magnético pode interferir nos sinais gerados pelo sensor.

Existem inúmeras fontes de ruídos inerentes ao processo industrial, como por exemplo, linhas de alta tensão, controles tiristorizados (SCR, TRIAC), Walk-Talk, reatores de lâmpadas fluorescentes, motores C.A. e C.C., geradores elétricos, transmissores e receptores de comunicação, cabos de telefonia, centro de controle de motores, máquinas de solda elétrica, fornos de indução, contadores e disjuntores, máquina de colar plástico por rádio-frequência, forno de microondas, processos eletrolíticos, transformadores e inúmeras outras fontes de ruídos.

Todas estas fontes podem fazer com que a linha de sinal de termopar capte estes ruídos e os conduza para a instrumentação, tendo como consequência uma sensível redução na performance e confiabilidade dos sistemas de instrumentação.

Os ruídos se dividem em eletrostático, de modo comum, e magnético.

1. O ruído eletrostático é causado por campos elétricos próximos ao sistema de medição de temperatura a termopar.

Estes campos elétricos são gerados por linhas de força próximas ao sensor ou cabo e acopladas capacitivamente a eles.

Estes ruídos são atenuados por uma blindagem e aterramento do fio ou cabo de extensão e compensação. A blindagem (shield) e o aterramento, conduz os ruídos para o terra não indo mais para o instrumento receptor.

Além da blindagem e aterramento, deve-se separar o mais distante possível, linhas de força de linhas de sinais.

Deve-se atentar para que o terra deva ser eficiente; ou seja; ter um valor de resistência de terra baixo (menor que  $10\Omega$ ).

2. Os ruídos de modo comum são causados por um mau aterramento, ou seja, diferentes potenciais de terra.

Quando dois pontos de terra diferentes são ligados a um mesmo sistema, ocorre a circulação de correntes de terra, fazendo com que o ruído retorne ao sistema e vá ao instrumento receptor. Isto é muito comum quando se usa termopares com junção aterrada. Portanto para evitar o duplo aterramento, deve-se somente aterrar a blindagem em um único ponto de terra; no terra do instrumento se o termopar for de junção isolada, ou no mesmo terra do termopar (tubo de proteção) caso este for de junção aterrada.

3. Ruídos magnéticos são produzidos por campos magnéticos gerados pela circulação de corrente em condutores elétricos ou de motores e geradores elétricos.

Se o campo magnético gerado passa através do sistema de medição de temperatura a termopar, este campo pode acoplar-se e induzir uma corrente elétrica espúria no sistema.

O método para a minimização dos ruídos magnéticos é a torção dos fios ou cabos de extensão e de compensação. A torção dos cabos, faz com que a corrente induzida se cancele, atenuando este tipo de interferência.

Quanto maior for o número de torções, mais eficiente será contra os ruídos.

Para uma melhor proteção, os fios ou cabos de extensão e compensação devem ser torcidos e blindados.

Além de todos estes métodos de se minimizar as interferências nos sinais gerados nos pares termoeletrônicos, a instrumentação também deve ter circuitos de entrada e saída isolados galvânica ou opticamente ou técnicas de software para uma melhor performance no sistema de medição de temperatura a termopar.

Todas estas técnicas de hardware ou software para filtrar as entradas de informações combatem, de diferentes maneiras, o ruído já introduzido na linha de sinal. No entanto é muito melhor limitar a quantidade de ruído que pode se infiltrar na linha.

Um modo de se conseguir este objetivo é através do uso de Transmissores de Sinais para carregar a linha com um sinal de tensão ou corrente contínua de alto nível (1 a 5Vcc ou 4 a 20mA).

O uso dos transmissores de sinal possibilitam, além de tornar o circuito termoeletrico quase imune aos problemas de ruídos espúrios, também algumas vantagens como a de se utilizar fios e cabos de cobre comuns, não precisar de blindagens e aterramentos, não necessitar de instalação especial (bandejas e conduites comuns), transmissão de sinais a grandes distâncias, padronização de sinais e custos de instalação reduzidos caso as distâncias forem grandes entre sensor e instrumento. Dependendo da faixa de trabalho consegue-se também uma maior precisão do que a montagem convencional com fios e cabos de extensão e de compensação.

### **11.11 - Calibração de Termopar**

Assim como qualquer outro sensor, medidor, transmissor, etc..., o termopar está sujeito a ter suas características alteradas com o uso ao longo de um tempo, principalmente sob condições severas de temperatura a atmosfera agressiva.

Assim, para garantir a precisão da malha em que o mesmo está instalado, periodicamente o mesmo deve ser calibrado. Porém, ao contrário dos outros instrumentos e sensores, o conceito de calibração neste caso é bem diferente, pois não se executa ajustes no mesmo e sim executa-se o levantamento de sua curva de milivolt gerado com a temperatura, o usuário deve verificar se a mesma está de acordo com as especificadas pela norma utilizada na fabricação do mesmo. Se todos valores levantado estiverem dentro das tolerâncias aceitas pela sua classe de precisão, o mesmo poderá ser usado. Caso contrário, é recomendado sua substituição. Para efetuar a calibração de um termopar existem dois métodos principais que podem ser utilizados. São eles:

a - Calibração absoluta ou por ponto fixo

Esse método baseia-se no levantamento do sinal gerado por um termopar em vários pontos fixos de temperatura como pontos de solidificação, ebulição e pontos triplos de substâncias puras, padronizadas atualmente pela ITS-90 (desde 01/01/1990) .

Para a realização da calibração, coloca-se o sensor a ser rastreado submetido a temperatura referente a esses pontos fixos e faz-se a leitura do sinal gerado com um instrumento padrão. O sinal lido é comparado com o valor conhecido do ponto fixo, verificando-se qual o desvio do sensor em relação ao ponto fixo.

Esse procedimento é repetido em vários outros pontos fixos conhecidos de modo a cobrir toda a faixa de trabalho do sensor.

Este é um método de alta precisão, porém de custo elevado, pois exige laboratório

sofisticado e profissional extremamente qualificado.

Face a isto, normalmente é utilizado para rastrear e certificar sensores padrões.

Escala de Temperatura Padronizada pela ITS-90:

Zero Absoluto	-273,15 °C
Ponto Triplo do Hélio	-259,3467 °C
Ponto Triplo do Neon	-248,5939 °C
Ponto de Ebulição do Nitrogênio	-195,7980 °C
Ponto Triplo do Argônio	-189,3442 °C
Ponto de Ebulição do Oxigênio	-182,9540 °C
Ponto Triplo do Mercúrio	-38,8344 °C
Ponto Triplo da Água	+0,01 °C
Ponto de Fusão do Gálio	+29,7646 °C
Ponto de Solidificação do Índio	+156,5985 °C
Ponto de Solidificação do Estanho	+231,9280 °C
Ponto de Solidificação do Zinco	+419,5270 °C
Ponto de Solidificação do Alumínio	+660,3230 °C
Ponto de Solidificação da Prata	+961,7800 °C
Ponto de Solidificação do Ouro	+1064,1800 °C
Ponto de Solidificação do Cobre	+1084,6200 °C

b - Calibração pelo método de comparação

Esse método é baseado na comparação dos valores obtidos pelo termopar a ser calibrado e um termopar padrão (tipo R ou S), ambos nas mesmas condições de medição.

Por ser mais simples e não exigir laboratório tão sofisticado, este método é o mais utilizado na indústria.

O método requer o uso de um termopar padrão e suas curvas de calibração, um sistema de medição de alta precisão, além de um forno especial para calibração.

Este forno deve ter a temperatura precisamente controlada.

O termopar padrão e os termopares a serem calibrados são imersos no forno. Quando o forno atinge o equilíbrio e estabilidade térmica numa dada temperatura, esta pode ser determinada pelo termopar padrão acoplado ao sistema de medição, estabelecendo-se a correlação com cada termopar a ser calibrado.

Assim como no método anterior, se o sensor em calibração se encontrar fora de sua especificação é feito relatório recomendando sua substituição.

A fig. 54 nos mostra um exemplo de forno para calibração de termopares por comparação.

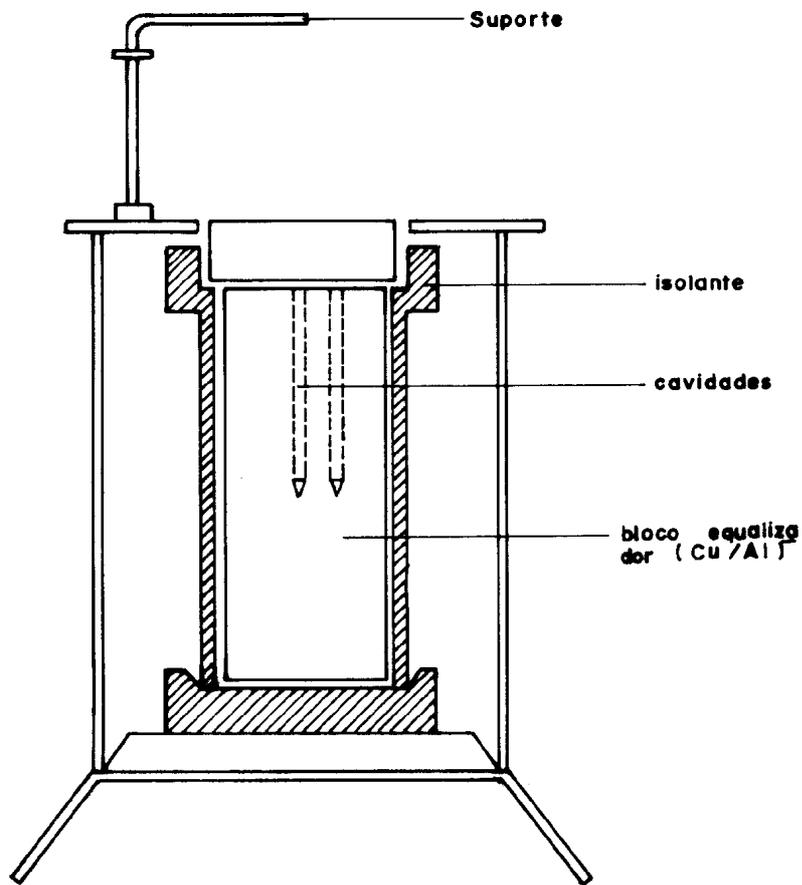


fig. 54

## 12 - Medidores de contato indireto

Os medidores de contato indireto podem ser classificados em três grupos:

- Pirômetro Ótico
- Pirômetro Fotoelétrico
- Pirômetro de Radiação

### 12.1 - Pirômetro Ótico:

Trabalham por comparação de cor, o operador do medidor faz uma comparação entre a cor de um filamento aquecido ao rubro com a cor do objeto em medição. A cor do filamento é definida pela corrente elétrica que circula pelo mesmo, a qual é medida por um miliamperímetro com uma escala relativa a temperatura do objeto. Este medidor apresenta pouca precisão por estar dependente da comparação feita pelo olho humano. A faixa de medição normalmente começa em 600°C.

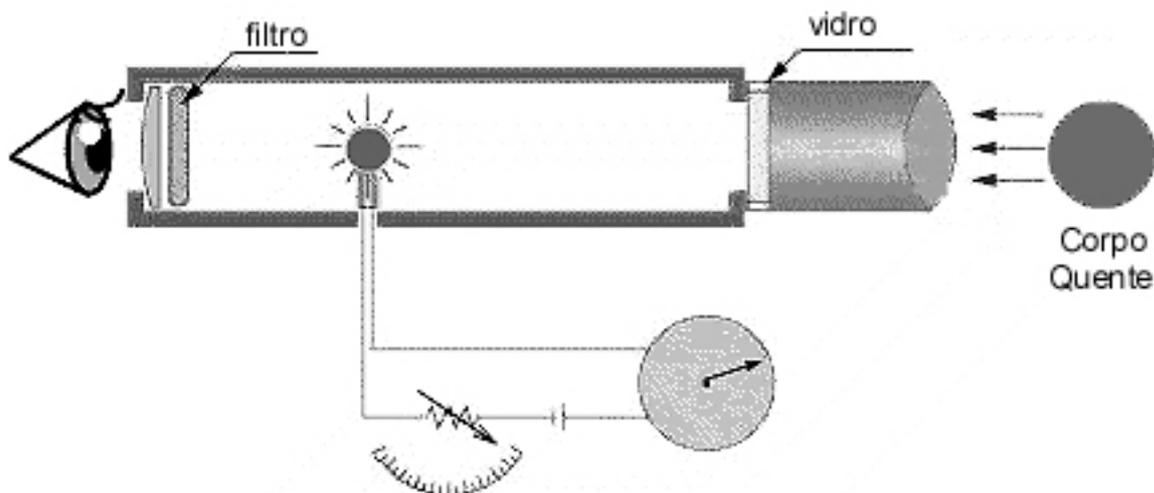


Fig.55 – Pirômetro Ótico

### 12.2 - Pirômetro Radiamático:

Este medidor utiliza a radiação térmica emitida pelo corpo que se deseja medir a temperatura. Por utilizar sensores eletro-eletrônicos este medidor possui uma alta sensibilidade, com isto a faixa de medição normalmente começa em -50 °C.

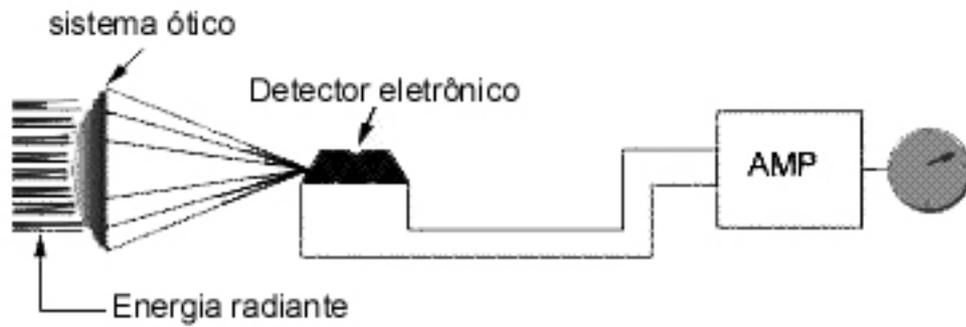


Fig. 56 – Pirômetro Radiamático

Estes medidores precisam ser ajustados para a emissividade dos corpos em medição.

Emissividade : Característica dos materiais relativa à intensidade da radiação emitida.

---

## EXERCÍCIOS DE TEMPERATURA

1) Faça as seguintes conversões:

- 100°F para °C
- 0°F para °C
- 250°F para °C
- 25°C para °F
- 1000°C para °F

2) Para um processo com temperatura que varia de 40°C ~ 150°C, quais sensores poderiam ser instalados (para transmissão de sinal)?

3) Qual o líquido que possibilita uma maior faixa de medição em termômetros a dilatação de líquidos?

4) Qual o princípio de funcionamento dos termômetros bimetálicos?

5) Quais são as vantagens dos termômetros à pressão de gás sobre os de dilatação de líquidos?

6) Qual o metal mais utilizado nos termômetros tipo bulbo de resistência? E por que?

7) Qual a faixa de medição dos Pt100?

8) Como podemos resolver o problema gerado pela resistência dos fios que conectam os bulbos de resistência aos transmissores/medidores ?

9) O que é o problema do autoaquecimento dos bulbos de resistência ?

10) Qual o princípio de funcionamento dos Termopares ?

11) Qual a influência da junta de referência nas medições utilizando termopares ?

12) Podemos ter uma emenda ,feita com fios de cobre, num cabo de termopar sem afetar a medição ? Por que?

# ANALISADORES INDUSTRIAIS

## SISTEMA DE AMOSTRAGEM

### 1 – INTRODUÇÃO

Os sistemas de análise de gases industriais englobam, geralmente, os seguintes elementos.

#### **INSTRUMENTOS DE ANÁLISE OU ANALISADOR**

Equipamento relativamente sofisticado, de operação automática e independente, que tem a finalidade de medir uma ou mais características de uma amostra do processo, que por ele fluem.

#### **SISTEMA DE AMOSTRAGEM**

Equipamento pouco sofisticado de operação automática, com a finalidade de retirar, continuamente do processo, amostras, enviando-as, após preparação, ao analisador. Os analisadores são construídos, geralmente, de modo a receberem uma amostra dentro de certas condições padronizadas de pressão, temperatura, umidade, poeira e corrosividade. As condições do gás, dentro do processo, fogem, geralmente, dos padrões estabelecidos para o analisador.

O sistema de amostragem age como elo de ligação entre o processo e o analisador, transformando uma amostra, inicialmente imprópria para análise, em uma amostra representativa e perfeitamente mensurável. Devido à infinidade de processos existentes nas indústrias, existe, conseqüentemente, uma variedade de sistemas de amostragem, cada qual adaptada às condições peculiares da amostra a ser analisada.

Normalmente, existe uma tendência de relegar a um plano secundário de importância, o sistema de amostragem, durante a instalação do analisador. Este fato implica na existência de uma série de problemas que são atribuídas aos analisadores e, na verdade, são provenientes da aplicação inadequada do sistema de amostragem.

O sucesso da operação de um sistema de análise, no seu todo, está na operação adequada e perfeita do seu sistema de amostragem e do analisador. O sistema de amostragem deve fornecer continuamente ao analisador, uma amostra limpa e representativa, no tocante às características a serem analisadas.

#### 2.1.1 – Captação

A captação de uma amostra representativa é um fator fundamental na precisão geral da medição. A expressão “amostra representativa”, refere-se a característica em medição, como a concentração de um componente, a densidade, viscosidade, capacidade, etc. As características não analisadas podem ser alteradas, desde que não afetem a variável medida.

O problema principal de captação de amostra aparece nos processos em que existe heterogeneidade com relação ao elemento em análise. É o caso da medição do oxigênio residual nas chaminés, ou de outros gases queimados nos processos de combustão.

A figura 1, mostra um corte efetuado em um duto de gases queimados de uma caldeira. Observam-se as diferentes concentrações de oxigênio, de acordo com o local considerado.

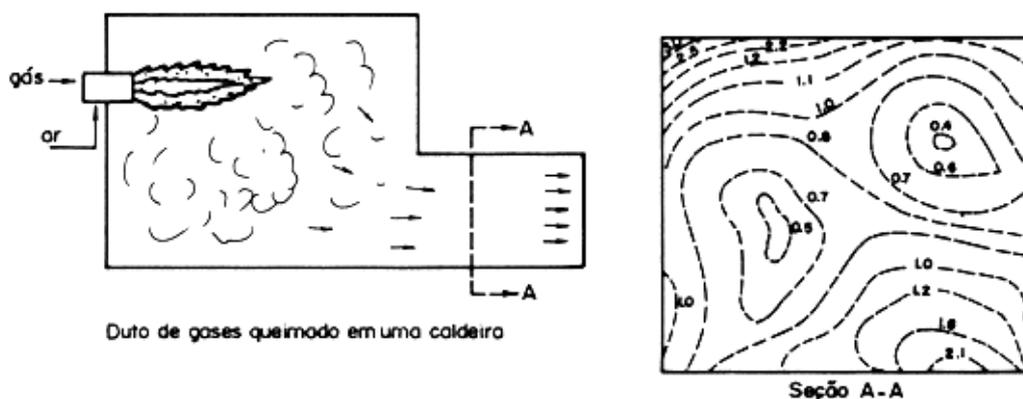


Fig 1

Estas diferenças são provocadas, principalmente, pelas baixas velocidades existentes no interior do duto, permitindo a estratificação do gás junto as paredes, onde as velocidades atingem valores muito baixos. As diferenças de densidade e entrada de ar também contribuem para a heterogenização do fluxo gasoso.

A captação de uma amostra representativa, nestas condições, é bastante difícil. A solução mais simples seria localizar, no processo, um ponto onde houvesse uma homogeneização natural provocada por algum elemento interno, como um ventilador, válvula de controle, placa de orifício, etc.

A solução ideal, sob o ponto de vista técnico, é o sistema de amostragem múltipla, que consiste em retirar do processo várias amostras em pontos diferentes e promover uma mistura homogênea entre elas, de forma a obter uma média aproximada, das condições do processo.

## 2 - FUNÇÕES DE UM SISTEMA DE AMOSTRAGEM

Um sistema de amostragem deve, geralmente, cumprir as seguintes funções:

- Captar, dentro do processo, uma amostra que seja representativa.
- Transportar rapidamente a amostra, do ponto de coleta ao analisador.
- Permitir a entrada de gases-padrão para aferição e pontos de coleta de amostra para análise externa.
- Transportar a amostra do analisador para o ponto de descarga.
- Adequar a amostra as condições de temperatura, pressão, umidade, corrosividade e concentração de poeira e de qualquer outra variável para a qual o analisador foi projetado.

A figura 2 representa esquematicamente as funções abaixo relacionadas.

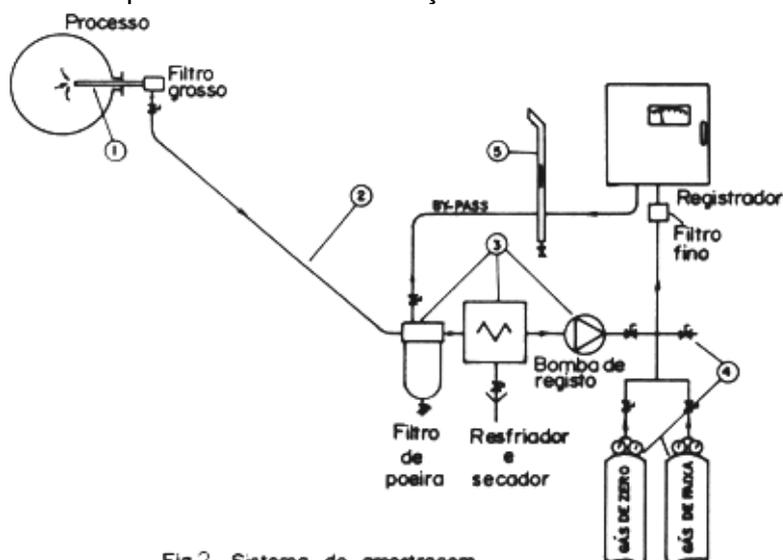


Fig 2 - Sistema de amostragem

- 1 - Captação
- 2 - Transporte
- 3 - Condicionamento
- 4 - Gases para calibração
- 5 - Descarga da amostra

### 2.1 - Captação da Amostra

O sistema de captação da amostra, no interior do processo, deve satisfazer algumas condições básicas:

- a) Retirar do processo uma amostra que representa, realmente, as condições médias do componente ou característica a ser analisada.
- b) Promover um acondicionamento da amostra, a fim de proteger o sistema de transporte da mesma, ao analisador.

O sistema de amostragem múltipla pode ser executado de duas maneiras:

- a) Por meio de uma única sonda que possui vários pontos de captação (fig. 3).

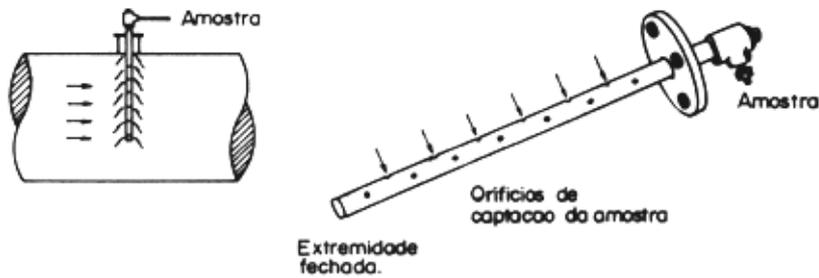


Fig. 3 – Sonda de captação múltipla.

Este sistema possui, como vantagem, a simplicidade de construção. Sua desvantagem está na falta de controle sobre as vazões de entrada em cada orifício, o que comprometerá a média final.

Por meio de várias sondas colocadas em pontos diferentes (fig. 4).

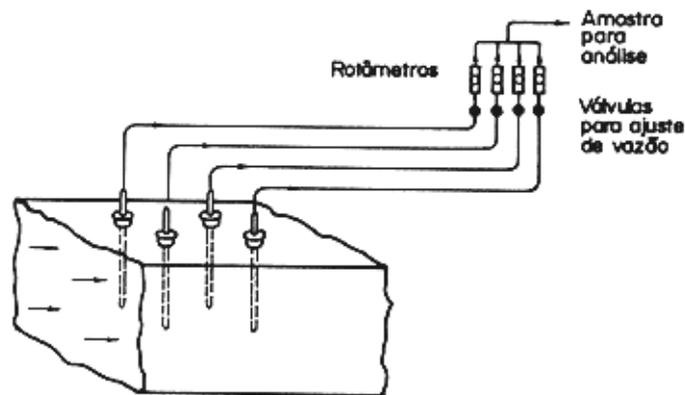


Fig. 4 – Sistema de captação de sondas múltiplas.

A amostra é captada em dois ou mais pontos, individualmente, e misturada em um sistema que permite medir a vazão de cada sonda. Apesar de mais complexo, este processo de captação da amostra fornece ao analisador um gás, com características próximas as da média existente no processo, deve-se ter o cuidado com impurezas nas amostras que venham a obstruir os medidores de vazão ou válvulas .

Outros problemas de captação estão relacionados com a alteração das características em análise da amostra, por fatores como:

a) Entrada de ar na sonda ou no processo próximo ao ponto de amostragem, problema que ocorre com frequência nos sistemas que operam com pressão inferiores a atmosférica.

b) Ação catalítica da sonda sobre a amostra; dependendo do material e da temperatura da sonda, pode ocorrer por exemplo, a queima de alguns resíduos de gases combustíveis.

c) Absorção de algum componente, no caso das sondas, com sistemas de lavagem com água ou vapor.

### - Precondicionamento da amostra

Nos casos em que a amostra apresente condições adversas de temperatura e com impurezas, tornam-se necessárias resfriamento e limpeza prévia, antes de a mesma ser encaminhada ao analisador.

As impurezas, como partículas sólidas, podem ser eliminadas por meio de filtros situados na própria sonda. Na sua forma mais simples, a filtragem pode ser executada por uma sonda chanfrada na extremidade de captação, conforme a figura 5. Nesta sonda, as partículas mais pesadas não penetrarão, devido a inércia das partículas.

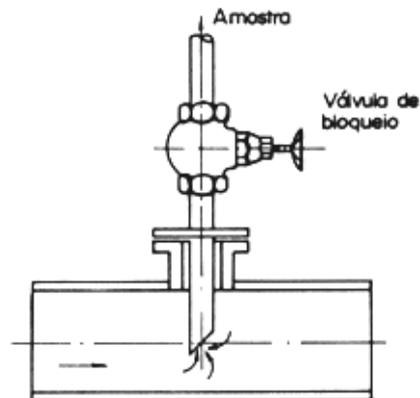


Fig 5

A sonda da figura 6, possui um filtro na extremidade de captação dentro do processo e, eventualmente, na extremidade externa. O filtro interno protege o próprio tubo da sonda contra entupimentos. As principais desvantagens deste tipo de filtragem, estão na dificuldade de acesso ao filtro para limpeza e na limitação de uso em temperatura acima de 500°C.

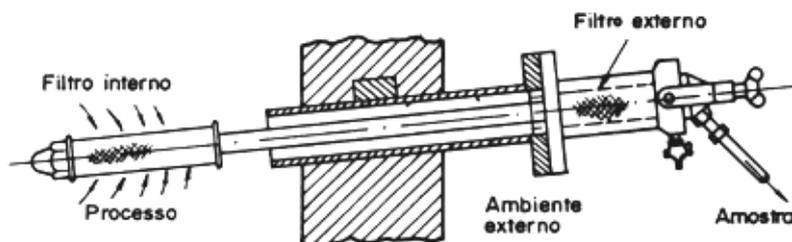


Fig 6

Para temperaturas mais elevadas usa-se a sonda mostrada na figura 7, que possui somente um filtro na parte externa.

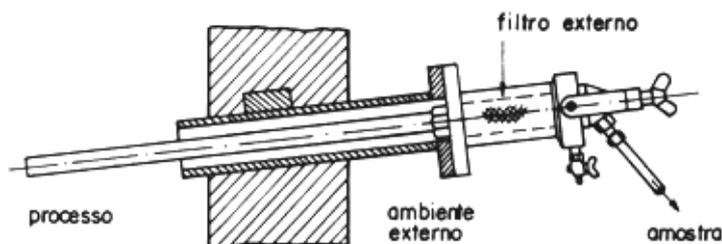


Fig 7

O material usado no filtro dependerá das condições da amostra, podendo ser uma simples tela de aço inoxidável ou elementos sintetizados de bronze, aço inox ou cerâmica.

O material da sonda dependerá do tipo de amostra e da temperatura do ponto de captação.

A temperatura afeta a sonda de duas maneiras:

- a) Mecanicamente: podendo comprometer sua resistência estrutural, ocasionando empenamentos, rompimentos ou mesmo fusão.
- b) Quimicamente: podendo reagir com o gás a ser analisado ou provocar reações catalíticas entre os componentes da amostra ou mesmo o rompimento de moléculas.

O aço-carbono comum pode ser usado até uma temperatura da ordem de 400°C. Quando houver possibilidade de agir cataliticamente sobre os componentes da amostra, como nos gases queimados com oxigênio e combustíveis residuais, a temperatura máxima deverá ser limitada em 200°C.

O aço inoxidável do tipo 316, pode ser usado até uma temperatura da ordem de 750 °C, a não ser que ocorram reações catalíticas na amostra.

Para temperaturas acima de 750 °C e abaixo de 1250 °C são usadas ligas de aço refratário, que apresentam boa resistência mecânica e pouco efeito catalítico sobre a amostra.

As ligas mais comuns são:

sicromal (CL 0,12%; 23% < Cr < 25%; 1,3 < Al < 1,6%): até 900°C.

Nimonic (0,2% < Ti < 0,6; Cu < 0,5%; Mn < 1%; Si < 1%; 0,08% < C < 0,15%; Fe < 5%; 18% < Cr < 21% e Ni o restante): até 1250°C

Sanicro 31 (C = 0,05%; Si = 0,55%; P < 0,55%; S < 0,015%; Cu < 0,010%; Cr = 21%; Ni = 31%; Ti = 0,35%; Al = 0,3%; Fe = Balanço).

Para temperaturas até 1800 °C, são usados materiais do tipo cerâmico, como a alumina pura,  $Al_2O_3$ , que não interfere quimicamente com os componentes da amostra mas apresenta uma resistência mecânica inferior a das sondas metálicas. Outro recurso bastante usado na captação de amostras em alta temperatura, é o de refrigerar a sonda

com água ou vapor.

A figura 8 mostra uma sonda refrigerada a água. Esta consiste em um tubo de aço em cujo interior circula a amostra e na parte externa circula água por meio de dois tubos concêntricos. Este tipo de sonda pode ser usado em temperatura de até 1800<sup>o</sup>C.

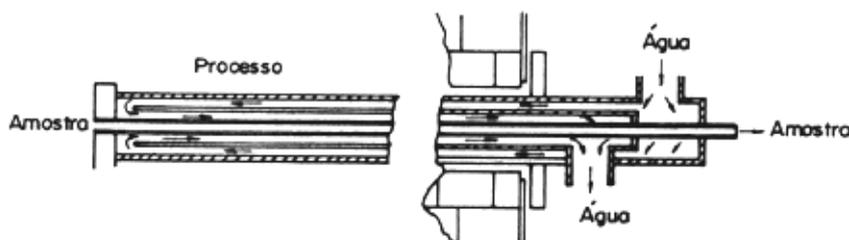


Fig 8 – Instalação de uma sonda refrigerada

#### INSTALAÇÃO DE UMA SONDA REFRIGERADA A ÁGUA

A figura 9 mostra uma instalação desta sonda. A saída da água deve ser aberta para a atmosfera e em um ponto superior ao da sonda, a fim de garantir a presença da água em seu interior, evitando danos pela alta temperatura, quando houver falta de alimentação d'água. Um alarme de baixa pressão permite alertar o operador quanto houver falta de refrigeração.

A temperatura de saída da amostra é, em alguns graus, superior a temperatura da água de refrigeração. Caso a amostra contenha vapor d'água, poderá ocorrer a condensação deste vapor, que deverá ser recolhido em um pote e colocado no ponto mais baixo da linha de amostra.

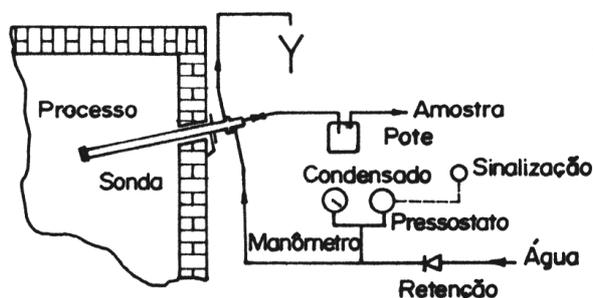


Fig 9 – Instalação de uma sonda refrigerada à água.

Outro tipo de refrigeração é o tipo direto. A água é pulverizada diretamente da amostra, dentro da sonda, formando um "SPRAY" que satura completamente o gás. Este processo, além de refrigerar a amostra, retira, por meio de lavagem, a maior parte das impurezas que ela contém.

A figura 10 mostra duas sondas com "SPRAY" de água. O tipo A, lança a água em direção contrária ao fluxo da amostra, enquanto, no tipo B, a água é pulverizada no mesmo sentido de amostra,

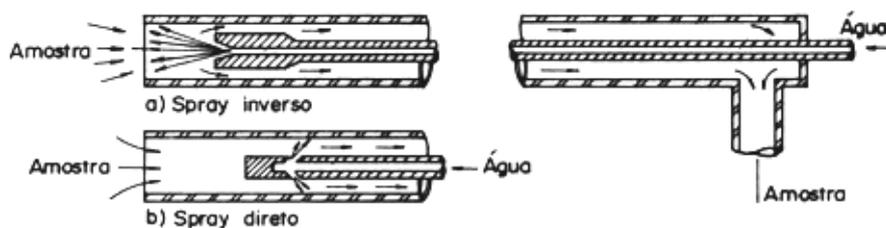


Fig10

A água, misturada com as impurezas da amostra, pode ser direcionada, para o interior do processo, no caso do "spray" invertido (fig. 10A) ou, então, pode ser transportada, junto com a amostra, até um ponto fora do processo, onde será separada do gás e drenada (caso do "spray" da figura 10B).

Quando a amostra contém gases que possam ser absorvidos pela água, como o  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$ , o sistema de refrigeração direta deve ser evitado, a não ser que estas absorções não alterem a característica em análise, O vapor pode ser usado no lugar da água pois, além de refrigerar e limpar a amostra, é usado para retirá-la do processo na forma de um ejetor.

## 2.2 – TRANSPORTE DA AMOSTRA

A amostra captada pela sonda, deve ser transportada por meio de tubos até o analisador, sem sofrer alteração na característica a ser analisada.

A distância entre o ponto de amostragem e o analisador deve ser a menor possível, de modo a reduzir o tempo de resposta do instrumento, a um mínimo. Normalmente, é transportada uma quantidade de amostra superior as necessidades do analisador a fim de diminuir o tempo de resposta. O excesso é desviado para a atmosfera, próxima ao analisador.

O diâmetro da linha deve ser escolhido de modo a não introduzir grandes perdas de carga e reduzir o volume a um mínimo. Os valores usuais estão compreendidos entre 1/4" e 1/2",

O material da linha deve ser compatível com a temperatura, a pressão e corrosividade da amostra, além de suportar as condições externas ao longo de seu percurso. O aço inoxidável tipo 316 é o material mais usado, sendo, também, utilizados outros materiais como: cobre, aço carbono galvanizado e PVC. A linha de amostragem deve ser estanque a fim de evitar vazamentos ou infiltrações de ar, no caso de baixas pressões.

No transporte de amostra, deve ser evitada a condensação de umidade no interior da linha, o que causaria restrições ao fluxo ou, mesmo, poderia ocasionar o seu bloqueio.

O modo mais simples de evitar acúmulo de condensado é dar a linha uma inclinação constante, a fim de drena-la para o interior do processo. Neste caso, o analisador deverá estar situado em um plano superior ao do ponto de amostragem.

A linha pode ser inclinada, para acumular o condensado em um pote, nas proximidades do analisador.

Aquecendo a linha de amostra com vapor, ao longo de seu percurso, evita-se a ocorrência de condensações. Se a característica a ser analisada for a umidade do gás e se o ponto de orvalho estiver próximo da temperatura ambiente, o aquecimento torna-se indispensável.

### NOTA:

Ponto de Orvalho é a temperatura que se inicia a condensação do vapor d'água.

## 2.3 - Condicionamento da amostra

Condicionar a amostra significa adequá-la a condições de temperatura, conteúdo de umidade, concentração da poeira, pressão e corrosividade em que o analisador foi projetado.

O condicionamento primário é dado, na sonda, a fim de proteger a linha de transporte. Temperatura, umidade e poeira são as variáveis que normalmente recebem um tratamento prévio na captação.

O sistema de condicionamento pode ser agrupado em um único local, na forma de uma cabine ou painel ou, pode ter seus elementos distribuídos ao longo do percurso da amostra. Normalmente, usa-se uma combinação destes dois processos.

A seguir, são mostradas as várias técnicas usadas para se obter uma amostra dentro dos parâmetros do analisador.

### 2.3.1- Temperatura

O condicionamento da temperatura é dos mais fáceis. Por meio de aquecedores ou resfriados de operação simples, consegue-se manter esta variável, dentro da faixa requisitada pelo analisador.

O analisador possui, normalmente, um sistema de aquecimento interno, que mantém a célula de análise e amostra em uma temperatura constante e acima da do ambiente. Os valores habituais variam entre 40 e 70°C.

Amostras com temperaturas entre 0~40 °C geralmente não interferem na operação do analisador.

Quando a amostra se apresenta com temperatura elevada, a própria sonda a reduz ao nível da temperatura do ambiente, através de refrigeração indireta com água ou com "spray", também de água, injetado diretamente na amostra.

Caso a amostra seja captada sem refrigeração, a própria linha de transporte se encarregará de reduzir a temperatura a um nível adequado. Pode ser usado, também, um resfriador com água, em um ponto qualquer entre a captação e o analisador (fig. 11).

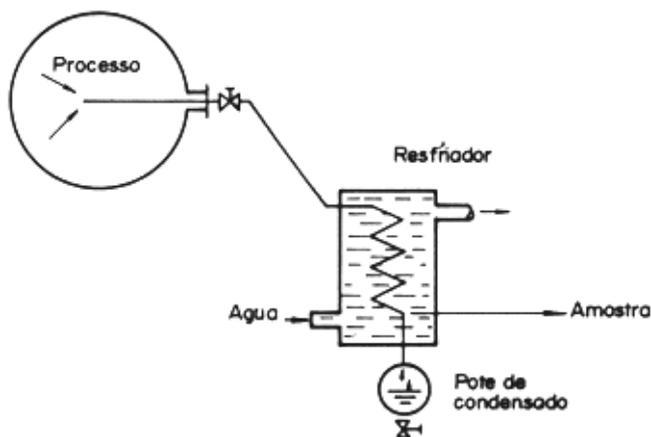


Fig11

Quando a amostra se apresentar com temperatura baixa em relação a faixa de analisador o que é raro acontecer nas indústrias, podem ser usados aquecedores elétricos ou a vapor, caso a linha de amostragem não seja suficiente para elevar a temperatura dentro da faixa ideal.

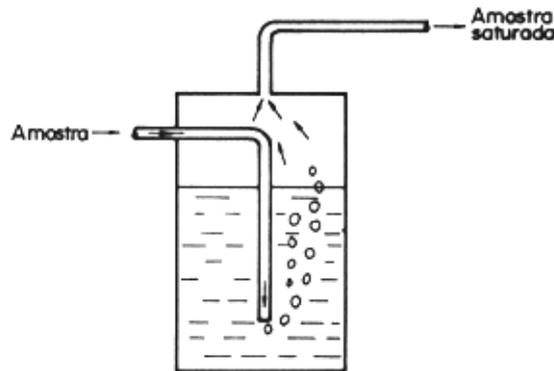
### 2.3.2- Umidade

A umidade é outro fator a ser controlado pelo sistema de amostragem.

Existem duas (2) situações a serem consideradas:

- Amostras secas:

As amostras, com ponto de orvalho inferior a temperatura ambiente, não requerem nenhum condicionamento prévio. Alguns analisadores, entretanto, saturam a amostra da análise, a fim de fixar esta variável. A figura 12 mostra um saturador de amostra.



A saturação é conseguida por meio de borbulhamento do gás, na água destilada. Se a temperatura do saturador permanecer constante, o teor umidade será fixo também.

- Amostras úmidas:

As amostras, com ponto de orvalho superior a temperatura ambiente, causam transtornos, devido as condensações ao longo da linha de transporte, nos filtros e, eventualmente, no próprio analisador. Estas condensações interferem na movimentação da amostra, causando, inclusive, entupimento no sistema e danos no analisador.

A umidade pode ser reduzida por meios físicos ou químicos:

- Secadores por processos físicos:

São os resfriadores de gás e filtros de adsorção:

a) Resfriadores de gás:

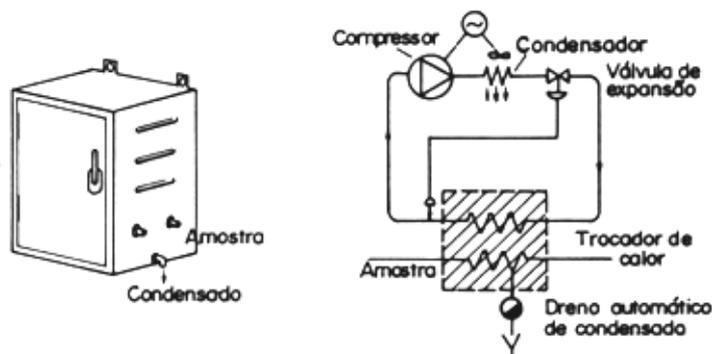
Promovem um abaixamento na temperatura do gás até cerca de 5<sup>0</sup>C, condensando, desta forma, uma quantidade de água equivalente a diferença entre as umidades absolutas nas temperaturas de entrada e saída.

Este resfriamento pode ser feito de vários modos:

- Refrigerador de compressor:

O gás é refrigerado por meio da evaporação de um fluido do tipo "FREON", em um trocador de calor. O ciclo é mantido por meio de um compressor acionado por um motor elétrico (figura 13).

Fig.13



- Refrigerador a efeito Peltier:

O efeito Peltier é o inverso do efeito "SEEBECK", que rege o funcionamento dos termopares. Se no circuito formado por dois metais diferentes for aplicada uma fonte de tensão contínua, circula uma corrente, que provocará o aquecimento de uma das junções e o resfriamento da outra. Dissipando-se o calor gerado na junta quente, a junta fria pode ser utilizada para abaixar a temperatura do gás. (fig.14)

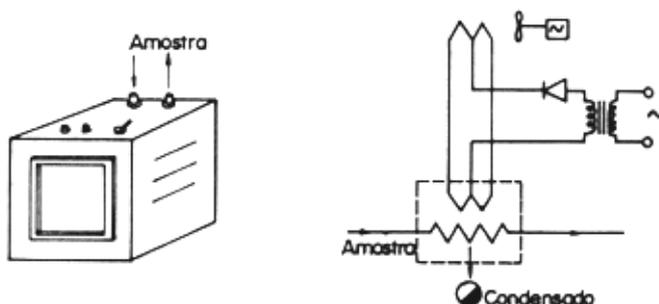


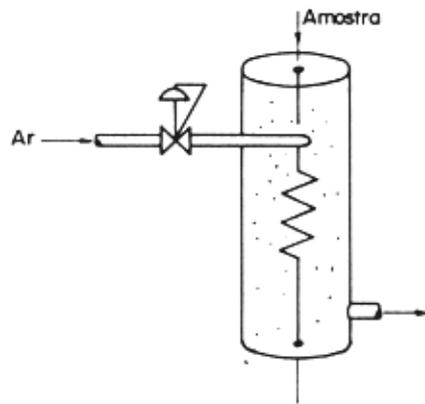
Fig.14 – Refrigerador de amostra a efeito Peltier

NOTA:

Normalmente, um abaixamento na temperatura do gás, na ordem de  $5^{\circ}\text{C}$ , em relação a ambiente, é suficiente para evitar condensações. Se existir algum fluido, água, por exemplo, com temperatura nesta faixa, basta um trocador de calor para se obter o resfriamento necessário.

- Refrigerador a efeito Vortex

O ar comprimido, ao ser introduzido tangencialmente no interior de uma câmara cilíndrica, cria regiões de temperatura diferentes, devido ao efeito de turbilhamento ou "VORTEX" gerado pelo movimento do ar. Na superfície da câmara, a temperatura se eleva enquanto que na região central ocorre um abaixamento de temperatura, a um valor entre  $1$  e  $5^{\circ}\text{C}$ . (figura 15).



- Filtro de adsorção

A adsorção é um fenômeno que consiste na condensação na área superficial de algumas substâncias especiais.

O filtro de adsorção consiste em uma câmara, geralmente de forma cilíndrica, cheia de material absorvente de umidade. O ponto de orvalho de um vapor, em presença destas substâncias, é bem inferior ao existente em presença do líquido do próprio vapor (figura 16).



Fig.16 - Secador por adsorção

As substâncias mais usadas são:

- Alumina ativada;
- Sílica gel.

Este tipo de secagem pode alcançar valores muito baixos de umidade do gás, mas apresenta os seguintes inconvenientes:

- Pode absorver outros componentes da amostra como  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$  apresentando, desta forma, um efeito de separação cromatográfica entre os componentes da amostra.
- Necessita de regeneração periódica, a fim de eliminar a água acumulada.

b) Secadores por processos químicos.

Os processos químicos de secagem da amostra consistem em fazer o gás atravessar um produto que reage ou absorve água. Os produtos utilizados estão apresentados na tabela a

seguir:

TABELA 1 - Substâncias para secagem da amostra.

FÓRMULAS	REAGENTES ABSORVENTES	OUTROS ELEMENTOS QUE REAGEM ALÉM DA ÁGUA
$P_2O_5$	Pentóxido de fósforo	$NH_3, Cl_2, HCl, C_2H_2, C_3H_6, C_2H_2n + 2$
$H_2SO_4$	Ácido sulfúrico a 96%	$C_nH_m, NH_3$
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio	$SO_2, NH_3, HCl$
$CaO$	Cal viva	$CO_2, SO_2, NH_3$
$Mg(ClO_4)_2$	Perclorato de magnésio	$C_nH_m, H_2, SO_2, NH_3$

19

Este tipo de secador pode eliminar quase que totalmente a umidade da amostra porém apresenta as seguintes desvantagens:

- O reagente químico deve ser trocado ou regenerado periodicamente;
- O reagente pode combinar quimicamente com outros elementos da amostra, conforme mostra a tabela 1.

### 2.3.3 - Concentração de poeira

A eliminação da poeira ou qualquer outro tipo de partícula sólida é um dos fatores de maior importância para garantia da continuidade da análise. A presença de impurezas na amostra, embora não prejudique a precisão da análise, obstrui as tubulações de transporte e pode danificar o analisador, caso venha a se acumular no interior da célula ou câmara de análise.

A poeira pode ser eliminada por via seca ou úmida:

#### a) Filtragem seca

Esta filtragem é feita, fazendo-se passar a amostra através de um material poroso, geralmente de forma cilíndrica ou plana.

Os materiais mais usados para confecção de elementos filtrantes são:

- papel poroso;
- celulose;
- fibra de vidro;
- fibra de amianto;
- cerâmica porosa;
- carborundum;
- bronze sinterizado;
- aço inoxidável sinterizado.

A forma do filtro depende da aplicação e do material filtrante.

A figura 17 mostra dois tipos de filtros diferentes. O tipo A, possui a forma cilíndrica e um cartucho de cerâmica. O tipo B, tem a forma de disco e usa papel poroso como elemento filtrante. O importante é que o volume interno seja o menor possível, a fim de aumentar a velocidade da resposta.

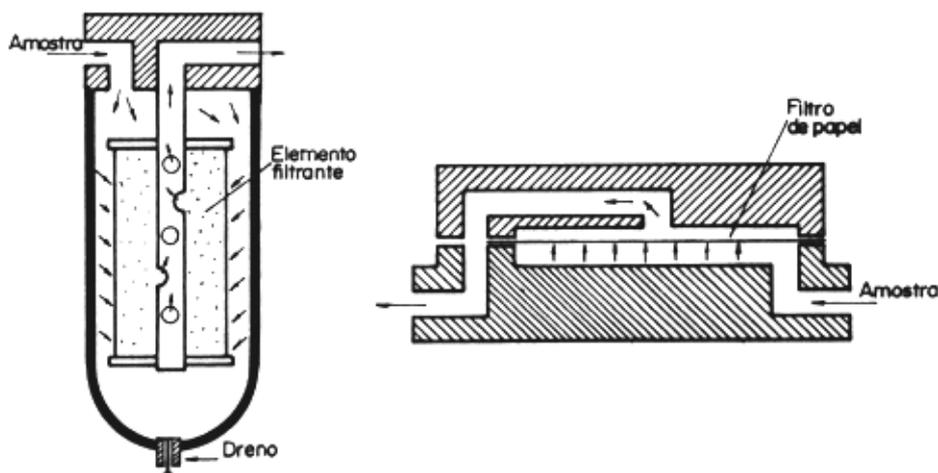


Fig. 17 - Tipos de filtro seco

Um fator importante a ser considerado nos filtros é a dimensão de seus poros, que determina o tamanho das partículas que serão retidas. Os filtros de papel possuem poros da ordem de décimos de micron ( $\mu$ ), enquanto que os elementos de metal sinterizado, podem ter poros da ordem de 100  $\mu$ .

Outros elementos filtrantes usados na eliminação de componentes indesejáveis, são:

- Carvão ativado: para eliminar vapores de óleo ou solvente;
- Óxido de ferro hidratado: para eliminação de ácido sulfídrico ( $H_2S$ );
- Hidróxido de sódio: para eliminar  $CO_2$  e  $SO_2$ ;
- Hidróxido de sódio com amianto: para eliminar CO e hidrocarbonetos;
- Perclorato de magnésio: para eliminar umidade.

b) Filtragem úmida

No caso de gases com altas concentrações de pó e temperaturas elevadas, usa-se água pulverizada para precipitar as impurezas na própria sonda. Este sistema de lavagem pode ser utilizado, também, em um ponto qualquer da linha de amostragem. A figura 18 mostra um sistema de lavagem com água.

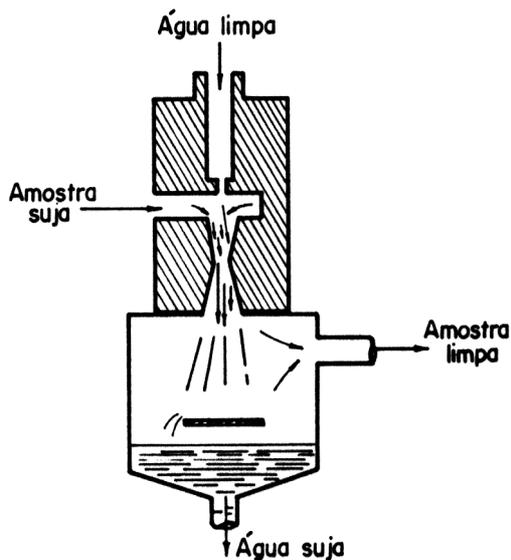


Fig. 18 - Lavador de gás.

Além de eliminar o pó, este sistema reduz a temperatura da amostra e pode, também, suga-la nos casos de pressão baixa. A desvantagem principal está na absorção do  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$  da amostra, alterando suas características.

2.3.4 - Pressão

Os analisadores são projetados para receber a amostra, dentro de uma faixa de pressão, que depende do tipo de célula de análise empregada.

Os valores habituais estão situados entre  $0,02 \text{ Kgf/cm}^2$  e  $5 \text{ Kgf/cm}^2$ . Alguns analisadores possuem redutores de pressão internamente, permitindo receber, deste modo, amostras com pressões mais elevadas.

Nos casos em que a amostra se encontra em pressão diferente da especificada para o analisador, são necessários equipamentos auxiliares para trazê-la ao valor desejado. Existem duas situações:

a) Alta pressão

Pode ser reduzida aos valores especificados para o analisador. A figura 18A mostra uma válvula reguladora de pressão, que mantém a pressão de saída constante, independente das variações da pressão de entrada. Pode operar com pressão, que mantém a pressão de saída constante, independente das variações da pressão de entrada.

Pode operar com pressões de até 30 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Para pressões maiores, usam-se duas reguladoras em série, que podem operar com pressões de entrada superiores a 350 Kgf/cm<sup>2</sup> (figura 18B).

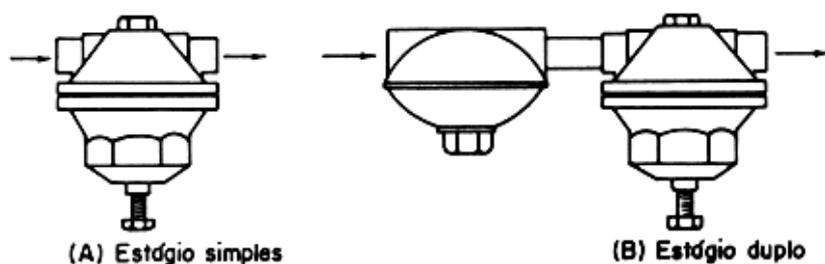


Fig. 18 - Válvulas redutoras de pressão.

As reguladoras devem ser instaladas ao ponto de captação a fim de diminuir o tempo de resposta do sistema de análise.

A linha de alta pressão deve ser protegida, por meio de válvulas de segurança, que protegerão o sistema de amostragem e o analisador, no caso de falha da válvula reguladora de pressão.

b) Baixa pressão

Quando a pressão for insuficiente para suprir o analisador com um mínimo de vazão ou garantir um tempo de resposta curto, torna-se necessário pressurizá-la a níveis convenientes a operação correta do sistema.

Os equipamentos utilizados para elevar a pressão da amostra compõem-se de:

- bombas, acionadas eletricamente; ejetores.

1) As bombas mais utilizadas são as de diafragma, devido a simplicidade de sua construção e a sua estanqueidade (figura 19).

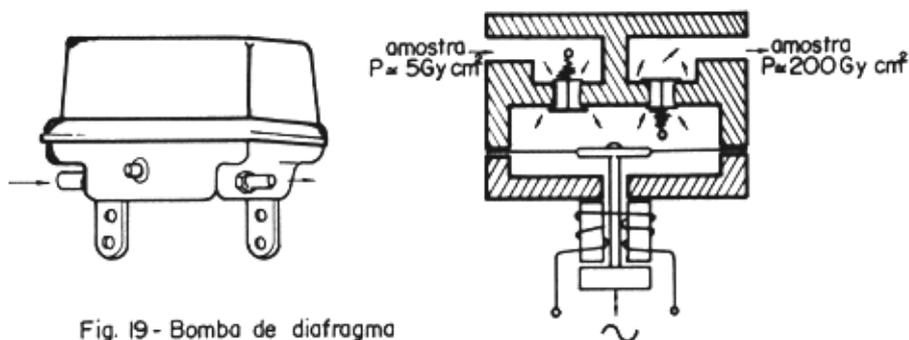


Fig. 19- Bomba de diafragma

O acionamento pode ser feito por motor elétrico ou então, por meio de vibrador eletromagnética.

Outros tipos de bombas são:

- bombas de pistão;
- bombas de palheta;
- bombas centrífugas.

2) Os ejetores são dispositivos que arrastam a amostra por meio de jato de um fluido auxiliar (figura 20).

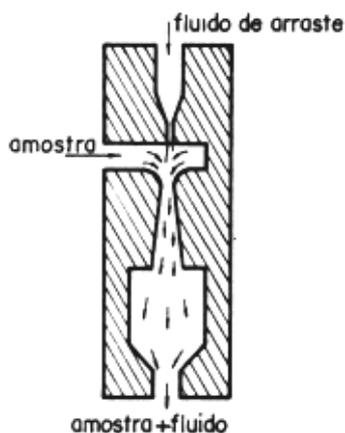


Fig. 20- Ejetor

Os fluidos usados são:

- Vapor;
- água;
- ar comprimido.

O ejetor a vapor pode ser usado, tanto na extremidade de captação da sonda (fig.21) como

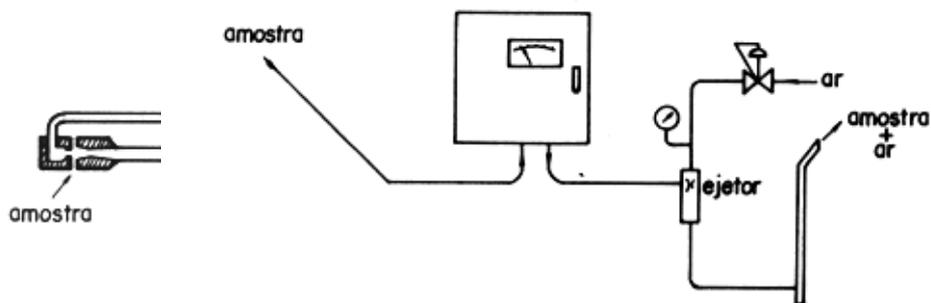
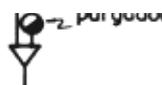


Fig. 23- Ejetor a ar.

Ejetor a vapor



na linha de amostra.

O primeiro tipo é mais vantajoso pois, além de limpar e refrigerar a amostra na captação, mantém o sistema de transporte sob pressão positiva, evitando infiltração de ar. O vapor usado no ejetor é condensado e retirado do sistema por meio de drenos. O ejetor de água opera de modo similar ao de vapor, sendo utilizado normalmente na linha de amostragem (figura 22).

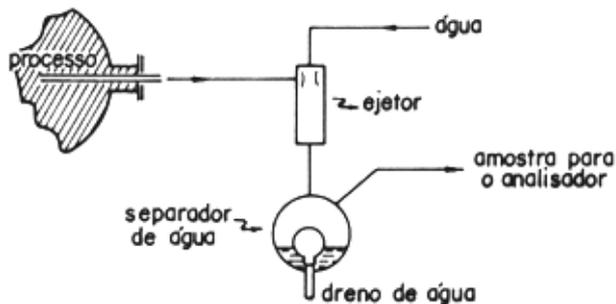


Fig. 22 - Ejetor a água.

O ejetor a ar só pode ser usado na saída do analisador pois altera as características da amostra (figura 23).

### Corrosividade

Qualquer componente da amostra, que possa reagir quimicamente com os materiais usados no sistema de amostragem ou com as partes internas do analisador, deve ser eliminado. O processo de eliminação depende das características do componente perturbador. Filtros

de adsorção, reagentes químicos, lavagem com água são os processos geralmente usados.

A análise de gases com a presença de  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , comuns nos processos de combustão, traz o risco da produção de ácido sulfúrico, devido a presença de umidade na amostra.

A lavagem do gás com água ou vapor dilui e retira do sistema o ácido sulfúrico ou, então, elimina-se a umidade da amostra, evitando-se a formação deste ácido.

A eliminação do ácido sulfídrico, presente em alguns gases como os de coqueria, é feita por meio da reação com o óxido de ferro hidratado.

Uma escolha conveniente dos materiais de construção do sistema de amostragem e do próprio tipo de analisador, pode evitar a ocorrência de corrosão.

#### 2.4 Introdução de gases de Calibração

O sistema de amostragem deve permitir a substituição da amostra por um ou mais gases de características conhecidas, a fim de que seja verificada periodicamente a precisão do sistema de análise.

Estes gases de referência são armazenados em cilindros de alta pressão e fazem parte do sistema de amostragem, sendo conhecidos como "gases padrão".

Um analisador é calibrado, geralmente, com o auxílio de dois gases; gás de zero ou de início de escala;

- gás de faixa ou de fim de escala.

Estes gases devem ser introduzidos no analisador com uma frequência que dependa da aplicação e do tipo do instrumento de análise. A frequência pode ser diária, semanal ou mesmo mensal. Por este motivo, o processo de troca de gases deve ser cómodo e rápido.

O gás-padrão difere da amostra em alguns aspectos: ausência de pó ou impurezas e umidade reduzida. O primeiro aspecto é vantajoso pois não altera a precisão das medições.

O segundo, entretanto, pode induzir a erros de calibração nas medições de grande precisão. Este erro pode ser eliminado facilmente, introduzindo-se o padrão em um ponto do sistema de amostragem, onde possa ser umidificado. Outro aspecto a ser considerado é a alteração da amostra pelo sistema de condicionamento.

Filtros, lavadores e secadores alteram a proporção entre os componentes da amostra, como no caso da absorção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$  pelos lavadores de água e vapor.

Neste caso, o padrão deve ser introduzido em um ponto do sistema de amostragem, anterior a estes elementos perturbadores.

A troca de amostra pelos padrões. Pode ser feita no próprio local, por meio de válvulas manuais de bloqueio ou, então, remotamente, por válvulas operadas por solenóides.

A operação destas válvulas solenóides pode ser manual ou, então, automática, no caso de analisadores de calibração automática.

A figura 24 mostra um sistema de amostragem com recursos de introdução de dois gases de calibração. E ainda uma tomada de amostra, na linha de entrada do analisador. Esta tomada permite a retirada de amostras para análise em laboratórios ou em outros analisadores para fins comparativos.

#### 2.5- Descarga da Amostra

Após atravessar o analisador, a amostra pode ser disposta de duas maneiras:

- descarregada diretamente na atmosfera;
- introduzida novamente no processo.

O primeiro sistema é o mais usado, devido a sua simplicidade e economia. Em alguns casos existem dispositivos na saída do analisador, tais como: reguladoras de pressão de descarga, reguladores de pressão e ejetores. O gás deve ser descarregado em um local onde não traga riscos de contaminação, explosão, corrosão, etc.

Os gases nocivos ao ambiente ou as pessoas podem ser neutralizados por meios químicos, antes de serem liberados.

A amostra só é devolvida ao processo, em alguns casos especiais, como:

- alto custo do produto analisado - a devolução pode ser economicamente viável neste caso;
- alta periculosidade do produto - gases, cuja ação nociva não pode ser neutralizada por meios químicos, como os gases radioativos.

## ANALISADORES DE GASES

### 2 - ANALISADORES DE GASES:

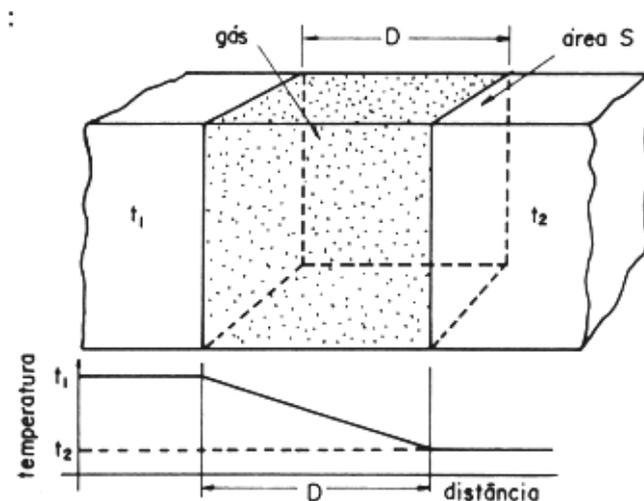
#### 2.1- Analisadores de Gases por Condutibilidade Térmica

O analisador por condutibilidade térmica é um instrumento analítico industrial, que permite determinar a concentração de um gás em uma mistura gasosa. A condutibilidade térmica de um gás é uma grandeza física específica dele. De modo que, quando uma mistura gasosa for composta de dois componentes, pode-se conhecer a concentração de cada um dos componentes através dessa propriedade. A idéia de usar a condutibilidade térmica dos gases para fins de determinação de um componente em uma mistura foi sugerida, pela primeira vez, em 1880, por LEON SOMZEE. Entretanto, o primeiro instrumento pratico só foi construído em 1908 pelo físico KOEPSA. Este instrumento determinava a concentração do hidrogênio em uma mistura gasosa. A partir desta data, foram desenvolvidos vários tipos de analisadores baseados neste princípio, que são atualmente usado largamente para medição e controle em processos industriais. Esta frequência se deve, principalmente, a sua simplicidade de operação que resulta em baixo preço e alta confiabilidade operacional.

##### 2.1.1 - Condutibilidade Térmica dos gases:

###### (1) Conceito

A figura 1 representa um cubo cheio de gás, tendo duas superfícies opostas mantidas em temperaturas diferentes.



A quantidade de calor,  $Q$ , que atravessa o cubo na unidade de tempo  $T$ , entre as duas superfícies, depende dos seguintes fatores:

- diferença de temperatura entre as duas superfícies:  $t_1 - t_2$ ;
- áreas das superfícies  $S$ ;
- distância entre as superfícies -
- condutibilidade térmica do gás -  $K$ .

Estas grandezas estão interrelacionadas na seguinte equação:

$$\frac{Q}{T} = K * \frac{S(t_1 - t_2)}{D} \dots\dots\dots(2.1)$$

O fator  $K$  é uma característica de cada gás e exprime a maior ou menor facilidade de transmissão de calor, por condução através de sua massa.

A unidade constante  $K$ , é fornecida diretamente pela fórmula anterior.

$$K = \frac{Q}{T * S * \frac{\Delta t}{D}} \dots\dots\dots(2.2)$$

- Se,  
 $Q$  = Kcal (quilos caloria)  
 $T$  = h (hora)  
 $S$  =  $m^2$  (metro quadrado)  
 $t$  =  $t_1 - t_2 = ^\circ C$  (graus celsius)  
 $D$  = m (metro)

A unidade  $K$  será:  
 $K = Kcal/h.m^2 . ^\circ C/m$   
Ou então:  
 $K = cal/s.cm^2 . ^\circ C/cm$ , no sistema CGS.

Outra forma de representar a condutibilidade térmica de um gás é relaciona-la com a condutibilidade de um gás de referencia, normalmente o ar atmosférico:

$$K_r = \frac{K_{\text{gás}}}{K_{\text{ar}}} \dots\dots\dots(2.3)$$

- $K_r$  = condutibilidade relativa do gás  
 $K_{\text{gás}}$  = condutibilidade térmica do gás em  $kcal/h.m^2 . ^\circ C / m$   
 $K_{\text{ar}}$  = condutibilidade térmica do ar em  $kcal/h.m^2 . ^\circ C/m$

(2) Condutibilidade térmica de alguns gases

A determinação experimental da condutibilidade térmica nos gases apresenta uma série de dificuldades, devidas a mobilidade inerente as suas moléculas. Os efeitos colaterais da convecção e da radiação alteram os resultados obtidos. Este fato justifica as divergências apresentadas nos valores da condutibilidade térmica nos gases, determinadas por diferentes pesquisadores.

A tabela 2 apresenta os valores experimentais da condutibilidade térmica de gases e vapores de importância industrial.

TABELA 2 - Condutibilidade térmica de gases e vapores.

GÁS OU VAPOR	FÓRMULA	TEMPERATURA °C	CONDUTIBILIDADE - K
			$\frac{\text{K Cal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}}$
ACETATO DE ETILA	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	100	0,0131
ACETATO DE METILA	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	0	0,00807
ACETONA	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	0	0,00779
ACETILENO	$\text{C}_2\text{H}_2$	0	0,0149
ÁLCOOL ETÍLICO	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	0	0,0168
ÁLCOOL METÍLICO	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	0	0,0113
AMÔNÍACO	$\text{N H}_3$	0	0,0165
AR ATMOSFÉRICO	—	0	0,0192
ARGÔNIO	AR	0	0,0136
ÁGUA (PRESSÃO ATMOSFÉRICA)	$\text{H}_2\text{O}$	0	0,0145
BENZENO	$\text{C}_6\text{H}_6$	0	0,00709
DIÓXIDO DE NITROGÊNIO	$\text{N O}_2$	0	0,0345
BUTANO	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	0	0,0133
CLORO	$\text{Cl}_2$	0	0,00617
CLOROFÓRMIO	$\text{CHCl}_3$	0	0,00523
CLORETO DE ETILA	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	0	0,00751
CLORETO DE METILA	$\text{CH}_3\text{Cl}$	0	0,00725
DIÓXIDO DE CARBONO	$\text{CO}_2$	0	0,0121
DIÓXIDO DE ENXOFRE	$\text{SO}_2$	0	0,0072
ETANO	$\text{C}_2\text{H}_6$	0	0,0155
ETILENO	$\text{C}_2\text{H}_4$	0	0,0143
GÁS SULFÚDRICO	$\text{H}_2\text{S}$	0	0,0103
HÉLIO	He	0	0,119
HEXANO (CICLO)	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	0	0,0141

Continuação da TABELA 2.

GÁS OU VAPOR	FÓRMULA	TEMPERATURA OC	CONDUTIBILIDADE - K
			$\frac{K \text{ Cal}}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C \cdot m}$
HEXANO (n)	$C_6H_{14}$	0	0,0886
HIDROGÊNIO	$H_2$	0	0,1320
MERCÚRIO	Hg	203	0,00655
METANO	$CH_4$	0	0,0261
MONÓXIDO DE CARBONO	CO	0	0,0185
NEÔNIO	Ne	0	0,0382
NITROGÊNIO	$N_2$	0	0,0195
ÓXIDO NÍTRICO	NO	0	0,0179
OXIGÊNIO	$O_2$	0	0,0200
PENTANO	$C_5H_{12}$	0	0,00983
PROTÓXIDO DE NITROGÊNIO	$N_2O$	0	0,0124
SULFETO DE CARBONO	$CS_2$	0	0,00547
TETRACLORO DE CARBONO	$CCl_4$	100	0,00649

(3) Princípio de medição Célula de medição básica

A técnica usada para medição da condutibilidade térmica de um gás, está representada na figura 2.

Uma câmara cilíndrica é mantida em uma temperatura constante e possui, no seu interior, um fio metálico estendido na direção do seu eixo.

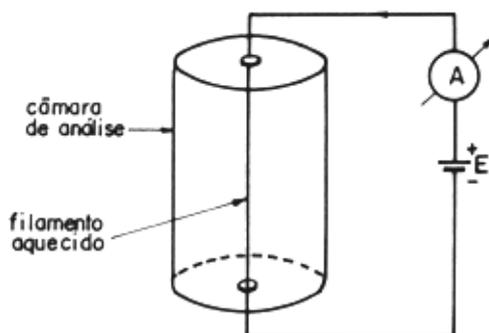


Fig 2 – Medidor Básico de Condutibilidade Térmica

O filamento é percorrido por uma corrente elétrica fornecida por uma fonte de tensão constante E, mantendo assim, uma temperatura superior à da câmara, devido ao efeito

—  
JOULE.

A temperatura do filamento dependerá do balanço entre a energia térmica gerada pela corrente e pelas perdas devidas a transferência de calor para as paredes da câmara, por meio de condução, convecção e radiação. Como se trata de medidor de condutibilidade térmica, a influência da convecção e da radiação deve ser reduzida a um mínimo pois, desta forma, a temperatura do filamento dependerá somente, da condutibilidade térmica do gás. O projeto adequado da geometria da célula é a limitação da diferença de temperatura entre filamento e paredes da câmara reduzem as perdas por convecção e a radiação a um mínimo, em relação as perdas por condução. A câmara, assim projetada, chama-se "Célula de Condutibilidade" pois permite a medição da condutibilidade térmica do gás encerrado em seu interior.

A temperatura do filamento será inversamente proporcional a condutibilidade térmica do gás, sendo máxima no caso de a célula estar sob vácuo é mínima, quando contiver um gás de alta condutibilidade térmica, como o Hélio ou Hidrogênio. Portanto, basta determinar a temperatura do filamento para se obter a condutibilidade térmica, no interior da célula.

A temperatura do filamento é medida por meio de um recurso simples, pois a resistência ôhmica do filamento varia proporcionalmente com a temperatura e, assim, as variações de corrente elétrica, medidas por um amperímetro, fornecem a temperatura do mesmo. O filamento da célula se presta, portanto, a dois propósitos:

- Converter a energia elétrica em energia térmica criando, assim, o gradiente de temperatura necessário à operação da célula;
- medir sua própria temperatura por meio de variações observadas em sua resistência elétrica.

### CÉLULA DE REFERÊNCIA

A célula de condutibilidade da figura 2 apresenta os seguintes inconvenientes:

- alta sensibilidade as variações de temperatura da célula e do gás;
- alta sensibilidade as variações na corrente de aquecimento.

Estes inconvenientes podem ser eliminados, por meio da introdução de uma célula de referência com características idênticas as da célula de medição apresentada anteriormente.

A figura 3 apresenta as duas células, de medição e referência, e o modo como são ligados os filamentos.

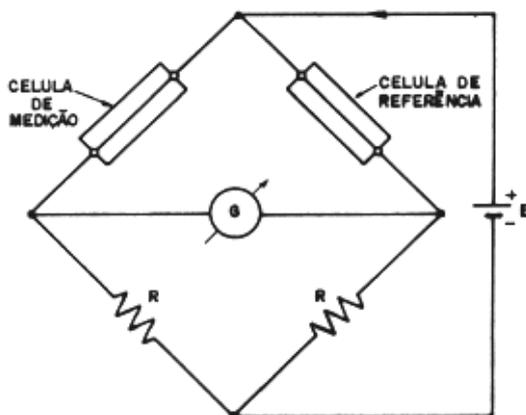


Fig.3 - Células de medição e referência ligadas em ponte

A célula de referência é preenchida com um gás, que mantém suas características térmicas constantes, durante o uso do medidor de condutibilidade. Na célula de medição são introduzidos os gases, cuja condutibilidade térmica se quer determinar. As duas células são situadas em um mesmo ambiente, sendo afetadas de modo idêntico por qualquer flutuação na temperatura externa.

Os filamentos são ligados em forma de ponte com auxílio de duas resistências de valor fixo  $R$ . Esta ligação também chamada de diferencial, garante a insensibilidade do instrumento a qualquer variação que ocorra similarmente nas duas células. Desta forma, somente as variações da condutibilidade térmica do gás na célula de medição afeta o equilíbrio da ponte.

Este desequilíbrio será medido pelo galvanômetro, que pode ser calibrado em termos de condutibilidade térmica do gás de medição.

#### (4) Medição da concentração de um gás em uma mistura de gases.

A medição da condutibilidade térmica de um gás, não encontra, geralmente, aplicação direta na indústria, devido a pouca importância desta grandeza na maioria dos processos.

A determinação da concentração de um gás em uma mistura gasosa, contudo, é de grande importância para a operação segura e rentável de um processo industrial. O medidor de condutibilidade térmica pode ser usado na determinação da concentração de um gás, em uma mistura.

Esta técnica encontra grande aplicação, devido a simplicidade inerente a medição de condutibilidade.

### MISTURAS BINÁRIAS

Mistura binária é aquela que comporta somente dois gases.

A análise de gases por condutibilidade térmica encontra sua aplicação mais característica, na determinação de um componente em uma mistura binária. Qualquer mistura binária de gases, em que seus componentes apresentem condutibilidade individuais

diferentes entre si, pode ser analisado por um medidor de condutibilidade térmica. Uma variação de 2% na condutibilidade térmica da mistura é o suficiente para se obter uma variação de 100%, na indicação do instrumento.

A tabela 2 mostra as faixas mínimas de análise para algumas misturas binárias.

As concentrações mostradas referem-se a uma variação na condutibilidade em cerca de 2%.

#### NOTA:

As faixas indicadas correspondem a uma variação da condutibilidade térmica, em cerca de 2%. Quanto maior a diferença entre a condutibilidade térmica dos 33 componentes, menor a faixa de medição correspondente.

#### MISTURAS COMPLEXAS

No caso de uma mistura de três ou mais gases, a aplicação de um analisador de condutibilidade térmica, deve ser cuidadosamente estudada. Em algumas situações, a aplicação se tornara bastante difícil, principalmente nas misturas com muitos gases que variam independentemente uns dos outros e em grande proporção. Certas misturas complexas devem ser consideradas, entretanto, como binárias sob o ponto de vista de condutibilidade térmica. Esta situação ocorre quando:

- as variações dos diversos componentes da mistura estão inter-relacionados entre si;
- os componentes da mistura, não analisados, possuem condutibilidades térmicas similares;
- o componente em análise possui condutibilidade térmica bem diferente da dos outros componentes da mistura;
- os componentes da mistura, não analisados, estão presentes, sempre na mesma proporção.

#### Tipos de construção

Os analisadores de condutibilidade térmica de uso industrial são do tipo contínuo, isto é, as células de medição são construídas de maneira a receberem de modo constante, um fluxo de amostra, retirada do processo.

#### TIPOS DE CÉLULAS

As células de condutibilidade podem ser classificadas de acordo com o modo que a amostra é admitida em seu interior. Existem três (3) tipos de células:

- *Célula de Difusão*
- *Célula de Convecção*
- *Célula de Fluxo Direto*

Célula de Difusão:

A figura 4 mostra a célula do tipo de difusão. Nesta célula, a amostra é admitida por difusão molecular, em uma câmara que contém o filamento aquecido.

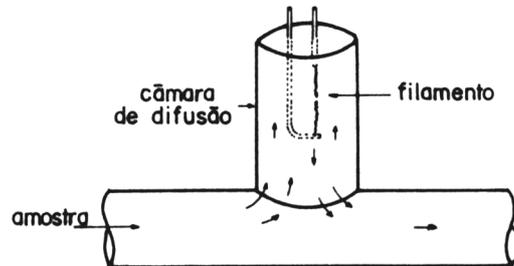


Fig 4

Célula de Convecção

A figura 5 mostra uma célula do tipo de convecção. Nesta célula o gás circula em uma câmara em forma de circuito fechado por meio de convecção. Esta câmara, que contém o filamento aquecido, é atravessada, em um ponto, pela linha de amostra que garante, assim, a renovação contínua do gás analisado.

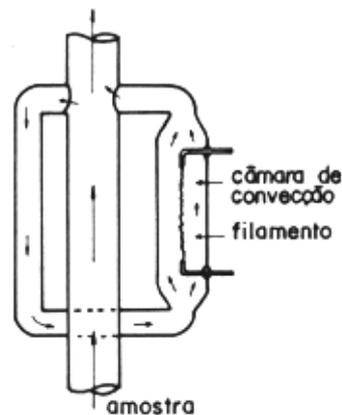
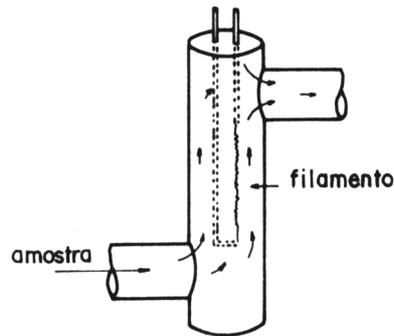


Fig 5

### Célula de Fluxo Direto

A figura 6 mostra uma célula do tipo fluxo direto. O gás circula em uma câmara, envolvendo o filamento aquecido.



- Célula de fluxo direto

Fig 6

#### a) Analisador com célula de difusão:

Os analisadores com célula de difusão tem encontrado a preferência dos fabricantes pois apresentam características de maior simplicidade e funcionalidade em relação aos outros tipos.

A célula de análise é de construção compacta e simples, constituindo-se em um bloco de latão ou aço inoxidável, onde estão usinadas as câmaras de medição e referencia, assim, como as comunicações entre elas. Em alguns casos, são construídas células com quatro câmaras, visando aumentar a sensibilidade da medição.

A figura 7 mostra um tipo de análise por difusão. É construída em um bloco metálico único, garantindo, assim, uma homogeneização de temperatura e robustez. Os filamentos são constituídos por um fio de platina revestido por uma fina camada isolante de vidro. Esta isolação garante uma proteção química ao filamento, evitando, ao mesmo tempo, que este provoque alguma ação catalítica na amostra. A célula de difusão possui duas câmaras de medição colocadas em sequência no sentido do fluxo da amostra. Duas câmaras de referência são colocadas no bloco, de forma simétrica as de medição.

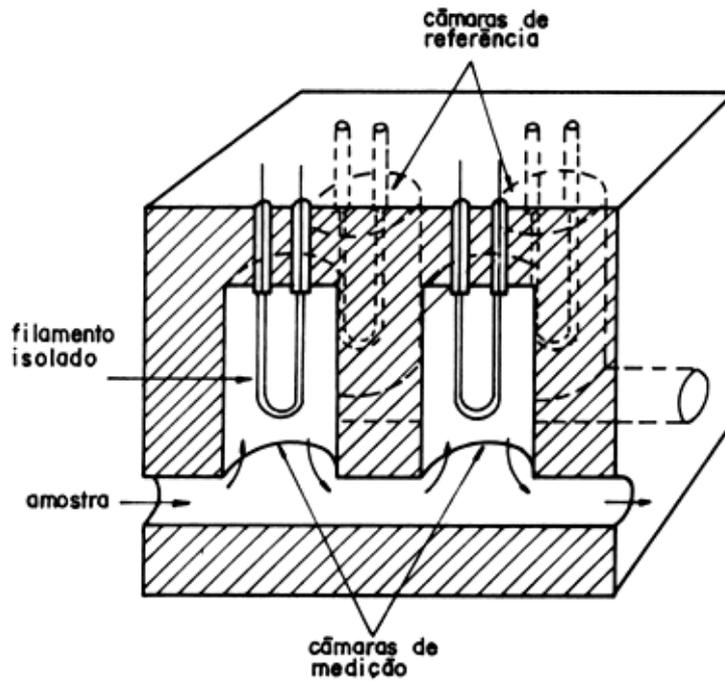


Fig 7

Os filamentos podem ser ligados de duas formas distintas, conforme mostra a figura 8. A sensibilidade de medição não se altera com a disposição dos filamentos, em relação a ponte de resistências.

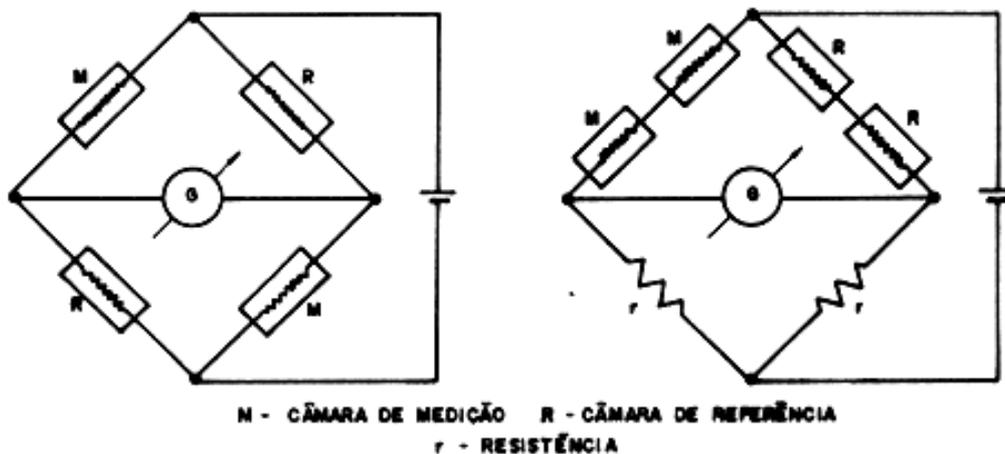


Fig. 8 - Ligações das filamentos

A figura 9 mostra outro tipo de célula de difusão, de construção bastante simplificada. Possui somente duas câmaras: uma de medição e outra de referencia. O filamento é substituído por material semicondutor, conhecido como termistor.

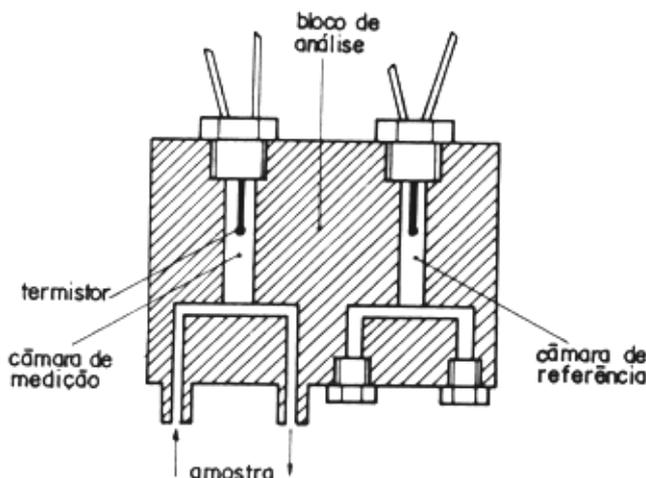


Fig. 9 - Analisador par difusão com termistor

O termistor possui um maior coeficiente de variações de resistência a temperatura do que os filamentos metálicos, possibilitando obter uma ação de maior sensibilidade, mesmo com células de duas câmaras.

A vantagem principal da célula de difusão está na sua insensibilidade a vazão da amostra, isto é, a vazão da amostra pode variar entre limites amplos, sem interferir na precisão da medição. Este fato simplifica o projeto do circuito da amostra, pois não são necessários dispositivos para controlar seu fluxo.

A desvantagem da célula de difusão está na velocidade de resposta, para uma determinada variação na composição da amostra pois o processo de difusão dos gases no interior da câmara de medição não é rápido e independente da velocidade de circulação da amostra.

Entretanto, a velocidade de resposta, pode ser aumentada a níveis satisfatórios, com o projeto de câmara de volumes reduzidos, conforme foi mostrado na figura 9.

#### b) Analisador com célula de convecção

A figura 10 mostra uma célula de análise do tipo convectivo. A câmara de medição é construída em vidro e possui a forma anelar. O gás contido no interior do anel é mantido em circulação por meio de convecções provocadas pelo próprio filamento aquecido.

Em um ponto do anel existe uma comunicação com a linha onde circula a amostra, possibilitando, assim, a renovação do gás contido na câmara.

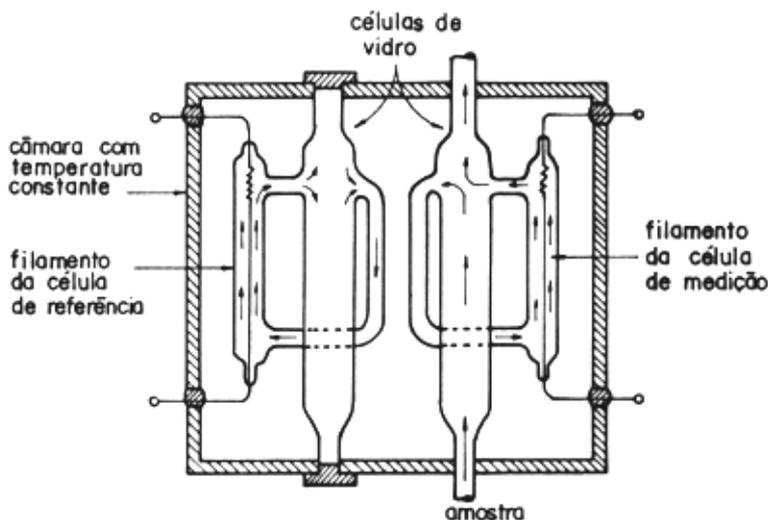


Fig .10 - Analisador com célula de convecção

A câmara de medição é montada no interior de uma caixa mantida em temperatura constante.

Esta caixa abriga, também, uma câmara de referencia que é idêntica a de medição, diferenciando-se, somente, pelo fato de ser selada com um gás de comparação. A célula de convecção é, também, insensível as variações de vazão da amostra, não necessitando de nenhum controle rigoroso desta vazão. A pressão da atmosfera afeta a medição pois o filamento se resfria pelo efeito combinado de condução e convecção.

A perda de calor por condução independe da pressão em uma ampla faixa de variação, enquanto que as perdas de calor por convecção são afetadas pela pressão da amostra.

Outras propriedades físicas do gás, que interferem no fenômeno de convecção e afetam a precisão da medição de calor são: calor específico, viscosidade, densidade e a própria condutibilidade térmica do gás.

A célula de convecção, portanto, é mais influenciada pelas propriedades físicas da amostra, do que a do tipo de difusão.

O tempo de resposta da célula de convecção, depende da velocidade de circulação do gás no anel de medição, não sendo, portanto, uma célula de resposta rápida.

#### c) Analisador com célula de fluxo direto

As células de fluxo direto são construídas, geralmente, de modo similar as de difusão: um bloco metálico, no interior do qual são usinadas as câmaras e as passagens de interligação.

O numero de câmaras varia entre duas ou quatro, incluindo as câmaras de referencia. O gás a ser analisado atravessa a câmara em toda a sua extensão, ou seja, a amostra é renovada em função de sua vazão.

A figura 11 mostra uma célula de análise de fluxo direto, com uma câmara de medição e uma de referencia.

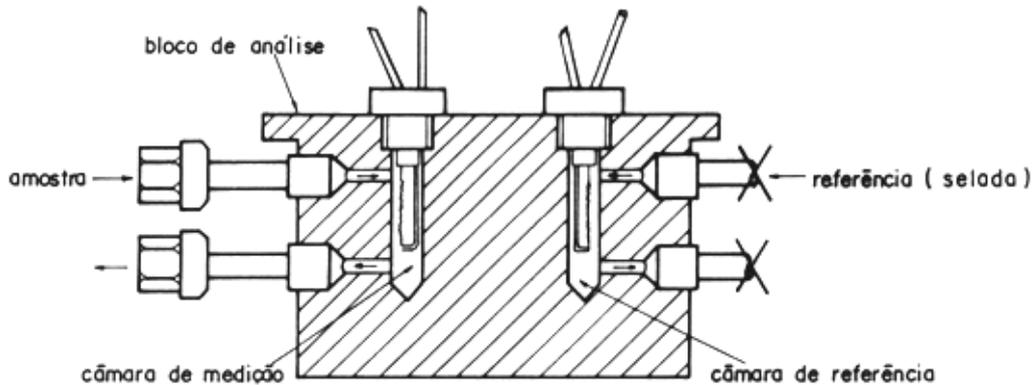


Fig. 11 - Analisador com célula de fluxo direta

A vantagem principal deste tipo de célula é seu tempo de resposta extremamente curto, pois a renovação da amostra se faz com bastante rapidez.

A desvantagem principal está na sua alta sensibilidade as mudanças de vazão de amostra. São necessários dispositivos adicionais para manter a vazão de amostra constante. As propriedades físicas do gás, tais como: densidade viscosidade e calor específico alteram a precisão da medição de modo mais acentuado que na célula de difusão.

## 6 - CIRCUITOS ELÉTRICOS

Os analisadores de condutibilidade térmica comportam, geralmente, dois tipos de circuitos elétricos.

- circuito de medição;
- circuito de aquecimento.
- circuito de Medição

É o responsável pela transformação das variações de resistência dos filamentos, em sinais elétricos proporcionais. Estes sinais são introduzidos em indicadores, registradores e controladores de concentração do componente em análise.

O circuito de medição engloba a ponte de resistência do tipo de "WHEATSTONE", sua fonte de alimentação, e o circuito de medição do sinal de desequilíbrio da ponte. A figura 12

mostra um circuito de medição genérico.

A fonte de alimentação deve fornecer uma corrente constante para a ponte de "WHEATSTONE" independentemente das variações da carga e da tensão da rede onde está ligada. Esta característica é conseguida por meio de circuitos eletrônicos de estabilização.

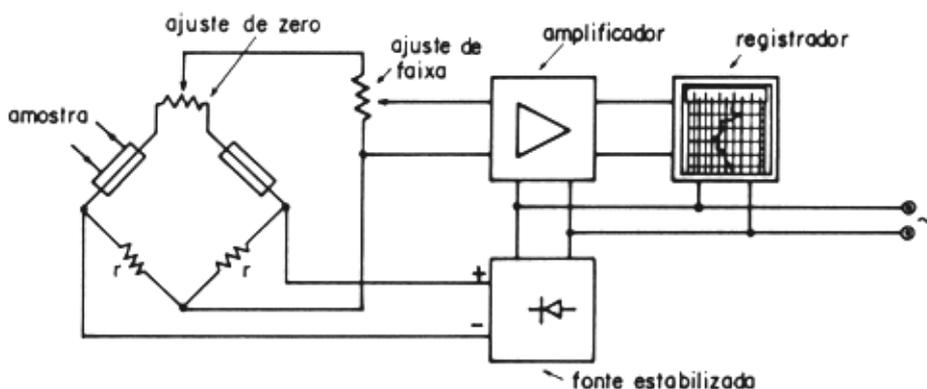


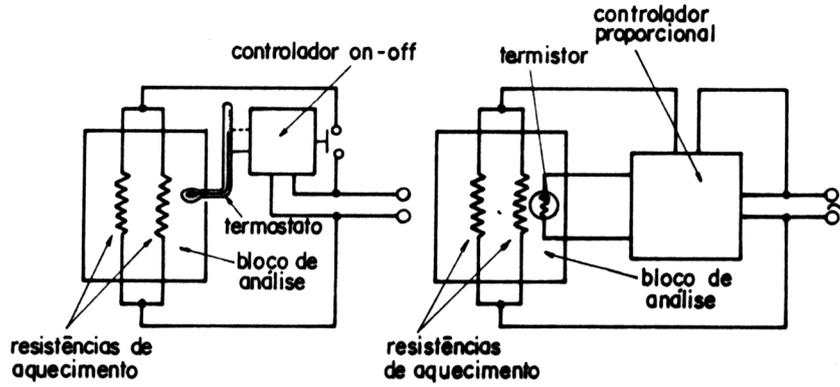
Fig 12

A ponte de "WHEATSTONE" é formada pelos filamentos das células de medição e comparação e por resistências fixas de elevada estabilidade térmica. Um potenciômetro é colocado na ponte a fim de permitir o ajuste do ponto zero. Um outro potenciômetro na saída da ponte permite ajustar a sensibilidade da medição. O sinal elétrico é, geralmente, da ordem de milivolts e pode ser introduzido em um amplificador, ou então, acionar diretamente um galvanômetro indicador ou registrador do tipo potenciométrico.

### - Circuito de aquecimento

A condutibilidade térmica dos gases varia com a temperatura; portanto torna-se necessário um controle rigoroso da temperatura da célula de análise. A técnica habitual consiste em se aquecer o bloco de análise a uma temperatura constante e acima do ambiente. Os valores usuais de temperatura estão compreendidos entre 45°C e 70°C.

O controle de temperatura pode ser feito por um simples termostato, que acionara uma resistência de aquecimento para manter constante a temperatura (figura 13) ou, então, poderá ser do tipo proporcional com um sensor tipo termistor substituindo o termostato. Neste caso, a potência dissipada pelas resistências de aquecimento, varia de modo contínuo, a fim de garantir uma temperatura estável do conjunto (figura 13).



Circuito de aquecimento

Fig 13

## Analísadores por absorção de raios infravermelhos

O analisador de infravermelho industrial é um instrumento analítico, que permite determinar, quantitativamente, em uma mistura de dois ou mais gases, um dos componentes.

A análise dos gases pelo método de absorção de raios infravermelhos (doravante será designado apenas por infravermelho), utiliza o princípio de que as moléculas de um determinado gás absorvem o raio infravermelho, conforme figura 14 e analisa continuamente a variação da concentração de um componente específico de uma mistura gasosa.

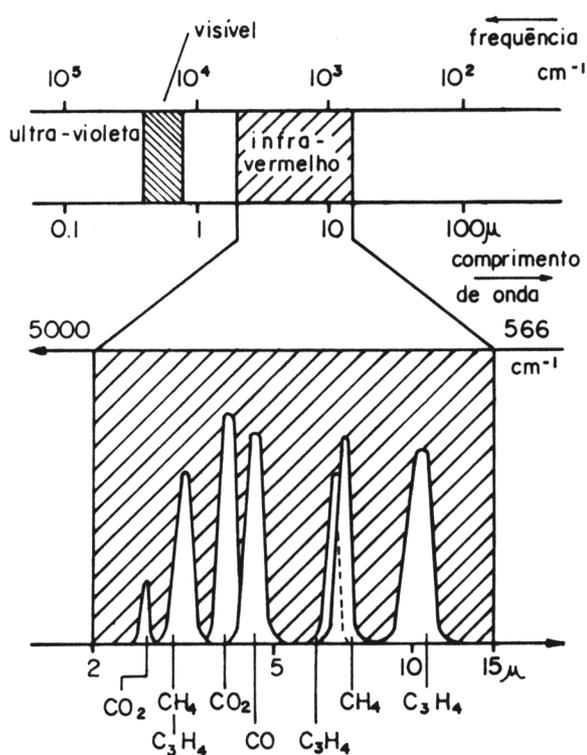


Fig.14 - Espectro de absorção de infra-vermelho de um gás

O princípio de medição é específico para o gás a ser analisado, isto é, o instrumento reagirá somente quando houver na amostra este gás.

A maioria dos gases podem ser analisados por este tipo de instrumento, conforme mostra a tabela 3.

TABELA 3 - Gases industriais analisados por infravermelho

FÓRMULA	COMPOSTO	*MENOR FAIXA
CO	MONÓXIDO DE CARBONO	0 a 0,01%
CO <sub>2</sub>	DIÓXIDO DE CARBONO	0 a 0,005%
CH <sub>4</sub>	METANO	0 a 0,02%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ETANO	0 a 0,02%
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	PROPANO	0 a 0,03%
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	BUTANO	0 a 0,02%
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	HEXANO	0 a 0,5%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ETILENO	0 a 0,3%
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	PROPILENO	0 a 0,2%
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ACETILENO	0 a 0,05%
—	VAPOR DE BENZINA	0 a 0,5g/m <sup>3</sup>
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	VAPOR DE BENZOL	0 a 1,0g/m <sup>3</sup>
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	TOLUOL	0 a 2,0g/m <sup>3</sup>
CH <sub>3</sub> OH	METANOL	0 a 1,0g/m <sup>3</sup>
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	ETANOL	0 a 2,0g/m <sup>3</sup>
CH <sub>3</sub> CHO	ALDEÍDO ACÉTICO	0 a 2,0g/m <sup>3</sup>
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	ACETONA	0 a 1,0g/m <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	AMÔNIA	0 a 0,1%
H <sub>2</sub> O	VAPOR DE ÁGUA	0 a 0,25g/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	DIÓXIDO DE ENXOFRE	0 a 0,02%
N <sub>2</sub> O	ÓXIDO NITROSO	0 a 0,005%
HCN	ÁCIDO CIANÍDRICO	0 a 0,05%
HCl	ÁCIDO CLORÍDRICO	0 a 0,1%
CS <sub>2</sub>	DISULFETO DE CARBONO	0 a 0,5%
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	CLORETO DE METILA	0 a 5,0%
—	FREON	0 a 5,0g/m <sup>3</sup>

\*Menor faixa de medição possível para os gases relacionados.

A maior faixa é, em todos os casos, de 0% a 100%.

Os valores constantes nesta coluna referem-se a um analisador do tipo de filtragem positiva, sem filtro de gases contaminantes ou interferentes.

(1) Teoria de funcionamento

### Infravermelho

O infravermelho é o nome dado a região do espectro eletromagnético compreendido entre os comprimentos de onda de  $0,8 \mu\text{m}$  a  $1000 \mu\text{m}$ , o que situa entre radiações luminosas e as micro-ondas, conforme é mostrado na figura 15, que representa o posicionamento da radiação infravermelha dentro do espectro eletromagnético.

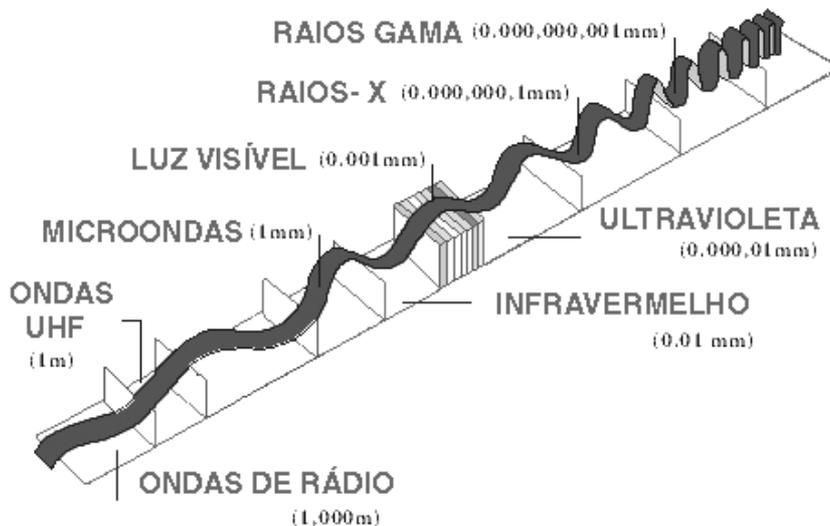


Fig 15

Em virtude da amplitude do intervalo coberto pelo infravermelho, suas propriedades e principalmente, o modo de interagir com a matéria, muda sensivelmente ao longo de toda a faixa. Isto levou a subdivisão do intervalo em três partes:

Infravermelho próximo: de  $0,8 \mu\text{m}$  a  $1,5 \mu\text{m}$ , com propriedades similares a da luz.  
Infravermelho intermediário: de  $1,5 \mu\text{m}$  a  $15 \mu\text{m}$ , faixa esta, onde opera a maioria dos analisadores industriais.

Infravermelho longínquo: de  $15 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ , de aplicação bastante especializada.

A figura 16, representa esta subdivisão.

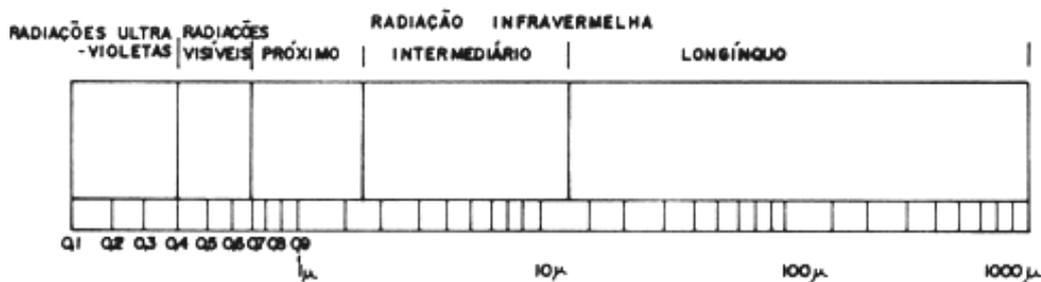


Fig. 16 - Espectro infravermelho

(2)Princípio de medição

A absorção dos raios infravermelhos é efetuada no interior de uma célula provida de janelas que permitem a passagem de raios infravermelhos e a relação quantitativa entre a absorvidade do infravermelho pelas moléculas e a quantidade do gás existente numa mistura é dada pela equação 2.4.

*Espectro de absorção*

Quando um feixe de radiação infravermelha atravessa uma substância gasosa, sofre uma absorção de energia em certos comprimentos de onda, resultando em um feixe emergente, com energia inferior a de entrada.

A figura 17 representa, graficamente, o fenômeno de absorção seletiva.

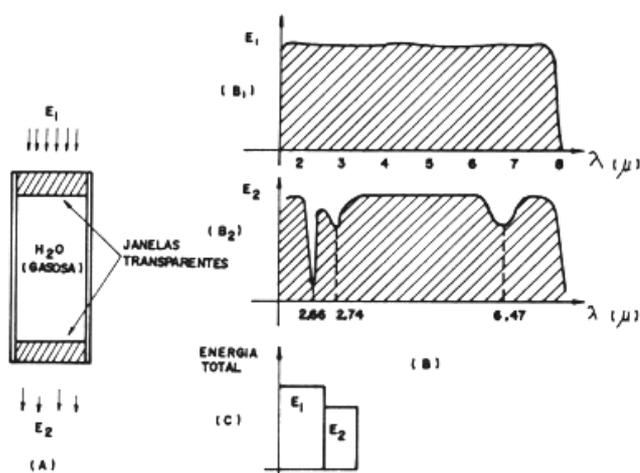


Fig. 17 - Absorção da infravermelho pela água

Em A, temos representada uma câmara ou célula de análise, que contém um determinado gás ou mistura de gases. Sobre a câmara, incide um feixe de radiação infravermelha de energia total  $E_1$ . Ao abandonar a câmara, a energia sofreu uma redução em alguns

comprimentos de onda, sendo sua energia representada por  $E_2$ . O gráfico  $B_1$  representa a distribuição de energia de entrada ao longo da faixa total de comprimentos de onda.

o gráfico  $B_2$  representa o mesmo tipo de distribuição onde se nota, porém, a redução de energia em alguns comprimentos de onda.

Em C, temos uma comparação entre as energias totais de entrada e saída,  $E_1$  e  $E_2$ , respectivamente.

A redução da energia radiante, através de uma substância qualquer, obedece a lei de BEER-LAMBERT.

De um modo geral, toda energia radiante do espectro eletromagnético obedece a esta lei.

$$E_2 = E_1 * e^{-\varepsilon(\lambda).p.\lambda} \dots\dots\dots(2.4)$$

Onde:

$E_2$  = energia emergente da substância

$E_1$  = energia incidente na substância

$e$  = base dos logaritmos Neperianos = 2,71828

$\varepsilon(\lambda)$  = Fator que depende do comprimento de onda da radiação e do tipo de substância.

$\rho$  = densidade do meio absorvente

$\lambda$  = distância percorrida pela radiação no meio.

Analisando melhor o gráfico  $B_2$ , da figura 17 vemos que representa, no eixo vertical as energias correspondentes a cada comprimento de onda (energia espectral  $\varepsilon \lambda$ ), e na horizontal, os comprimentos de onda em  $\mu$  ou, ainda, os números de onda, grandeza esta, usada preferencialmente em espectroscopia.

### (3) Fonte de infravermelho

As condições necessárias da fonte de luz do analisador de espectroscopia do infravermelho para fins industriais são, que o aparelho emita o espectro contínuo e que a característica da onda seja próxima à da radiação de um corpo negro e, que seja estável por um prolongado período e que a variação da luminância seja o mínimo possível. Dentre as diversas fontes que satisfazem as condições acima citadas com relativa facilidade, existem, fontes de infravermelho provenientes de fio metálico e de corpos emissores de calor.

### (4) Célula

A célula poderá ser feita de aço inoxidável, de vidro, ou de alumínio e, a parede interna da mesma é polida ou acabada por eletro galvanização, a fim de elevar a refletância do infravermelho e as extremidades deverão estar providas de janelas que permitam a passagem do infravermelho.

### (5) Tipos de analisadores

Os instrumentos baseados na absorção do infravermelho podem ser classificados em dois grandes grupos:

1º analisadores tipo dispersante (espectrômetro)

2º analisadores tipo não dispersante

1º - Tipo dispersante

O princípio básico de funcionamento dos analisadores dispersante está representado na figura 18.

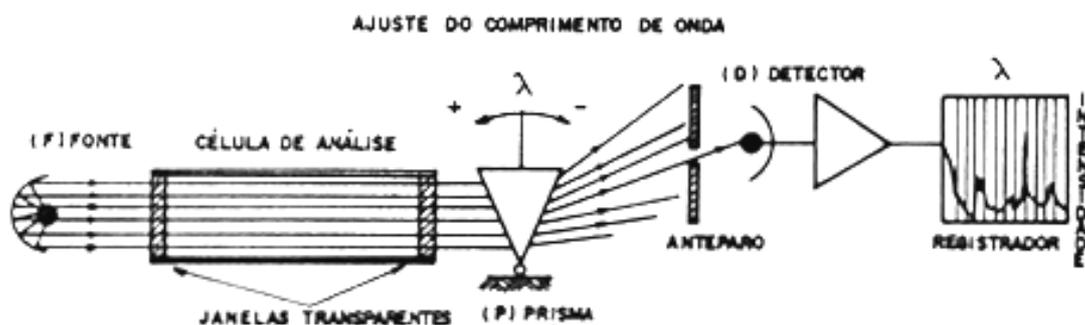


Fig. 18 - Espectrômetro básico

A radiação infravermelha proveniente da fonte (F), passa através de uma célula, contendo a amostra da substância a ser analisada. O feixe transmitido sofre, no

prisma (P), uma dispersão e o espectro, assim obtido, incide em uma fenda que seleciona uma estreita faixa ou banda de comprimentos de onda, que irá atingir o detector de radiação (D).

Atuando-se sobre os sistemas de dispersão, pode-se fazer uma exploração de todo o espectro, tendo-se como resultado, um gráfico chamado espectrograma, conforme mostram as figuras 17 e 21.

Este tipo de analisador é usado em laboratórios e sua operação é feita por técnicos especializados. Pode analisar gases, líquidos e sólidos, não havendo, em princípio, necessidade de conhecimento prévio dos componentes da amostra a ser analisada, pois o estudo do espectrograma fornecido permite identificar e quantizar as diversas substâncias presentes.

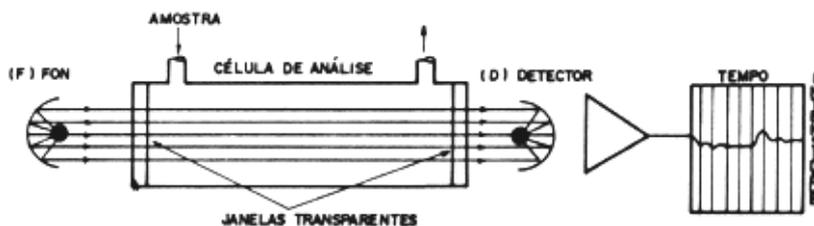


Fig 19 - Tipo não dispersante

A fonte do infravermelho (F) emite um feixe de radiação que passa através da célula de análise, indo incidir no detector (D) sem ter sofrido nenhuma dispersão.

O sinal recebido pelo detector varia de acordo com a concentração do gás a ser analisado, sendo o resultado, geralmente registrado em termos percentuais.

Uma diferença a ser observada entre os dois tipos de analisadores é que, no tipo não dispersante, a amostra flui continuamente através da célula de análise, fornecendo, ao longo do tempo, a concentração de somente um dos componentes da amostra, conforme mostra a figura 20, enquanto no espectrômetro, a análise é feita com uma amostra selecionada por vez, sendo, o resultado, o espectro de absorção de todos os componentes presentes na amostra, conforme figura 21.

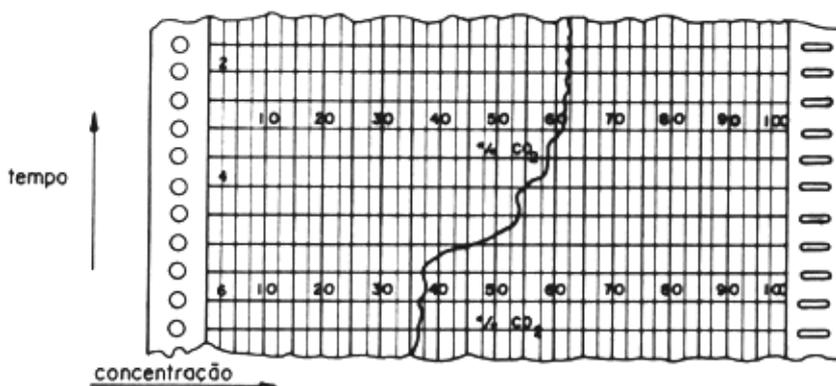


Fig. 20 - Gráfico de analisador contínuo

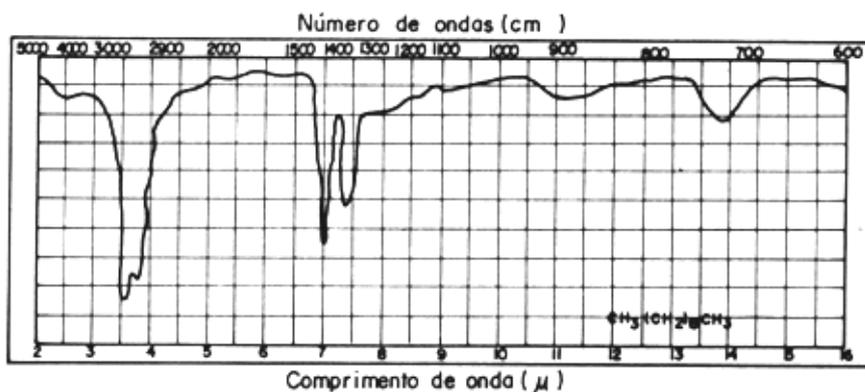


Fig. 21 - Gráfico de um espectrômetro

Pelo fato de os analisadores não dispersantes apresentarem uma análise contínua ao longo do tempo, possuem aplicação bastante comum como elementos de monitoria e controle em processos industriais, dos mais variados tipos, principalmente, na análise de substância na forma gasosa. Serão, por este motivo, objeto de estudo nos parágrafos subsequentes.

(6) Tipos de construção.

- Classificação dos analisadores contínuos

O analisador básico apresentado na figura 19 embora funcional, apresenta deficiências de operação que tornam impraticável seu uso comercial.

Estas deficiências são:

1 - Qualquer variação na intensidade da fonte provocará variação no final do detector causando erro de medição.

2 - O acúmulo de impurezas nas paredes das células ou nas janelas transparentes também afetará o sinal no detector.

3 - A presença de outro componente gasoso na amostra, que absorva, também, radiação infravermelha, falsificará a medição do componente escolhido previamente. Deste modo, os analisadores, comercialmente disponíveis, dispõem de recursos que minimizam ou mesmo, eliminam estas deficiências, conforme se mostrara a seguir:

As duas primeiras deficiências apontadas são, geralmente, eliminadas por meio de dois recursos:

1 - Através de um controle automático de intensidade da fonte, que compensaria os desvios do instrumento, causados pelo envelhecimento da fonte e por impurezas na célula de análise.

2 - Através da divisão do feixe de radiação enviado pela fonte, em duas partes, sendo uma delas para medição e outra para referencia, garantindo, deste modo, pelo menos, a estabilidade do zero no instrumento.

A ultima deficiência do analisador básico apontada, ou seja, a sensibilidade do mesmo a qualquer gás absorvente de radiação é eliminada por meio de filtros seletivos de radiação infravermelha interpostos no caminho do feixe, que sensibilizam o instrumento para somente um dos gases componentes da amostra.

A classificação dos analisadores contínuos, atualmente em uso, é baseada nos

- sistemas de filtragem ou sensibilização empregados:

- sistema de filtragem negativa (figuras 21A – 21B)

- sistema de filtragem positiva (figuras 22A – 22B)

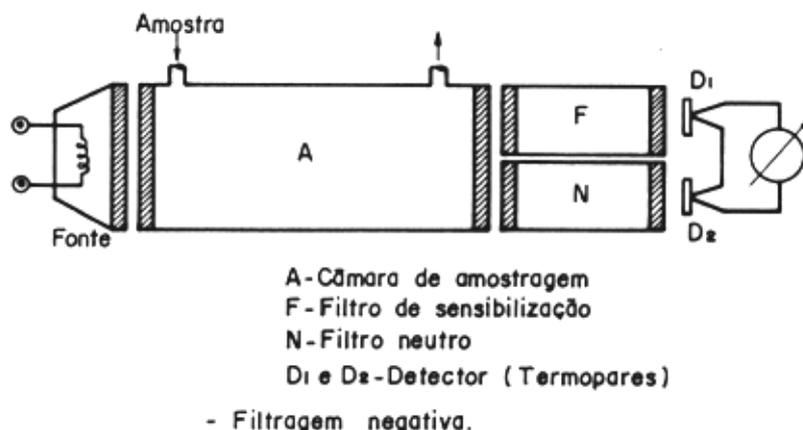


Fig 21A

#### Filtragem Negativa

No sistema de filtragem negativa, o feixe atravessa a câmara onde circula a amostra, bifurca-se e cada metade atravessa um filtro independente (F e N), indo incidir em dois detectores de radiação (D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>) representados na figura 21A por dois termopares.

Os filtros podem ser simples câmaras com janelas transparentes cheias de um gás qualquer.

No presente caso, N representa um gás que não absorve radiação infravermelha (N<sub>2</sub>, Ar ...) e F representa o mesmo gás a ser medido na amostra (CO, CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>...) A radiação infravermelha que alcança o termopar é transformada em energia térmica, aquecendo-o.

Podemos imaginar duas situações:

1º - A amostra não contém o gás a ser medido (0%), o detector D<sub>1</sub>, recebe toda radiação da fonte, exceto a parte do espectro absorvida pelo filtro F. O detector D<sub>2</sub> recebe toda a radiação da fonte.

2º - A amostra contém o máximo do gás a ser medido (100%). O detector D<sub>1</sub> não se altera pois os comprimentos de onda absorvidos pela amostra já não o atingiam devido ao filtro F.

O detector D<sub>2</sub>, que recebia a radiação integral, terá suprimido parte do espectro por meio da amostra, tendo, deste modo, sua temperatura reduzida.

A combinação dos dois detectores em série operará o sistema de indicação.

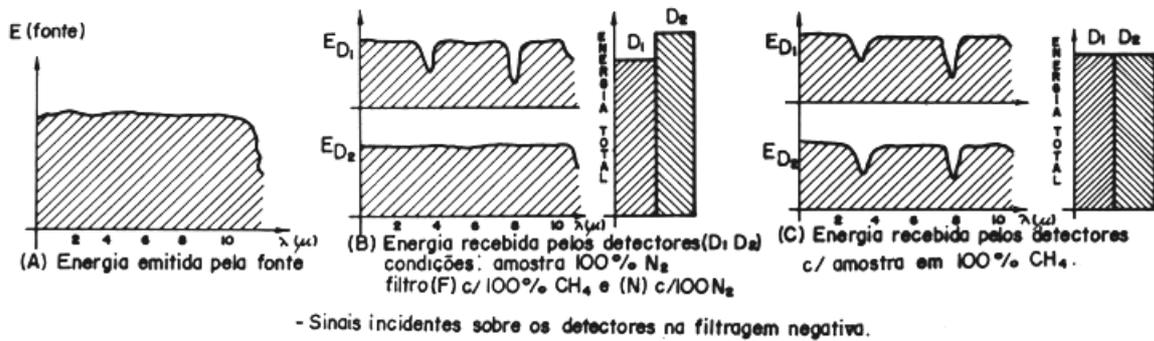


Fig 21B

A figura acima representa graficamente a radiação emitida pela fonte (A), supostamente de energia uniforme ao longo de espectro e a radiação incidente sobre os detectores com o gás medido em 0%(B) e 100%(C).

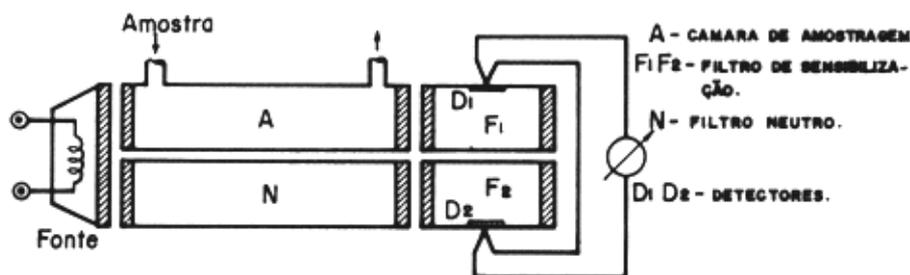


Fig. 22A - Filtragem Positiva.

### Filtragem Positiva

Neste sistema, o feixe de radiação se bifurca e uma das partes (figura 22A atravessa a câmara de medição (A) indo incidir no filtro ( $F_1$ ) que, neste caso, sempre é uma câmara com janelas transparentes cheias de gás do tipo a ser medido

( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ...)

A outra parte do feixe de infravermelho atravessa uma câmara selada, com gás neutro ao infravermelho (N), e incide em um filtro ( $F_2$ ) idêntico ao mencionado anteriormente.

Os detectores  $D_1$  e  $D_2$ , neste caso, medem a temperatura do gás de enchimento dos filtros ( $F_1$  e  $F_2$ ).

De modo similar ao tipo anterior, imaginemos dois tipos de situações:

1º A amostra não contém o gás a ser medido (0%). O detector  $D_1$  aquece-se por meio do gás do filtro ( $F_1$ ) pois o mesmo absorve parte da energia do feixe incidente nos comprimentos de onda correspondentes ao seu espectro de absorção (o mesmo do gás a ser medido).

O detector  $D_2$  comporta-se de modo similar ao  $D_1$  e não será afetado pelas variedades da amostra.

2º A amostra contém o máximo, do gás a ser medido (100%). O detector  $D_2$  não se altera, conforme explicação anterior.  
O detector  $D_1$ , que mede a temperatura do gás selado em  $F_1$ , abaixara sua temperatura pois a radiação, que incide em  $F_1$ , não contém os comprimentos de onda que este gás absorve, visto que foram previamente absorvidos pela amostra.

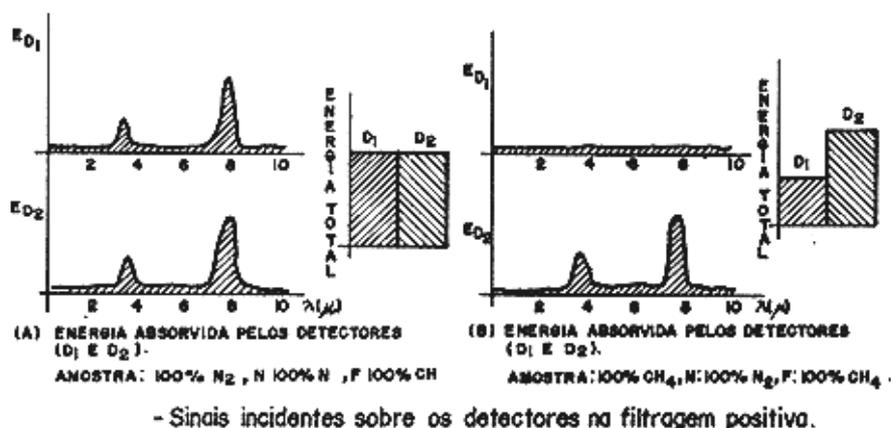


Fig. 22B - Sinais incidentes sobre os detectores na filtragem positiva.

A figura 22B representa graficamente as radiações recebidas pelos detectores nos dois casos extremos de amostra (0% e 100%).

Comparando-se os sistemas de detecção dos dois tipos de filtragem, verifica-se que, no sistema positivo, o sinal de saída é função da absorção direta dos comprimentos de onda, relativo ao gás medido (analogia positiva), enquanto que no sistema negativo, o sinal de saída é função da absorção pelos detectores, de todo o espectro, menos uma parte referente aos comprimentos de onda do gás a ser medido (analogia negativa).

- Elementos da unidade analisadora

Antes de descrever alguns tipos de analisadores comercialmente em uso, serão descritos neste parágrafo, os principais componentes da unidade de análise, que engloba três partes:

- 1º - Fonte de infravermelho
- 2º - Sistema óptico (filtros e janelas transparentes)
- 3º - Detectores de infravermelho

1º - Fontes de infravermelho

São responsáveis pela emissão de radiação infravermelha, dentro da faixa espectral necessária a análise de um determinado gás.

As fontes de infravermelho destinadas ao uso, em instrumentação analítica, são, geralmente, do tipo elétrico, ou seja, por meio de aquecimento de uma determinada substância, com uma corrente elétrica, fazendo que a mesma emita energia radiante na

faixa espectral do infravermelho.

Entre os vários tipos de fonte existentes, as mais comuns são:

- FONTE DE GLOBAR
- FONTE DE NERNST
- FONTE DE NICHROME.

A fonte de GLOBAR é constituída, basicamente, de um pequeno cilindro de carbureto de silício sintetizado, aquecido, eletricamente, a uma temperatura de, aproximadamente 1500°C. Este tipo de fonte é utilizado, principalmente em espectrofotômetros por infravermelho.

A fonte de NERNST é constituída de um pequeno tubo de oxido de Ítrio e Zircônio aquecido eletricamente, a uma temperatura de, aproximadamente, 2000°C e emite radiações de grande intensidade na faixa de infravermelho. É também, usado em espectrofotômetros.

A fonte de NICHROME é constituída por um fio ou fita de NICHROME (62% Ni, 13%Cr e 25% Fe) enrolada na forma de hélice é aquecida, eletricamente, na faixa de 400°C a 900°C. Normalmente, estes filamentos são encerrados em atmosferas inertes e secas a fim de prolongar a sua durabilidade. As superfícies internas das cavidades onde são instalados os filamentos são polidas, a fim de aumentar o rendimento na direção desejada, com auxílio do formato da superfície e do posicionamento dos filamentos.

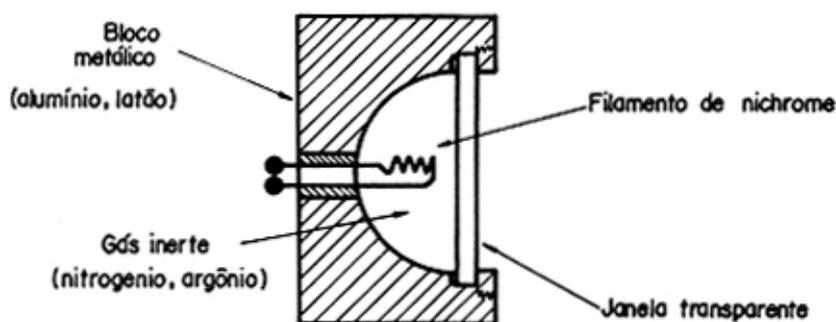


Fig.23- Fonte de infravermelho de Nichrome.

A figura 23 mostra uma superfície refletora do tipo parabólico, cujo foco é ocupado pelo filamento.

As vantagens principais da fonte de NICHROME, estão na simplicidade de construção, que lhe confere robustez e durabilidade. Por este motivo, é, atualmente, a fonte empregada, por excelência, nos analisadores industriais.

## 2º - Sistema óptico

(filtros ópticos e janelas transparentes)

O comportamento de uma substância com relação a uma radiação infravermelha incidente é, sem dúvida, da maior importância na confecção do sistema óptico de um analisador infravermelho.

Um feixe de infravermelho, ao encontrar uma determinada substância, pode ser absorvido, transmitido, refratado ou mesmo difratado.

Quando a absorção é total, diz-se que o material não é transparente ao infravermelho.

No caso da transmissão, ela pode ser total quando o feixe atravessa a substância, sem sofrer perdas na sua energia inicial e sem mudar de direção. Quando houver mudanças de direção, o feixe estará sendo refratado ou difratado.

Em um analisador infravermelho contínuo, necessita-se de substâncias que sejam transparentes ao tipo de radiação utilizado (janelas transparentes), assim como de substâncias que transmitam, somente, parte do feixe incidente, isto é, que deixem passar, sem grande redução na sua energia, uma pequena faixa ou banda de comprimentos de onda, absorvendo quase que totalmente o restante (filtros).

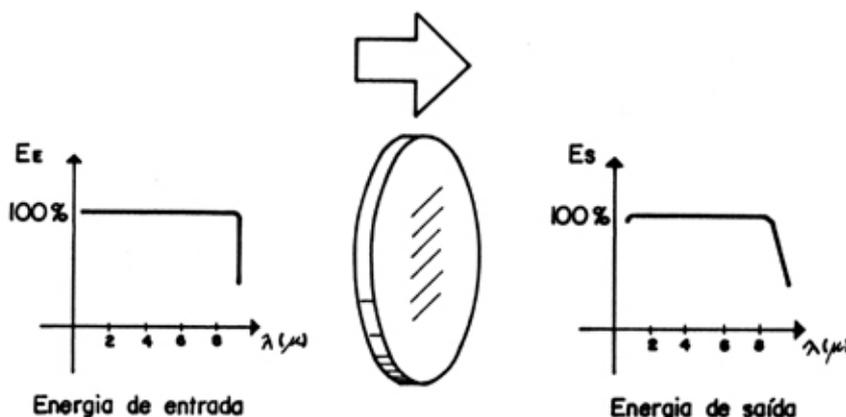
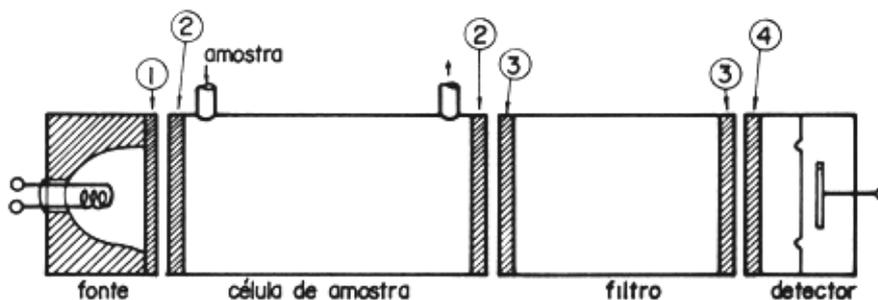


Fig 24- Janela transparente ao Infravermelho.

Não existe nenhuma substância que seja transparente ao infravermelho em toda a sua faixa. Na realidade, a transparência se dá, apenas em uma certa largura do espectro. No caso dos analisadores, a faixa de trabalho cobre a parte do infravermelho intermediário, aproximadamente ( $1,5\mu\text{m}$  a  $15\mu\text{m}$ ), bastando, para isto que a transparência se restrinja a esta faixa (figura 24).

As janelas usadas nos analisadores de infravermelho devem, ainda, ser robustas e resistentes à ação da umidade. As aplicações mais comuns são (conforme figura 25):

- (1) selagem da fonte de infravermelho;
- (2) construção da câmara de amostragem;
- (3) selagem das câmaras de filtragem;
- (4) selagem da câmara do detector.



- Janelas transparentes no analisadores infravermelho.

Fig 25

Os materiais mais usados na confecção das janelas são:

- Cloreto de sódio (Na Cl);
- Brometo de Potássio (K Br);
- Fluoreto de Lítio (LiF);
- Fluorita ou Fluoreto de Calcio (Ca F<sub>2</sub>);
- Cloreto de Prata (Ag Cl);
- KPS-5 (42% de Brometo de Tálcio e 58% de Iodeto de Tálcio);
- Brometo de Césio (Ce Br);
- Vidro (vários tipos);
- Quartzo Fundido (Si O<sub>2</sub>).
- Safira

### 3.9 - Detectores de infravermelho

São elementos responsáveis pela recepção e medição da radiação infravermelha, após esta atravessar as células de análise e os filtros.

são transdutores do tipo elétrico, isto é, absorvem a energia incidente e a transformam em um sinal elétrico proporcional à intensidade desta radiação. Os princípios de operação são dos mais variados, sendo, entretanto, o de transformação de energia radiante em energia térmica e, posteriormente, em energia elétrica, os mais usados. Os tipos mais comuns são classificados em:

Detectores não térmicos: célula foto condutora.

Detectores térmicos: o termopar, o bolômetro, o termistor, o detector pneumático.

A célula fotocondutora é constituída de uma camada de sulfeto ou telureto de chumbo, depositada sobre um suporte isolante, sendo o conjunto encerrado em uma cápsula sob vácuo. O conjunto possui uma janela transparente à radiação a ser medida (figura 26).

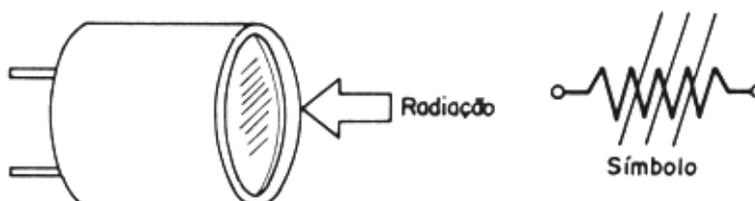


Fig 26

Ao incidir sobre a célula, a radiação provoca a variação de corrente, causada pela variação na sua resistividade. Deste modo, a medição de sua resistência representará a intensidade da radiação absorvida. As vantagens residem na sua alta sensibilidade e no curto tempo de resposta (cerca de 0,5 milisegundos). As desvantagens limitam seu uso em analisadores, devido à insensibilidade em comprimentos de onda superiores a  $6\mu$ , faixa esta, insuficiente para cobrir várias aplicações industriais de análise.

Termopar (veja também a apostila de medição de temperatura)

Um dos detectores mais utilizados em analisadores industriais. É constituído, basicamente, de um circuito elétrico composto de dois metais diferentes, conforme mostra a figura 27A. Quando existe uma diferença de temperatura entre as duas junções dos dois metais, aparece uma força eletromotriz (F.E.M.), que representará a diferença da temperatura.

Colocando-se uma das junções em um local de temperatura constante e fazendo-se incidir radiação sobre a outra, a absorção da energia radiante elevará a temperatura desta junção, gerando uma F.E.M. proporcional a radiação incidente.

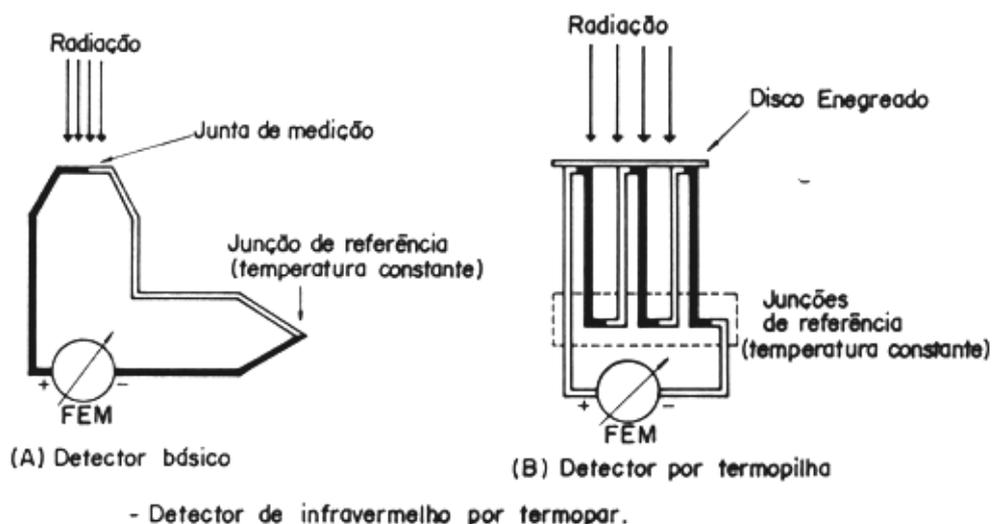


Fig 27

A fim de aumentar a sensibilidade do detector, usa-se, geralmente, uma associação de termopares em série, sendo, o conjunto, chamado de termopilha (figura 27B). o tempo de resposta, no caso da termopilha, é superior ao do termopar singelo.

Detector pneumático

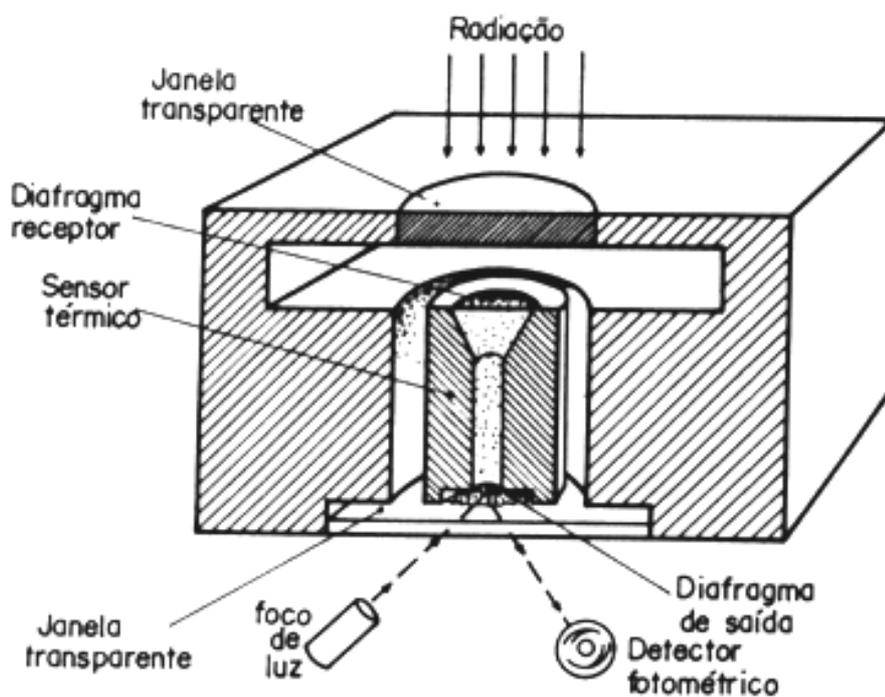
Tem uso generalizado em analisadores a infravermelho, contínuos.

O seu princípio de operação é bem diferente dos detectores apresentados anteriormente e pode ser subdividido em dois tipos:

- célula de GOLAY;

- o detector microfônico.

A CÉLULA DE GOLAY, representada na figura 28, baseia-se na variação da pressão de um gás com a temperatura. A radiação incide sobre um diafragma metálico fino com a superfície receptora enegrecida, para melhorar o coeficiente de absorção. Este diafragma fecha uma câmara cilíndrica cheia de gás inerte (Xenônio) a qual possui, na outra extremidade, um diafragma altamente flexível.



- Célula de Golay.

Fig 28

Ao incidir a radiação, o diafragma superior aquece-se transmitindo energia térmica ao gás. Aquecendo-se o gás, o diafragma inferior deforma-se, devido as variações de pressão do gás com a temperatura. A deformação do diafragma representa a pressão do gás e, conseqüentemente, a temperatura do mesmo, que estará, relacionada, diretamente, com a intensidade da radiação incidente. Conforme mostra, ainda, a figura 28, a posição do diafragma inferior é detectada por um sistema óptico. A superfície externa deste diafragma é espelhada, e sobre ela incide um feixe de luz que, refletido, irá atuar sobre um sistema fotométrico. As deflexões do diafragma provocam a mudança de posição do feixe refletido, que provocará alteração de um sinal de saída elétrico.

Este tipo de sensor é altamente sensível, podendo detectar fluxos de energia da ordem  $10^{-10}$  watt porém é delicado e custoso, motivo pelo qual não é usual seu emprego em analisadores industriais.

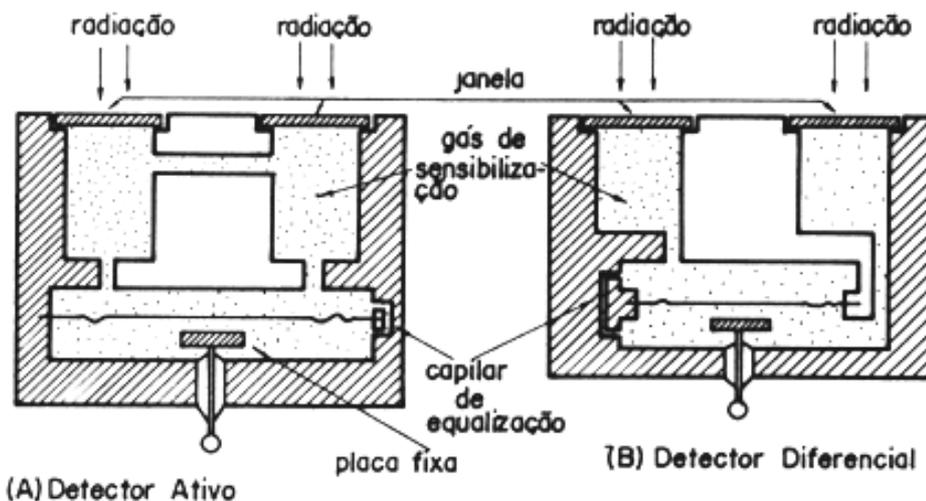
### Detector microfônicos

Possui pontos em comum com a célula de GOLAY, no que se refere ao elemento sensor: aquecimento de um gás com radiação e conseqüente deformação de um diafragma, existindo, porém, diferenças, conforme a explicação a seguir:

Este tipo de detector é constituído de uma câmara dividida em duas partes por um diafragma flexível (figura 29A e B). A câmara é preenchida por um gás absorvente, de radiação infravermelha, havendo, também, uma janela transparente de radiação. Atravessando a janela, a radiação é absorvida pelo gás, nos comprimentos de onda correspondentes ao tipo de gás de enchimento da câmara. Este gás, então, se aquece e aumenta a pressão que causa a deformação do diafragma. O diafragma forma um capacitor variável, com uma placa fixa, e as variações de posição do diafragma provocam variações da capacitância que representam as variações de energia radiante incidente.

A figura 28 (A) mostra um detector do tipo aditivo (a deflexão do diafragma depende da soma das duas radiações).

A figura 28 (B) mostra um detector do tipo subtrativo ou diferencial (a deflexão do diafragma depende da diferença das duas radiações).



Nota: CAPILAR DE EQUALIZAÇÃO: MANTÉM O EQUILÍBRIO DE PRESSÃO A LONGO TERMO ENTRE OS DOIS LADOS DO DIAFRAMA.

- Detector de infravermelho microfônico.

Fig 29

Este tipo de detector é seletivo, pois absorve somente energia radiante infravermelha, correspondente ao espectro de absorção do gás de preenchimento. Os outros tipos de detectores, mencionados anteriormente, absorvem toda a energia radiante, independentemente do seu comprimento de onda.

Devido a esta particularidade, o detector microfônico, é também chamado "detector seletivo" e seu uso é bastante difundido entre os analisadores industriais de filtragem positiva pois mede exatamente a energia radiante nas bandas correspondentes ao tipo de

— gás em análise, ao contrário do sistema de filtragem negativa, que mede todo o espectro incidente do mesmo.

## - Analisadores por Paramagnetismo

### (1) Introdução

O analisador paramagnético de gases é um instrumento analítico que permite determinar, em uma mistura de dois ou mais gases, um dos componentes. Esta determinação é feita por meio das propriedades magnéticas apresentadas pelo gás a ser analisado.

Entre todos os gases industriais existentes, o oxigênio é o único que apresenta propriedades magnéticas excepcionais. Outros gases apresentam também, esta característica, porém em menor proporção. São eles, o óxido nítrico e o dióxido de nitrogênio, ambos com pouca importância dentro do campo industrial e de presença pouco comum na maioria dos processos. Deste modo, o analisador paramagnético, é usado quase que exclusivamente na medição da concentração do oxigênio, em uma mistura de gases.

A descoberta das propriedades magnéticas do oxigênio foi feita por FARADAY, que sugeriu, em 1848, a utilização desta propriedade para determinação da concentração

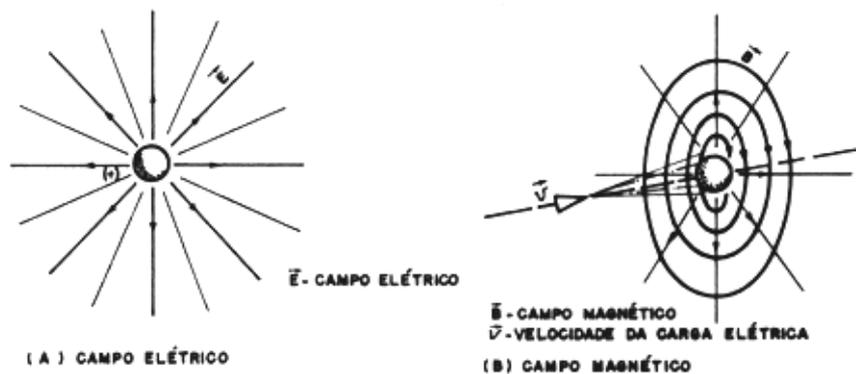
Somente em 1942, HARTMANN & BRAUN desenvolveram um analisador para uso industrial, baseado no paramagnetismo do oxigênio. As aplicações, na indústria, do analisador de oxigênio paramagnético são as mais diversas:

- controle de oxigênio dos gases queimados nos processos de combustão;
- controle de pureza nos processos de produção de oxigênio;
- controle de produção de cal, cimento e fosfato;
- controle de craqueadores catalíticos, processos de fermentação, produção de polpa e papel, etc.

### (2) Magnetismo

Uma carga elétrica cria um campo elétrico ao redor do espaço que ocupa. A presença deste campo é detectada, colocando-se um pequeno corpo de prova neste espaço e verificando-se os efeitos resultantes. O corpo de prova se movimentará, afastando-se ou aproximando-se da carga, seguindo uma trajetória chamada "*linha de força*". O sentido do movimento dependerá dos sinais das cargas envolvidas.

Supondo-se a carga estática, em relação a um determinado referencial, o único efeito de origem elétrica existente é provocado pelo campo elétrico. Colocando-se a carga em movimento, é criado um outro campo de força, chamado campo magnético. As linhas de força que criam o campo magnético são perpendiculares as do campo elétrico que o originou (figura 30).



- Criação do campo magnético.

Fig. 30 - Criação do campo magnético.

Se for colocada uma carga elétrica em repouso sob a ação do campo magnético, este não mostra nenhuma reação, porém, movimentando-se esta carga, aparece uma força que modifica a trajetória da mesma.

Do exposto, conclui-se que o magnetismo é de origem puramente elétrica.

### (3) Magnetismo na Matéria

A conceituação apresentada, supõe que o fenômeno magnético descrito se desenvolveu no vácuo ou seja, uma região do espaço sem a presença de matéria.

Quando ocorrem em um meio material, seja ele gasoso, líquido ou sólido, os fenômenos magnéticos sofrem mudanças significativas.

As linhas de força do campo magnético em uma substância, podem ter sua densidade aumentada ou diminuída em relação ao vácuo.

Estas alterações estão relacionadas com a estrutura atômica da matéria. Os átomos são constituídos de cargas elétricas positivas, aprisionadas em um núcleo central e cargas negativas em movimento em torno deste núcleo e de si mesmas. O movimento das cargas negativas (elétrons) criam campos magnéticos que interagem com o campo externo, reforçando-o ou enfraquecendo-o.

As substâncias são classificadas pelo modo como se comportam na presença de um campo magnético:

- diamagnéticas: são as que diminuem a densidade do fluxo magnético em relação ao vácuo (figura 31A);
- paramagnéticas: são as que aumentam a densidade do fluxo magnético em relação ao vácuo (figura 31B);
- ferromagnéticas: aumentam, também, a densidade do fluxo magnético mas em uma proporção milhares de vezes superiores as substâncias paramagnéticas (fig 31 C)

## Diamagnetismo

O espectro mais importante do diamagnetismo é o de estar presente em todas as substâncias, não sendo, as vezes, notado, pelo fato de predominarem outros efeitos de maior magnitude.

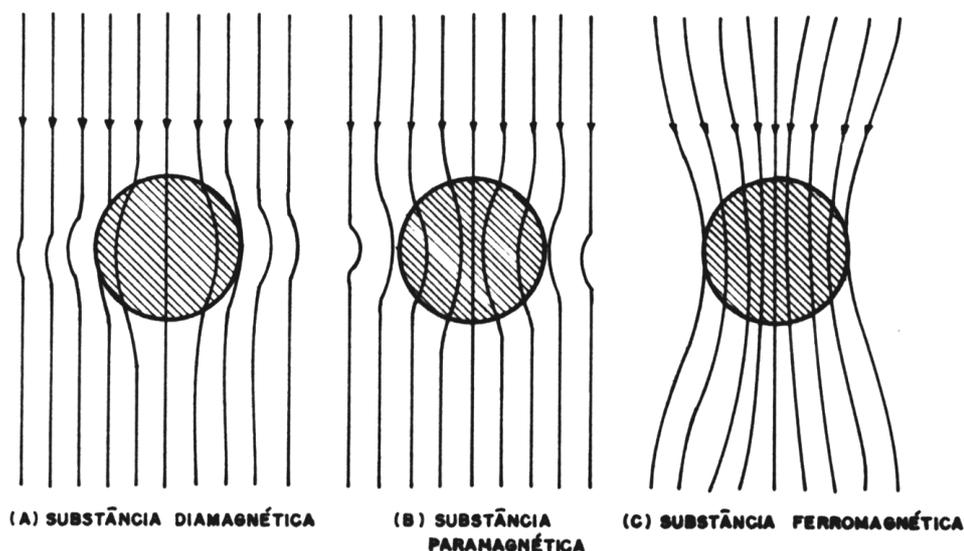


Fig 31

A explicação para o diamagnetismo está relacionado com a geração de uma corrente magnética. A corrente elétrica introduzida na espira, cria um campo magnético que se opõe ao campo original.

O movimento do elétron, em torno do núcleo, pode ser interpretado como uma espira que, quando imersa em um campo magnético, sofre uma perturbação similar a da espira mencionada anteriormente, ou seja, é criado um campo magnético induzido, que se opõe ao campo original.

Combinando-se o efeito de todos os átomos que constituem a substância em observação, obtém-se, como resultado final, uma redução do fluxo magnético, no interior do corpo. Este fenômeno é facilmente observável nos gases inertes cobre, vidro, chumbo, água, etc.

## Paramagnetismo

Alem do campo magnético criado por seu movimento em torno do núcleo, o elétron cria, também, outro campo magnético, girando sobre si mesmo, movimento este, chamado de "SPIN".

Quando os átomos possuem seus orbitais completos, como no caso dos gases raros, os campos magnéticos criados pelos movimentos dos elétrons se cancelam, resultando em um campo magnético atômico nulo. Somente a presença de um campo externo altera este equilíbrio, provocando um campo contrario, como no caso do diamagnetismo.

Porem, existem casos em que ocorre o desemparelhamento entre o "SPIN" de dois ou mais elétrons. Neste caso, passa a existir um campo magnético resultante, que possui

orientação aleatória no interior da substância. O átomo ou molécula, deste modo, passa a se comportar como um diminuto ímã. A substância constituída destas pequenas partículas magnéticas e chamada de paramagnética. Devido a orientação arbitrária destes pequenos ímãs, o campo magnético resultante é nulo. Porém, ao serem introduzidas em um campo magnético externo, estas partículas se orientam no sentido das linhas de força, resultando em um incremento na intensidade do campo indutor. Eliminando-se o campo externo, estabelece-se novamente a desordem, na orientação das partículas e não se observa nenhum efeito magnético mensurável.

Como exemplo de substâncias paramagnéticas temos: alumínio, cromo, estanho, oxigênio, etc.

#### Ferromagnetismo:

Algumas substâncias comportam grupos de átomos, cujos campos, magnéticos são orientados no mesmo sentido:

Estes grupos chamados domínios, possuem um campo magnético relativamente intenso, orientados em direções diferentes, podendo dar como resultado um campo magnético nulo.

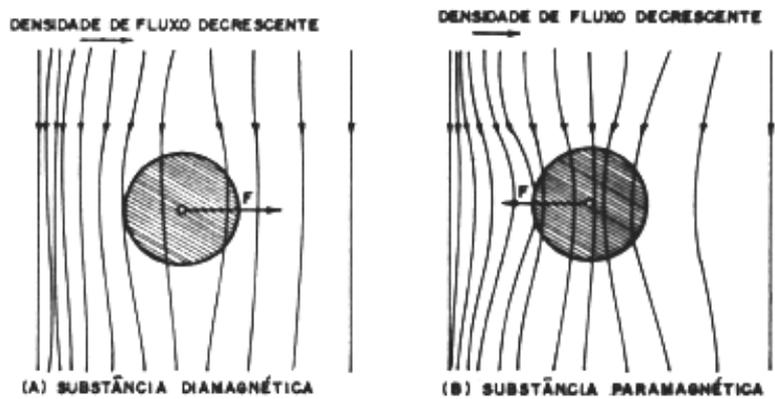
Sob a ação de um campo magnético, estes domínios se orientam, de modo a reforçar o campo indutor. Esta propriedade identifica as substâncias ferromagnéticas, como, por exemplo: ferro, níquel, cobalto.

Comportamento de um corpo em um campo magnético.

Um corpo imerso em um campo magnético não uniforme, sofre a ação de uma força de atração ou repulsão, dependendo da propriedade magnética do corpo em relação ao meio em que se encontra (figura 32).

- uma substância diamagnética é repelida do campo, ou seja, é deslocada no sentido de menor densidade do fluxo (figura 32A).
- a substância paramagnética é atraída para a região de maior densidade de fluxo magnético (figura 32B).

No caso de um meio gasoso, o comportamento magnético deste, interfere no resultado, podendo, inclusive, alterar o sentido da força.



- Comportamento de uma substância em um campo magnético não uniforme.

Fig 32

#### (4) Paramagnetismo nos gases

Na maioria das moléculas gasosas a combinação dos campos magnéticos individuais de cada elétron, devido ao seu "SPIN", resulta em um campo final nulo. Neste caso, o comportamento desta molécula em um campo magnético é devida ao emparelhamento dos "SPINS" dos elétrons nos orbitais a que pertencem.

Os gases inertes também apresentam comportamento não-magnético pois tem todos os orbitais atômicos completos, resultando em um campo magnético final nulo.

O oxigênio entretanto, apresenta propriedades fortemente paramagnéticas, devido ao desemparelhamento de dois elétrons nos orbitais externos de sua molécula.

A tabela 1 mostra, em termos relativos ao oxigênio, a suscetibilidade magnética de alguns gases. Além do oxigênio, somente o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), apresentam um comportamento paramagnético notável.

TABELA 4 - Suscetibilidade magnética de alguns gases.

FÓRMULA	GASES	PORCENTAGEM
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ACETILENO	- 0,24
H <sub>2</sub> O	ÁGUA	- 0,02
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	ALENO	- 0,44
NH <sub>3</sub>	AMÔNIA	- 0,26
Ar	ARGÔNIO	- 0,22
HBr	BROMETO DE HIDROGÊNIO	- 0,61
Br <sub>2</sub>	BROMO	- 1,3
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	I - 2 BUTADIENO	- 0,65
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	I,3 BUTADIENO	- 0,49
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n - BUTANO	- 1,3
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	ISO - BUTANO	- 1,3
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	AS - 2 BUTANO	- 0,89
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	TRANS - 2 - BUTANO	- 0,92
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	I BUTENO	- 0,85
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	ISO - BUTENO	- 0,85
Cl <sub>2</sub>	CLORO	- 0,77
HCl	CLORETO DE HIDROGÊNIO	- 0,30
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	CLORETO DE VINILA	- 0,63
Kr	CRÍPTÔNIO	- 0,51
CO <sub>2</sub>	DIÓXIDO DE CARBONO	- 0,27
NO <sub>2</sub>	DIÓXIDO DE NITROGÊNIO	+ 28
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ETANO	- 0,46
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ETILENO	- 0,26
HF	FLUORETO DE HIDROGÊNIO	+ 0,10
He	HÉLIO	+ 0,30
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n - HEPTANO	- 2,1
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n - HEXANO	- 1,7
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	CICLO - HEXANO	- 1,557
H <sub>2</sub>	HIDROGÊNIO	+ 0,24
HI	IODETO DE HIDROGÊNIO	- 1,1

TABELA 4 - Continuação

FÓRMULA	GASES	PORCENTAGEM
I <sub>2</sub>	ÍODO	- 2,4
CH <sub>4</sub>	METANO	- 0,2
CO	MONÓXIDO DE CARBONO	+ 0,01
Ne	NEÔNIO	+ 0,13
N <sub>2</sub>	NITROGÊNIO	0,0
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n - OCTANO	- 2,5
NO	ÓXIDO NÍTRICO	+ 43
N <sub>2</sub> O	ÓXIDO NITROSO	- 0,2
O <sub>2</sub>	OXIGÊNIO	100,0
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N - PENTANO	- 1,45
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	ISO - PENTANO	- 1,49
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	NEO - PENTANO	- 1,49
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	PROPANO	- 0,86
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	PROPILENO	- 0,54
H <sub>2</sub> S	SULFETO DE HIDROGÊNIO	- 0,39
Xe	XENÔNIO	- 0,95

#### Tipos de analisadores

O comportamento paramagnético do oxigênio e sua importância nos processos industriais particularmente nos processos de combustão determinaram o desenvolvimento de várias técnicas para medir a sua concentração.

Os analisadores de oxigênio baseados no paramagnetismo deste gás, podem ser classificados em dois grupos:

- analisadores paramagnéticos
- analisadores termoparamagnéticos

## Analísadores paramagnéticos:

São instrumentos que medem a suscetibilidade magnética de uma mistura de gases mantendo constante sua temperatura.

Analísadores QUINCKE - São baseados no efeito QUINCKE, representado na figura 33.

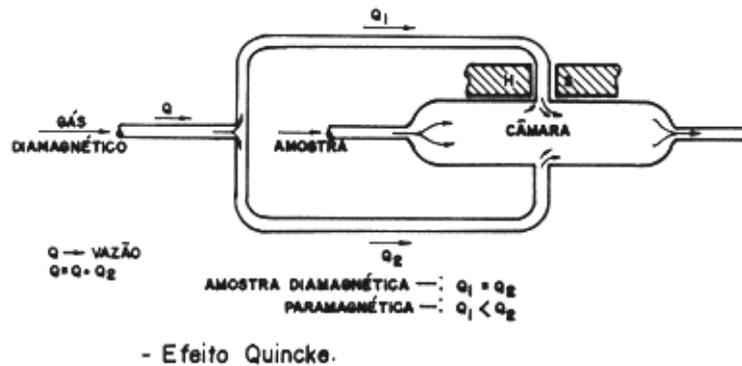
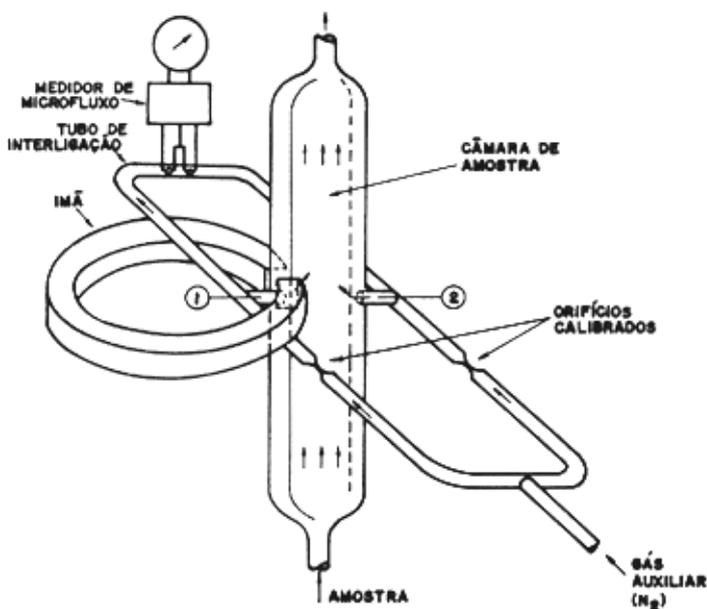


Fig 33

Um fluxo de gás diamagnético ( $N_2$ , Ar) se bifurca e volta a se encontrar em uma câmara, onde circula a amostra. Uma das linhas está submetida a um forte campo magnético, próximo a câmara de amostra.

Este campo provocará uma contrapressão na linha, caso a amostra apresente propriedades paramagnéticas. A relação entre as pressões ou vazões nas duas linhas indicará a suscetibilidade magnética do gás em análise.

Os instrumentos fabricados sob este princípio, apresentam suas unidades analisadoras conforme mostra a figura 34.



- Analisador paramagnético a efeito Quincke.

Fig 34

A amostra a ser analisada circula por uma câmara de forma achatada, com uma vazão constante. Um gás auxiliar diamagnético, geralmente nitrogênio, é introduzido nesta câmara em dois pontos simétricos através de orifícios calibrados idênticos. Um pequeno tubo interliga estes dois pontos de injeção de nitrogênio. Um possante imã estabelece um campo magnético em um destes pontos de injeção.

No tubo de interligação existe um medidor sensível a pequenos fluxos de gás, que detectará qualquer circulação do gás auxiliar.

Funcionamento: supondo que a amostra não contenha gás paramagnético, ocorrerá o seguinte:

- O campo magnético não introduzirá nenhuma alteração na distribuição de fluxos de dois ramos de nitrogênio. O instrumento é ajustado para que as pressões nos pontos 1 e 2, sejam iguais, e desta forma, não circulará nenhum nitrogênio, no tubo de interligação. A indicação do analisador se estabelece em zero. Supondo a presença de um gás paramagnético na amostra, como o oxigênio ocorrerá o seguinte:

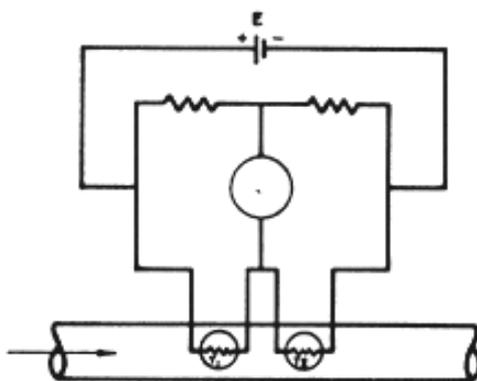
- O Campo magnético estabelecido em um dos ramais, atrairá o gás paramagnético da amostra para a região de maior densidade de fluxo magnético.

Esta particularidade provocará um aumento de pressão neste ramal, que gerará, um fluxo de nitrogênio no tubo de ligação. Este fluxo representará a suscetibilidade magnética da amostra, que por sua vez, é proporcional a concentração do oxigênio na amostra.

Visando aumentar a estabilidade da indicação e a sensibilidade do instrumento, o campo magnético é feito variável por meios mecânicos, de forma a obter um fluxo de nitrogênio pulsante no tubo de interligação. Um circuito eletrônico transformará estes pulsos de vazão em sinais elétricos de medição.

A medição do fluxo é geralmente feita por sistema térmico. Neste sistema, conforme a

figura 35 dois termistores,  $T_1$  e  $T_2$ , aquecidos eletricamente, são colocados a pequena distância um do outro na direção do eixo do tubo onde circula o gás. Os dois termistores são ligados num circuito em ponte, que detectará qualquer diferença de resistência entre eles. A alimentação da ponte, mantém, os termistores em uma temperatura acima da ambiente. Não havendo circulação de gás, as temperaturas de  $T_1$  e  $T_2$  são idênticas e, conseqüentemente, o instrumento de medição marca zero. Com circulação de gás de esquerda para a direita, por exemplo,  $T_1$  esfria e  $T_2$  aquece e a indicação do instrumento será proporcional ao fluxo.



- Sensor de fluxo térmico.

Fig 35

Considerações gerais sobre o analisador de efeito QUINCKE

- No caso da amostra não circular no sistema de detecção do fluxo, o analisador não é sensível às características físicas do gás de amostra tais como: densidade calor específico, condutibilidade térmica e viscosidade. Gases corrosivos podem ser analisados com facilidade.
- Os fatores que interferem na precisão do instrumento são: vazão da amostra e do gás auxiliar, pressão atmosférica e temperatura da amostra. Deste modo, o analisador possui dispositivos para manter constantes estas grandezas.
- As faixas de medição podem ser ajustadas de um mínimo 0% a 2% de oxigênio a um máximo de 0% a 100% de oxigênio com ou sem a supressão de zero. No caso de supressão o analisador pode ser ajustado em qualquer faixa, para um intervalo mínimo de variação de 2%, como no caso da faixa de 98% a 100% de oxigênio. A precisão da medição é melhor do que  $\pm 2\%$  do valor medido.
- Outra característica positiva deste tipo de analisador é o seu tempo de resposta extremamente curto, geralmente, inferior a 1 segundo.
- Como desvantagem, pode ser citada, a influencia de posição do instrumento, na precisão de medição do mesmo.

Analisadores Termoparamagnéticos ou analisadores termomagnéticos:

São instrumentos baseados na diminuição da suscetibilidade magnética com o aumento de temperatura.

A combinação apropriada de um gradiente de temperatura e um campo magnético não uniforme cria um fluxo gasoso proporcional a suscetibilidade do gás, chamado vento

magnético (figura 36).

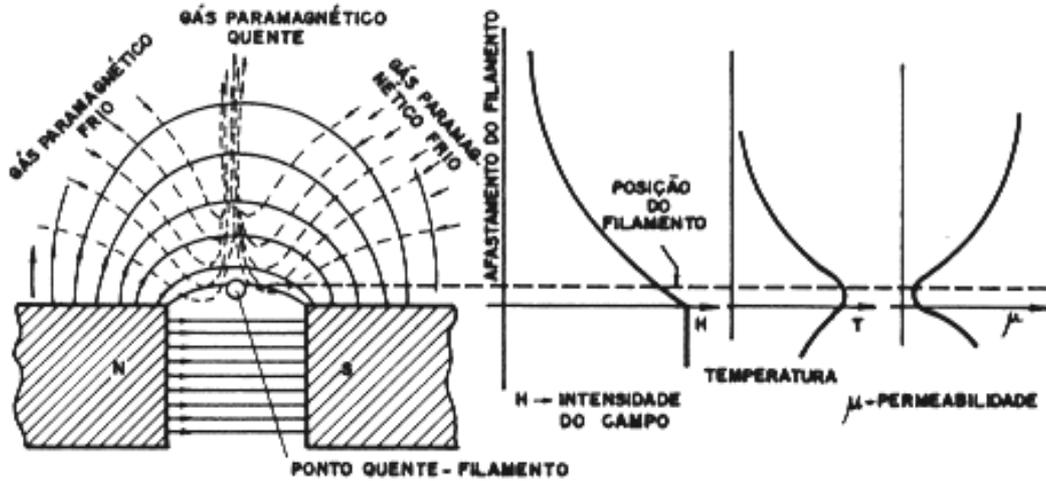
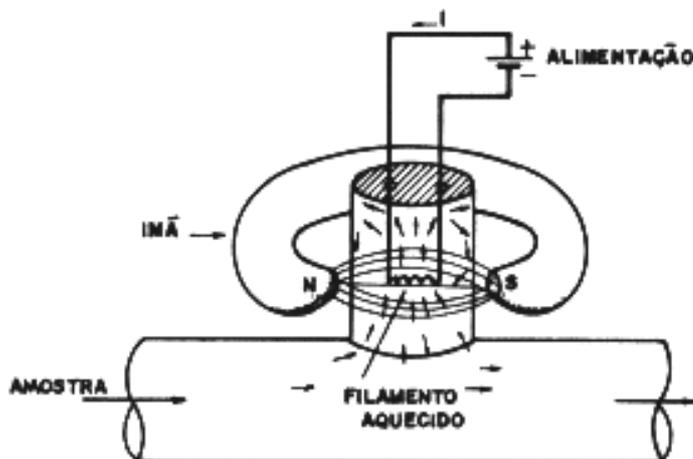


Fig 36 - Vento magnético.

A intensidade do vento magnético representa a suscetibilidade magnética do gás ou a concentração do oxigênio, quando o mesmo estiver na amostra.

Os analisadores termomagnéticos podem ser de dois tipos:

- Analisador tipo convectivo: a figura 36 mostra o princípio básico deste analisador.



- Analisador termomagnético convectivo básico.

Fig. 37

Um filamento aquecido eletricamente, no interior de uma câmara, gera correntes de

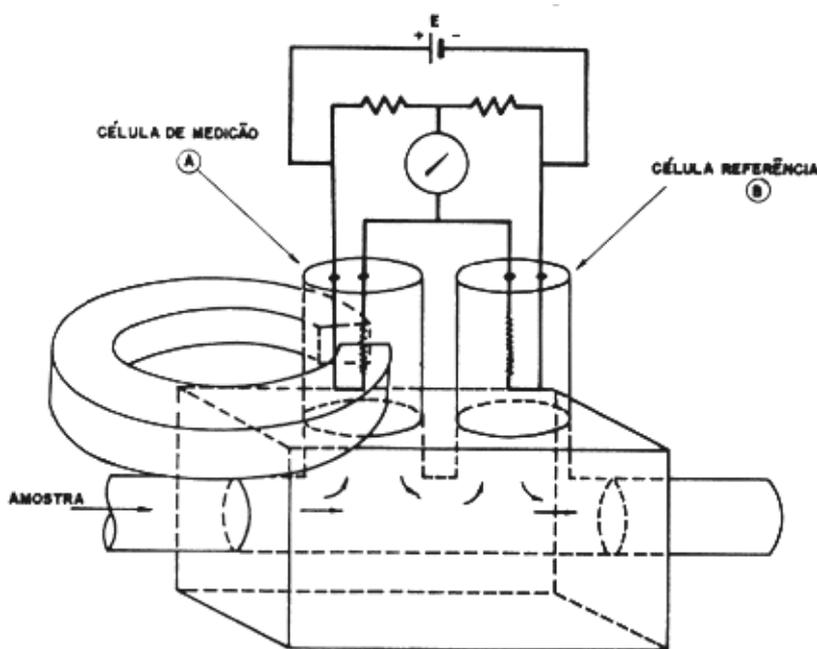
convecção térmica do gás, que não será afetado pela ação do campo magnético aplicado (se a amostra não possuir algum componente paramagnético).

Ao circular um gás paramagnético na célula, será acrescentada à convecção térmica, uma outra, do tipo paramagnética, que é o vento magnético. Estes fluxos gasosos reduzirão a temperatura do filamento, e conseqüentemente, a sua resistência elétrica.

O valor desta resistência, medido, representará, a suscetibilidade magnética do gás.

As células de análise usadas nos instrumentos desta classe, variam consideravelmente na sua forma física, disposição em relação ao fluxo de amostra e número de elementos sensores.

A figura 38 mostra um tipo de célula de análise, genérico:



- Analisador termomagnético convectivo.

Fig. 38

Comparando com o sistema básico, mencionado anteriormente, nota-se o acréscimo dos seguintes elementos:

- uma célula de referência ou comparação;
- um sistema para medir as variações de resistências, relativas as duas células

Funcionamento:

As figuras 39, 40 e 41 ilustram o funcionamento deste tipo de analisador. A figura 39 mostra duas células, A e B, contendo, cada uma, filamentos idênticos mantidos em uma temperatura superior a das paredes da célula, por meio de uma fonte de alimentação, E.

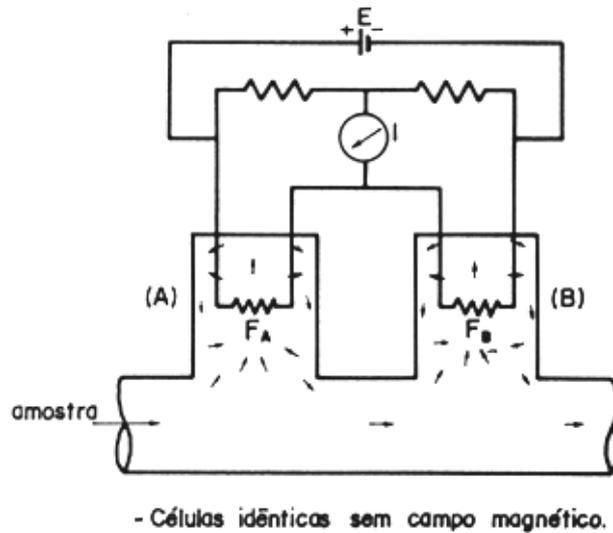


Fig. 39

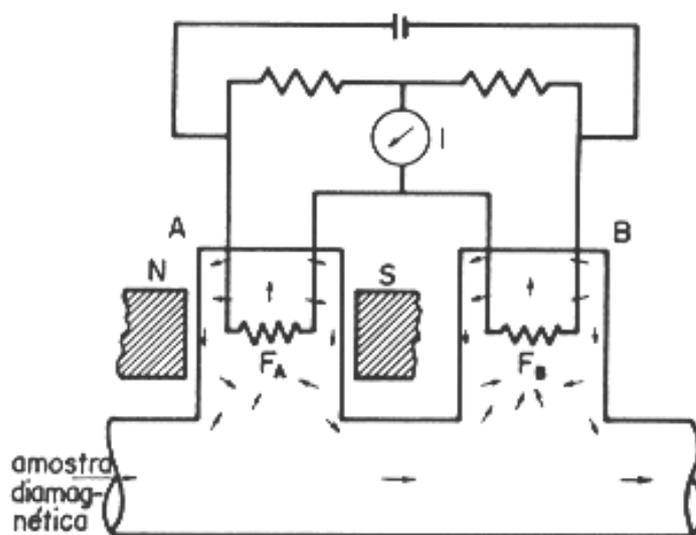
Os dois filamentos,  $F_A$  e  $F_B$ , estão ligados em uma ponte de "WHEATSTONE", que mede as diferenças de resistência entre os mesmos. Estas diferenças são indicadas no amperímetro, 1.

Os filamentos geram uma quantidade fixa de calor, por meio da ponte E, e perdem parte deste calor para o ambiente, por meio de condução, radiação e convecção. Devido a igualdade geométrica e elétrica entre as duas células, as temperaturas dos dois filamentos será idêntica, independentemente da composição e característica física do gás de amostra circulante. A presença de gás paramagnético, como o oxigênio, também não interferem no equilíbrio térmico existente, devido à ausência de campos magnéticos.

As setas no interior das células representam as correntes convectivas, estabelecidas pelos filamentos aquecidos. O gás, aquecido pelo filamento, diminui sua densidade e sobe até encontrar as paredes mais frias da célula, onde se resfria e desce, sendo introduzido na corrente de ascensão. Desta forma, o calor é transportado do filamento para as paredes da célula.

A figura 39 mostra as mesmas células da figura anterior porem foi introduzido um ímã, que estabelece um forte campo magnético na célula A, de medição.

No caso do gás circulante não ter propriedades paramagnéticas, como ocorre na maioria dos gases industriais, não haverá nenhuma perturbação sensível com a introdução do campo magnético. A fonte de medição permanecerá equilibrada e o amperímetro não indicará a passagem de corrente elétrica, indicando, deste modo, zero.



- Célula A, submetida a campo magnético com amostra diamagnética.

Fig 40

As setas que simbolizam o fluxo convectivo de gás nas células, indicam que não houve alteração na intensidade deste fluxo.

A figura 41 representa o comportamento das células na presença de um gás, com propriedades paramagnéticas.

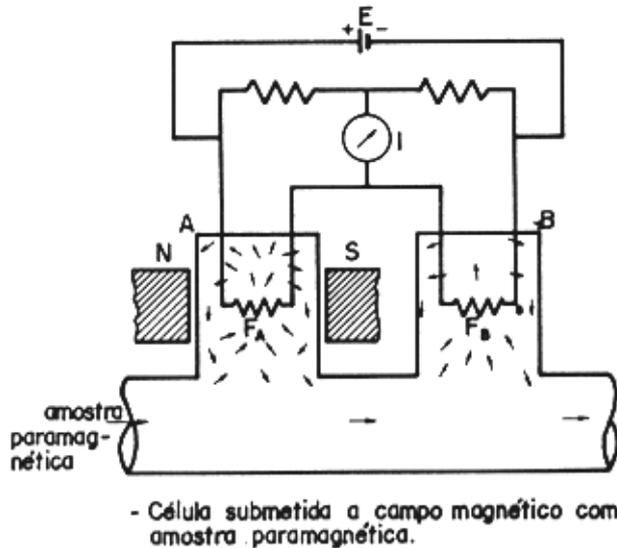


Fig 41

A célula de referência B não muda seu comportamento, a exemplo da situação anterior. A presença do gás paramagnético, geralmente o oxigênio é atraído para a região de maior densidade de fluxo magnético. Ao atingir esta região, o gás é aquecido pelo filamento, reduzindo o seu grau de paramagnetismo. Ao perder as propriedades magnéticas, o gás é afastado das proximidades do filamento, dando lugar ao mais frio, atraído para este local. O gás aquecido sobe, indo incrementar a corrente convectiva de origem puramente térmica. Nas proximidades das paredes da célula, o gás se esfria e recupera suas propriedades magnéticas, voltando a ser atraído na direção do filamento onde é novamente aquecido, estabelecendo um fluxo em circuito fechado.

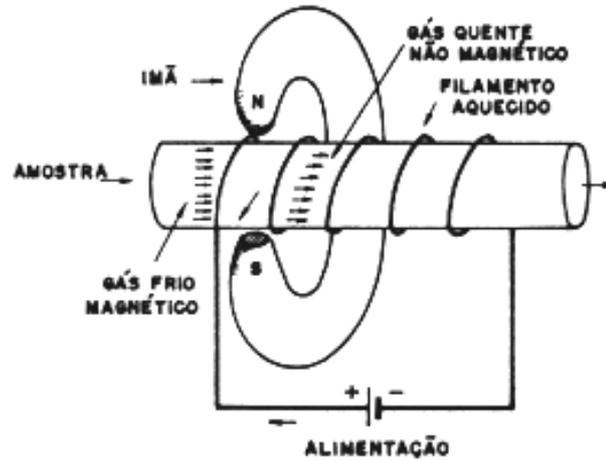
Este aumento na corrente convectiva na célula de medição, devido a presença do gás paramagnético, reduz a temperatura do filamento correspondente, causando uma variação no valor da resistência ôhmica do mesmo.

Esta variação é medida na ponte de "WHEATSTONE", por meio do amperímetro 1, e representa a suscetibilidade magnética da amostra e, conseqüentemente, representará, também a concentração do gás paramagnético, na mistura de gases diamagnéticos.

A variação dos demais componentes gasosos, altera as propriedades físicas da amostra, como, densidade, calor específico e viscosidade, que interferem diretamente na condução de calor do filamento para o ambiente. A célula de referência B, compensa dentro de certos limites, estas influências, porém, com a presença do gás paramagnético o comportamento da célula de medição se altera, devido ao aumento de fluxo convectivo.

## Analizador LEHRER

Este tipo de analisador se baseia na medição do vento magnético ou fluxo ermomagnético em um tubo horizontal, conforme mostra a figura 42.



- Analisador de Lehrer básico.

Fig. 42

O gás é introduzido no tubo horizontal e a combinação de um campo magnético criado por um ímã e a elevação de temperatura provocada pelo filamento, produzirão um fluxo de gás, que medido, indicará a suscetibilidade magnética do gás.

A célula de medição básica deste analisador é mostrada na figura 43.

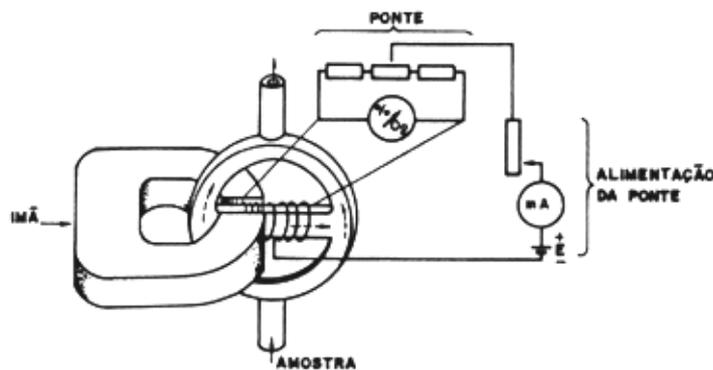


Fig.43 - Analisador termomagnético de Lehrer.

Comparando esta célula com a do princípio básico, apresentado anteriormente, verifica-se o acréscimo dos seguintes elementos:

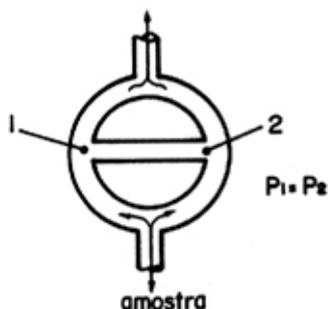
- um anel circular, no qual está ligado o tubo horizontal de medição;
- um circuito de medição do vento magnético, incorporado ao próprio sistema de

aquecimento.

Funcionamento:

O funcionamento desta célula pode ser visualizado na seqüência das figuras 44, 45, 46.

A figura 44 mostra o circuito do gás através da célula.



- Célula termomagnética tipo anel.

Fig. 44 - Célula termomagnética tipo anel.

Devido a simetria do anel, as pressões nos pontos 1 e 2, serão sempre iguais, independentemente da vazão da amostra e da sua composição ou propriedades físicas. Como conseqüência, não circulará nenhum gás no tubo horizontal.

O tubo deve ser mantido na posição horizontal a fim de evitar efeitos gravitacionais.

A figura 45 mostra a mesma célula, sendo que a metade esquerda do tubo horizontal, foi submetida a um forte campo magnético provocado por um ímã.



Fig. 45- Célula tipo anel com ímã.

A presença do ímã não afetará o fluxo de gás, no caso da amostra ser diamagnética.

Quando houver a circulação de um gás paramagnético, este será atraído na direção de maior densidade do fluxo, ou seja, entre as peças polares do ímã. Nesta região haverá um aumento de concentração do gás no tubo horizontal.

A figura 46 mostra a célula anterior acrescida de um filamento aquecedor, ao longo do tubo horizontal.

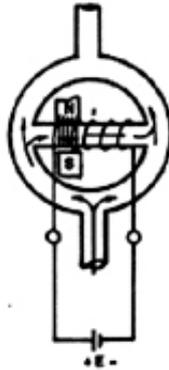


Fig.46- Célula tipo anel, com ímã e aquecedor.

O campo magnético atrai o gás paramagnético, que passa no ramo esquerdo do anel, para a região de maior densidade do fluxo magnético. Ao atingir esta região, o gás se aquece, devido à presença do filamento, perdendo suas propriedades magnéticas. O gás mais frio continua a ser atraído empurrando para o outro ramo do anel o gás aquecido. Estabelece-se, desta forma, um fluxo de gás da esquerda para direita, chamando, vento magnético cuja intensidade é proporcional à suscetibilidade magnética da amostra.

## Analizador de Oxi-Zircônia

### 2.4.1 - Introdução

A célula eletroquímica constitui-se basicamente de dois eletrodos imersos ou separados por um meio condutor adequado, líquido ou sólido, denominado eletrólito. A célula eletroquímica pode ser classificada em:

- Célula eletroquímica galvânica ou voltaica: é aquela que transforma energia química do sistema eletrodo/eletrólito em energia elétrica (fig. 47A).
- Célula eletroquímica eletrolítica: é aquela ligada a uma fonte de energia elétrica externa que força a passagem de corrente elétrica através da célula (fig. 47B).
- A aplicação da célula eletroquímica na análise de gases, especificamente do gás oxigênio, baseia-se no fato de que esse gás, ao entrar em contato com o eletrólito da célula, reage quimicamente com este de uma forma previsível e definida, permitindo estabelecer uma relação entre sua concentração e uma grandeza elétrica qualquer, possível de ser medida através da célula. (Ex.: tensão elétrica, corrente elétrica, resistência ôhmica, etc.). A reação química entre o oxigênio e o eletrólito é regida pela lei de Henry que diz: "O oxigênio dissolvido no eletrólito é função da concentração deste gás na amostra".

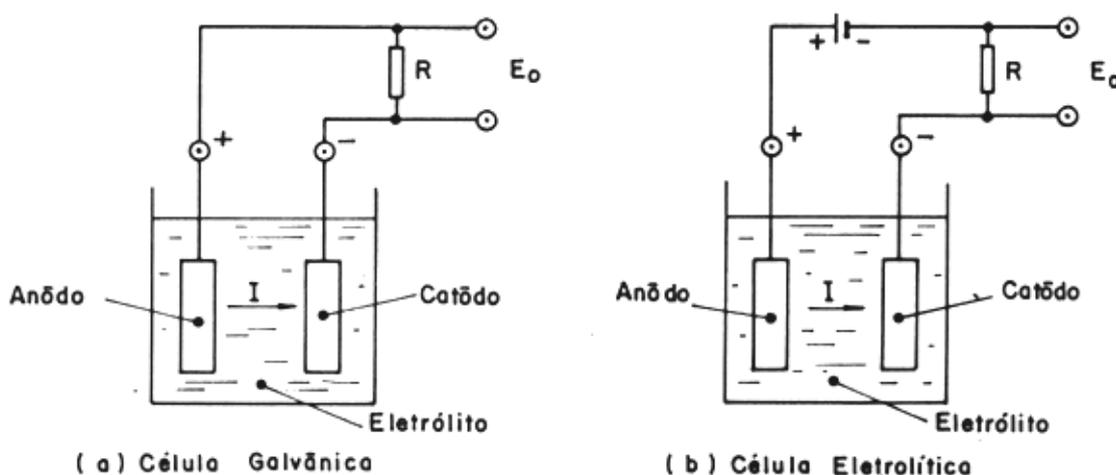


Fig. 47 - Células Eletroquímicas

### 2.4.2- Analizador de Oxi-zirconio

na verdade uma célula (ou pilha) eletroquímica galvânica embora sua construção é bastante diferenciada dos outros modelos eletroquímicos.

A figura 48 mostra esquematicamente e de forma básica esse analisador, que na verdade é um analisador de oxigênio.

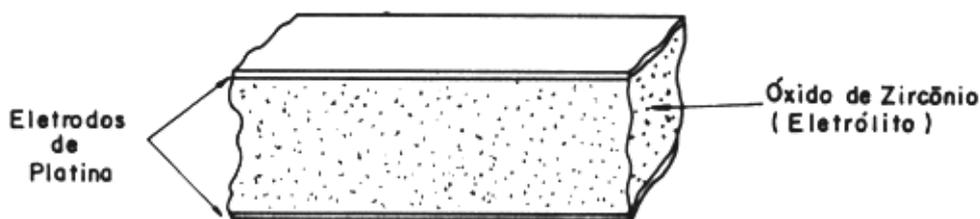


Fig 48 - Célula básica de medição da analisador de Oxi-Zircônia

A célula de análise consiste em um eletrólito sólido de óxido de zircônio ou zircônia ( $ZrO_2$ ) estabilizada por mistura de pequenas quantidades de outros óxidos (o óxido de cálcio,  $CaO$ , especialmente). As superfícies opostas do eletrólito são formadas por platina porosa, constituindo assim os dois eletrodos da célula. Se esta célula for mantida a uma temperatura suficientemente elevada, o eletrólito se torna um condutor devido à mobilidade dos íons de oxigênio constituintes do óxido, liberados por esta temperatura alta.

#### 2.4.3- Princípio de Funcionamento

Suponha que um dos lados da célula básica de medição esteja em contato com uma mistura gasosa cuja concentração de oxigênio é conhecida e de valor fixo como por exemplo o ar atmosférico, e que o outro lado esteja em contato com um gás cuja concentração de oxigênio se queira determinar.

A célula se comportará da forma descrita a seguir (fig. 49).

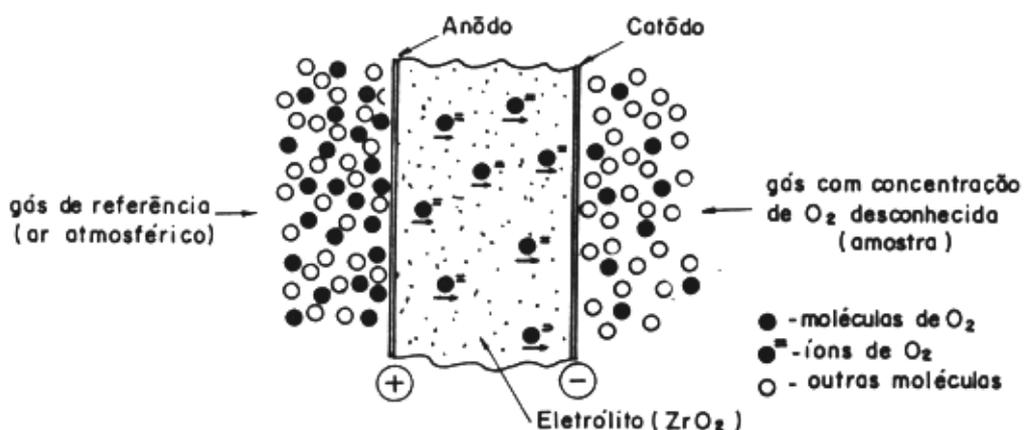


Fig. 49 - Princípio de funcionamento do analisador de Oxi-Zircônia

Considerando-se que o teor de Oxigênio na amostra é inferior ao do gás de referência (que na maioria das aplicações práticas é o próprio ar atmosférico) e que a temperatura a qual se encontra a célula de análise é alta o suficiente para liberar íons de oxigênio da estrutura cristalina do óxido, tornando-os portadores de carga, teremos que:

a) As moléculas de oxigênio em contato com a superfície aquecida do eletrólito (através do

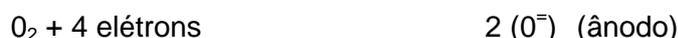
— revestimento poroso de platina) se ionizam;

b) A zircônia é impermeável a passagem das moléculas de qualquer gás que componha a amostra ou o gás de referência; entretanto permite a passagem dos íons de oxigênio formados nas superfícies dos eletrodos de platina devido a mobilidade iônica promovida pela temperatura alta:

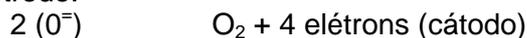
c) Devido a concentração de oxigênio (e conseqüentemente de íons oxigênio) ser maior no lado de referência, haverá um fluxo de íons deste lado para o lado da amostra;

d) Supondo os dois eletrodos em circuito aberto, surgirá entre estes uma diferença de potencial que dependerá das seguintes reações:

d.1) a captura de elétrons pelas moléculas de  $O_2$  do lado de referência (ânodo) na formação de íons na superfície do óxido.



d.2) liberação das moléculas de oxigênio no cátodo e conseqüentemente a liberação de elétrons neste eletrodo.



Desta forma o lado de maior concentração de oxigênio se torna positivo (+) em relação ao de menor concentração (-).

Logicamente a classificação dos eletrodos em cátodo e ânodo será relativa.

A d.d.p. gerada dependerá dos seguintes fatores:

1) relação entre as concentrações de  $O_2$  nos dois lados da célula, sendo tanto maior quanto o for esta relação;

2) temperatura da célula, variando de forma linear com esta (fig. 50)

Tendo-se a temperatura na qual se encontra a célula de análise e a indicação da tensão entre os terminais da mesma, é possível se determinar através do gráfico apresentado na figura 49 a concentração de  $O_2$  na amostra.

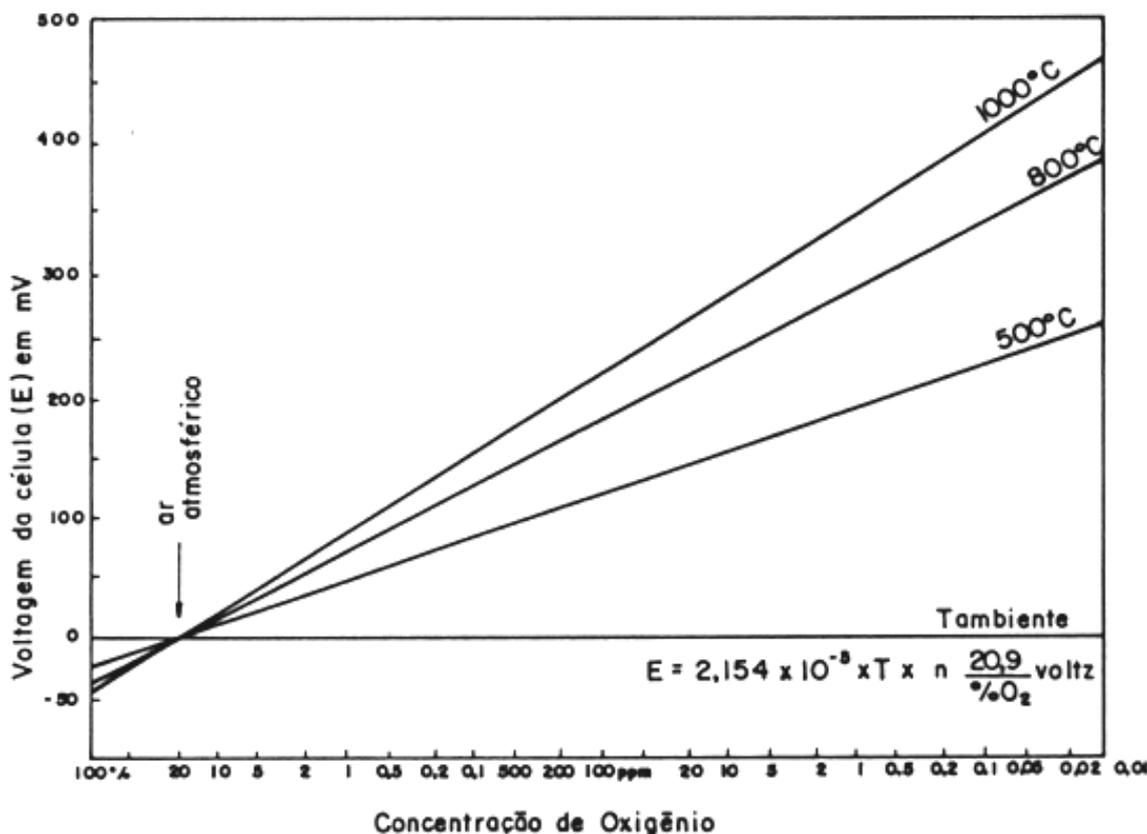


Fig.50

Analisando-se a figura 50, pode-se concluir que:

- Quando a amostra apresenta a mesma concentração do gás de referencia (20,9%), o sinal gerado se anula independentemente da temperatura de trabalho;
- A tensão elétrica da célula se torna negativa para concentração de  $O_2$  na amostra em quantidades superiores a concentração de  $O_2$  no gás de referência;
- O ganho em tensão elétrica da célula aumenta linearmente com o aumento da temperatura absoluta de trabalho.

**OBSERVAÇÕES:**

- A temperatura absoluta de trabalho da célula deve ser mantida constante e seu valor depende de cada fabricante.
- Para temperaturas "muito" altas a tensão elétrica tende a reduzir devido ao surgimento de condução eletrônica na rede cristalina do óxido. Para temperaturas "muito" baixas a célula tende a desenvolver tensões elétricas muito pequenas, apresentando também o inconveniente do aumento excessivo de impedância.

#### 2.4.4 - Analisador de Oxi-Zircônia típico

A figura 51 mostra de forma esquemática um analisador de oxi-zircônia.

A célula de zircônia tem normalmente a forma de um tubo de ensaio no qual se encontra o  $ZrO_2$ . Uma face do tubo tem contato com o ar atmosférico e a outra com a amostra.

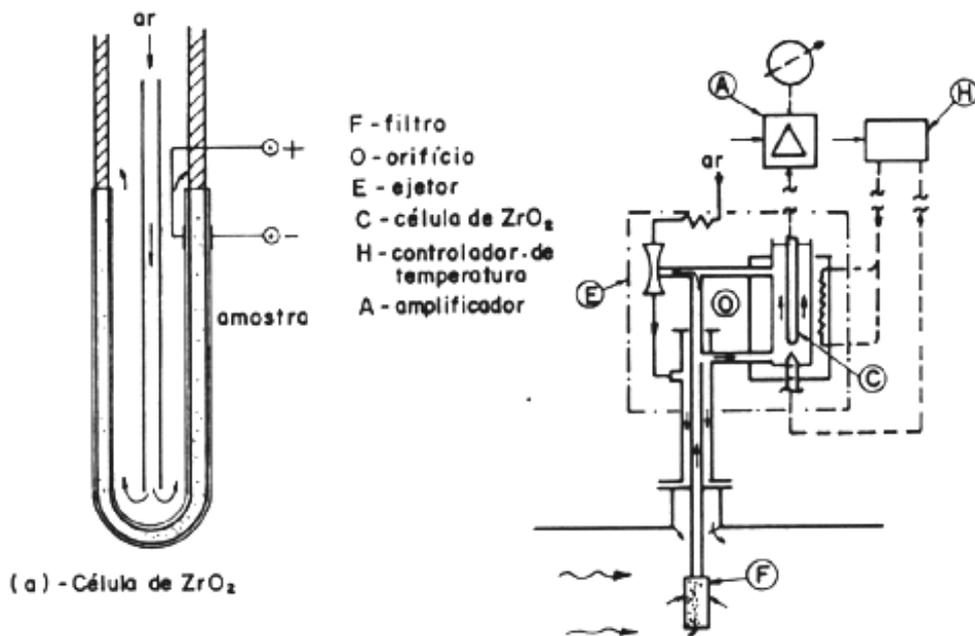


Fig. 51 - Analisador de Oxi-Zircônia típico

De acordo com a fig. 51 vemos que a amostra é captada por meio de uma sonda que eventualmente possui um filtro de partículas na extremidade interior do processo. Devido a ação de sucção de um ejetor a ar comprimido, a maior parte da amostra circula em um circuito em alta velocidade retornando ao processo. Apenas uma pequena parte da amostra é desviada deste circuito e circula pela parte externa da célula de zircônia, onde será analisada. O controle de temperatura do bloco onde se situa a célula feito por um controlador de temperatura que tem como elemento sensor normalmente um termopar e como elemento aquecedor na maioria dos casos um resistor de aquecimento. A tensão elétrica gerada pela célula é amplificada por um circuito eletrônico e enviada a um indicador.

#### 2.4.5 - Características Operacionais

- a amostra circula sempre em temperaturas elevadas;
- tempo de resposta extremamente curto;
- a umidade da amostra é mantida no seu valor original durante a análise;
- reage a qualquer combustível existente na amostra com o  $O_2$ ;
- faixa de medição se estende de 0,1 ppm (parte por milhão, a 100%);
- fácil manutenção;
- a célula de medição dura de um a vários anos.

## 2.5- Cromatografia

### 2.5.1 - Definição e Histórico

As análises cromatográficas, na sua forma mais simples, consistem primeiramente em separar a amostra desconhecida em seus constituintes e então realizar uma análise quantitativa em cada um de seus componentes separados.

Os métodos cromatográficos foram descobertos por TSWETT em 1903, que os usou para a separação dos componentes de extratos das folhas verdes. Devido ao fato da separação ter envolvidos diferentes materiais coloridos, TSWETT chamou o processo de cromatografia. O nome, apesar de impróprio hoje em dia, pois podem ser separados materiais incolores e também gasosos, continua sendo utilizado, definindo o processo físico-químico de separação citado acima. Apesar da simplicidade do processo, este não foi utilizado até 1931, quando KUHN e LEDERER separaram o alfa do beta caroteno. A partir dessa data, os processos cromatográficos constituíram um dos meios mais importantes de separação e de análise das misturas orgânicas e inorgânicas.

### 2.5.2 - Princípio de Funcionamento

O princípio básico de medição está representado na figura 52.

Um gás portador flui continuamente (por exemplo  $H_2$ ,  $N_2$ , He, Ar) e é dosado um determinado volume da amostra a ser analisada. O gás portador (ou de arraste) e a amostra fluem através do que chamamos coluna de separação (ou cromatográfica), sendo que os diversos componentes da amostra fluem pela mesma com velocidades diferentes, e, dessa forma, são separados entre si. Em seguida, o gás de arraste e os componentes separados são levados a um detector ligado a coluna de separação. Esse capta a concentração dos diversos componentes, na ordem em que os mesmos saírem da coluna de separação. O sinal elétrico fornecido pelo detector é proporcional a cada concentração e é registrado em forma de picos, por um registrador instalado. O diagrama registrador é denominado cromatograma.

A amostra e o gás de arraste (que formam o que chamamos de fase-móvel) são introduzidos no topo da coluna, e a fase móvel é bombeada continuamente a uma velocidade constante. A substância química (sólida ou líquida) que se encontra dentro da coluna constitui o que designamos por fase estacionária. Com o passar da fase móvel as substâncias começam a migrar de acordo com as interações de suas propriedades físico-químicas existentes entre os componentes da amostra e a fase estacionária. A figura 53 mostra a seqüência de eventos que ocorrem.

#### OBSERVAÇÃO PRÁTICA:

As medidas da coluna de separação, a grandeza e constância do fluxo do gás de arraste e a temperatura da coluna cromatográfica tem influência no resultado da medição e devem ser tomadas medidas preventivas contra tais influências.

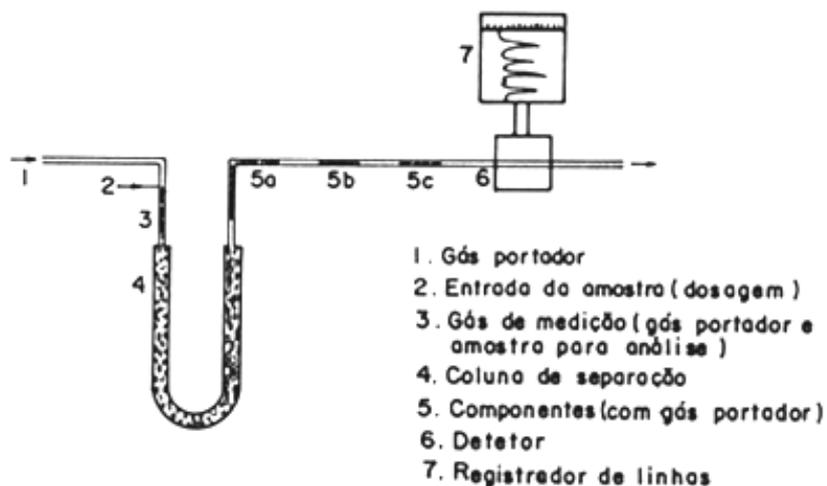


Fig. 52 - Princípio básico da Cromatografia

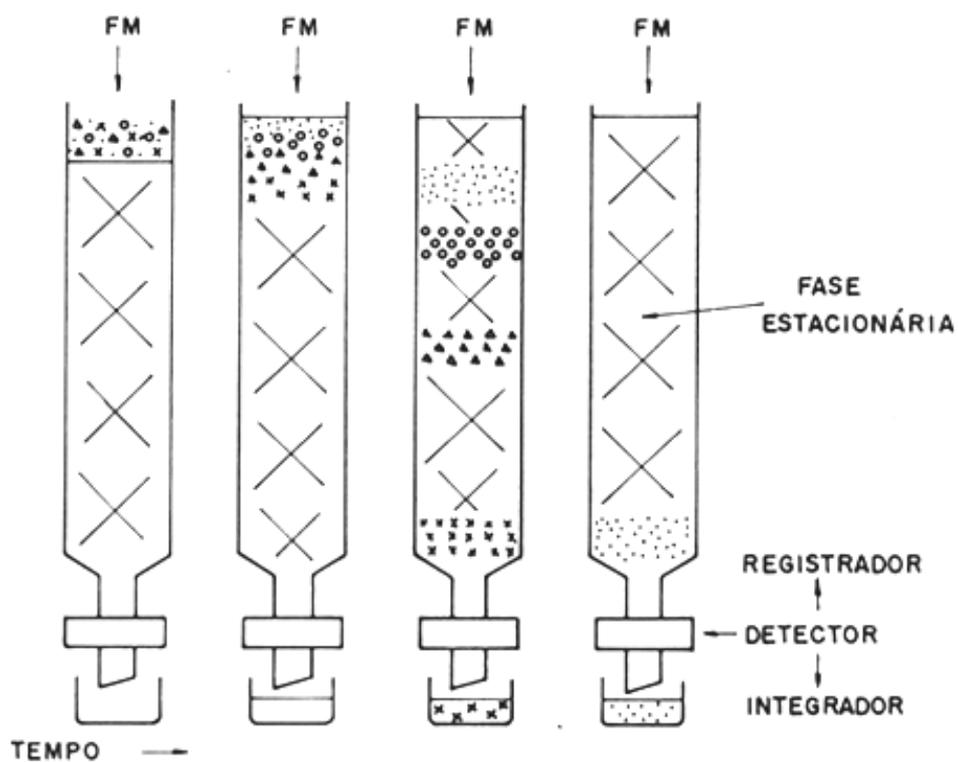


Fig. 53 - Sequência de eventos durante a análise cromatográfica feita pela coluna de separação

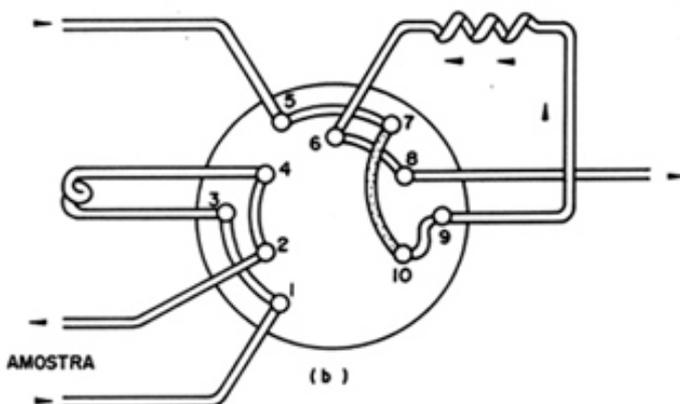
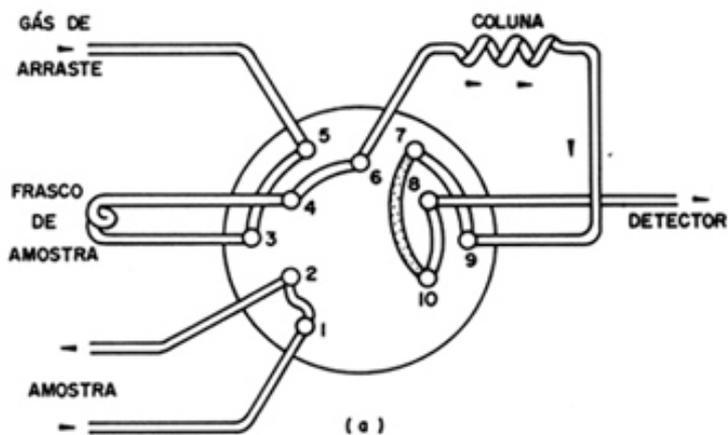


Fig 54 - Válvula para dosagem e introdução da amostra.

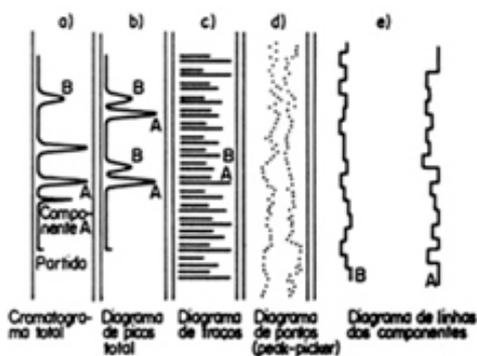


Fig 55 - Tipos de cromatograma

As moléculas dos diversos componentes de análise são retidas temporariamente através

de efeitos de troca com a fase estacionária, depois continuam sendo levadas pelo gás de arraste; num outro ponto, são retidas novamente, e depois prosseguem, e assim por diante. Moléculas do mesmo composto mostram o mesmo comportamento de retenção, moléculas diferentes, no entanto, são retidas por tempos variados.

### 2.5.3 - Materiais utilizados na fase estacionária

#### 2.5.3.1 - Materiais absorventes sintéticos de grande área superficial como:

- carvão ativo
- sílica gel
- alumina
- peneiras moleculares (que são substâncias químicas que criam atrasos diferentes para cada componente da amostra).

#### 2.5.3.2 - Substâncias orgânicas ligadas quimicamente à superfície de uma sílica gel de grande área superficial. Por exemplo:

- octadecil sílica
- octil sílica
- propilciano sílica
- alquil amino sílica

#### 2.5.3.3 - polímeros porosos obtidos por técnicas de polimerização especial.

#### 2.5.3.4 - Líquidos de baixíssima pressão de vapor à temperatura de trabalho aliados à alta estabilidade química e térmica. Por exemplo:

- hidrocarbonetos
- ftalatos
- poliésteres
- polisiloxanas (siliconas)

### 2.5.4 - Fases móveis

As fases móveis são por definição fluidas. O fluido empregado poderá ser um gás ou um líquido, e esta distinção classificará a cromatografia em:

- a) cromatografia em fase gasosa ou a gás
- b) cromatografia em fase líquida ou a líquido.

Considerando as fases móveis e estacionárias podemos ter as seguintes situações:

Tabela 5

FASE MÓVEL	FASE ESTACIONÁRIA	CROMATOGRAFIA	SIGLA
Gás	Sólido	Gás-sólido	CGS
Gás	Líquido	Gás-líquido	CGL
Líquido	Sólido	Líquido-sólido	CLS
Líquido	Líquido	Líquido-líquido	CLL

#### OBSERVAÇÃO:

Quando a fase estacionária for sólida, a cromatografia envolve, no mecanismo de separação por interações físico-químicas, o fenômeno da adsorção, enquanto que, quando empregamos fases estacionárias líquidas fenômeno envolvido é chamado de partição, que é relacionada com a solubilidade das substâncias a serem separadas.

#### 2.5.5 - Colunas cromatográficas

Os materiais mais utilizados para a construção das colunas de separação são o aço, o alumínio, o cobre e o vidro. As colunas tem a forma de um pequeno tubo enrolado em forma de espiral. O comprimento da coluna deve ser escolhido de modo que, no seu final, os componentes saiam separados, com um espaço de tempo bem definido. Os comprimentos comuns das colunas vão de 0,5 a 20m, com um diâmetro de 2 a 10mm. As colunas capilares (que são aquelas de diâmetros muito pequeno) possuem diâmetros entre 0,25 e 1 mm e os comprimentos podem chegar a 200 m.

Quando uma coluna não separa alguns componentes, ou só os separa de forma incompleta, conduz-se o gás de arraste e a amostra para outras colunas, que contenham outros tipos de enchimento.

#### 2.5.6- Gás de arraste

O gás de arraste deve ser escolhido levando-se em conta os seguintes fatores:

- condutividade térmica
- custo
- segurança
- inércia química (o gás de arraste deve ser inerte em relação aos componentes da amostra a ser analisada, ao restante do sistema cromatográfico, principalmente a coluna e ao detector).
- disponibilidade
- tempo de análise

OBSERVAÇÃO:

Os gases mais utilizados são He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e Ne.

2.5.7 - Sistemas de Introdução da amostra

São utilizadas principalmente as válvulas multi-vias. A figura 53 ilustra este tipo de válvula. Em **a** temos a situação de análise e em **b** a dosagem da amostra.

2.5.8 - Detectores

Dentre os detectores possíveis, o mais utilizado nos processos cromatográficos é aquele cujo princípio é baseado na condutividade térmica dos gases, já estudado no nosso curso. Além desses, podem ser utilizados os detectores da ionização, de ionização de chama e de captura de elétrons, dentre outros.

2.5.9 - Avaliação Final de dados

O cromatograma obtido no registrador (que compõe também o sistema cromatográfico) pode ser empregado para fins de identificação a partir dos tempos de retenção que podem ser calculados a partir dele ou para quantificação quando as áreas dos picos forem determinadas.

Dependendo da natureza do cromatograma, a sua interpretação e cálculo manual pode ser uma tarefa demorada e as vezes impossível de se efetuar com precisão, como por exemplo, quando se empregam colunas capilares que produzem facilmente picos de até um volt com largura de somente alguns segundos. Nesse caso o sistema tem que ser associado a um processador/registrator dedicado a cromatografia.

Os dados obtidos nesse caso são bem diferentes. Geralmente esses instrumentos registram o cromatograma normal, associam a cada pico o seu tempo de retenção, com a precisão de centésimos ou milésimos de minuto, determinam sua área, multiplicam amostra ou a concentração de um ou mais grupos de substâncias, fornecendo um relatório final impresso ou enviando as informações finais para outro computador, que controlará o processo. Em outros casos o processador guarda na sua memória o próprio cromatograma, permitindo o seu cálculo por diferentes métodos, fato que economiza tempo para novas análises.

A apresentação dos dados de análise pode ser feita pelo próprio cromatograma, que pode ser classificado em:

- 1) *Cromatograma total*, que representa todos os componentes analisados (fig. 55.a).
- 2) *Diagrama de picos total*, que seleciona apenas alguns componentes analisados (fig. 55.b);
- 3) *Diagrama de traços*, que representa graficamente a altura dos picos dos componentes analisados (fig. 55.c);
- 4) *Diagrama de pontos* (peak-picker), onde são representadas 50 as pontas dos picos dos componentes analisados com pontos de diferentes cores (fig. 55.d);
- 5) *Diagrama de linhas* de um único componente (fig. 55.e).

### 3 - ANALISADOR DE LÍQUIDOS

#### 3.1 - Medidor de pH

##### 3.1.1 - Definição de pH

"pH é um índice que representa o grau de alcalinidade ou de acidez de uma solução". A medição de pH pode ser dividida de um modo geral em dois métodos:

*Método de medida elétrica e método de medida pela comparação de cor.*

Na área industrial utiliza-se o método de medição elétrica devido a sua facilidade de manipulação e facilidade na instrumentação.

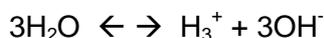
O método de eletrodo de vidro é principalmente o mais utilizado. A definição do pH é conforme a fórmula 3.1.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (3.1)$$

$$\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+} : \text{atividade do íon Hidrogênio} \quad (3.2)$$

Na realidade é difícil medir a atividade do íon hidrogênio, o  $\text{H}^+$ , durante a medição do pH, por isso ela é realizada através da medição comparativa com um líquido cujo pH já é conhecido.

A água pura é considerada um eletrólito fraquíssimo, dissociando-se de acordo com a seguinte equação iônica:



O grau de dissociação da água é extremamente pequeno. Realmente, a água não é um isolante perfeito, apresentando uma condutibilidade elétrica da ordem de  $10^{-6}$  mho.

A concentração de seus íons, determinada experimentalmente pela medida de condutibilidade elétrica, na temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e de:

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} \text{ íon g/ litro}$$

Este valor significa que de  $10^7$  moles de água, apenas uma se ioniza. Diante do que foi dito, é fácil concluir que a concentração da água não dissociada é praticamente a totalidade da mesma.

Escolheu-se o valor da concentração do íon hidrogênio para identificar os meios ácido, básico e neutro. Assim, temos:

$[\text{H}^+] > 7$	meio ácido
$[\text{H}^+] = 7$	meio neutro
$[\text{H}^+] < 7$	meio básico ou alcalino

A fim de evitar o trabalho com potências de expoente negativo, que normalmente confunde

, adota-se um símbolo capaz de facilitar a identificação dos diferentes meios. Por proposta de SORENSEN (físico-químico sueco) foi aceito o símbolo pH (potencial hidrogeniônico). Logo:

$$\text{pH} = \log \frac{1}{[\text{H}^+]}$$

Ou

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Deste modo:

$$\text{pH} < 7$$

meio ácido

$$\text{pH} = 7$$

meio neutro

$$\text{pH} > 7$$

meio alcalino

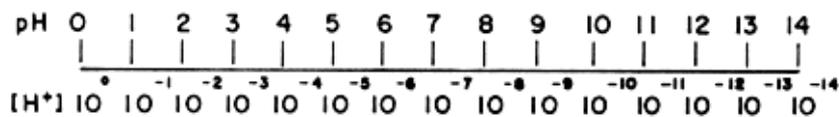
Analogamente, teríamos  $\text{pOH} = \log 1/[\text{OH}^-]$

claro que  $\text{pH} + \text{pOH} = 14$

Limites do pH:

Os valores do pH encontram-se distribuídos entre zero e 14. O ponto 7 indica o meio neutro; entre zero e 7 encontra-se a faixa ácida e de 7 a 14 a faixa alcalina.

Assim:



O diagrama acima nos mostra que quanto maior for a acidez maior é a concentração do íon hidrogênio e menor o pH.

O inverso se passa com a alcalinidade.

No caso do método de eletrodo de vidro, calcula-se através de comparação com um líquido padrão.

### 3.1.2 - Medição de pH através do eletrodo de vidro

Conforme indica a figura 56, mergulha-se o eletrodo de vidro D no líquido de pH desconhecido. No interior deste coloca-se a solução "B" que possui pH diferente ao do líquido desconhecido "A". Neste caso surgirá uma diferença de potencial proporcional a diferença de pH, entre estes dois líquidos, na parte interna e externa da camada fina do eletrodo de vidro. Esta diferença de potencial elétrico é conduzida ao medidor de diferença de potencial "V", passando pelo eletrodo interno "d" e pelo líquido de pH desconhecido "A", e, passando pelo eletrodo interno "h" do eletrodo de comparação "H".

Se considerarmos que a diferença de potencial surgida no interior da camada fina do eletrodo de vidro seja E, que a diferença de potencial surgida entre o líquido interno e externo do eletrodo de vidro seja  $e_1$ , e que o potencial elétrico surgido entre o líquido interno e o eletrodo interno do eletrodo de comparação seja  $e_2$ , teremos:

$$V = e_1 + E - e_2$$

Se igualarmos o eletrodo interno com o líquido contido na parte interna  $e_1$  e  $e_2$  serão iguais, possibilitando a obtenção do valor de  $E$ .

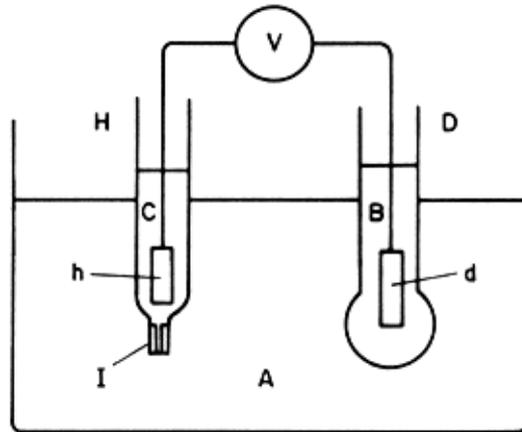


Fig 56

A estrutura do eletrodo de vidro e o eletrodo de comparação é conforme a fig. 56.

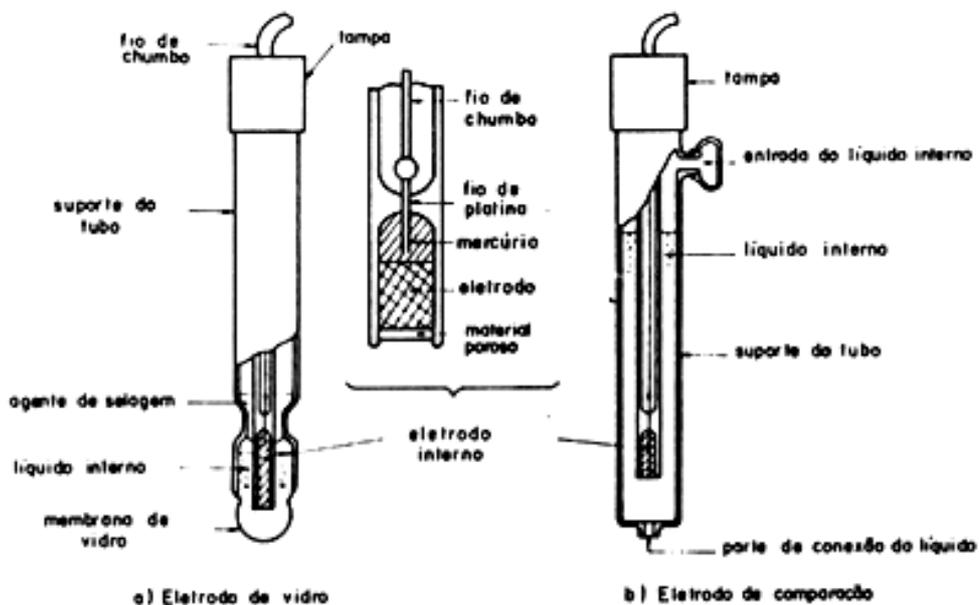


Fig 57

Os eletrodos internos utilizados, são de estruturas praticamente idênticas e tal providência foi tomada para que não ocorresse uma diferença na força elétrica gerada causada pelos eletrodos internos de diferentes estruturas.

O líquido interno do eletrodo de vidro contém uma solução padrão com pH igual a 7 e no meio líquido interno para uso do eletrodo diferencial utiliza-se o Cloreto de potássio (KCl). O

KCl é utilizado pois apresenta a menor diferença de potencial elétrico entre os líquidos não medidos.

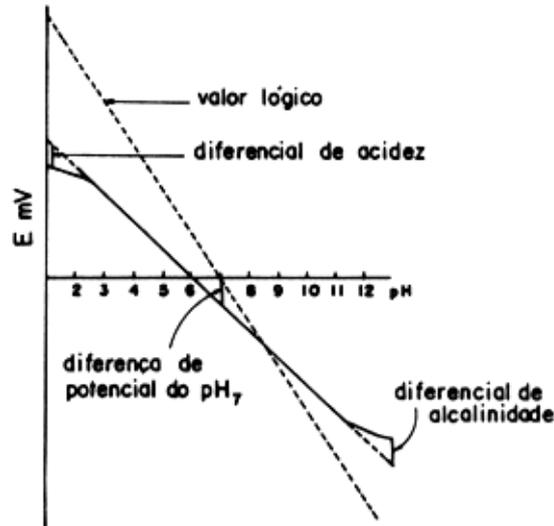


Fig.58- Característica do eletrodo de vidro

A figura 58 mostra a característica da energia gerada no eletrodo de vidro.

### 3.1.3 - Solução padrão de pH

A solução padrão de pH deverá ter como características:

- a) A menor diferença de potencial elétrico em relação ao KCl, a ponto de ser desprezível.
- b) Facilidade na fabricação da solução padrão pura.

#### c) Grande força amortecedora

Por esses motivos a solução de ácido Potássio Fitálico foi escolhida como solução padrão. Como o eletrodo de vidro possui a característica de perder a linearidade quando o ácido ou a alcalinidade se tornam fortes, torna-se necessário para fins de correção mais de duas soluções padrões com diferentes pH. A característica da temperatura da respectiva solução padrão é representada na tabela 6.

TABELA 6

TEMPERATURA °C	ÁCIDO OXÁLICO	ÁCIDO FÍTÁLICO	ÁCIDO FOSFÓRICO NEUTRO	ÁCIDO BÓRICO	ÁCIDO CARBÔNICO	SOLUÇÃO DE HIDRÓ- XIDO DE BÓRIO	SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO SATURADO
0	1.67	4.01	6.98	9.46	10.32	13.8	13.4
5	1.67	4.01	6.95	9.39	(10,25)	13.6	13.2
10	1.67	4.00	6.92	9.33	10.18	13.4	13.0
15	1.67	4.00	6.90	9.27	(10,12)	13.2	12.8
20	1.68	4.00	6.88	9.22	(10,07)	13.1	12.6
25	1.68	4.01	6.86	9.18	10.02	12.9	12.4
30	1.69	4.01	6.85	9.14	(9,97)	12.7	12.3
35	1.69	4.02	6.81	9.10	(9,91)	12.6	12.1
38	-	-	-	-	9,91	-	-
40	1.70	4.03	6.81	9.07	-	12.4	12.0
45	1.70	4.04	6.83	9.01	-	12.3	11.8
50	1.71	4.06	6,83	9.01	-	12.2	11.7
55	1.72	4.08	6.81	8.99	-	12.0	11.6
60	1.73	4.10	6.81	8.96	-	12.9	11.4

3.1.4- Observações a serem feitas durante a medição.

A ponta do eletrodo de vidro é a parte vital, e deve estar permanentemente limpa. E ainda, como o eletrodo é feito de vidro, deve-se ter bastante cuidado ao manuseá-lo. Quando o líquido não manuseado estiver sujo, o eletrodo também se sujará com facilidade de modo que é necessário planejar a introdução de equipamento automático de lavagem e realizar limpezas periódicas. Temos diversos métodos de lavagem automática como lavagem com ultra-som, lavagem com líquido químico, ou lavagem com escova, e é necessário que o método a ser escolhido dependa das condições das impurezas.

Como o KCl se desgasta, é necessário um planejamento adequado as condições de uso, no que se refere a sua distribuição automática a partir de um tanque e no que se refere a distribuição periódica.

Temos hoje com facilidade o eletrodo composto, que reúne o eletrodo de vidro e o eletrodo de comparação em um mesmo elemento. Isto simplificou o manuseio e o trabalho na conservação deste eletrodo. Possuímos também um sensor de temperatura junto aos eletrodos para que seja feita a compensação automática (fig 59).

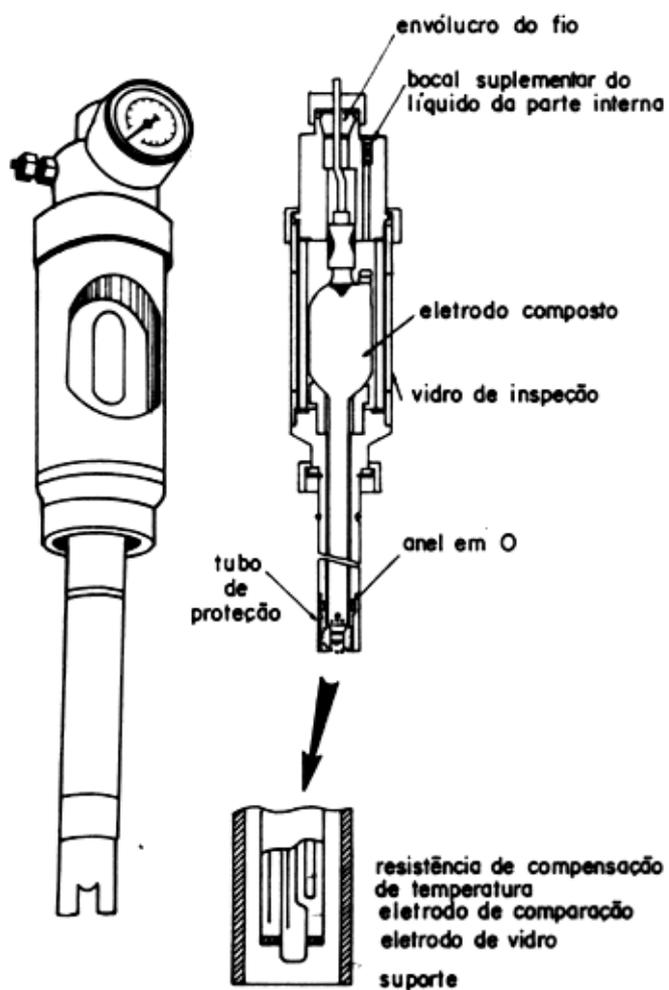


Fig.59- Eletrodo para medição de pH do tipo composto

### 3.2 - Medidor de densidade específica

3.2.1 - Medidor de densidade específica pelo método flutuação, Quando fabricamos a solução líquida de um elemento o seu volume será, em geral, menor que a soma dos dois, A porcentagem dessa variação varia conforme a sua concentração e é difícil calcular o grau de concentração a partir da mistura dos dois. É muito freqüente medir o grau de concentração do álcool de uma bebida ou do ácido sulfúrico diluído num acumulador a partir da densidade específica. Com respeito a solução líquida comum (ácido sulfúrico, ácido hidrocloreto, ácido nítrico, hidróxido de sódio, sal, sacarose, álcool, etc) temos uma relação entre a concentração e a densidade específica, podendo ser lida em tabelas, e no caso de solução líquida de ácido sulfúrico, há a balança flutuante com graduação direta do grau de concentração, de modo que sua medição pode ser feita de maneira direta e fácil, Nas indústrias se utiliza o medidor de densidade específica pelo método de pressão, pela radiação ou pelo efeito Coriolis.

3.2.2 - Medidor de densidade específica pelo método de pressão.

É um medidor que utiliza o princípio do medidor da superfície do líquido pelo método borbulhador (figura 5), isto é, mantém-se a superfície da solução, a ser medida a um determinado nível e faz com que um certo volume de ar seja aí colocado e depois mede-se a pressão posterior exercida sobre o cano que esta mergulhado na solução e de cuja extremidade sai um certo volume de bolha de ar, Como a superfície da solução é determinada, a pressão está em relação proporcional com o peso líquido, isto é, com a densidade do líquido, e se conhecermos essa pressão, conheceremos também a densidade específica.

Este método é utilizado para medir a densidade específica do ácido contido num recipiente com solução ácida para decapagem de metais que está em estado de excesso e depois que o líquido esteja sendo distribuído continuamente.

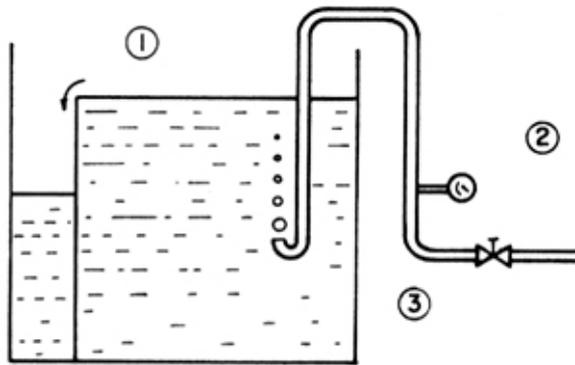


Fig 60

- 1 - Excesso
- 2 - Medidor de Pressão
- 3 - Válvula controladora de ar

b - Medidor de gravidade específica pelo método de radiação.

A radiação possui a característica de se transmitir através de um material, e neste processo, a sua intensidade (energia) é absorvida. O grau de absorção difere conforme o material, e ainda conforme a espessura deste material, Se a espessura do material for constante, a concentração do material, ou mesmo de um líquido, será praticamente proporcional a densidade específica. Se agora, transmitirmos através de um material usando uma radiação de uma determinada energia, mede-se a sua intensidade após a radiação e teremos uma relação específica entre a densidade específica e o grau de diminuição dessa intensidade através da qual podemos medir a densidade específica.

Podemos utilizar radiações visíveis ou invisíveis ( Luz , infravermelho, raios gama....)

### 3.3 - Medidor do grau de densidade pelo método de comparação da cor

1 - Princípio pelo método de comparação de cor

Transmite-se raios visíveis a uma solução e depois calcula-se o grau de densidade a partir da quantidade de luz absorvida por essa solução, Na tabela 2 representamos a relação entre a cor e o comprimento de onda da luz.

Tabela 7 – Relação entre cor e comprimento de onda

Comprimento de Onda	Cor
400 ~ 435	Roxo
435 ~ 480	azul
480 ~ 500	azul verde
500 ~ 560	verde
560 ~ 580	amarelo verde
580 ~ 595	amarelo
595 ~ 610	laranja
610 ~ 750	vermelho laranja
750 ~ 800	vermelho

Estrutura do equipamento

Utiliza-se freqüentemente o equipamento baseado no princípio do método da intensidade da luz absorvida pelo filtro como sendo um analisador do grau de densidade continua para fins industriais.

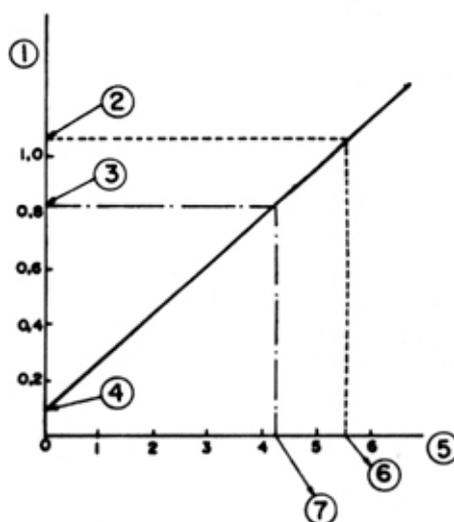


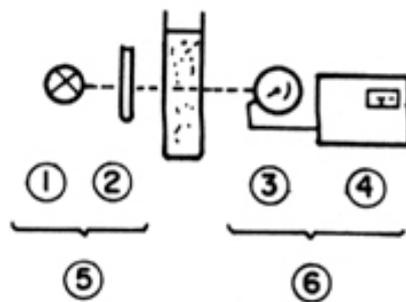
Fig.61- Linha de medida

- 1 - Grau de absorção da luz
- 2 - Grau de absorção da luz pela solução padrão
- 3 - Grau de absorção da luz pela amostra

- 4 - Grau de absorção da luz pela solução
- 5 - Grau de densidade
- 6 - Grau de densidade da solução padrão
- 7 - Grau de densidade da amostra

É estruturado pela parte da fonte de luz monocromática, parte de amostra, e parte de medição da luz recebida.

A figura 62 representa a estrutura do comparador da cor do filtro fotoelétrico.



**Fig. 62- Exemplo de estrutura do comparador da cor do filtro fotoelétrico**

- 1- fonte da luz
- 2 - filtro
- 3 - receptor de luz
- 4 - circuito elétrico
- 5 - parte da fonte de luz monocromática
- 6 - parte da medida da luz recebida

a) Parte da fonte de luz monocromática

Utiliza-se a lâmpada de tungstênio ou lâmpada xenônio como lâmpada da fonte de luz. Como filtro, utiliza-se o filtro de vidro em que a coloração é feita acrescentando um elemento oxidante metálico no interior de um vidro inorgânico ou o filtro, interferente que retira o comprimento da onda monocromática utilizando a interferência causada pela membrana fina evaporada e fixada na superfície do vidro.

b) Parte da medição da luz recebida

Dependendo da grandeza do volume de luz a ser medido ou do limite do comprimento da onda utiliza-se na parte da recepção da luz, vários tipos de tubos de recepção da luz, mas, para a medição do grau de densidade da solução através da medição elétrica da luz, utiliza-se o tubo fotoelétrico, pilha fotoelétrica, tubo de multiplicação fotoelétrica, etc.

c) Parte da amostra

Com relação a medição contínua, a parte do porta-amostras, é a parte mais importante do setor industrial, sendo os itens principais, do ponto de vista do planejamento:

- Que não haja sujeira nem embaçamento na parte da passagem do raio de luz da amostra.
- Que o fluxo contínuo da amostra seja limpa.
- Que a mistura entre a amostra e o reagente seja bem feita e que não haja atraso no tempo.
- Que não haja acúmulo de elementos flutuantes.
- Que não haja variação de temperatura.

---

## EXERCÍCIOS DE ANALÍTICA

- 1) Quais as funções de um sistema de amostragem ? Comente cada uma
- 2) Como eu solucionaria do ponto de vista técnico o problema da heterogeneidade com relação ao elemento em análise ?
- 3) Quais as variáveis (principais) que são pré-conhecidas?
- 4) Quais os tipos de sonda para pré condicionar a poeira?
- 5) Quais as preocupações que o técnico deve ter com relação ao transporte da amostra ?
- 6) Quais as principais variáveis que são condicionadas pelo sistema de amostragem?
- 7) Quais os tipos de filtragem que você conhece?
- 8) Que artifícios são utilizados para aumentar e diminuir a pressão da amostra respectivamente?
- 9) Que tipos de fluidos são utilizados pelo ejetores?
- 10) Onde pode ser descarregada a amostra após sua análise?
- 11) Em que baseia-se o analisador por condutibilidade térmica?
- 12) Por que são utilizadas células de referência na ponte de WHEATSTONE?
- 13) Como podem ser classificados os analisadores por paramagnetismo?