

PTC3421 – Instrumentação Industrial

# Temperatura – Parte I

---

V2017A

PROF. R. P. MARQUES

# Definições

---

**TEMPERATURA** é a quantidade medida por um termômetro, que pode ser expressa em

°C	Graus Celsius	(0°C	100°C)	(escala relativa)
°F	Graus Fahrenheit	(32°F	212°F)	(escala relativa)
K	Kelvin	(273,15K	373,15K)	(absoluta)

Do ponto de vista termodinâmico, temperatura é uma grandeza relacionada ao movimento térmico/energia cinética dos átomos de um corpo.

# Definições

---

Há um limite inferior para temperatura. Em 0K (-273,15°C), o movimento térmico dos átomos atinge o seu mínimo quântico.

Não há limite superior. O próprio conceito de movimento térmico (ou mesmo de átomo) perde o sentido em temperaturas extremas.

A temperatura estimada para o núcleo do Sol é de 15.700.000K.

# Definições

---

**TERMÔMETRO** é um instrumento que mede temperatura.

**ENERGIA TÉRMICA** de um corpo é a grandeza associada à soma das energias cinéticas dos átomos constituintes.

A energia térmica depende da temperatura, da massa e do tipo de material que constitui o corpo.

**CALOR** se refere a transferência de energia térmica entre um corpo e o meio circundante ou outro corpo.

A transferência entre corpos ocorre quando há diferença de temperatura entre eles.

# Definições

---

As formas de transferência de calor são:

**CONDUÇÃO**      corpos em contato físico, sem transferência de massa

**CONVECÇÃO**      transferência de calor por intermédio de um corpo fluído, com deslocamento de massa

**RADIAÇÃO**      corpos sem contato físico, sem transferência de massa

Os sensores de temperatura, de formas variadas, empregam um ou mais desses fenômenos para obter uma leitura.

# Proteção

---

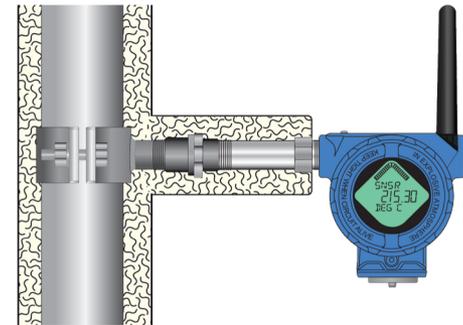
A medição de temperatura, especialmente em faixas mais altas, é intrinsecamente desafiadora.

É necessário expor o elemento primário a altas temperaturas, eventualmente em ambientes onde também há esforços mecânicos ou altas pressões (e.g. tubulações com elevadas vazões de fluídos muito quentes) ou mesmo ambientes corrosivos.

Além disso, a maioria dos elementos primários que medem temperatura são relativamente frágeis.

# Proteção

Uma solução é utilizar instrumentos NÃO INTRUSIVOS, porém nem sempre essa solução é adequada.



OBS.: Com antena para transmissão sem fio.

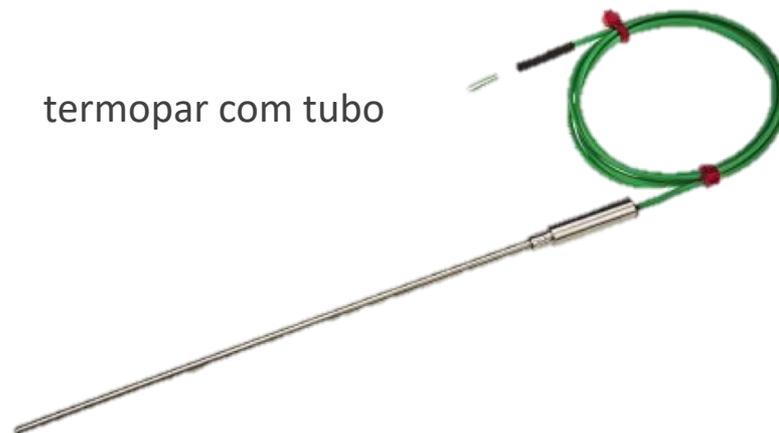
# Proteção - tubos

---

Instrumentos INTRUSIVOS apresentam potencialmente melhor desempenho, porém requerem que se proteja o elemento primário.

Os dispositivos usuais são:

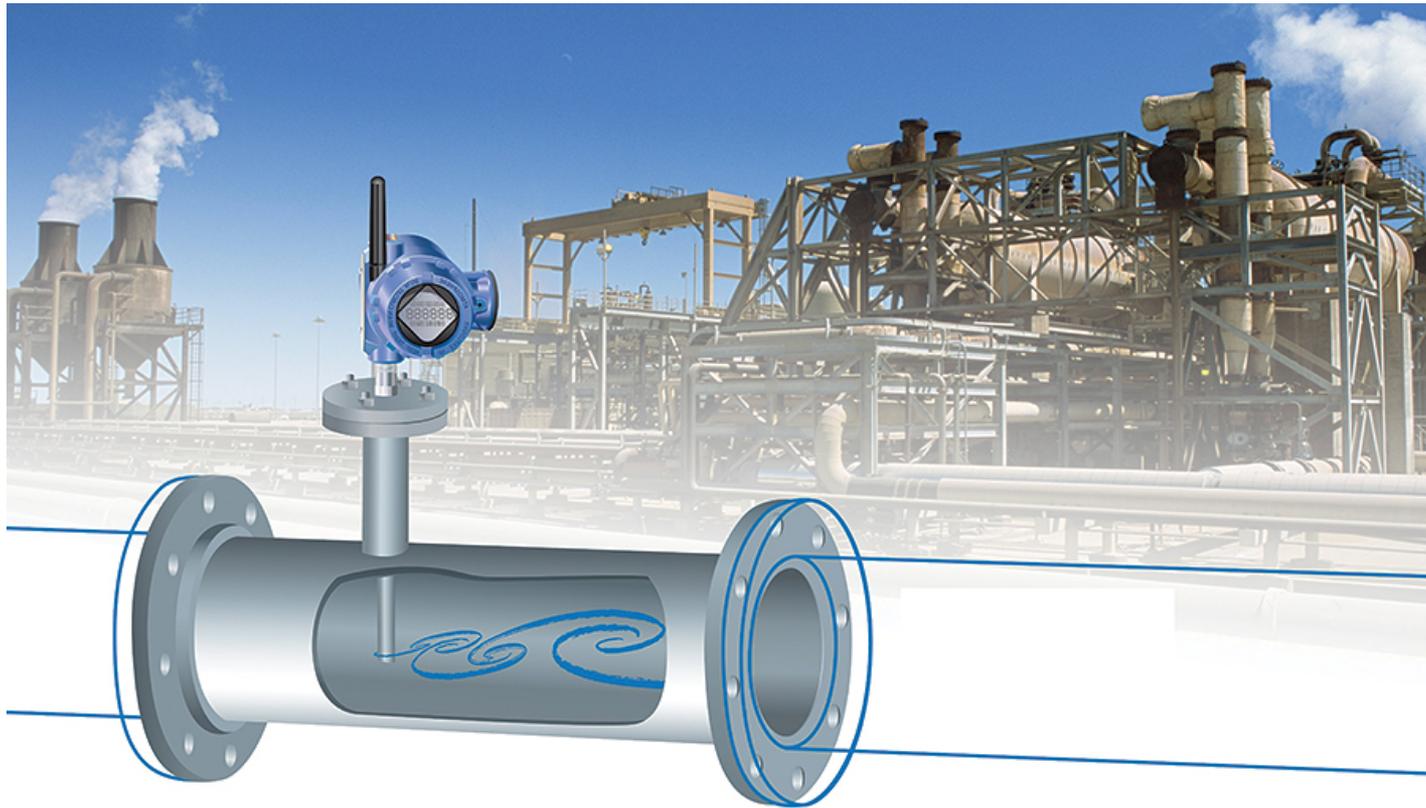
TUBOS: revestimentos metálicos ou cerâmicos usualmente incorporados aos instrumentos.



# Proteção - poços

---

POÇOS: (poços térmicos, termopoços – thermowells) são intrusões estanque fixadas ao processo que permitem a manutenção e troca dos elementos primários sem contato com o processo.



# Proteção - poços

---



ROSQUEADO



FLANGEADO



SOLDADO



SANITÁRIO\*

\* Poços usualmente grampeados de fácil limpeza.

# Proteção - poços

---

## Observações

- As intrusões (poços e tubos) causam perturbações ao fluxo em tubulações. Em casos extremos podem gerar ressonância ou cavitação.
- Tubos e especialmente poços causam um aumento no tempo de resposta dos sensores, pois eles devem esquentar ou esfriar junto com a variável de processo para o valor se refletir no elemento primário.

# Tipos

São os seguintes os tipos de termômetros mais comumente encontrados na Indústria:

CONDUÇÃO	Termômetro por dilatação de líquido	Indicação apenas local
	Termômetro por dilatação de gás	
	Termômetro por pressão de vapor	
	Termômetro por dilatação de sólido	Indicação local, A&C
	Termômetro por efeito termoelétrico	Transmissão, A&C
	Termômetro por resistência elétrica	Transmissão, A&C
RADIAÇÃO	Pirômetros, câmeras termográficas, etc.	Indicação local, transmissão, A&C

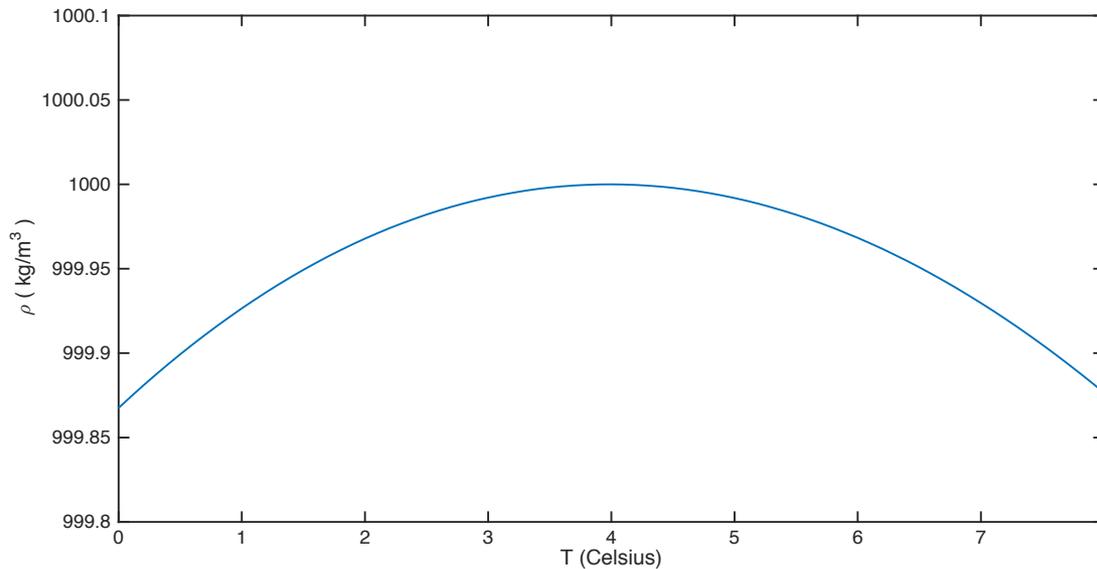
# Dilatação de Líquido

---

O princípio básico desses termômetros é usar a variação volumétrica de um líquido específico com a temperatura para medi-la.

Tipicamente usa-se líquidos que dilatam quando a temperatura aumenta.

OBS.: Isso exclui água, que se adensa entre 0°C e 4°C.

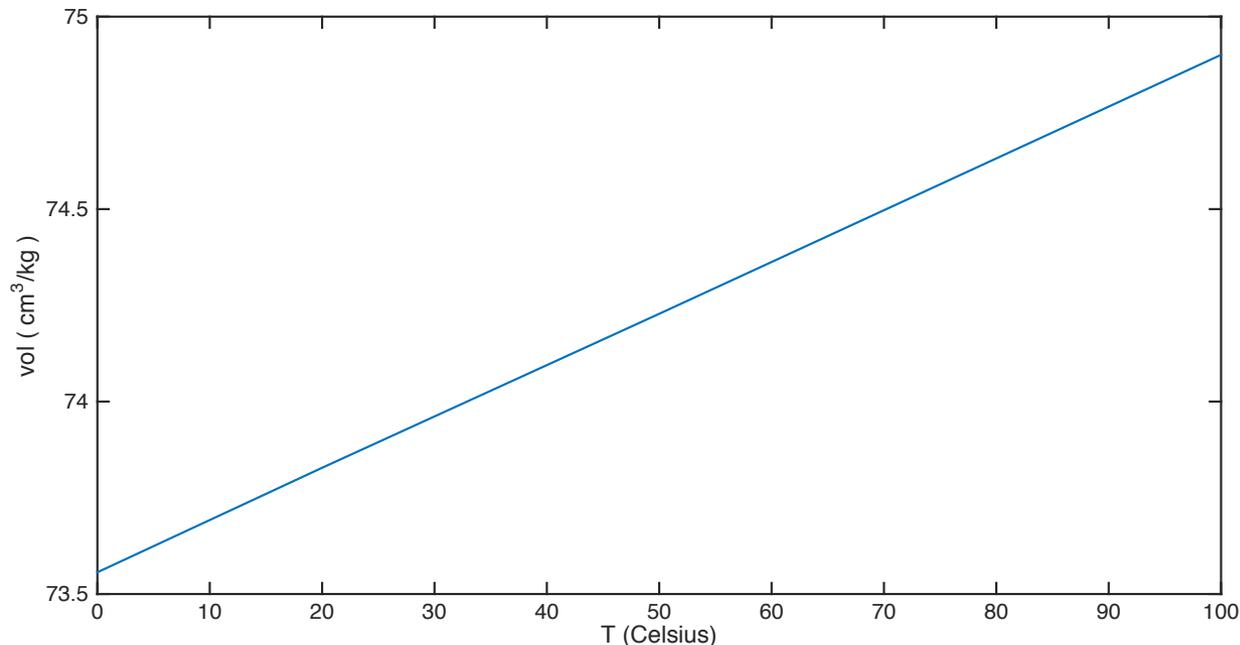


# Dilatação de Líquido

---

MERCÚRIO por outro lado é uma substância bastante conveniente.

- É líquido a temperatura ambiente.
- Sua dilatação varia linearmente com a temperatura nessa faixa.

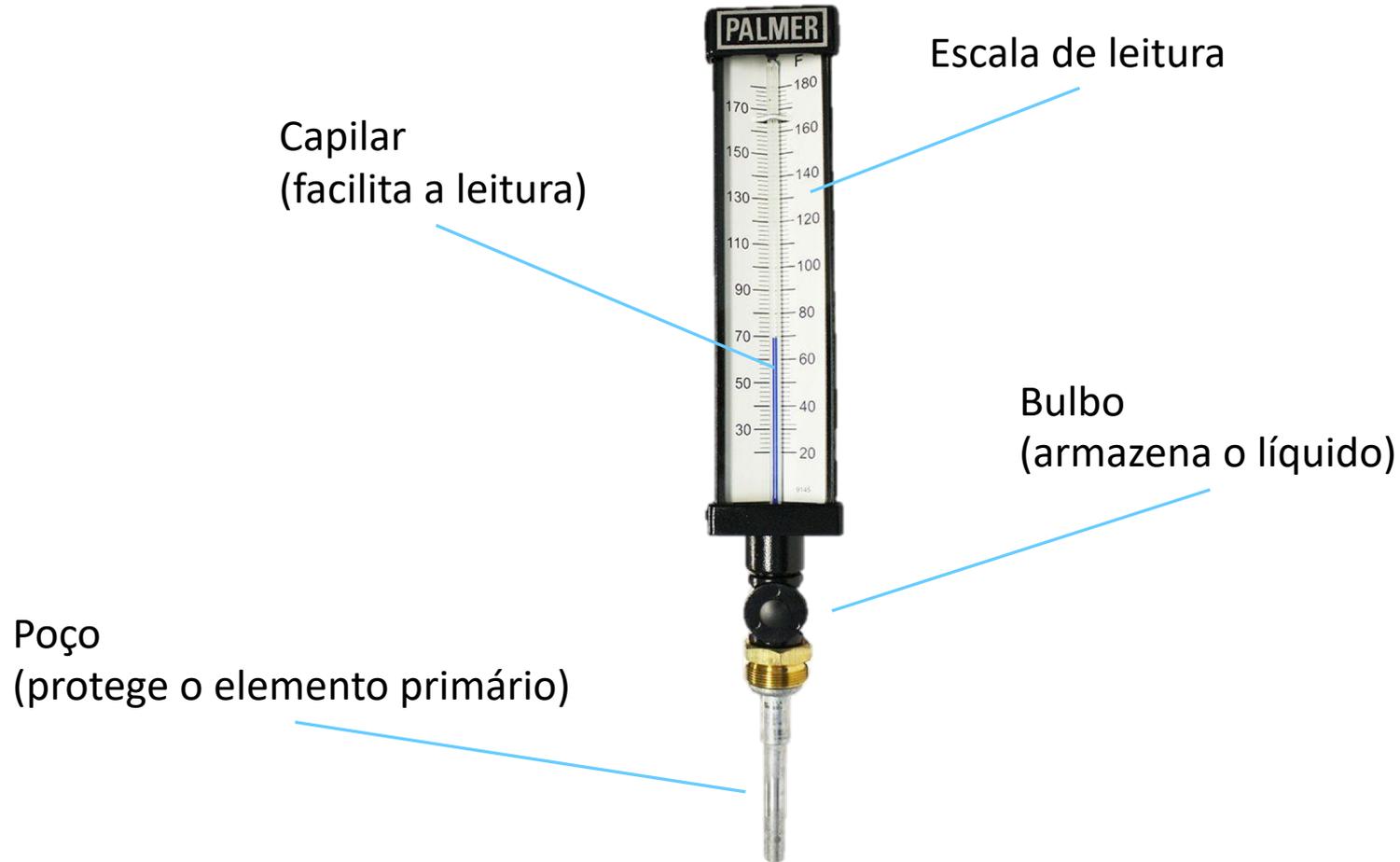


Outros líquidos típicos: Tolueno, Álcool Etílico.

# Dilatação de Líquido

---

Termômetro de vidro



# Dilatação de Líquido

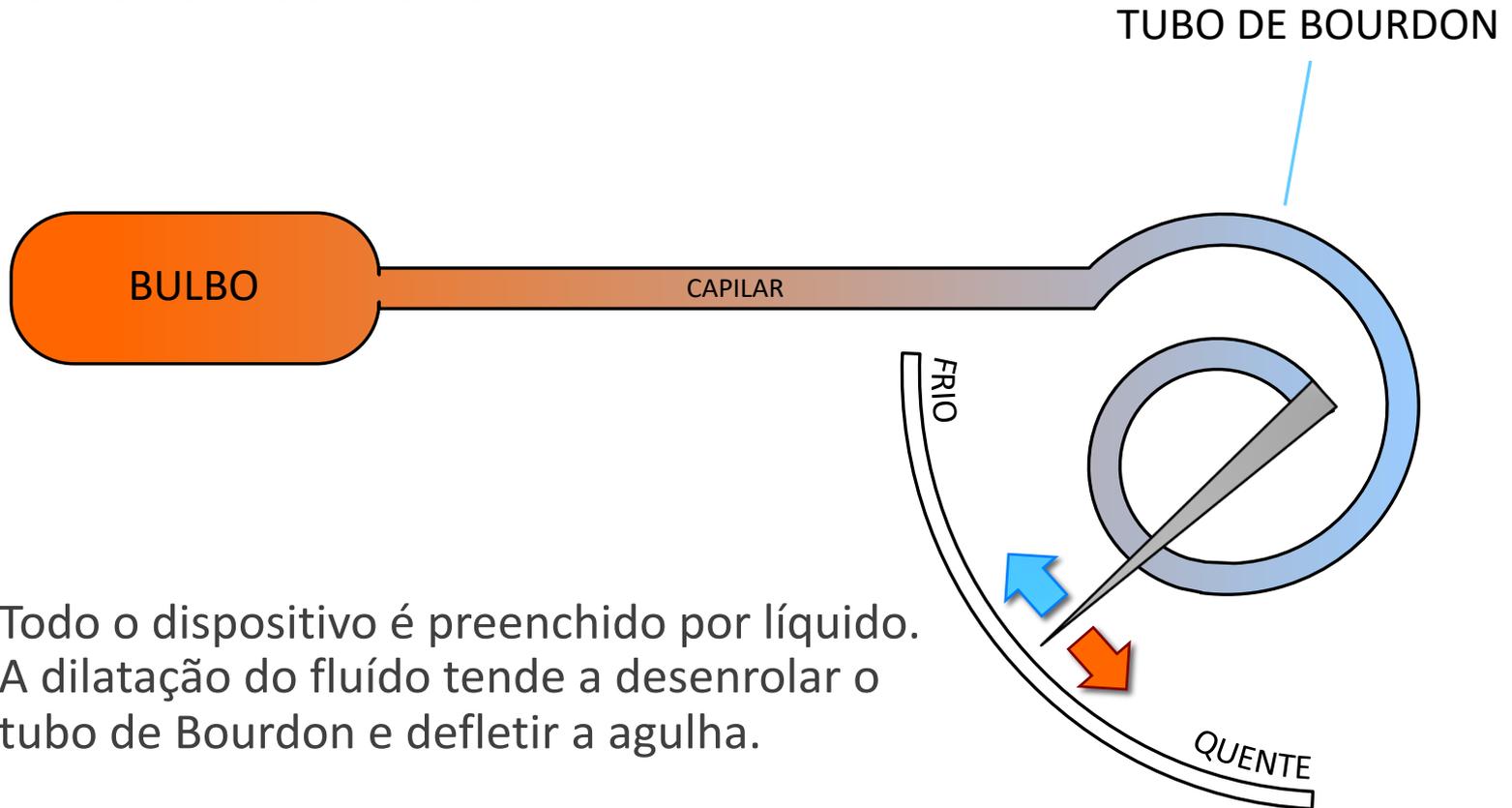
---

## Observações:

- O espaço restante no capilar deve ser preenchido com gás, preferencialmente de propriedades físicas conhecidas (tipicamente nitrogênio), pois o líquido em expansão comprime o gás, o que interfere na medida.
- A escolha do líquido depende de requisitos diversos:
  - A temperatura mínima de medição depende basicamente do ponto de congelamento do líquido (e.g. mercúrio:  $-39^{\circ}\text{C}$ ). Termômetros de Etanol ou outras soluções orgânicas são comumente utilizados para medir baixas temperaturas.
  - A temperatura máxima de medição depende basicamente do ponto de evaporação do líquido. Para medir temperaturas mais altas os termômetros podem ser preenchidos com gás pressurizado (a pressão mais alta aumenta o ponto de ebulição, porém diminui a sensibilidade do instrumento).
- Diversos fatores limitam a precisão da medida: dilatação do vidro, pureza das substâncias, condutividade térmica do corpo, etc.

# Dilatação de Líquido

Termômetro de Bourdon



Todo o dispositivo é preenchido por líquido. A dilatação do fluido tende a desenrolar o tubo de Bourdon e defletir a agulha.

# Dilatação de Líquido

---

Termômetro de Bourdon



Com marcadores mecânicos de mínimo, máximo e setpoint.

# Dilatação de Líquido

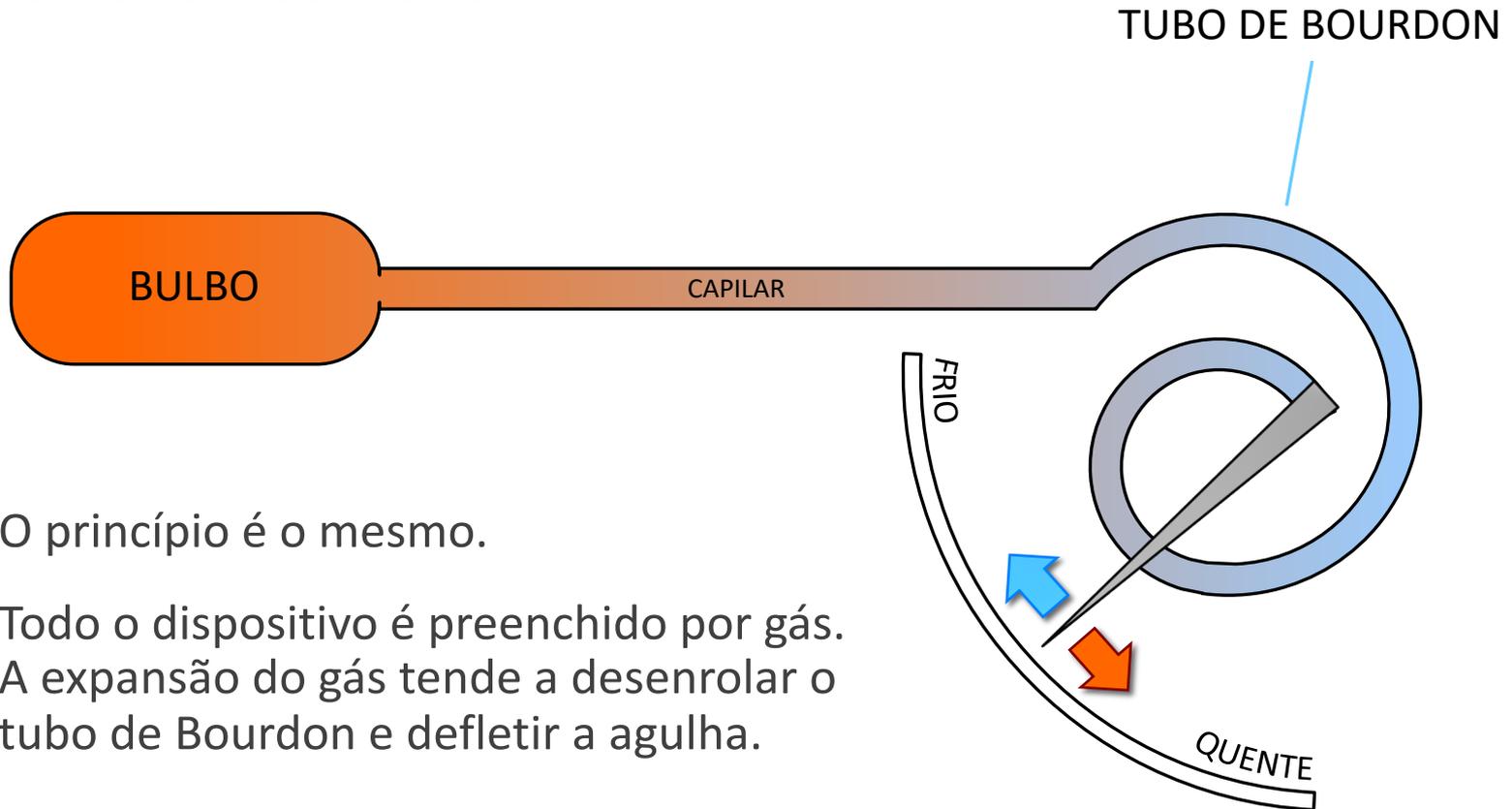
---

## Observações:

- O princípio do tubo de Bourdon também se aplica a dispositivos preenchidos por gás e para medidores de pressão.
- Tendem a ser menos precisos e sofrer de histerese.
- São bastante robustos e confiáveis.
- Adequados para atmosferas explosivas (são intrinsecamente seguros).
- Não se prestam diretamente à transmissão de sinais. Usados mais comumente como mostradores locais.
- O gradiente de temperatura ao longo do capilar pode afetar a leitura, portanto ele não pode ser muito longo.
- O tempo de resposta pode ser um tanto longo (a depender das dimensões do bulbo e do comprimento do capilar).

# Dilatação de Gás

## Termômetro de Bourdon



O princípio é o mesmo.

Todo o dispositivo é preenchido por gás. A expansão do gás tende a desenrolar o tubo de Bourdon e defletir a agulha.

# Dilatação de Gás

---

## Termômetro de Bourdon



# Dilatação de Gás

---

## Observações:

- A escolha do gás depende de requisitos diversos:
  - A temperatura mínima de medição depende basicamente do ponto de liquefação do gás na pressão em que o dispositivo é preenchido.
  - A temperatura máxima de medição depende da resistência dos materiais ao calor e da porosidade em temperaturas elevadas.
  - É preferível usar gases inertes (e.g. hélio, nitrogênio, etc.) ou pouco reativos. Isso minimiza o risco de explosão e os efeitos da reatividade do gás, especialmente em altas temperaturas.
- Valem a maioria das observações feitas anteriormente sobre os termômetros por dilatação de líquido.

# Pressão de Vapor

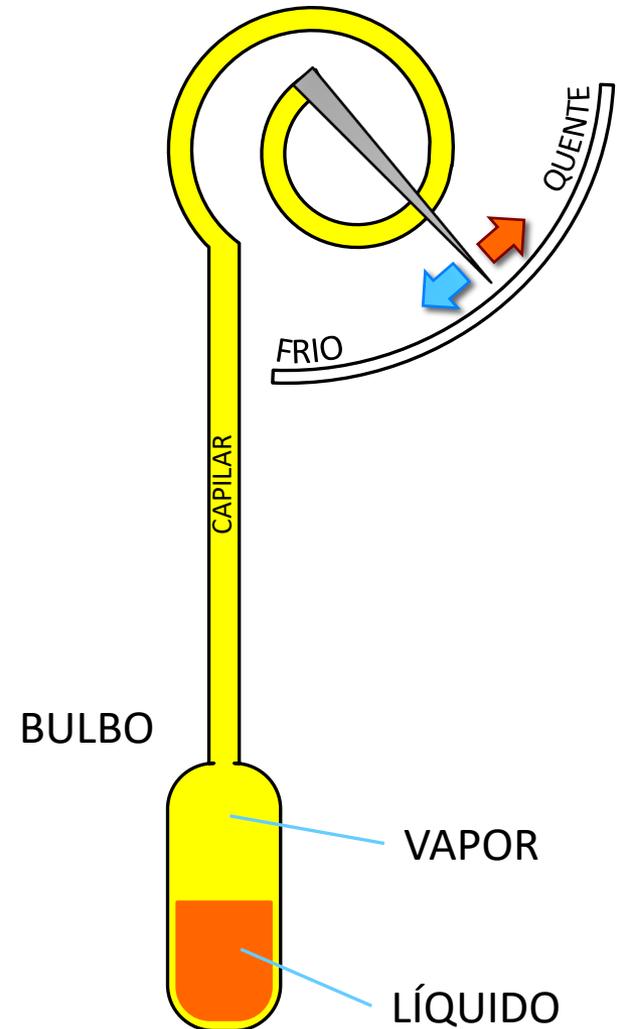
## Termômetro de Bourdon

O bulbo é preenchido parcialmente com um líquido volátil. O reservatório entra em equilíbrio líquido-vapor à pressão de enchimento

O aumento da temperatura faz com que o ponto de equilíbrio se altere, vaporizando parte do líquido e aumentando a pressão de equilíbrio.

A pressão tende a desenrolar o tubo de Bourdon, defletindo a agulha.

A parte líquida fornece um reservatório para produção de vapor que permite ampliar a faixa de medição do instrumento.



# Pressão de Vapor

---

Observações:

- Preenchimentos típicos incluem: butano, éter etílico, tolueno, propano, etc.

# Tubos de Bourdon

---

Formatos típicos de tubos de Bourdon incluem tubos espirais e helicoidais.

Os tubos são usualmente achatados.



ESPIRAL



HELICOIDAL

# Dilatação de Sólidos

---

A dilatação de sólidos com o aumento da temperatura também pode ser utilizada para se medi-la.

O deslocamento mecânico causado pela dilatação pode mover um indicador em uma escala associada à temperatura.

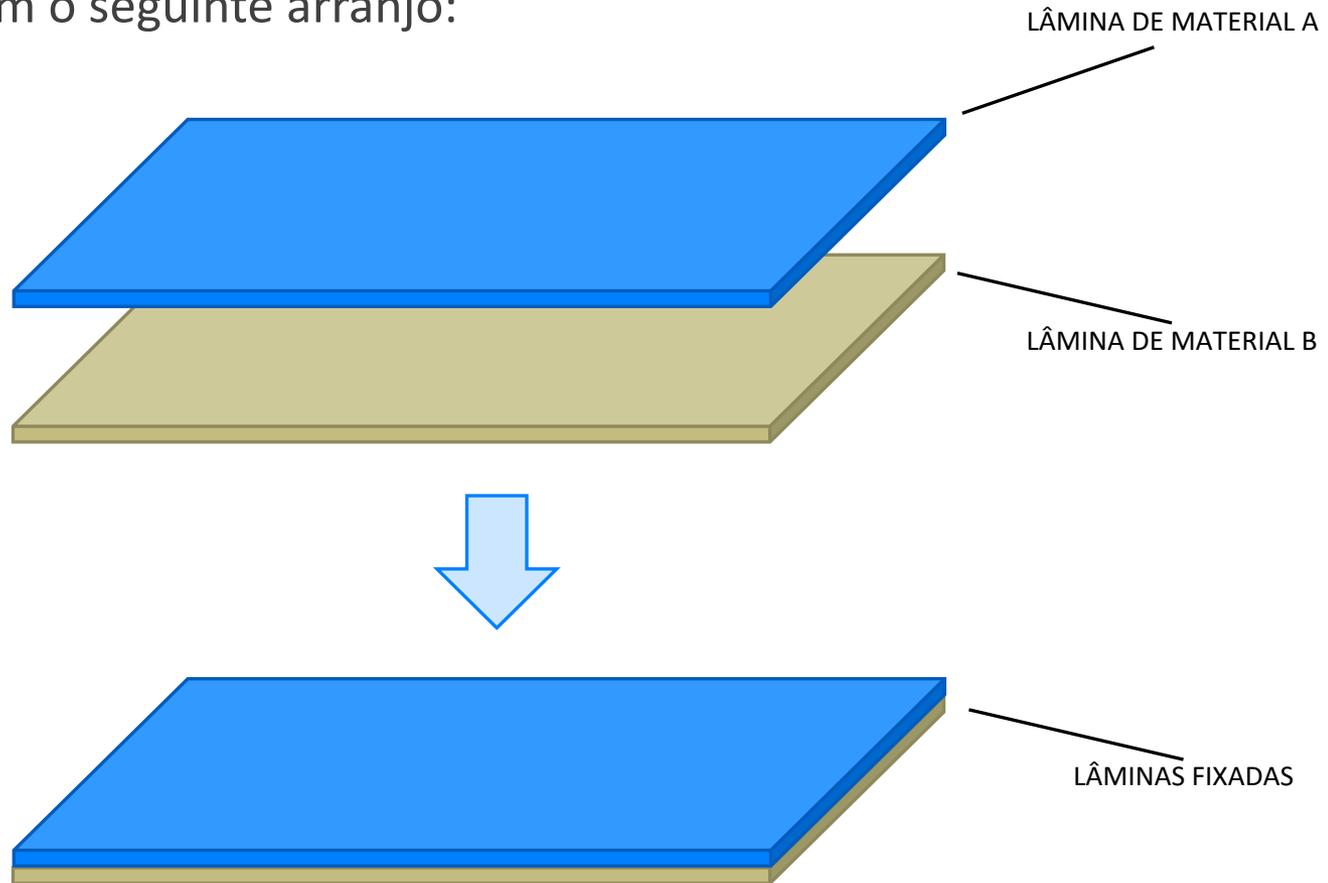
O tipo mais comum (e interessante) elemento primário baseado nesse princípio é o PAR BIMETÁLICO, que encontra larga aplicação em instrumentação e controle.

# Dilatação de Sólidos

---

## O PAR BIMETÁLICO

Considerem o seguinte arranjo:

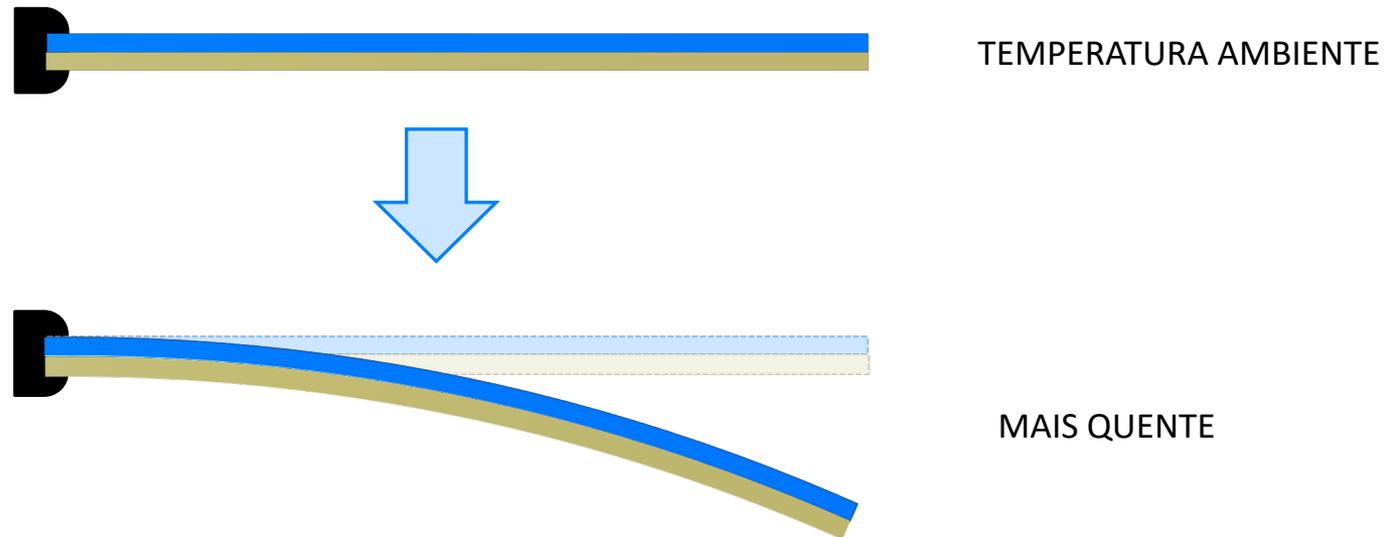


# Dilatação de Sólidos

---

Suponham que os materiais tenham coeficientes de dilatação diferentes (por hipótese vamos admitir que o material A tenha o coeficiente maior).

Ao se aumentar a temperatura ocorre o seguinte:

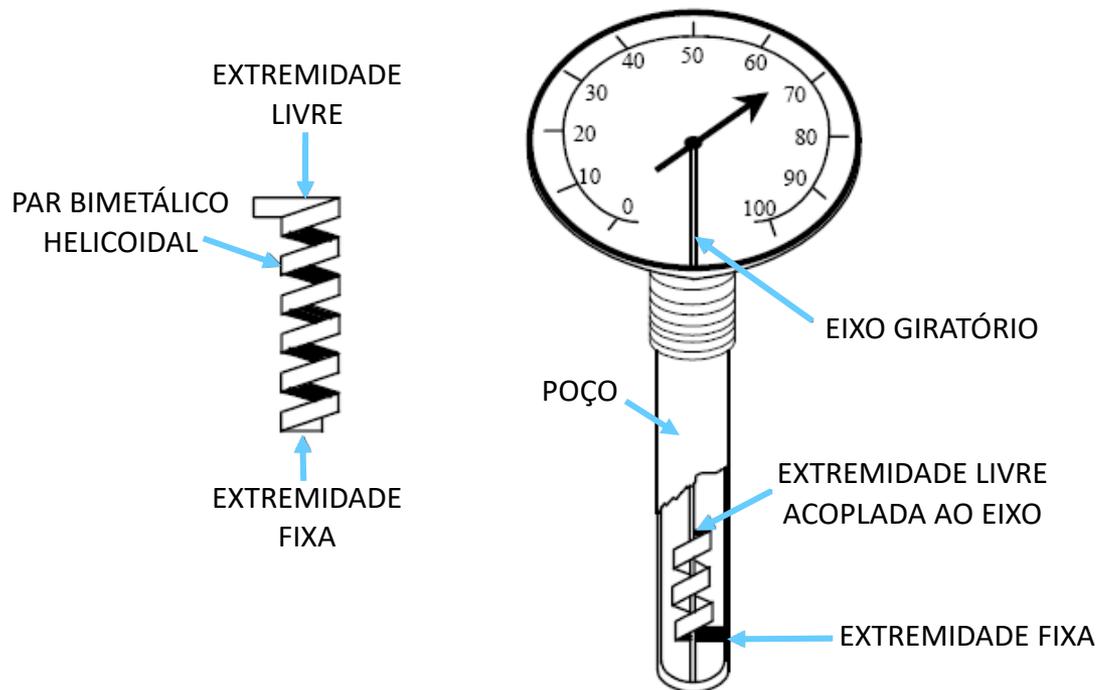


A deflexão, proporcional à temperatura, pode ser utilizada para indicar a temperatura num mostrador.

# Par Bimetálico

O tipo de par bimetálico mais utilizado na Indústria é o par Helicoidal:

- A estrutura helicoidal associada a um eixo giratório apresenta uma boa sensibilidade a variações de temperatura;
- A forma alongada da hélice é conveniente para inserção em poços e afastar fisicamente o elemento primário (o bimetálico) do mostrador.



# Par Bimetálico

---

Exemplos:



PAR BIMETÁLICO HELICOIDAL  
-70°C a 600°C (IP68)



PAR BIMETÁLICO  
EM ESPIRAL

# Par Bimetálico

---

## Observações:

- Materiais típicos incluem INVAR-36 (liga com 64%Fe e 36%Ni) que tem baixo coeficiente de dilatação associado a outros metais ou ligas metálicas (latão, etc.) que têm coeficientes de dilatação muito maiores.
- Pares bimetálicos são particularmente sensíveis a histerese. Esse problema é usualmente mitigado com tratamentos térmicos.
- Pares bimetálicos são muito utilizados para implementar termostatos e sensores binários.