

# *SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM HIDROMETEOROLOGIA*

*Augusto José Pereira Filho  
apereira@model.iag.usp.br*

*Departamento de Ciências Atmosféricas  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Universidade de São Paulo*

# *Introdução*

## **Perspectivas de Sistemas de Medição em Hidrometeorologia:**

- Variáveis a serem medidas;
- Tempo e escalas espaciais;
- Plataformas de instrumentos;
- Sistemas de comunicação;
- Classificação de instrumentos.

**Macro escala**

**Meso escala**

**Micro escala**

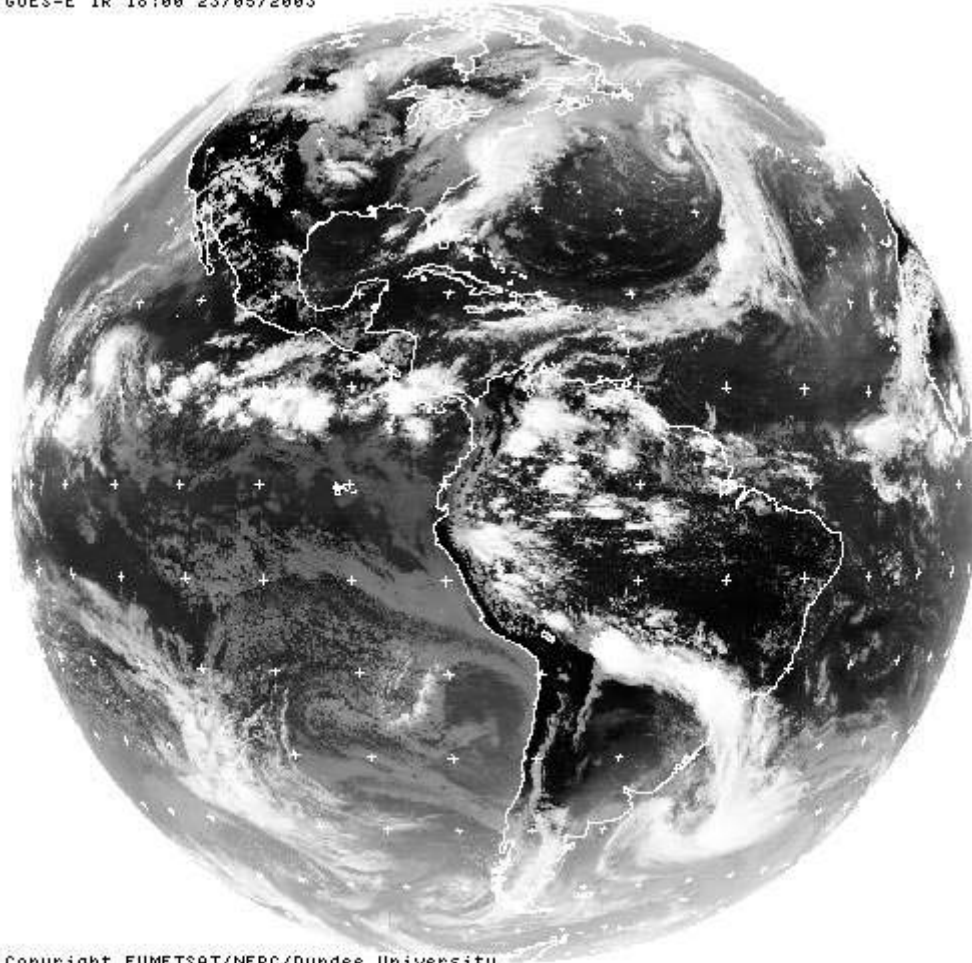


**necessidade de automação**

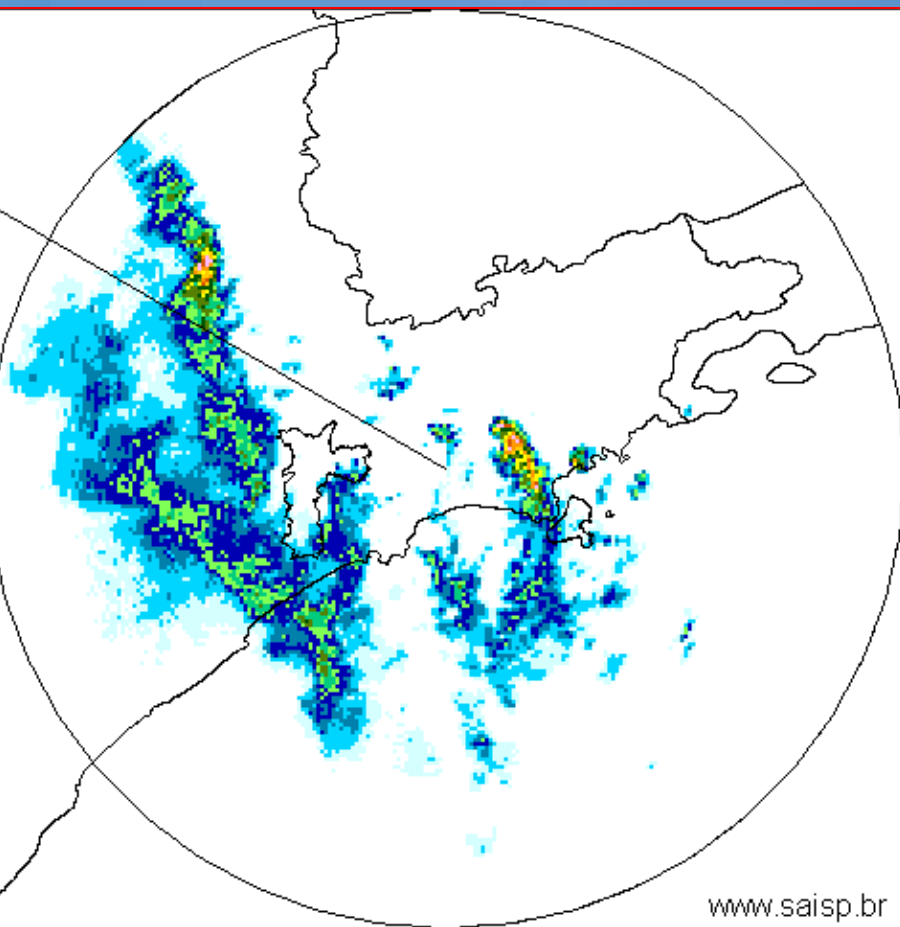
**volume de informação**

**complexidade dinâmica**

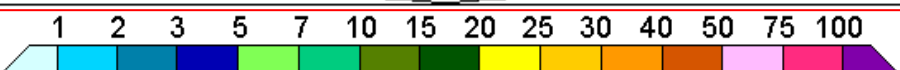
GOES-E IR 18:00 23/05/2003



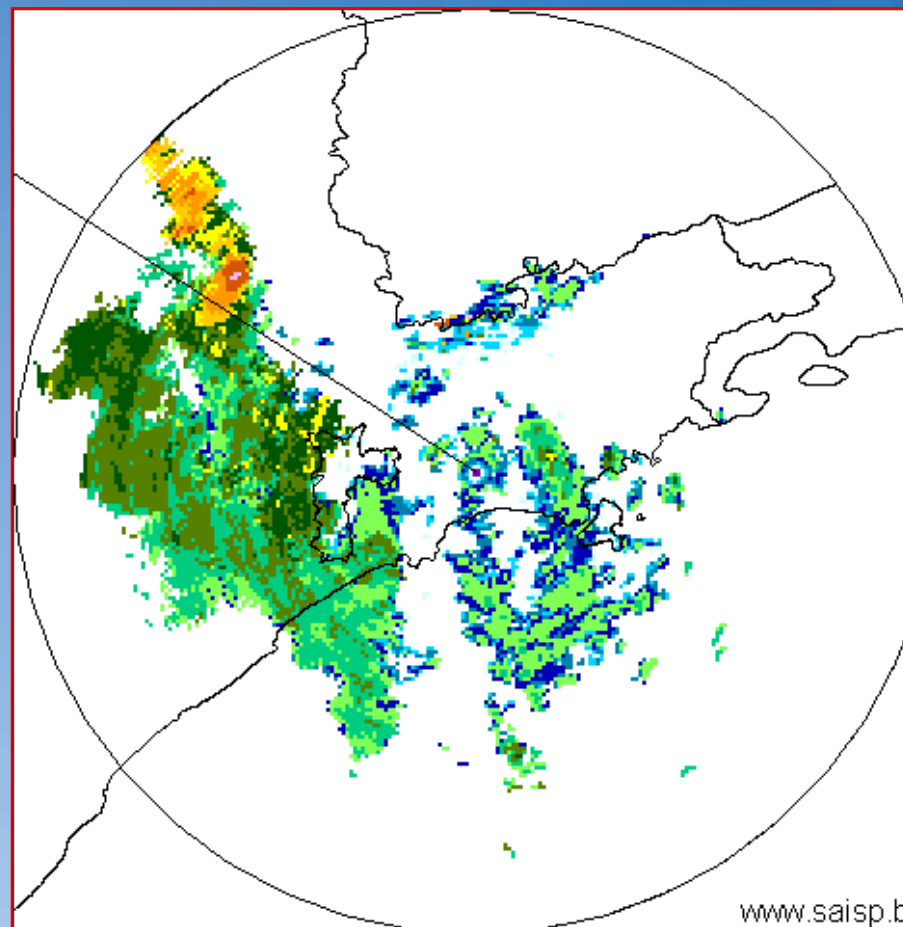
Copyright EUMETSAT/NERC/Dundee University.



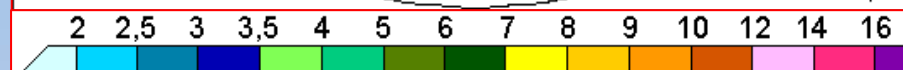
www.saisp.br



**R [mm h<sup>-1</sup>]**



www.saisp.br



**ET [km]**

## **Necessidades:**

**Sistemas de medição adequados**

**Linguagem precisa para sistemas de medição**

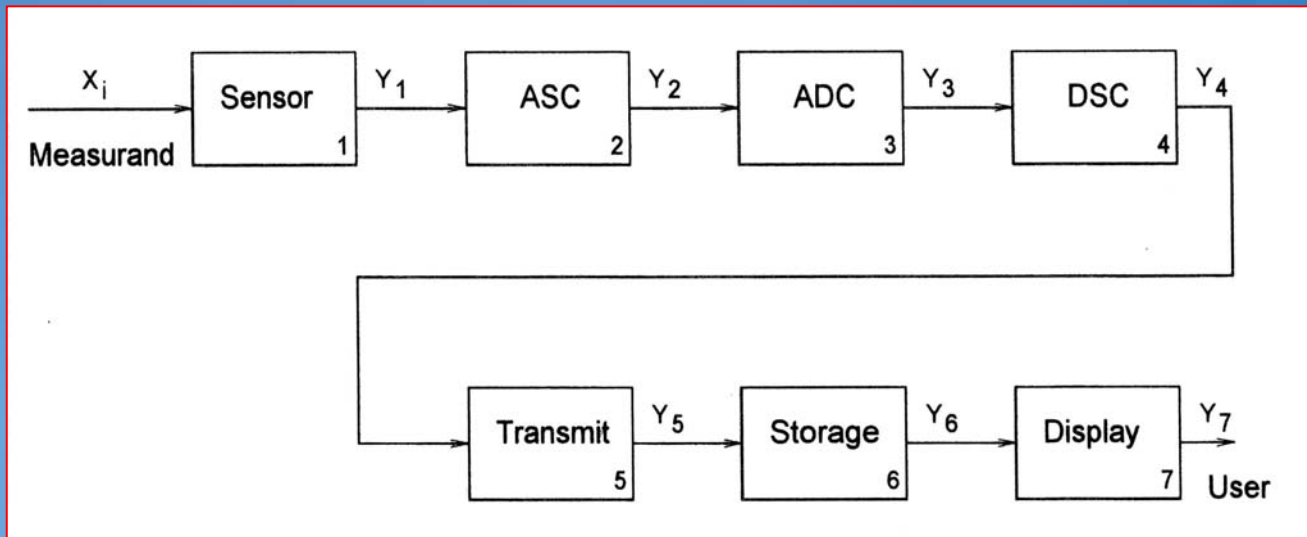
**Entendimento físico dos sistemas de medição**

# **Instrumentação**

**Características de desempenho**

**Modelo Funcional**

**Fontes de Erro**



Modelo funcional  
de um sistema  
de medição.  
Medindo  $X_i$  e  
saídas  $Y_n$ .

**Bloco 1 - sensor com entrada  $X_i$  e saída  $Y_1$ ;**

**Bloco 2 - condicionador de sinal analógico;**

**Bloco 3 - conversor analógico/digital;**

**Bloco 4 - microprocessador;**

**Bloco 5 - transmissão de dados;**

**Bloco 6 - armazenamento de dados;**

**Bloco 7 - exibição de dados.**



# Padrões

Calibração

Desempenho

Exposição

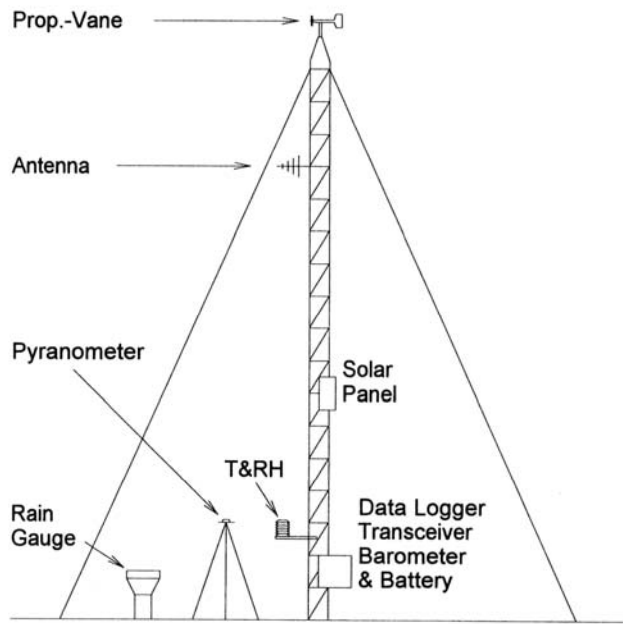
Estratégia de medição

# **Integração de Sistemas**

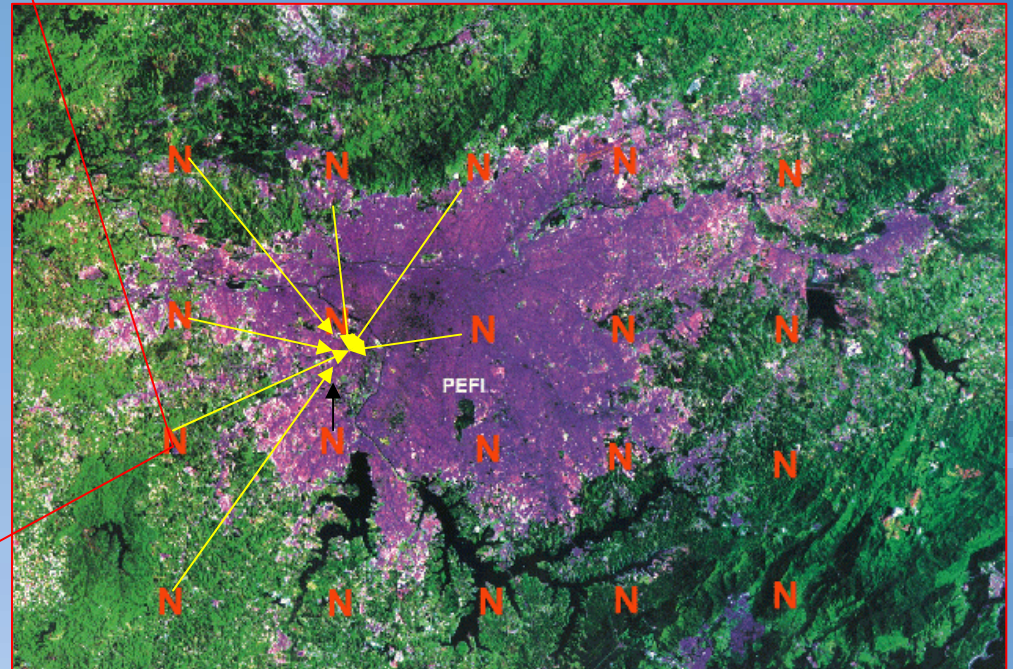
**Plataformas de instrumentos**

**Sistemas de comunicação**

**Fontes de alimentação**



**RMSP**



## **Aspectos Humanos das Medições**

**Percepção humana x medição instrumental**

**Razões para automação**

**Projeto, implementação e manutenção de SMS**

**Interpretação das especificações dos sensores**

**Avaliação**

# DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Resolução – a menor mudança num variável que pode ser detectada sem ambigüidade;

Sensibilidade – taxa de variação de um sinal de saída de um sistema de medição em relação ao respectivo sinal de entrada;

Acurácia – exatidão com a qual um instrumento ou sistema de medição irá medir a variável em relação a um padrão internacional;

Precisão – capacidade de um instrumento ou sistema de medição em reproduzir a mesma medição de um variável repetidamente sem um padrão absoluto;

# *Barometria*

## Pressão atmosférica

$$p(0) = \int_0^{\infty} g\rho(z)dz$$

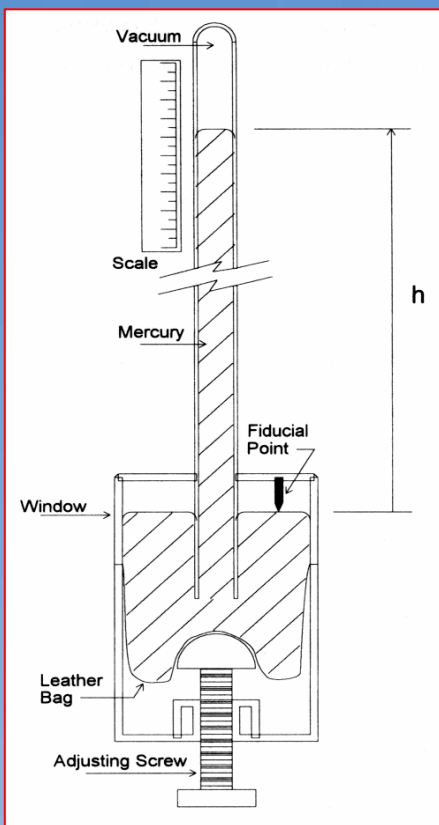
$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ );

$\rho$  = densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$P$  = pressão atmosférica (Pa).

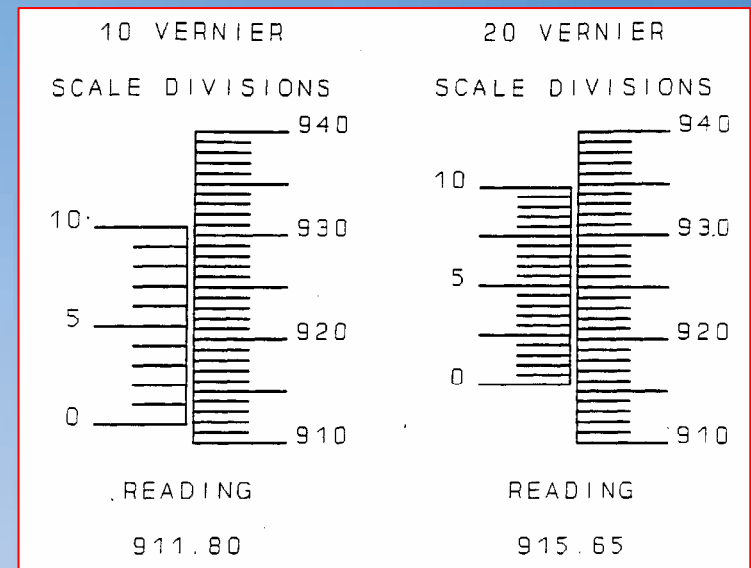
# Medição direta

- mercúrio, aneróide e silício

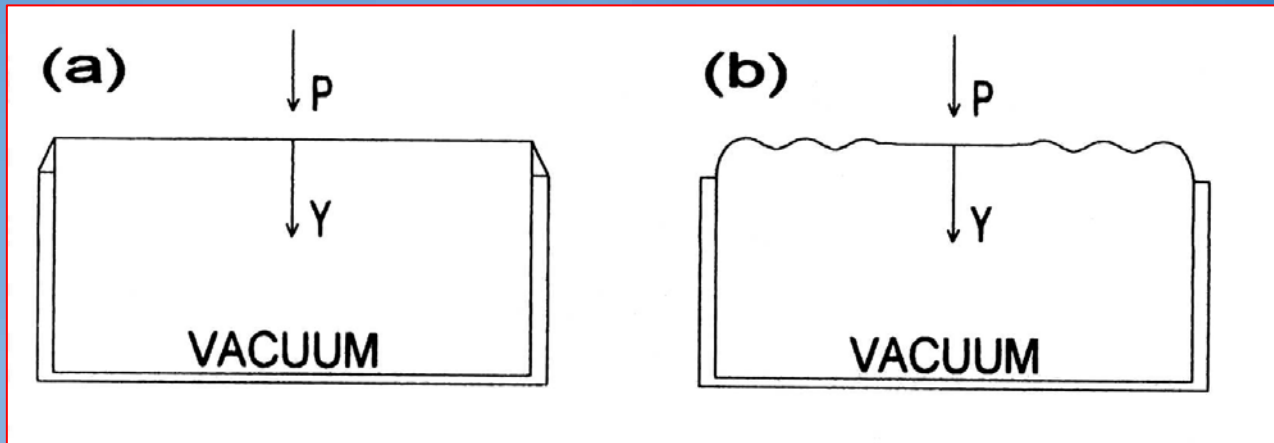


Barômetro de mercúrio mostra a coluna de mercúrio, a escala, o reservatório, o ponto fiducial e a altura da coluna  $h$ .

Ilustração de duas implementações diferentes de escalas de vernier comumente usada em barômetros de mercúrio







Câmaras aneróides simples; diafragma plano (a) e corrugado (b).

Equação de calibração:

$$p = \frac{16Et^4}{3R^4(1-\nu^2)} \left[ \frac{y}{t} + 0.488 \left( \frac{y}{t} \right)^3 \right]$$

$p$  = pressão em Pa;

$E$  = módulo de elasticidade =  $1.0 \times 10^{11}$  N m<sup>-2</sup>;

$t$  = espessura do diafragma =  $8.0 \times 10^{-4}$  m, ;

$R$  = raio do diafragma =  $5.0 \times 10^{-2}$  m;

$\nu$  = a relação de Poisson = 1/3;

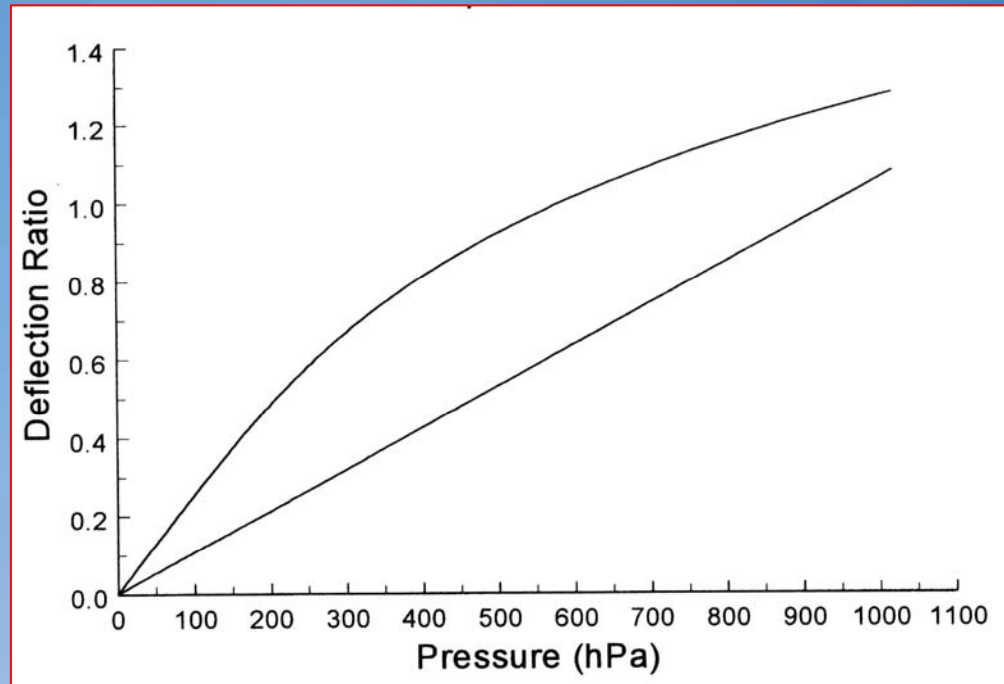
Equação de transferência normalizada (corrugado):

$$y_r = \frac{y}{t} = \frac{2.25 \times 10^5 D(1 - \nu^2)}{E} \left( 1000 \frac{t}{D} \right)^{-1.52} p$$

$$D = 2R$$

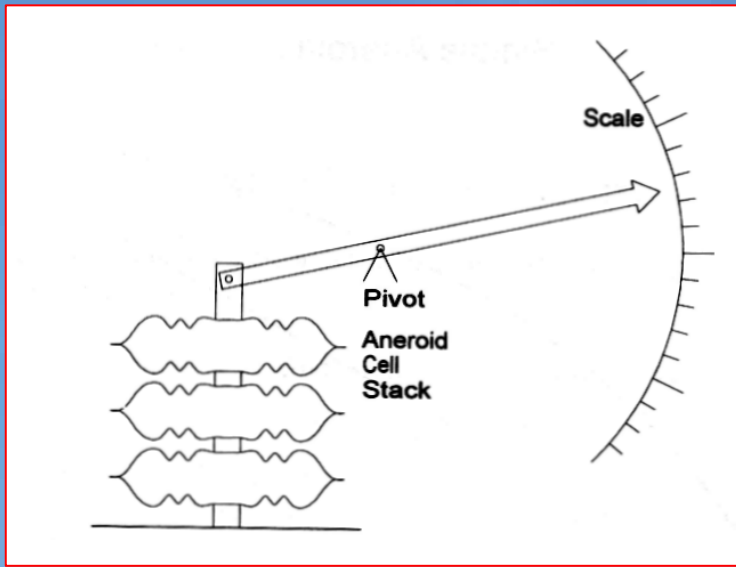
Sensibilidade estática:

$$\frac{dy_r}{dp} = \frac{1}{c_0 + 3c_0 c_1 y_r^2}$$

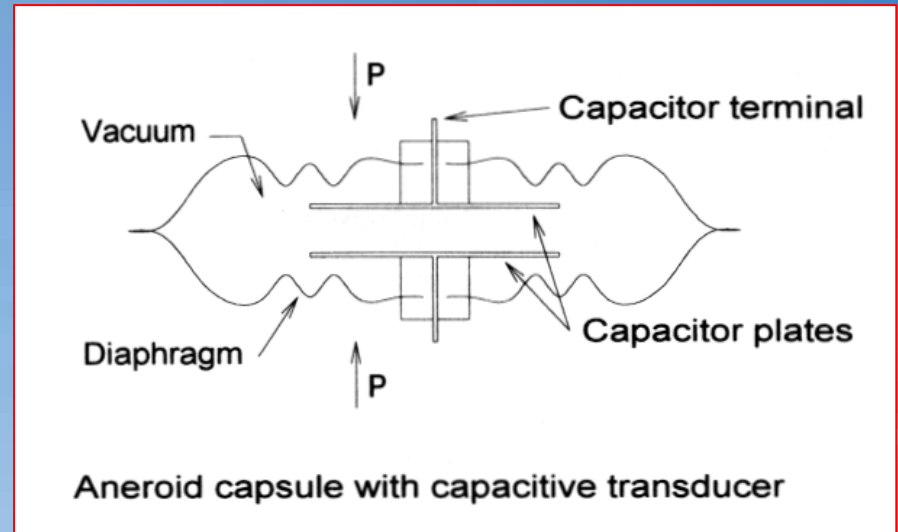


Deflexão normalizada  $y/t$  [  $y$  = deflexão e  $t$  = espessura do diafragma] contra pressão para diafragma plano (curva) e corrugado (reta).

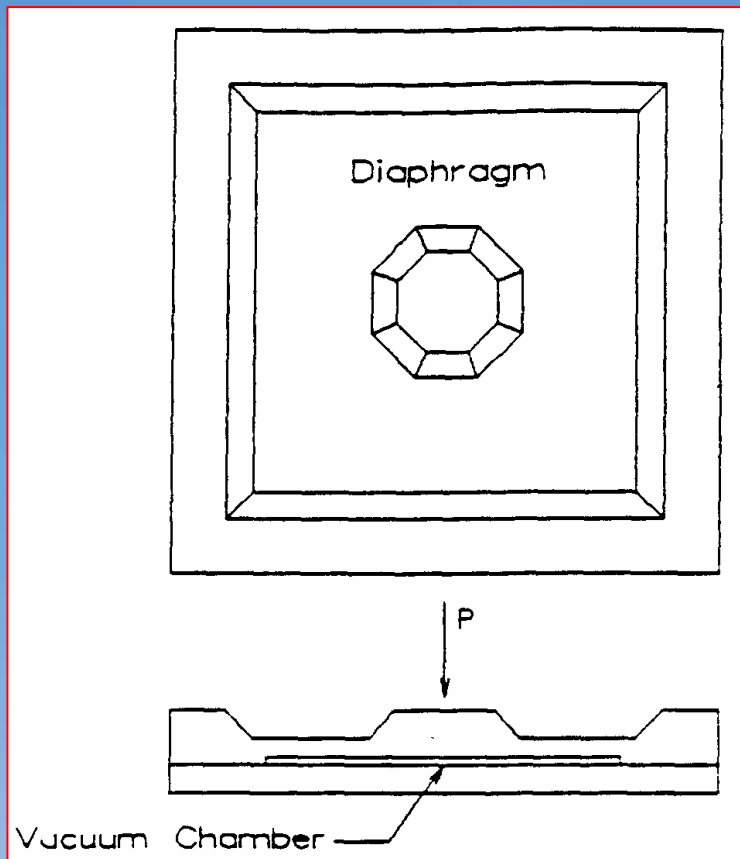
- Uma cápsula aneróide típica consiste em dois diafragmas corrugados soldados juntos;
- Estas cápsulas normalmente são evacuadas até 1 Pa;
- Em alguns modelos adiciona-se na cápsula um gás inerte até 70 mb;
- O gás provê alguma compensação de temperatura.



Pilha de cápsulas aneróides.



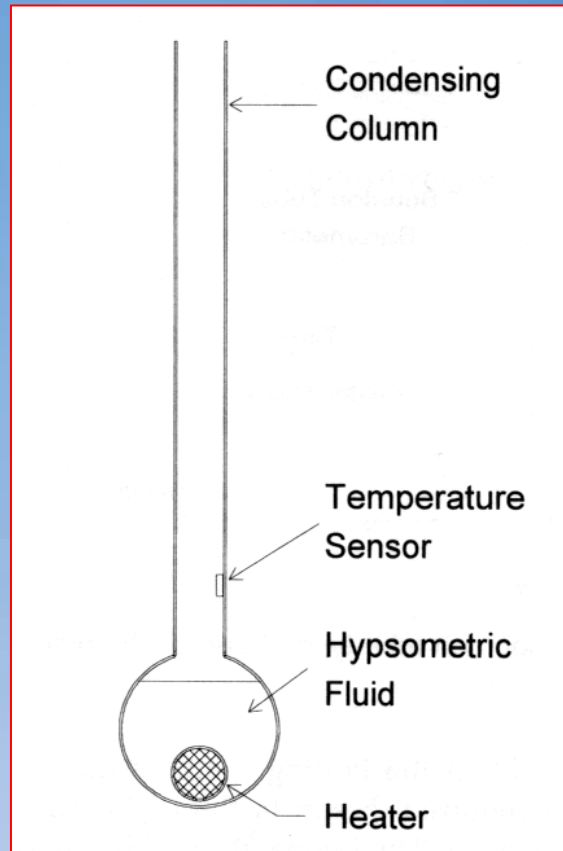
Cápsula Aneróide capacitiva.



Visão do topo e corte transversal de um sensor de pressão de silício em circuito integrado. A leitura poderia ser por uma ponte piezo-resistiva gravada dentro do topo da chapa ou no topo na chapas do fundo poderiam agir como um capacitor.

# Medição indireta

- ponto de ebulição





## Clausius-Clapeyron

$$\frac{d(\ln p)}{dT} = \frac{L}{RT^2}$$



## Equação de calibração

$$p = p_0 \exp \left[ \frac{L}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

L = calor latente de vaporização;

R = constante universal do gás;

p = pressão;

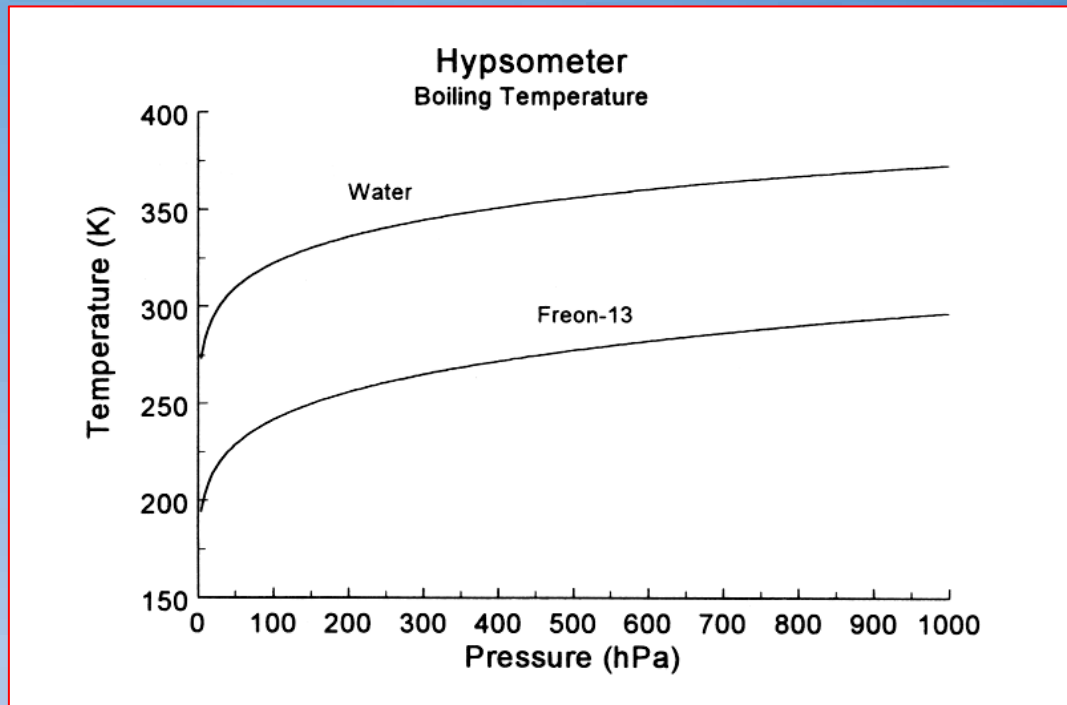
T = temperatura.

Equação de transferência:

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{RT_0}{L} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)}$$

$T_0$  = Temperatura de ebulição;

$p_0$  = pressão ao nível mar.



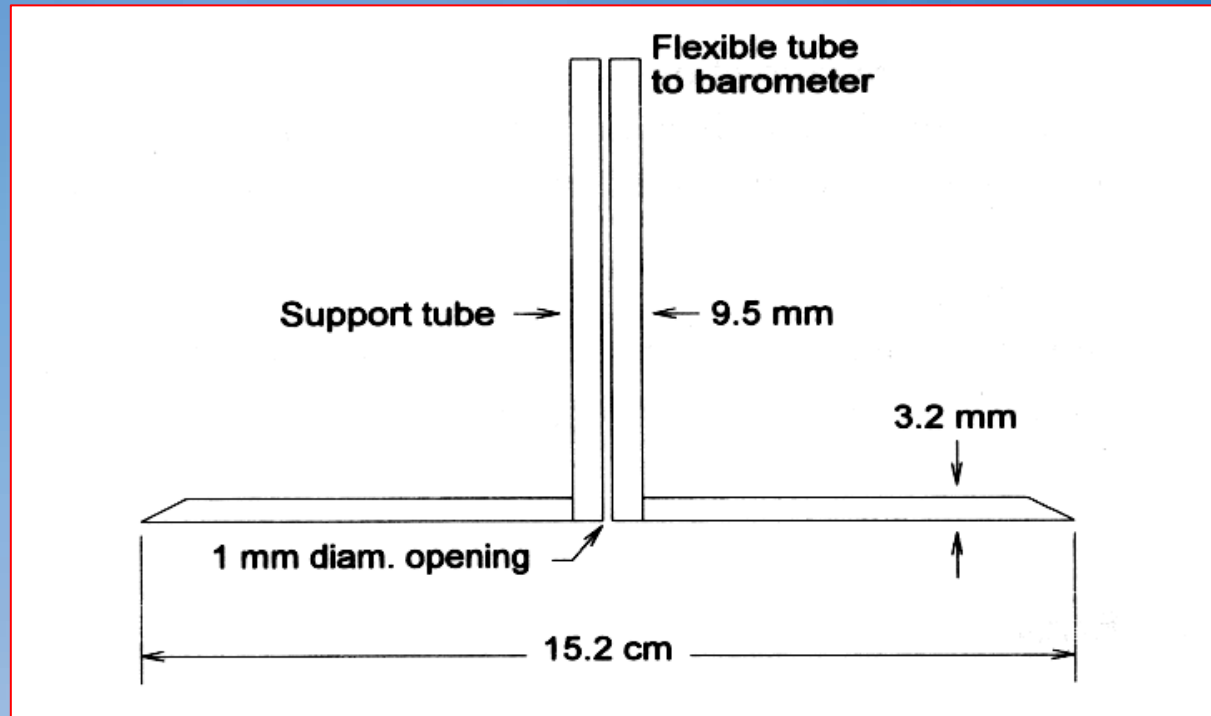
# Parâmetros de fluídos de hipsômetros

Fluido	Temperatura de ebulição T	Calor latente L	Constante do gás R
	K	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Água	373.15	2.5 x 10 <sup>6</sup>	461.5
FREON-11	296.97	1.8 x 10 <sup>5</sup>	60.52
FREON-13	191.75	1.5 x 10 <sup>5</sup>	79.59
Bissulfureto de Carbono, CS <sub>2</sub>	319.45	3.6 x 10 <sup>5</sup>	109.21
Tetracloroeto de Carbono, CCl <sub>4</sub>	349.45	21. x 10 <sup>5</sup>	54.05

## Comparação de barômetros

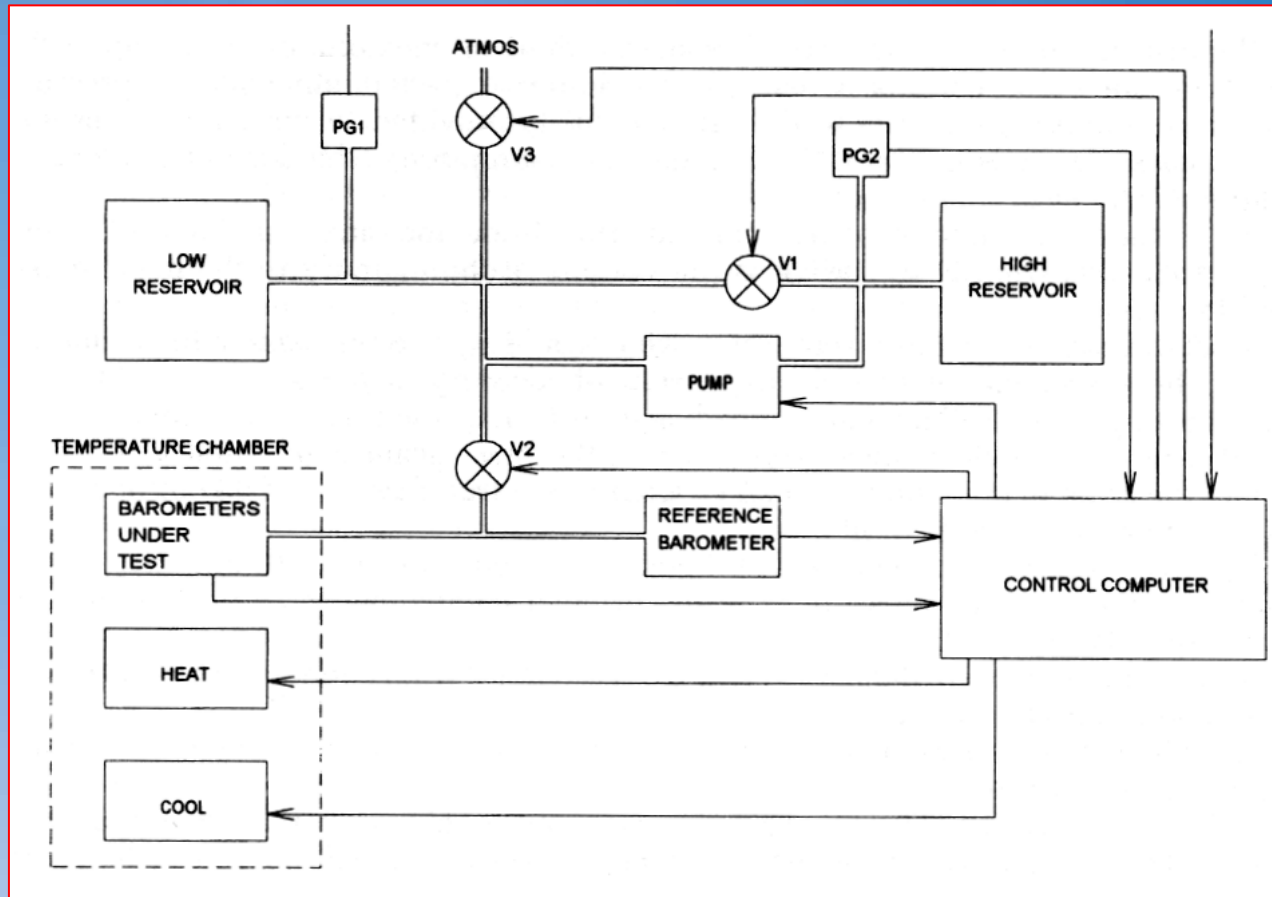
- Todos os barômetros são sujeitos a erros induzidos pela temperatura;
- Sensores aneróides apresentam o efeito de histerese;
- Aneróides também apresentam mudança na sensibilidade do sensor de longo prazo (deriva).

# Erro de exposição



Esquema de um dispositivo de compensação de pressão dinâmica na toma de ar para a câmara de um barômetro.

# Calibração de barômetros



Esquema de um sistema de aferição barômetros em função da pressão e temperatura.

# *Desempenho Estático*

## Desempenho estático (aferição e calibração)

- Variável constante

## Desempenho dinâmico (modelagem dinâmica)

- Variável variável

## Definições

Mesurando: grandeza medida (temperatura, pressão, vento...);

Sensor: recebe energia do mesurando e produz um sinal de saída;

Sinal: quantificação da grandeza medida;

Sinal Analógico: sinal proporcional à variável medida;

Sinal Digital: sinal cujo valor varia em passos discretos;

Transdutor: converte energia de uma forma para outra;

Instrumento: sensor, demais transdutores, e visor de dados;



Condicionamento de sinal: processo de amplificação e redução de ruído de um sinal;

Transmissão de dados: processo de enviar um sinal de um lugar para outro;

Armazenamento de Dados: mecanismo para manter dados e permitir sua recuperação posterior;

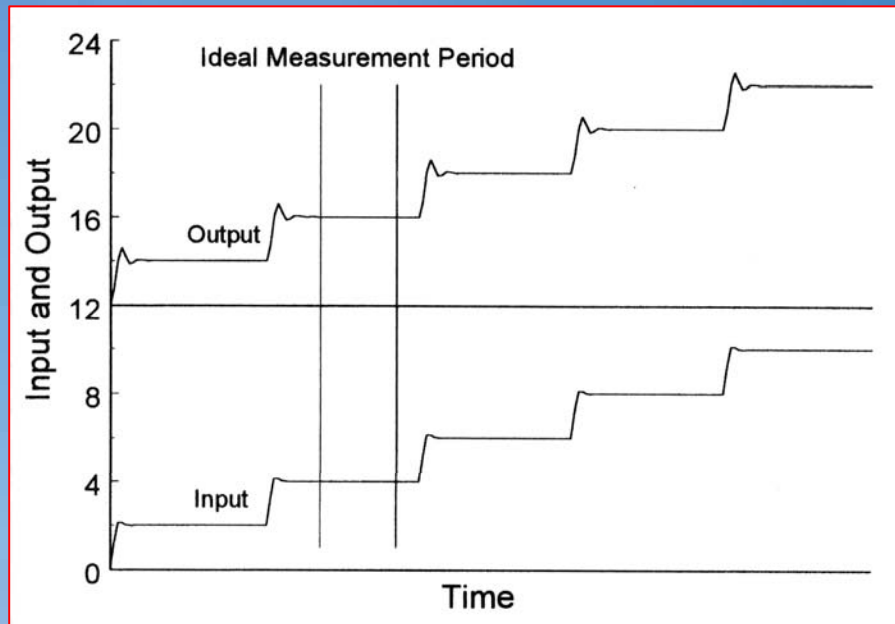
Visor de dados: mecanismo para apresentar os dados ao usuário;.

Entrada primária: variável medida;.

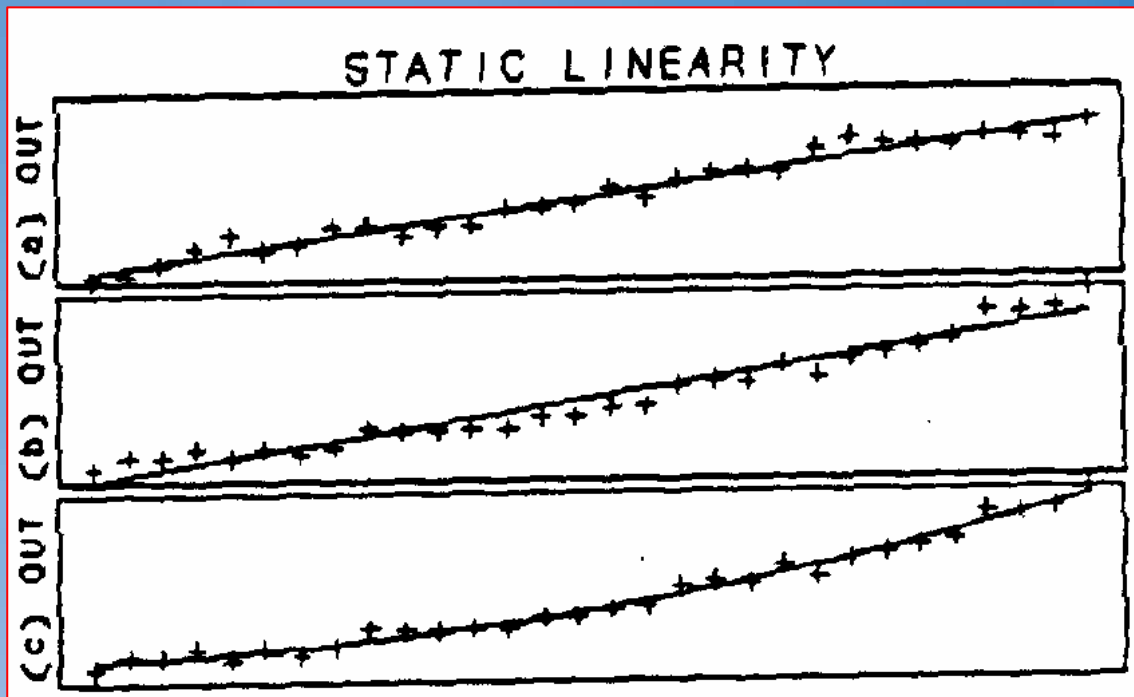
Entrada secundária: sinal indesejado e inevitável.

## Calibração Estática

- Varia-se o mesurando lentamente em toda a faixa de valores possíveis;
- Mantém-se fixas quaisquer outras entradas existentes;
- Mantém-se o sinal de entrada estável tempo suficiente;



Processo de calibração estática. Painel superior mostra a variação do sinal de entrada em função do tempo e inferior a saída do sensor.



**Linearidade estática. Abscissa indica a entrada do sensor e a ordenada, a saída.**

# GRÁFICO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Faixa de leitura: intervalo de variação do mesurando (e.g., 700 a 1100 mb);

Intervalo de leitura: diferença algébrica entre os limites superior e inferior da faixa de leitura (e.g., 400 mb);

Sensibilidade estática: declividade (ou derivada) da função de transferência.

Resolução: A menor variação na entrada primária que produz uma alteração perceptível na saída;

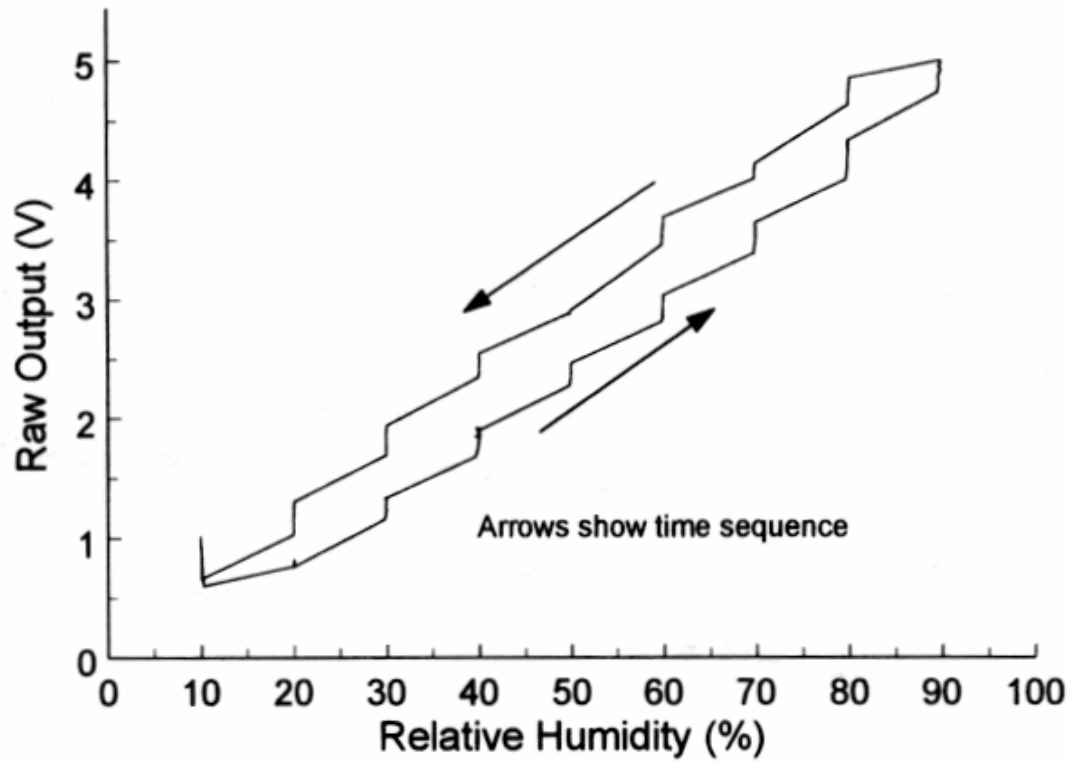
Linearidade: adequação de uma linha reta aos pontos do gráfico da função de transferência tal que as diferenças entre os pontos e a linha reta estão randomicamente distribuídos em torno da linha;

Histerese: efeito do atrito na variação do mesurando;

Limiar de Partida: caso particular de histerese quando a entrada parte de zero;

Estabilidade: invariabilidade da função de transferência para repetidas calibrações num determinado período de tempo.

## Humidity Sensor Calibration



Erro devido à histerese num sensor de umidade.

## Procedimento de Calibração

1. Medição acurada de  $X_i$  (entrada primária) e  $Y_i$  (saída direta do sensor) em N pontos na faixa de leitura do sensor. A unidade de  $X_i$  é aquela da variável medida, enquanto que a unidade de  $Y_i$  será a apropriada para a saída direta do sensor;
2. Dados obtidos são grafados para determinar a função de transferência;
3. Ajusta-se uma reta aos dados (método dos mínimos quadrados). Obtém-se uma função biunívoca entre a saída  $Y_i$  e a entrada  $X_i$ ;  $\hat{Y}_i = a_0 + a_1 \cdot X_i$
4. Inverte-se a equação de transferência para obter-se a equação de calibração.  $X_i = c_0 + c_1 \cdot Y_i$

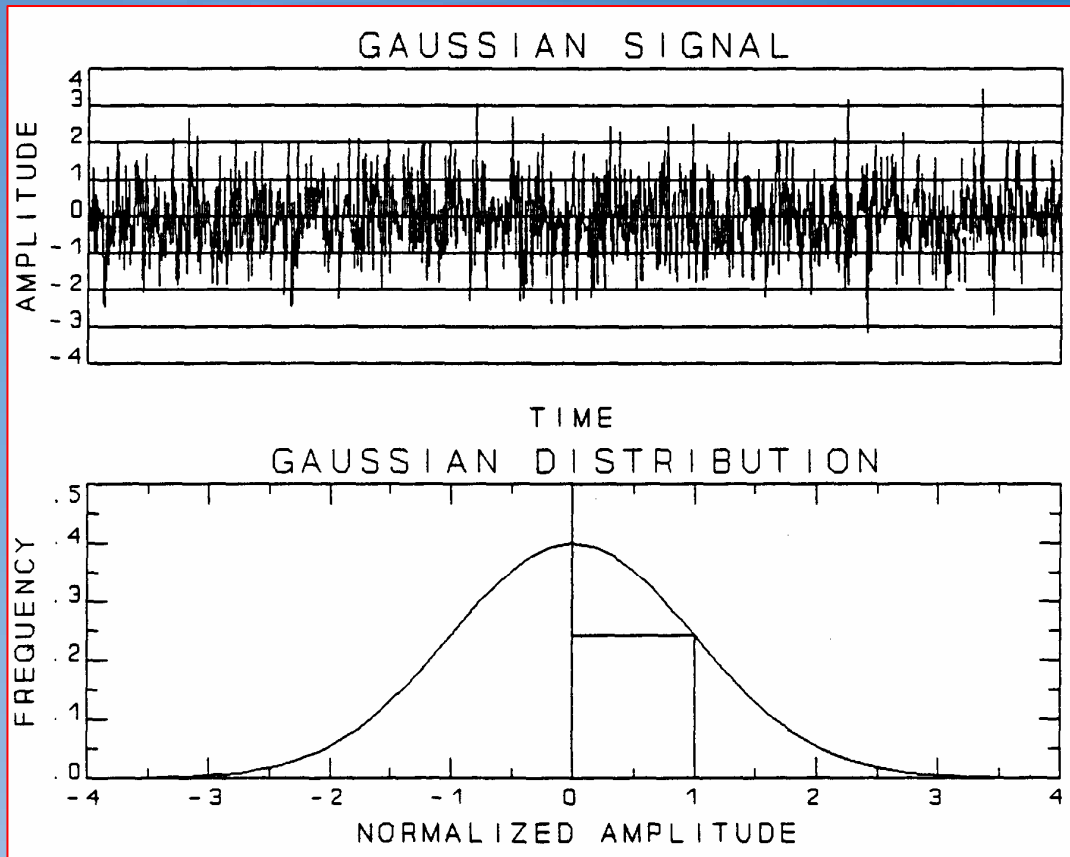


A sensibilidade estática é a inclinação da reta  $a_1$  e  $a_0$  é o offset da equação de transferência;

O erro do instrumento é definido como:

$$e_n = X_{1n} - X_{in}$$

Erros de instrumentos são frequentemente modelados com uma distribuição gaussiana.



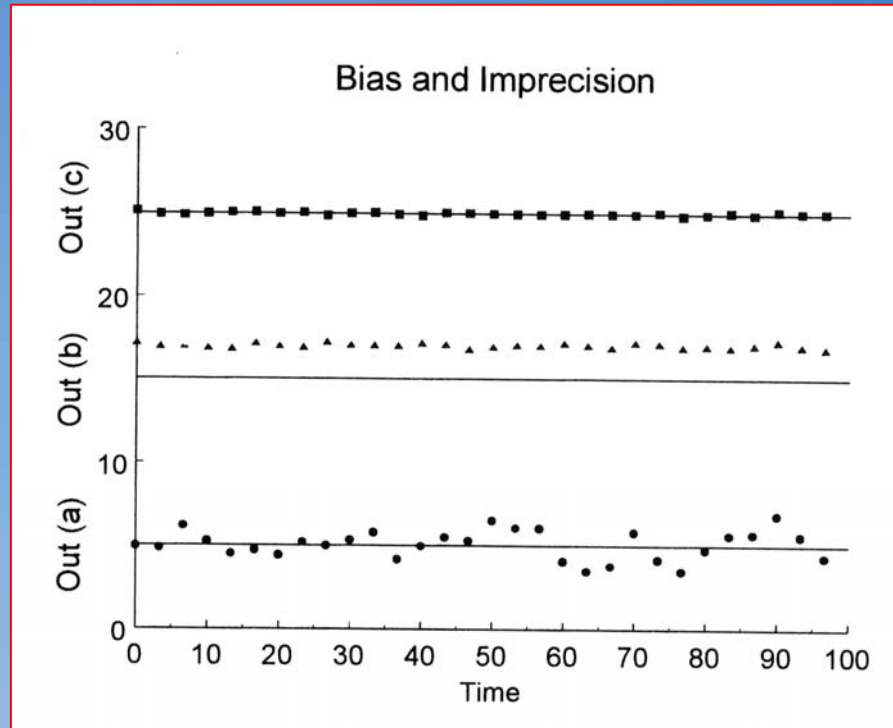
Exemplo de um sinal com distribuição gaussiana no gráfico superior e respectiva distribuição no gráfico inferior. A amplitude normalizada é  $(x - \mu) / \sigma$ .

Definições:

Viés:  $\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e_n$

Imprecisão:  $2s_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (e_n - \bar{e})^2}$

Inexatidão = viés  $\pm$  imprecisão



**Viés e imprecisão em um sensor. Painel (a) sensor sem viés mas impreciso; (b) preciso mas com viés; (c) sem viés e baixa imprecisão.**

# Múltiplas fontes de erros e incertezas

Raiz da Soma do Erro Quadrático (RSEQ):

$$RSEQ = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}$$

Exemplo: barômetro

Fonte de erro

Imprecisão

Linearidade

0.15 hPa

Histerese

0.03 hPa

Repetitividade

0.03 hPa

Incerteza na calibração

0.20 hPa

Dependência da temperatura

0.10 hPa

Estabilidade de longo período

+0.20 hPa/ano

RSEQ

0.3 hPa + 0.2 hPa/ano

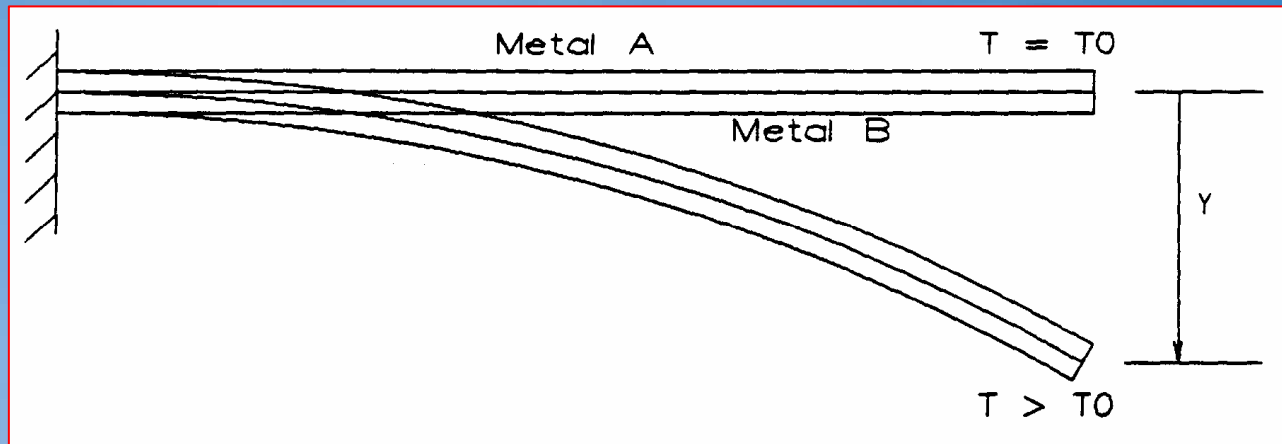
# *Termometria*

Sensores para medição de temperatura podem ser classificados de acordo com o princípio físico: expansão térmica, efeito termo-elétrico, resistência elétrica e outros.

Escala	Símbolo	gelo	Ponto triplo	Vapor
Termodinâmica	K	273.15	273.16	373.15
Celsius	° C	0.00	0.01	100.00
Fahrenheit	° F	32.00	32.01	212.00

## Expansão térmica

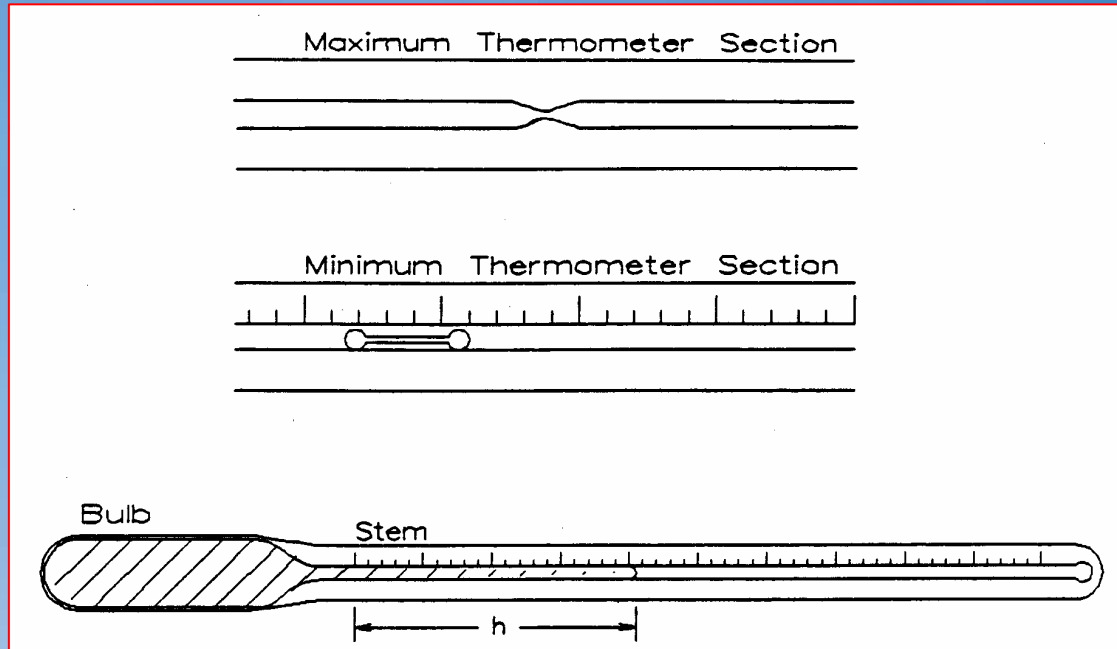
- bimetálico



*Uma tira bimetálica: uma extremidade fica fixa enquanto a outra fica livre para defletir com as variações de temperatura a partir da temperatura a qual a tira foi formada.*

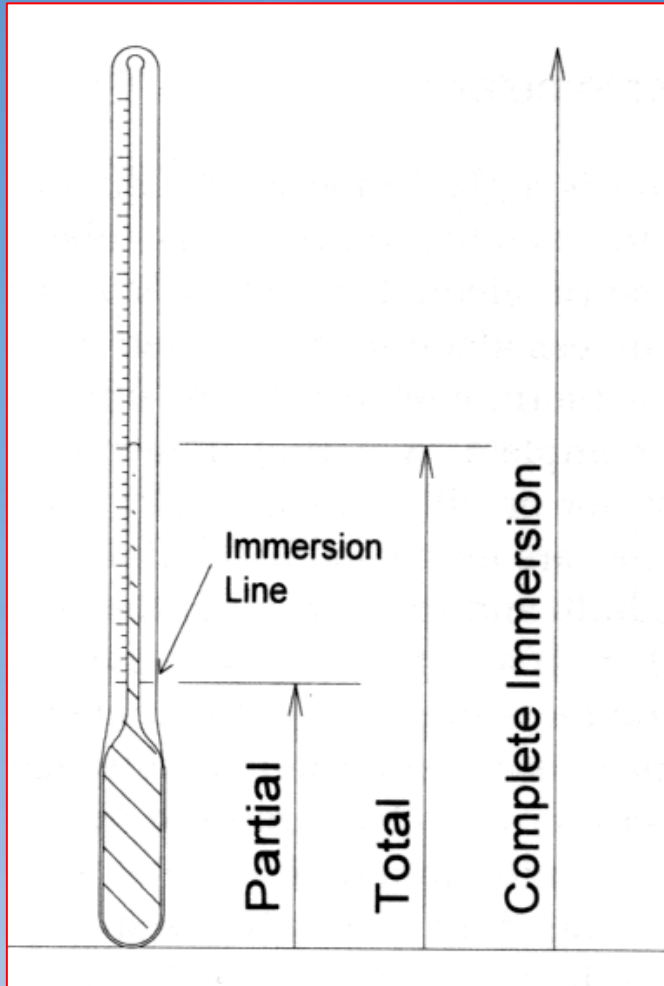
# Expansão térmica

- Termômetro tipo líquido-em-vidro



*Termômetro de vidro com bulbo e coluna para indicar altura da coluna ( $h$ ). Acima, detalhes de um termômetro de máxima (estrangulamento) e de mínima (alteres).*





Termômetros de imersão parcial, total e completa.

Expansão do fluido termométrico e o vidro devido ao aumento de temperatura:

Sensibilidade estática de um termômetro de vidro:

$$S = \frac{dh}{dT} = \frac{V_0 \beta_d}{\pi r^2}$$

$$\Delta V_d = V_0 \beta_d \Delta T = \pi r^2 \Delta h$$

$\beta_d$  = coeficiente diferencial de expansão volumétrica;

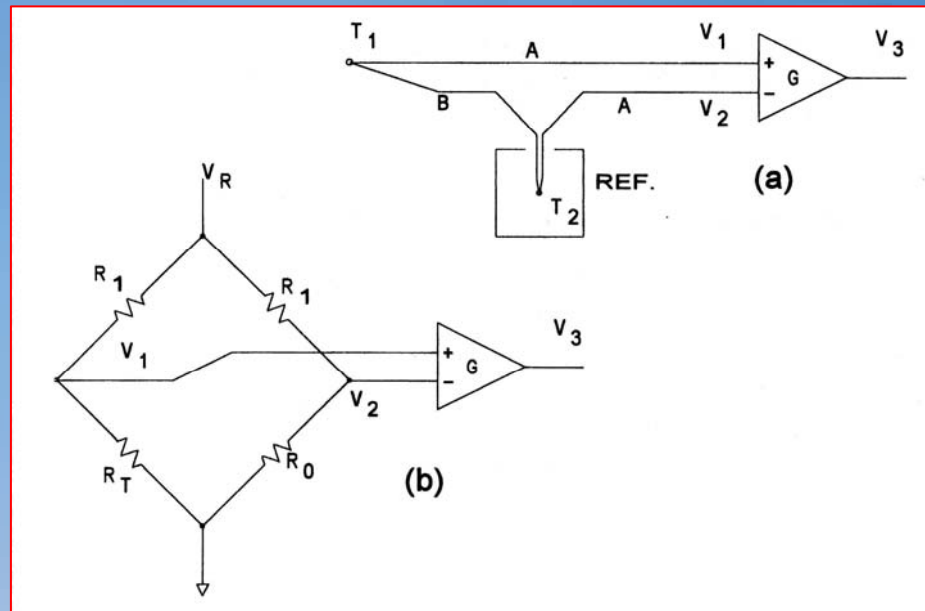
$V_d = V_0$  quando  $\Delta T = 0$ ;

$r$  = raio do capilar;

$\Delta h$  = variação na altura da coluna.

# Sensores termo-elétricos e de resistência elétrica

- termo-par, RDT e termistor

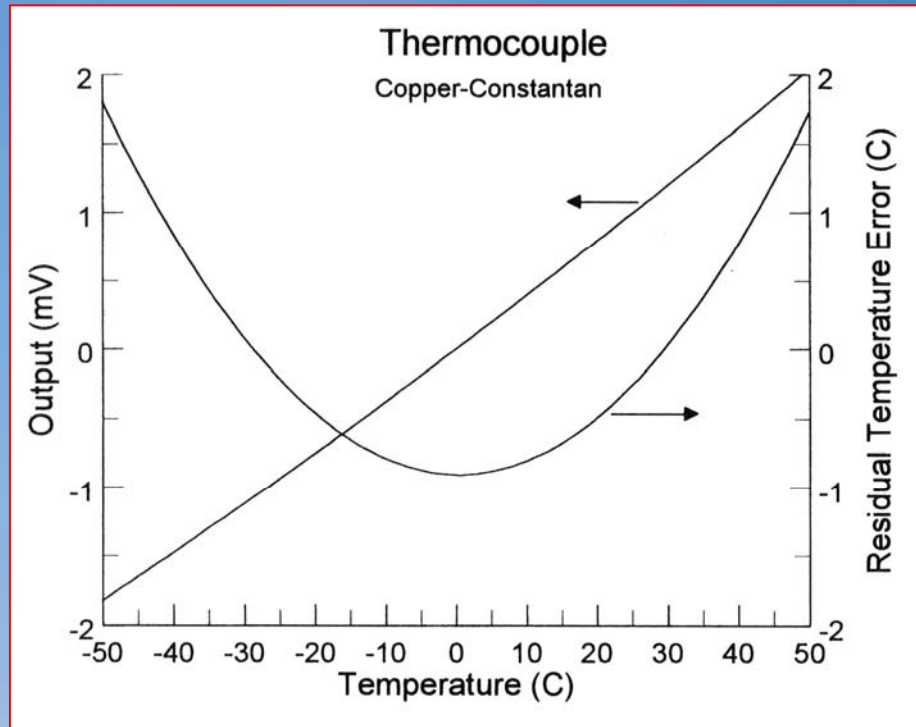


Termo-par (acima) e RTD e amplificador (abaixo).

## Alguns tipos de termopar

Tipo	Metal
T	Cobre x Constantan
J	Ferro x Constantan
E	Níquel (10% de cromo) x Constantan
K	Níquel (10% de Cromo) x Níquel (5% de Alumínio e Silício)

- A FEM produzida pelas duas junções do termopar é  $\Delta V = V_1 - V_2$ ;
- A FEM só aparecerá se nenhuma corrente for permitida fluir no circuito;
- O amplificador (G) deve ter uma impedância muito alta;
- Se uma corrente fluísse pelo circuito, então uma junção seria aquecida e a outra esfriada (efeito “Peltier”).

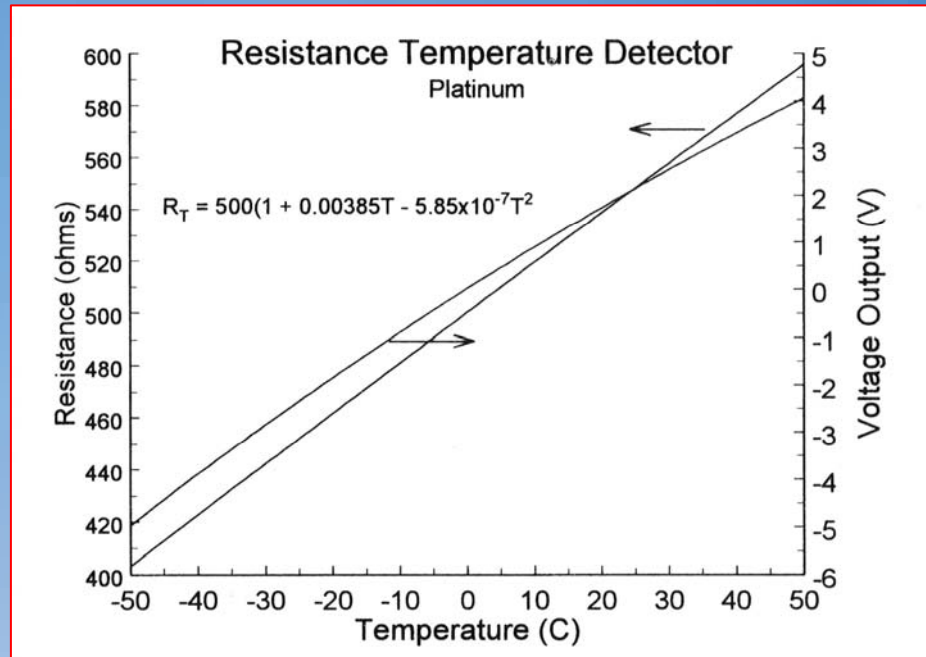


Saída de um termopar de cobre-constantan com um amplificador e erro devido a não linearidade.

Saída de um termopar cobre-constantan para junção de referência a 0 °C

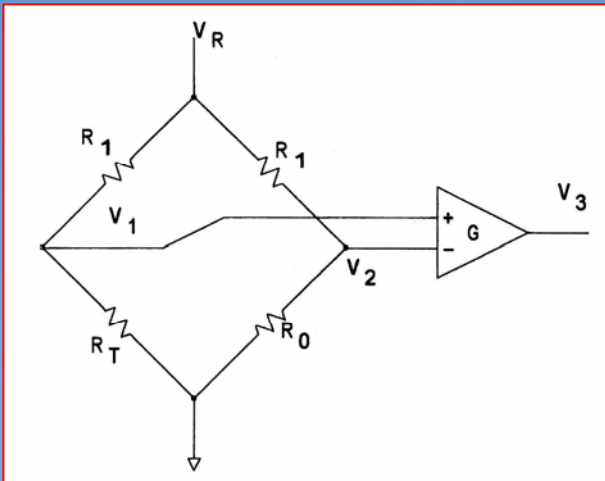
T (°C)	$\Delta E = E_1 - E_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$V_3$ (V)
-30	-1122	-2.756
-20	-756	-1.858
-10	-382	-0.939
0	0	0.000
10	390	0.959
20	789	1.939
30	1196	2.939
40	1611	3.959
50	2035	4.999

- Num sensor de resistência elétrica, a mesma varia em função da temperatura. Este tipo de sensor é denominado de RTD.



Resistência e voltagem de saída de um RTD de platina de 500  $\Omega$  em circuito de ponte com amplificador em função da temperatura .





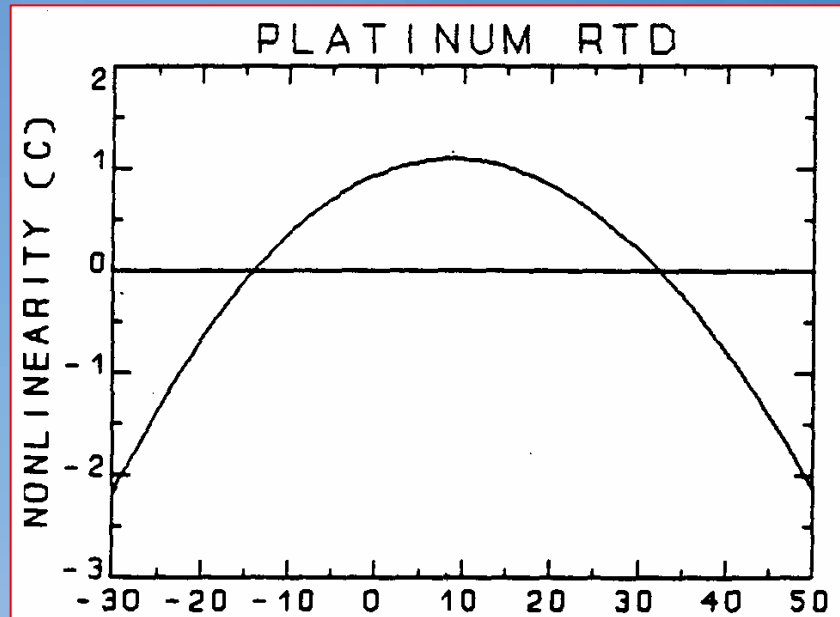
Voltagem de saída do amplificador (G):

$$V_3 = GV_R \left[ \frac{R_T}{R_T + R_0} - \frac{1}{2} \right]$$

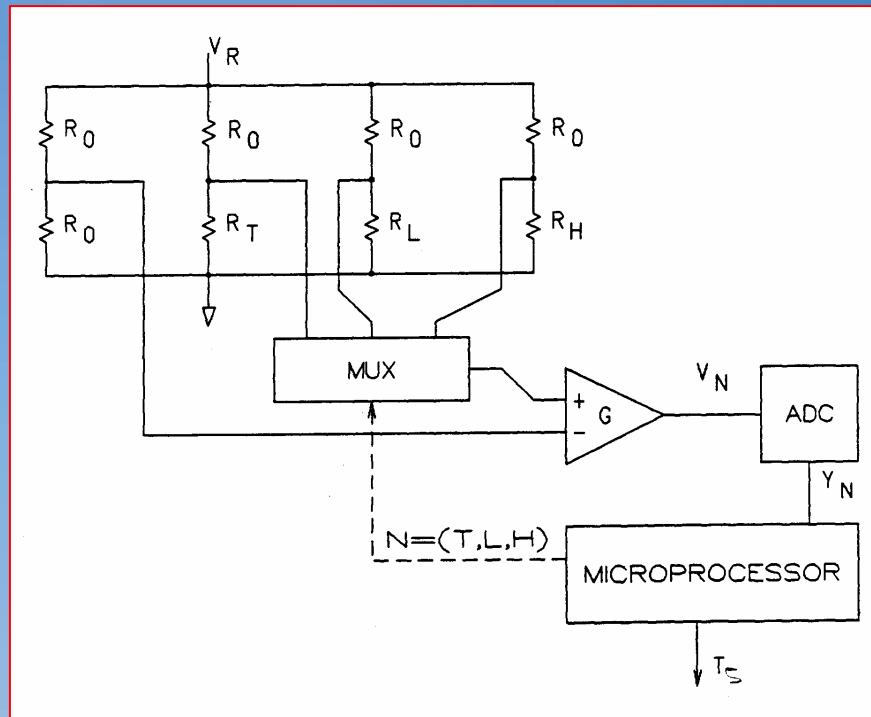
Circuito de ponte de um RTD que converte resistência para voltagem que é amplificada (G).

Sensibilidade estática:

$$S = \frac{dV_3}{dT} \approx \frac{GV_R R_0^2 a}{(R_T + R_0)^2}$$

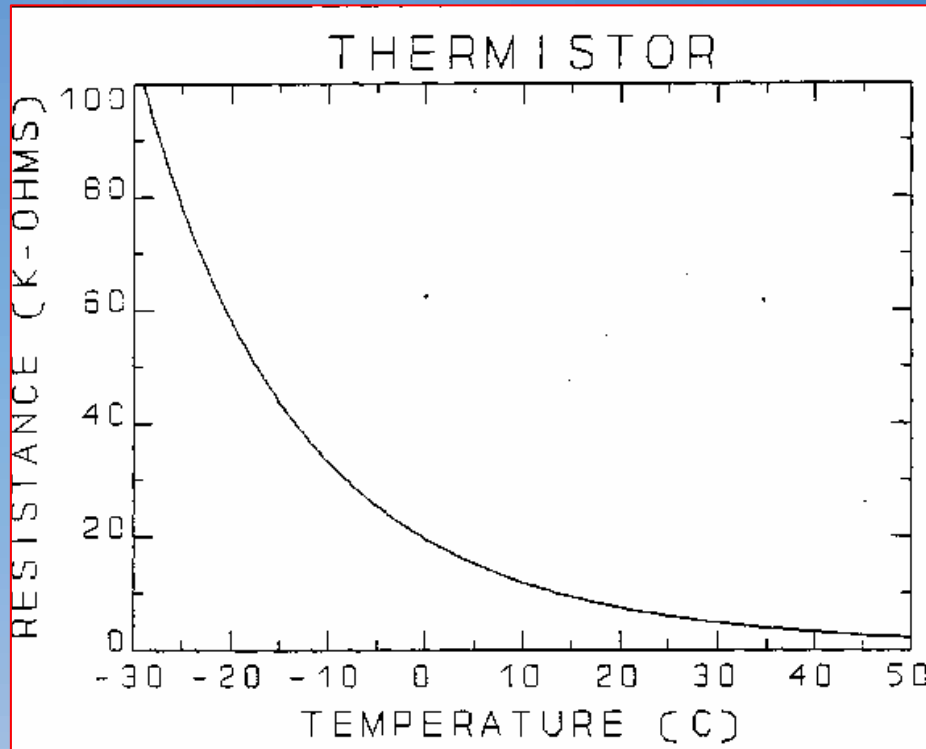


Não linearidade residual de um RTD de platina em um circuito de ponte.

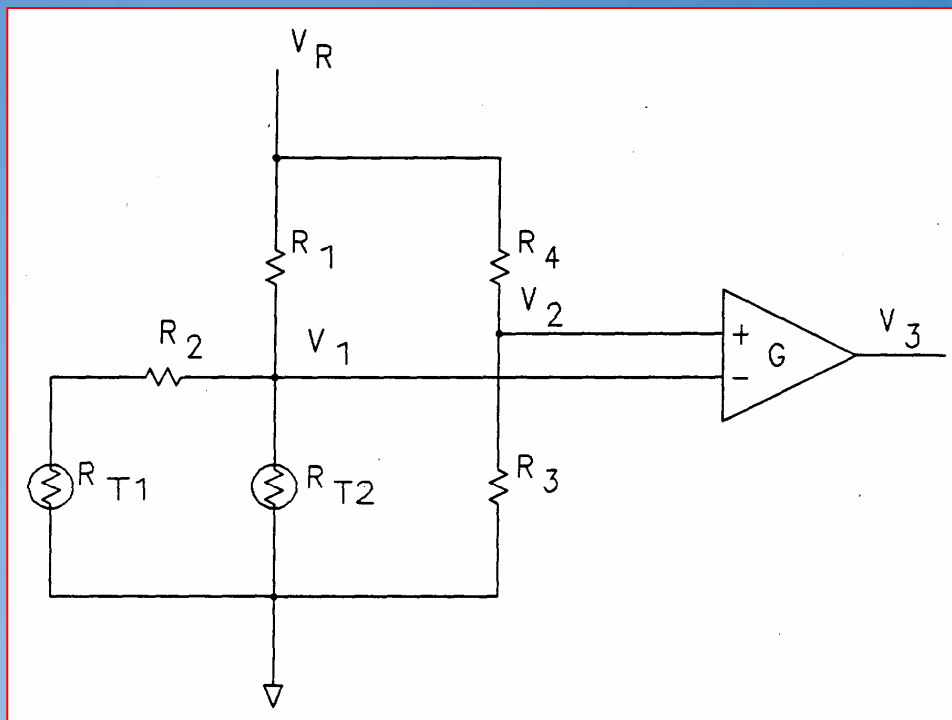


Circuito de ponte de múltiplas pernas que, junto com um microprocessador, será insensível a pequenas mudanças na voltagem de referência e no ganho do amplificador.

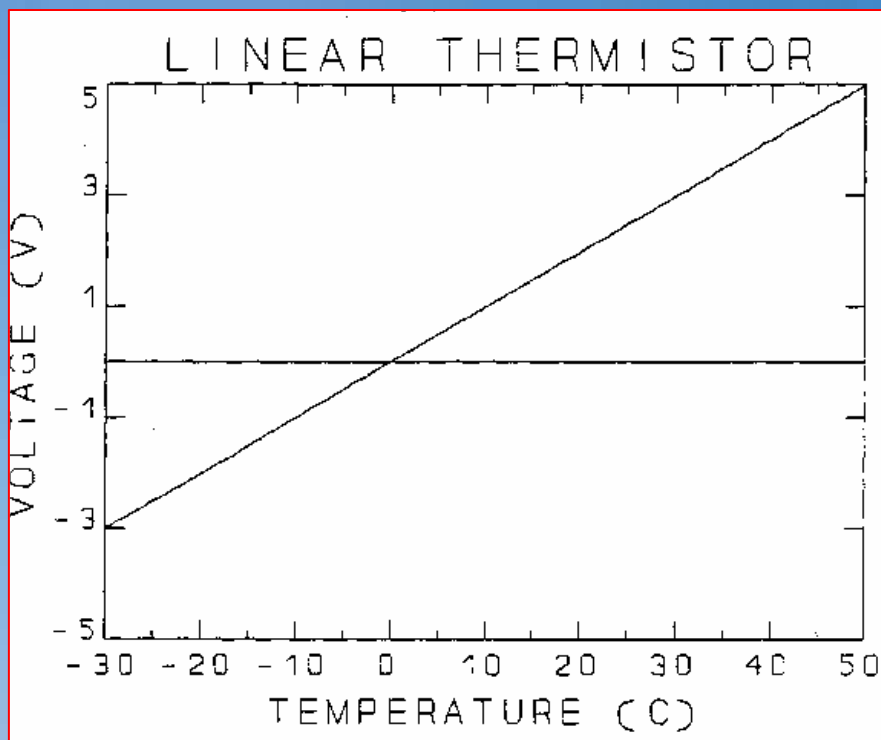
- Sensores resistivos semicondutores - termistores.



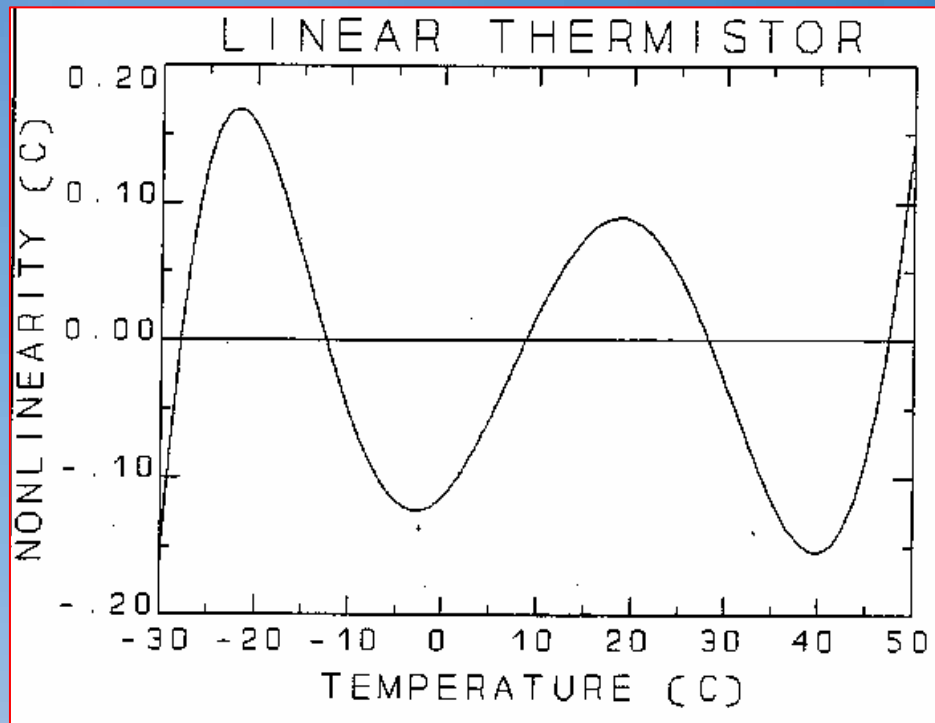
Resistência do termistor x temperatura



Circuito quase linear com dois termistores com divisor de voltagem para remover o *off-set* e um amplificador.



Voltagem de saída de um termistor linear com circuito de ponte e amplificador em função da temperatura



Erro devido a não linearidade residual de um termistor "linear" em função da temperatura.

## Comparação de Sensores de Temperatura

- custo, qualidade, tamanho e operação

Exemplo: ganho do amplificador (-5V a 5V)

Termopar de cobre constantan  $G=2457$

RTD de platina  $G= 114$

Termistor linear  $G= 14.7$  (melhor)



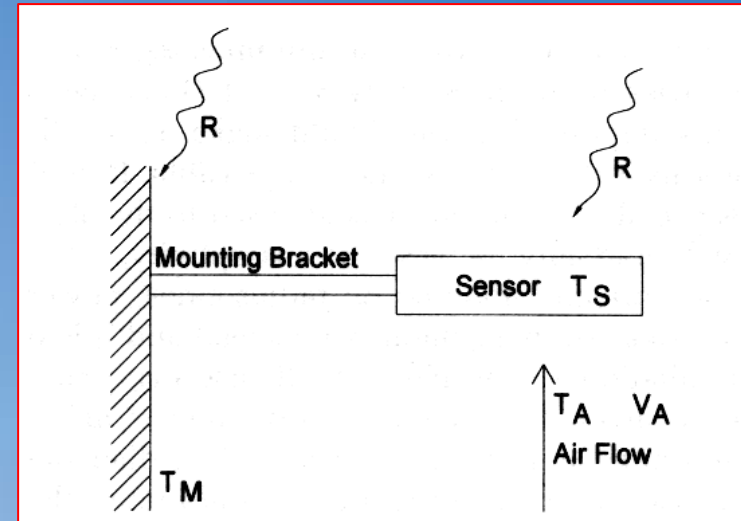
# Exposição de Sensor de Temperatura

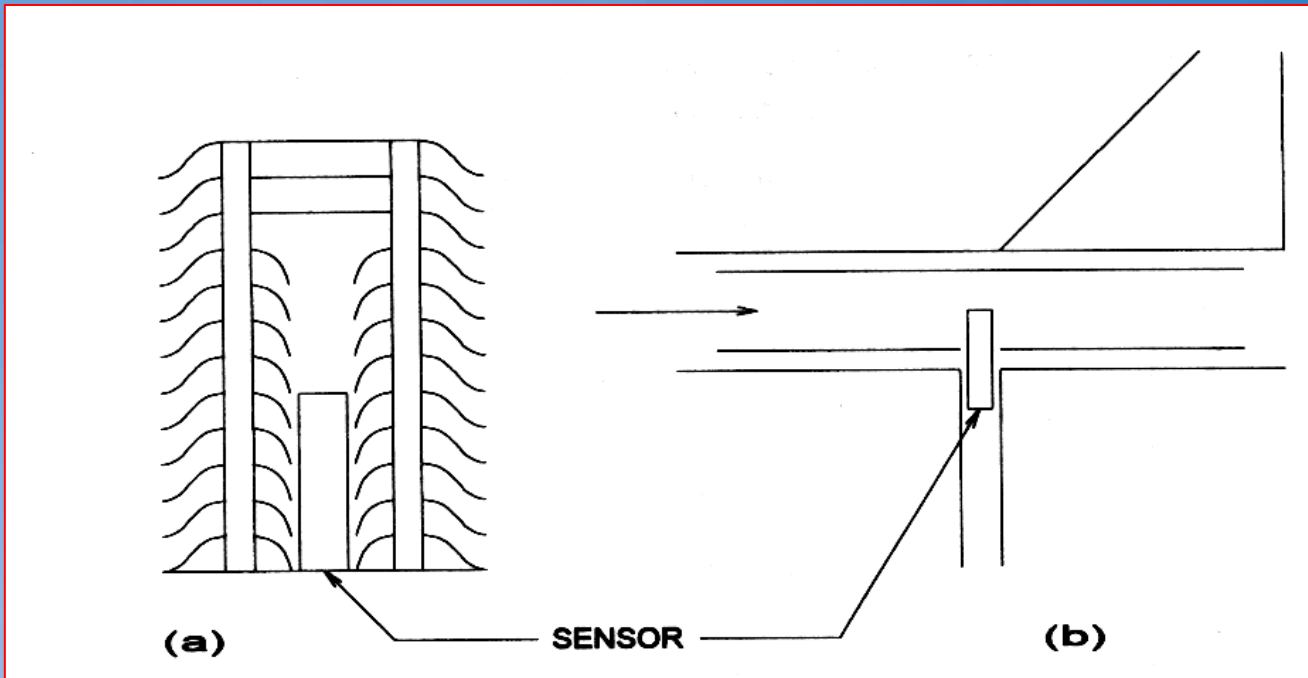
Minimizar fluxos de calor por:

- Condução (suportes)
- Radiação (solar)

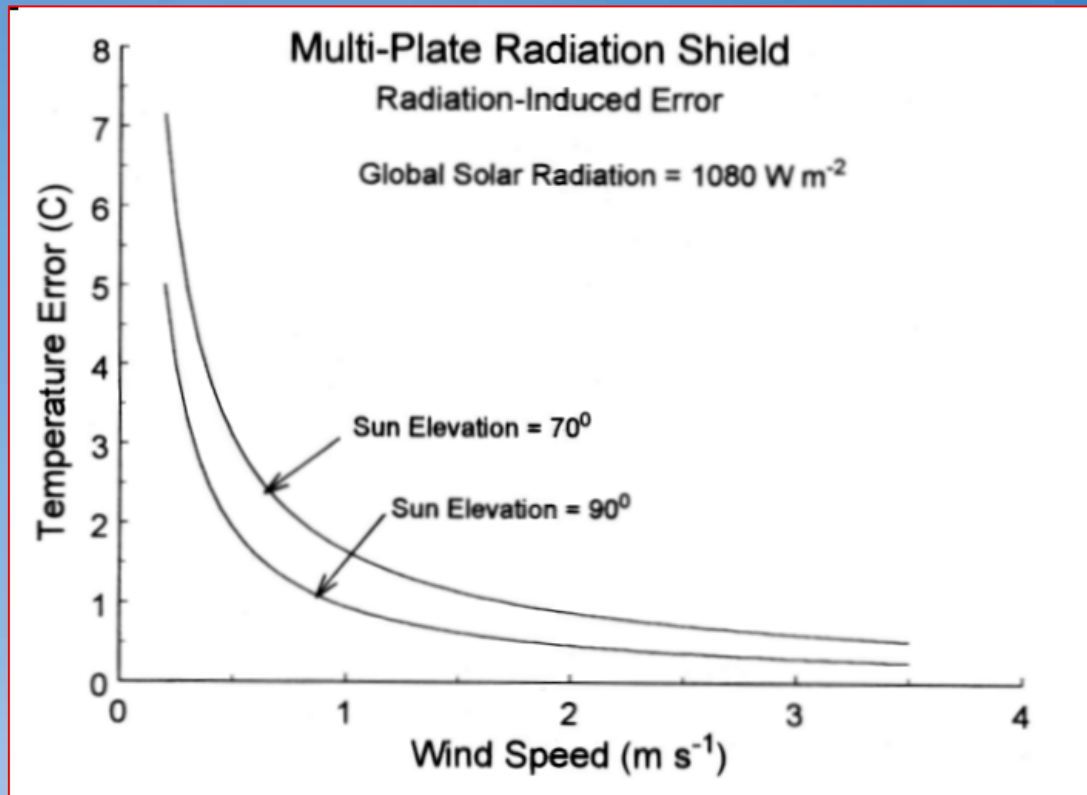
Maximizar fluxo de Ar por:

- Convecção (circulação)





## Tipos de abrigos para sensores de temperatura e umidade



Erro de temperatura induzido pela radiação global num abrigo Gill.

# *HIGROMETRIA*

Medir a quantidade de vapor d'água por meio do:

- Peso;
- Volume;
- Pressão parcial;
- Fração da pressão de vapor de equilíbrio.

## Pressão de vapor d'água

$$e_s = e_e \exp \left[ \frac{L_o}{R_o} \left( \frac{T - T_o}{TT_o} + \alpha \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) - \frac{\alpha(T - T_o)}{T} \right) \right]$$

$T_o = 273,15 \text{ K}$ ;

$L_o = 2,5008 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ , calor latente de vapor d'água em  $T_o$ ;

$R_v = 461,51 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , constante do gás para o vapor d'água;

$e_e = 611,21 \text{ Pa}$ , pressão de vapor de equilíbrio em  $T_o$ ;

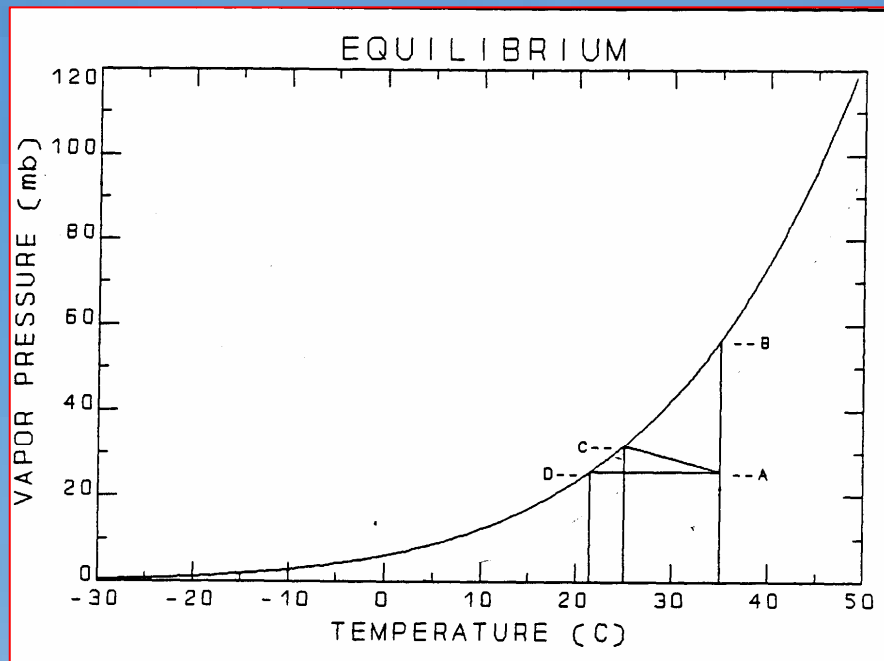
$\alpha = -9,477 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , coeficiente do calor latente.

Equação de Buck:

$$e_s = 6,1121 \exp\left(\frac{17,502T}{240,97 + T}\right)$$

Válida para -30 a 50°C

Temperatura (°C)	Resultados experimentais	Erro na aproximação Buck (mb)	Erro teórico Equação (mb)
0	6,1121	0,0000	0,0000
30	42,4520	-0,0169	-0,0789
50	123,4476	0,2447	-0,5831



Pressão ambiente de 1000 mb:

A (24,9 mb, UR = 44%)  $T_d = 21,0 \text{ }^\circ\text{C}$

B (56,5 mb, UR = 100%)  $T_d = 35,0 \text{ }^\circ\text{C}$

C (31,3 mb, UR=55%)  $T_w = 24,7 \text{ }^\circ\text{C}$

Pressão de vapor de saturação como  
uma função da temperatura do ar.

## Definições:

Umidade absoluta:  $d_v$ , razão entre a massa de vapor d'água,  $m_v$ , e o volume total de ar úmido,  $V$ , em unidades de  $\text{kg m}^{-3}$ ;

Temperatura de ponto de orvalho:  $T_d$ , temperatura na qual o vapor d'água ambiente se condensa;

Temperatura de bulbo seco:  $T$ , temperatura do ar ambiente medida pelo termômetro de bulbo seco de um psicrômetro;

Temperatura do bulbo úmido:  $T_w$ , temperatura medida pelo termômetro de bulbo úmido de um psicrômetro;



Razão de mistura:  $w$ , razão entre a massa de vapor d'água,  $m_v$ , e a massa de ar seco,  $m_d$ ;

Umidade relativa:  $UR$  ( $100 e/e_s$ ) razão entre a pressão de vapor real  $e$  e a de saturação,  $e_s$ , à temperatura do ar  $T$ ;

Umidade específica:  $q$ , razão entre a massa de vapor d'água,  $m_v$ , e a massa de ar úmido,  $m_v + m_d$ ;

Pressão de vapor:  $e$ , pressão parcial do vapor d'água expressa em mb.

Fórmulas aproximadas:

$$w = 0,622 e / (p - e)$$

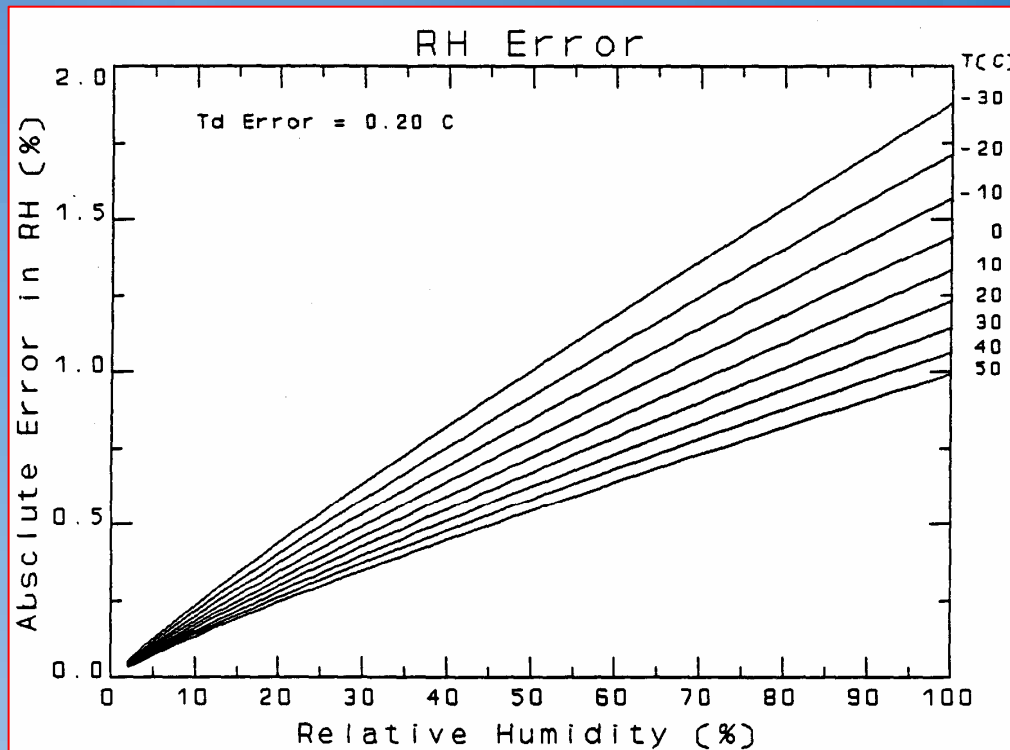
$$e = w p / (0,622 + w)$$

$$q = w / (1 + w), \text{ quando } e \ll p, w \approx q \approx 0,622 e/p$$

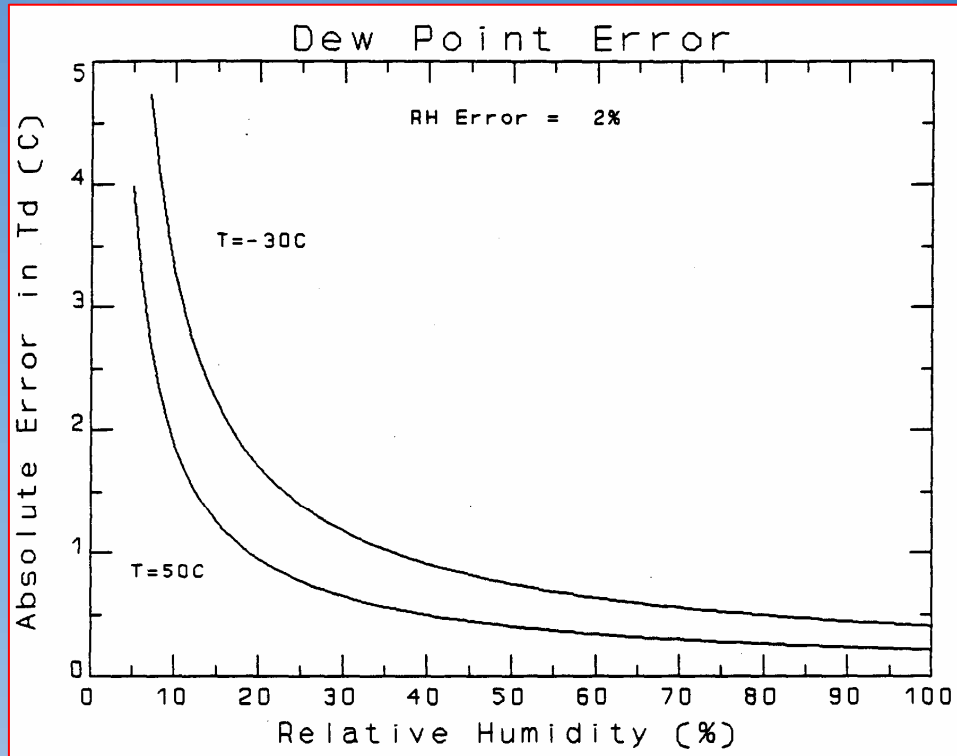
$$d_v = 0,2167 e / (T+273,15) \text{ kg m}^{-3}$$

Temperatura em graus Celsius

Pressão em milibares



Conversão do erro no ponto de orvalho de  $\Delta T_d = 0.20 \text{ }^\circ\text{C}$  para erro na umidade relativa



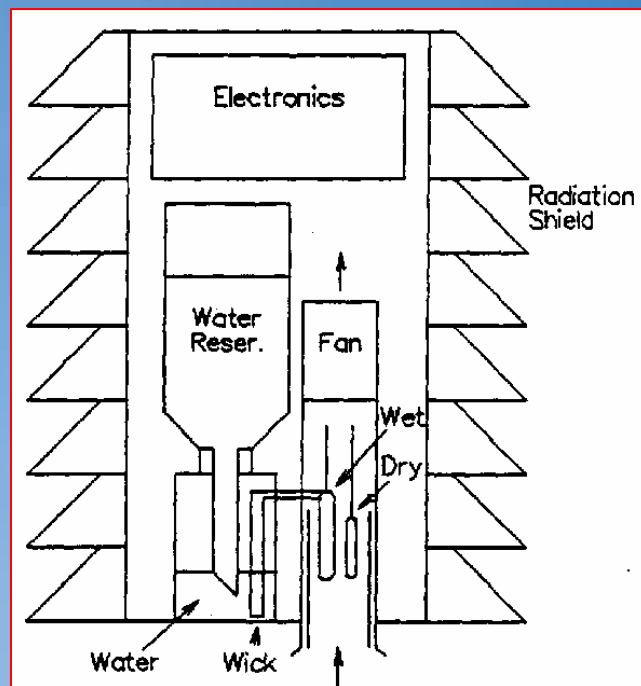
Conversão de 2% de erro na umidade relativa para o erro equivalente na temperatura do ponto de orvalho.

## Métodos de medição

### •Adição de vapor d'água no ar

**Psicrometria** - método de adicionar vapor d'água no ar úmido enquanto não é alcançado o equilíbrio.

- A umidade é obtida pelo esfriamento do bulbo úmido em relação a temperatura do ar ambiente;
- O psicrômetro é composto por dois sensores de temperatura expostos a um fluxo de ar ambiente;
- O sensor de bulbo seco mede a temperatura de ar ambiente;
- O sensor de bulbo úmido, coberto com uma musselina umedecida com água destilada, mede a temperatura devida a evaporação da água;
- A musselina pode ser umedecida intermitentemente, se imerso em água, ou continuamente, por um fluxo capilar no material da musselina.
- A ventilação forçada permite melhor desempenho..



Psicrômetro para uso em uma estação meteorológica automática. O reservatório d'água é suficiente para uma a duas semanas de operação contínua.

## Fontes de erro de um psicrômetro:

- Compatibilidade dos sensores de temperatura
- Taxa de ventilação
- Radiação incidente nos sensores de temperatura
- Tamanho, forma, material e umidificação da musselina
- As posições relativas do sensor de bulbo úmido e seco
- Pureza da água da musselina úmida

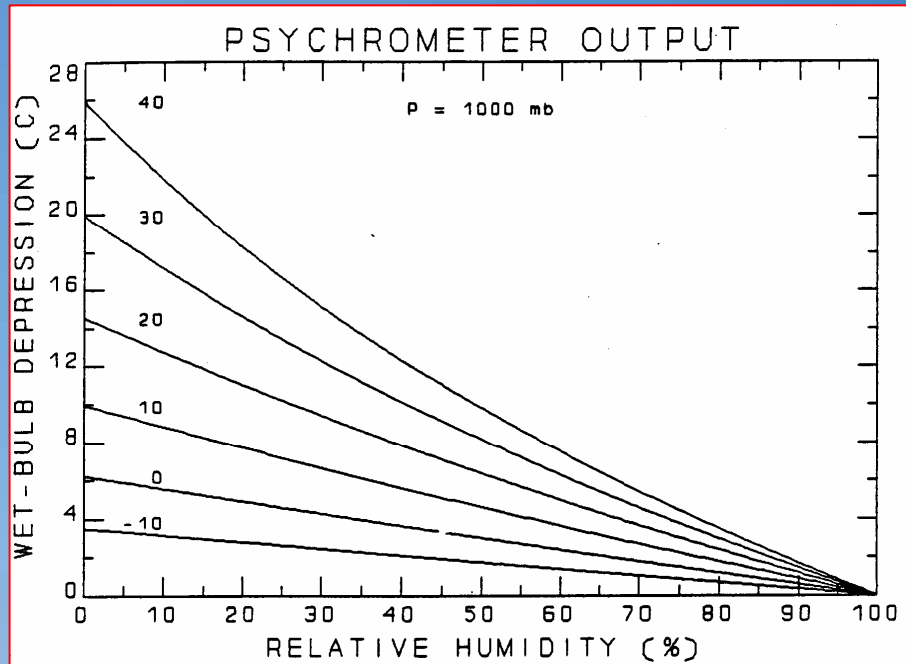
Fórmula psicrométrica:  $e = e_{sw} A p (T - T_w)$

Temperaturas em °C

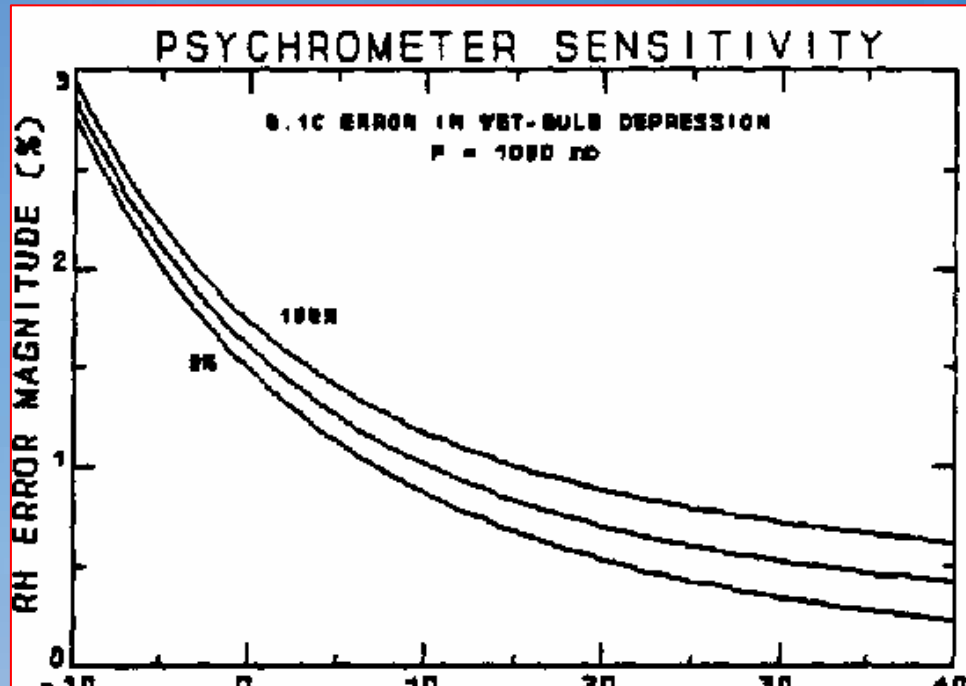
Pressões em mb

$A = 0,00062$ , coeficiente psicrométrico





Saída de um psicrômetro; depressão de bulbo úmido em função da umidade relativa. Cada curva indica a depressão para temperaturas ambientes entre  $-10$  e  $40^{\circ}\text{C}$



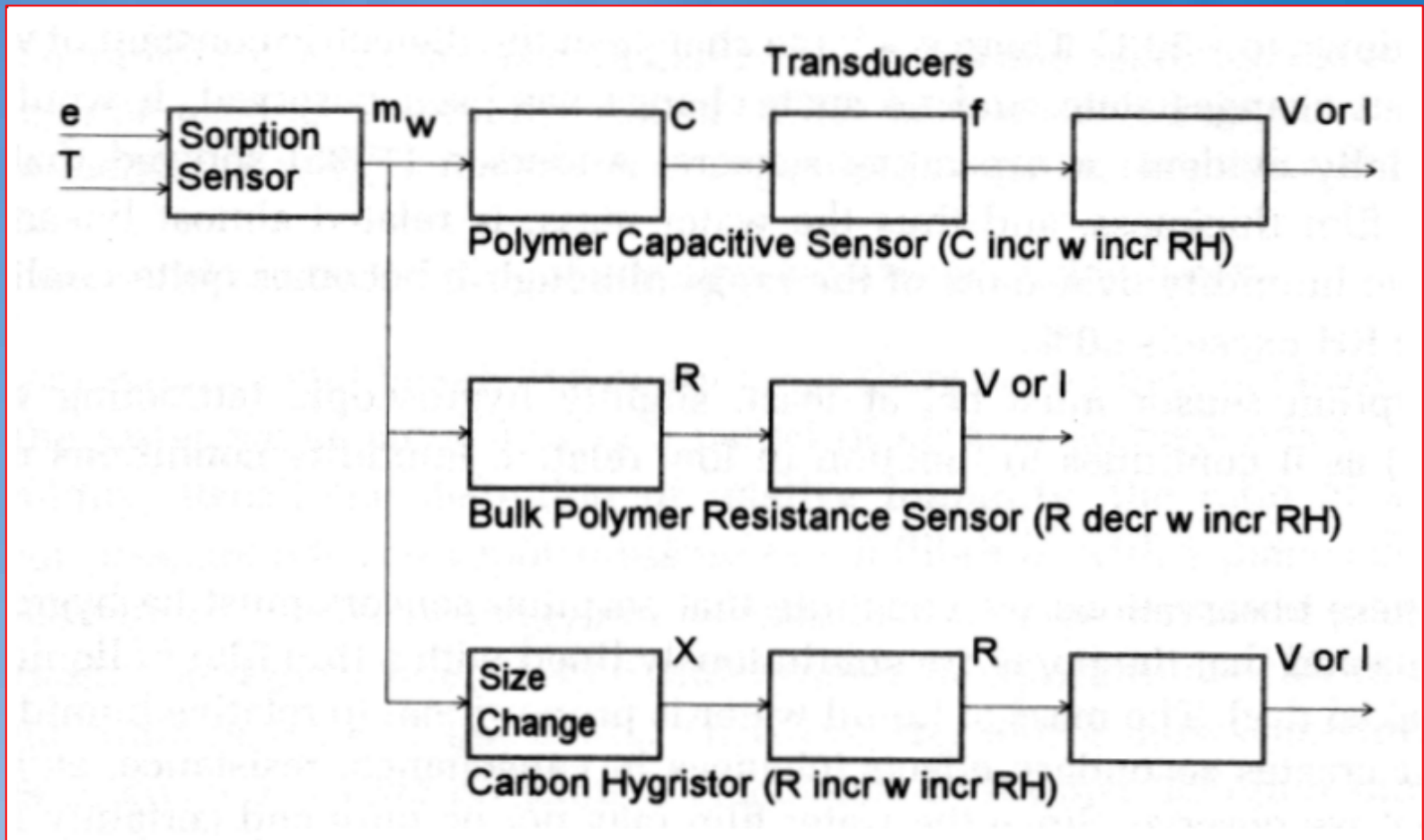
Erro induzido em um psicrômetro devido a 0.1 °C de erro na depressão do bulbo úmido.

## Métodos de medição

- Absorção de vapor d'água no equilíbrio
- O vapor d'água interage com quase todas as substâncias;
- Processos de absorção ou adsorção e reação de química;
- material com mudança reversível e reproduzível pode ser usado como um sensor de umidade.

Higrômetros elétricos: sensores que utilizam uma substância que exhibe uma mudança em um parâmetro elétrico como a resistência ou a capacitância.

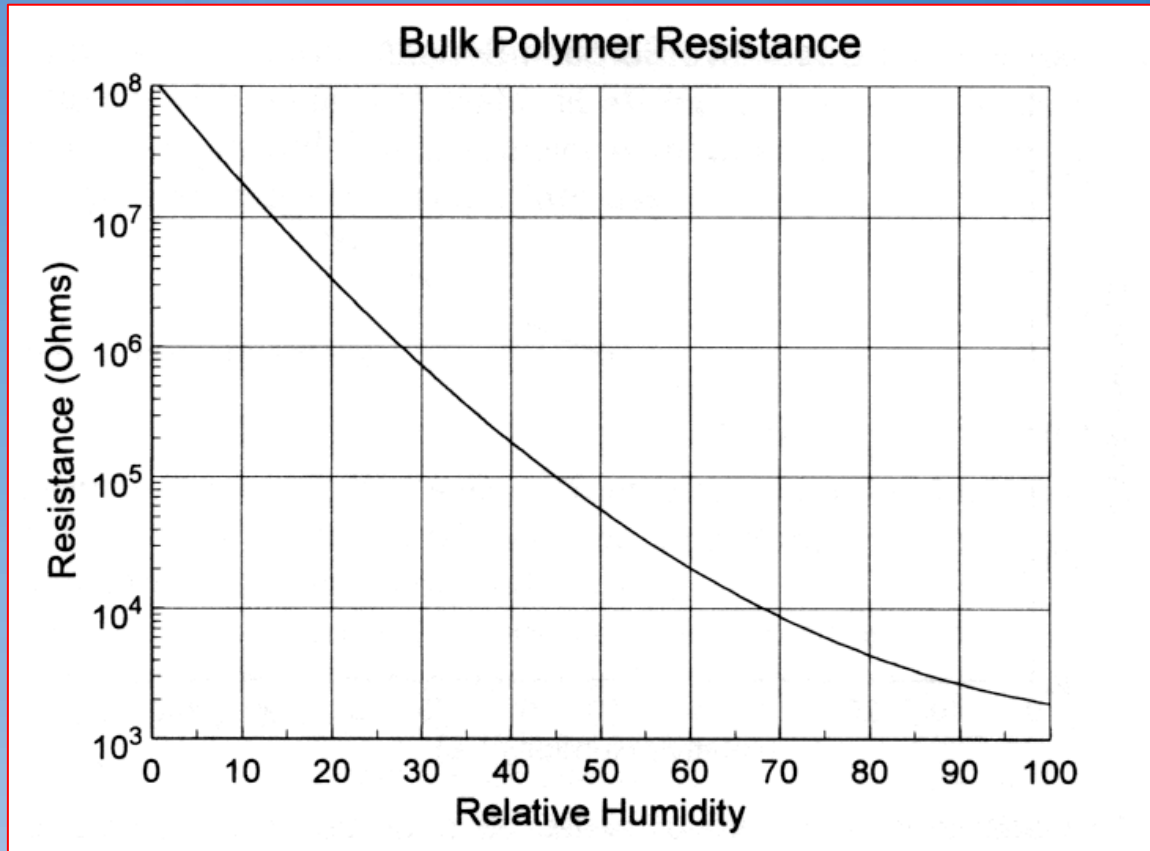
Há quatro tipos básicos: soluções eletrolíticas aquosas, sólidos impermeáveis, sólidos porosos, e materiais dimensionalmente variáveis.



Modelo funcional de alguns higrômetros elétricos.

- A **condutividade** de uma solução aquosa eletrolítica é uma função de sua concentração que, por sua vez, é uma função da umidade relativa e da temperatura.
- Um **filme fino** de uma solução pode ser aplicado à superfície de um material isolante impermeável e a sua condutividade pode ser medida.
- O **substrato** é apenas um veículo para segurar a solução e permite que esta responda à umidade ambiente.
- A solução aquosa eletrolítica pode ser dispersa em uma camada orgânica e então aplicada a um substrato isolante ou pode ser usado para impregnar fibras orgânicas porosas.

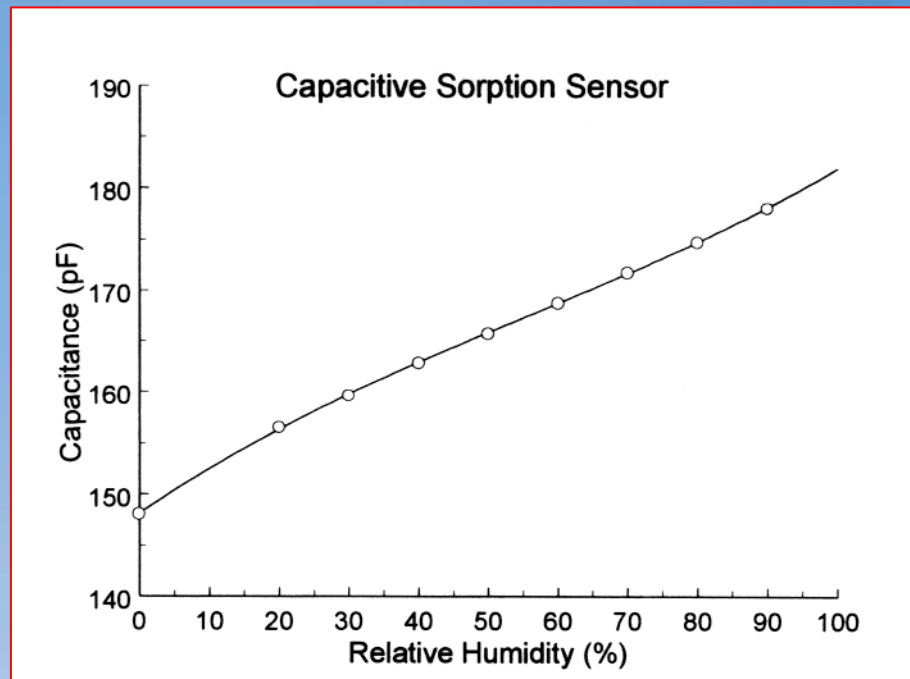
- O vapor d'água é adsorvido na superfície de **sólidos impermeáveis** que formam um filme cujas propriedades são uma função da umidade relativa ambiente e da temperatura.
- Este **filme** provê um caminho para a passagem da corrente elétrica.
- Quantidades minuciosas de **sais solúveis** e gases presentes na superfície contribuem para a condutividade.
- Na **célula de Pope**, resina de troca de íons, a resistência aumenta com o decréscimo da temperatura.



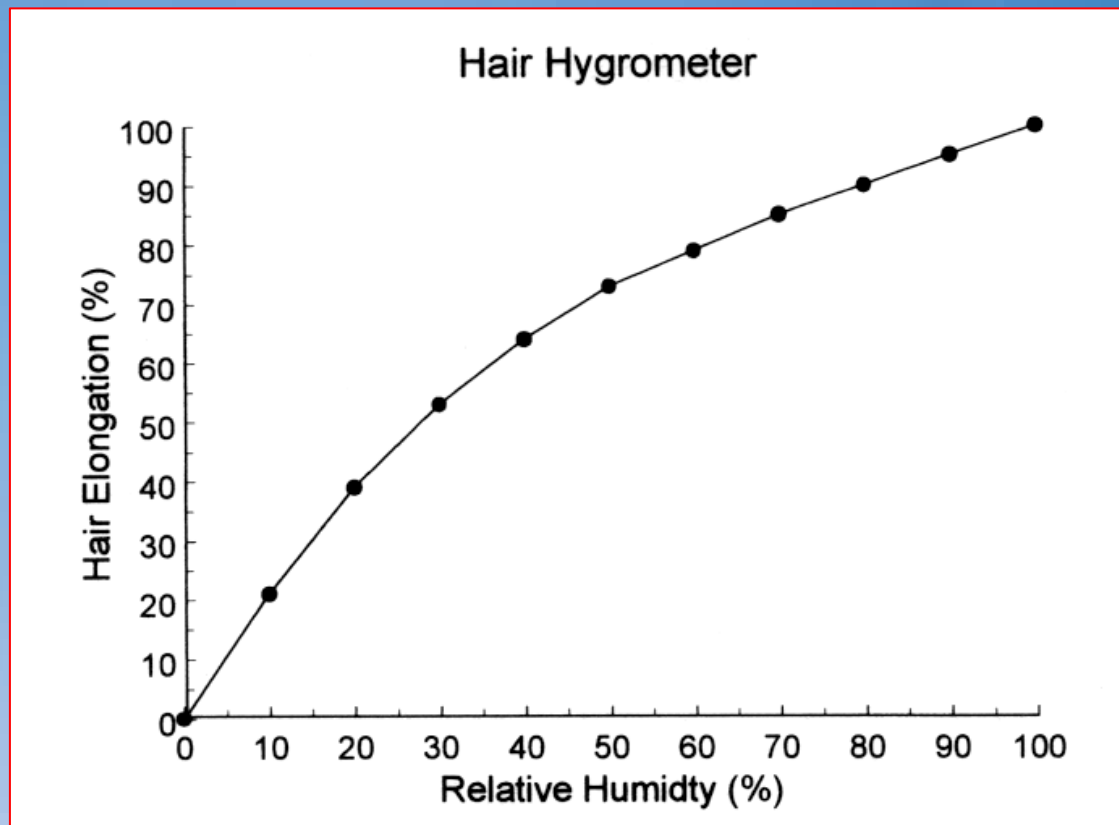
Resistência de polímero em função da umidade relativa



**Humicap** - utiliza a variação da capacitância num filme de polímero fino que mede a umidade relativa entre 0 a 100% UR para temperatura de -40 a 80 °C, com um coeficiente de temperatura de 0.05% UR por °C.



O vapor d'água também é absorvido por materiais porosos que mudam de resistividade pela variação de volume. Exemplos argila, fibras naturais e tecidos.



**Curva de transferência de um higrômetro de cabelo.**

## Métodos de medição

- Propriedades físicas do ar úmido

Higrômetro espectroscópico: mede a atenuação de certas bandas do espectro de radiação eletromagnética devido a absorção do vapor d'água.

Estas bandas correm no ultravioleta e no infravermelho.

Lei de Beer:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp\left(-k_{\lambda} d_v x\right)$$

$x$  = distância (m);

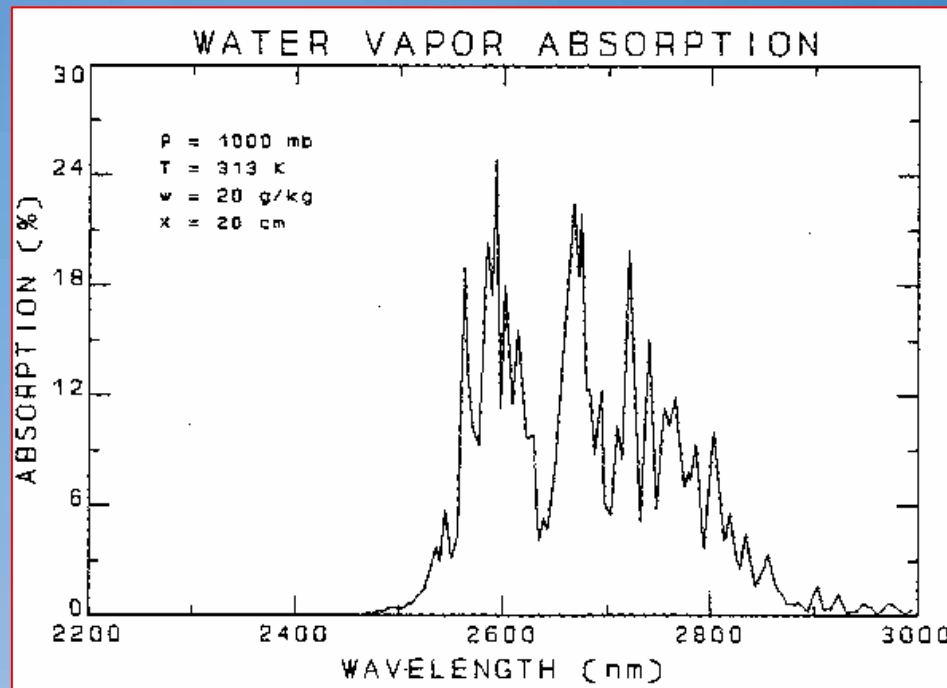
$d_v$  = umidade absoluta ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $p = 1013,25$  mb,  $T = 273,15$  K;

$k_{\lambda}$  = coeficiente de absorção em  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ;

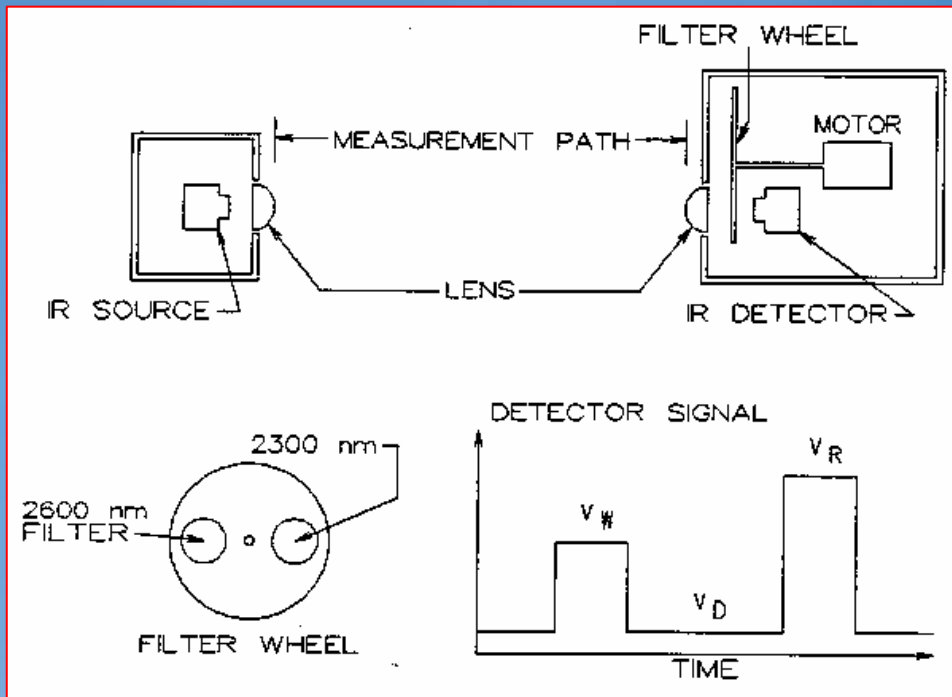
$I$  = intensidade da fonte;

$I_0$  = intensidade da luz depois de atravessar a atmosfera;

$a = (1 - \tau)$ , a absorção;



**Absorção de vapor d'água por radiação infravermelha. São mostradas bandas com uma pequena ou nenhuma absorção e outras com uma forte absorção.**



$V_W$  - sinal de saída com filtro de absorção,

$V_D$  - sinal quando o feixe não passa por nenhum dos dois filtros;

$V_R$  - sinal de saída com filtro de referência.

Esquema de uma possibilidade de implementação para um higrômetro de infravermelho simples.

## Equação de transferência do higrômetro IR:

$$V_{\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{a\lambda} R_{\lambda} + B$$

$I_{0\lambda}$  - intensidade da fonte em na banda de referência ou de absorção;

$\tau_{g\lambda}$  - transmissividade dos componentes ópticos (janelas e lente);

$\tau_{a\lambda}$  - transmissividade do caminho atmosférico absorvente;

$R_{\lambda}$  - responsividade do detector;

$B$  - viés devido ao vazamento de luz, à corrente de fuga do detector etc.

## Normalização do Sinal:

$$V_n = \frac{V_w - V_d}{V_r - V_d} = \frac{I_{ow} \tau_{gw} \tau_{aw} R_w}{I_v \tau_{gr} \tau_{ar} R_r} = S \tau_{aw}$$

$S$  = sensibilidade estática.

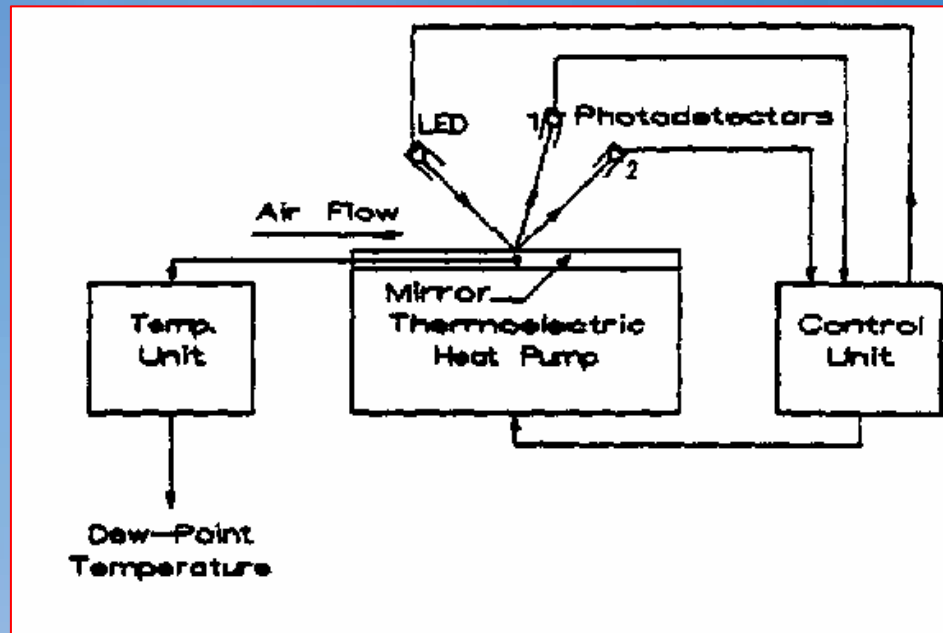
O sinal normalizado elimina a deriva e é insensível às variações na intensidade da fonte.



A temperatura e a pressão precisam ser medidas para obter a umidade absoluta:

$$d_v = f(T, p, \tau_{aw})$$

# Higrômetro de Ponto de Orvalho



**Diagrama de um higrômetro de espelho refrigerado. O LED é a fonte de luz e o dois fotodetectores detectam a luz difundida (#1) e a refletida (#2). Um sistema de controle regula a temperatura de espelho.**

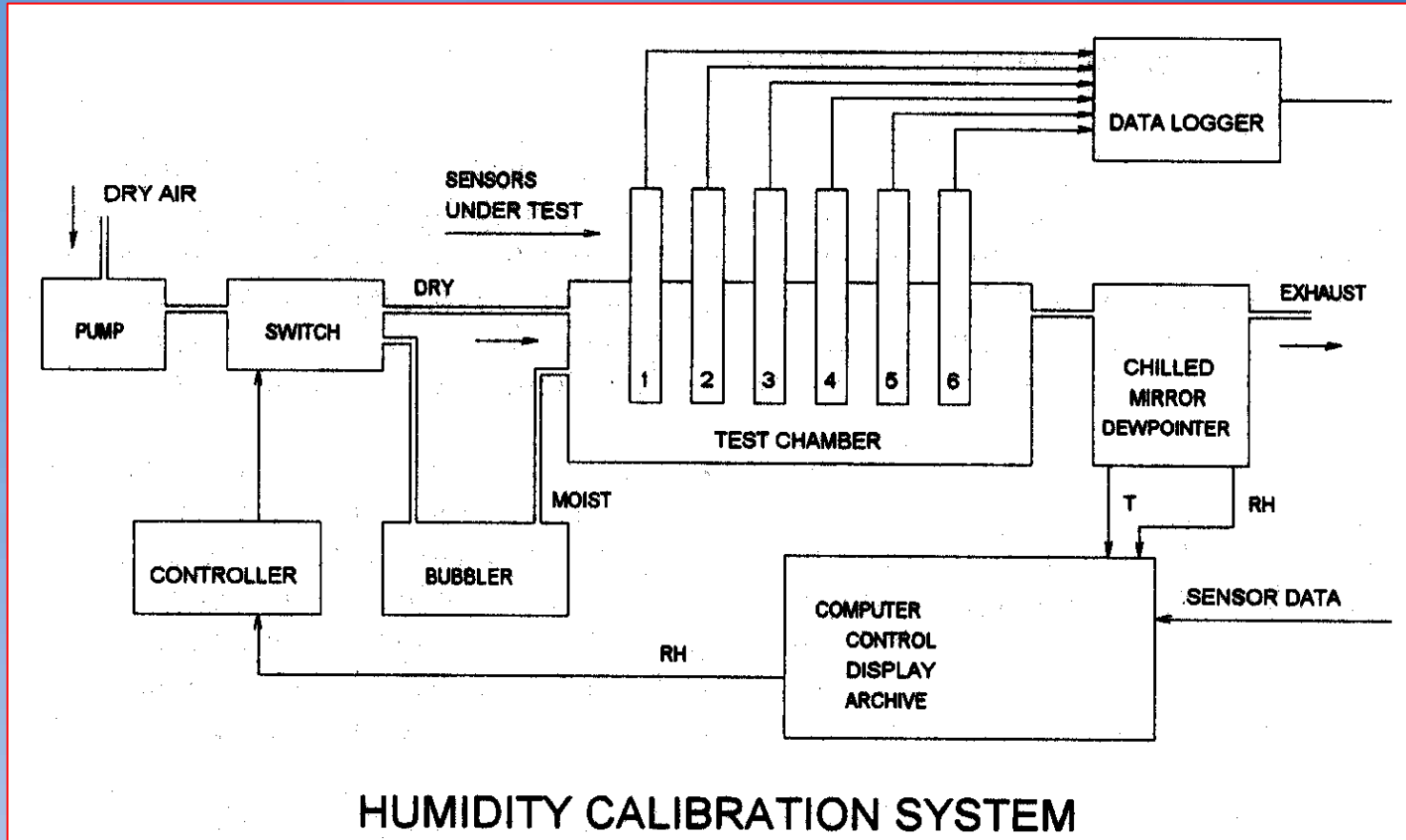
## Calibração de sensores de umidade

Método simples – câmara com solução salina.

Sal	T(°C)			
	20	25	30	
Cloreto de Lítio	11,1	11,3	11,3	LiCl
Acetato de Potássio	23,1	22,5	21,6	KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>
Cloreto de Magnésio	33,1	32,8	32,4	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Carbonato de Potássio	43,2	43,2	43,2	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Nitrato de Magnésio	54,4	52,9	51,4	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Cloreto de Sódio	75,5	75,3	75,1	NaCl
Cloreto de Potássio	85,1	84,3	83,6	KCl
Cloreto de Bário	91,0	90,0	89,0	BaCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O
Nitrato de Potássio	94,6	93,6	92,3	KNO <sub>3</sub>
Sulfato de Potássio	97,6	97,3	97,0	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Valores de equilíbrio da umidade relativa (%) para soluções aquosas saturadas de sal. Os valores listados são para temperaturas de 20, 25 e 30°C.

# Método complexo – sistema de calibração automático



# *Desempenho Dinâmico - 1ª ordem*

## Sistemas e primeira ordem

- um reservatório de energia
- equação diferencial de primeira ordem
- constante de tempo
- sinais de entrada degrau, rampa e senoidal

## Sistemas de Primeira Ordem

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = x_i$$

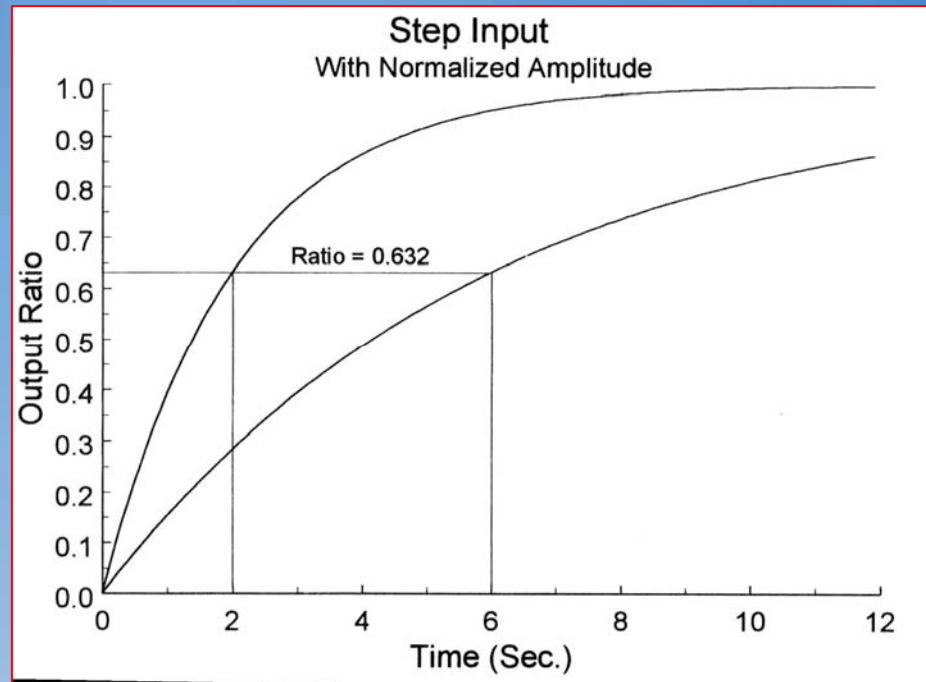
$\tau$  = constante de tempo do sistema

Solução:  $x(t) = x_T(t) + x_S(t)$

$x_T(t)$  = solução transiente;

$x_S(t)$  = solução de estado estacionário.

# Entrada na Forma de Função Degrau



Resposta a uma função degrau positiva. Saídas para  $\tau = 2$  s (curva superior) e  $\tau = 6$  s (curva inferior). A relação de saída é  $x(t)/x_c$

## Função degrau

0 para  $t < 0$

$x_c$  para  $t > 0$

condição inicial:  $x(0)=0$ .

$$\frac{dx}{x} = -\frac{dt}{\tau}$$



$$x = C e^{-t/\tau}$$

$C =$  constante arbitrária



$$x_i = x_c \Rightarrow x_s = x_c \longrightarrow x(t) = x_T(t) + x_S(t) = x_c + Ce^{-t/\tau}$$

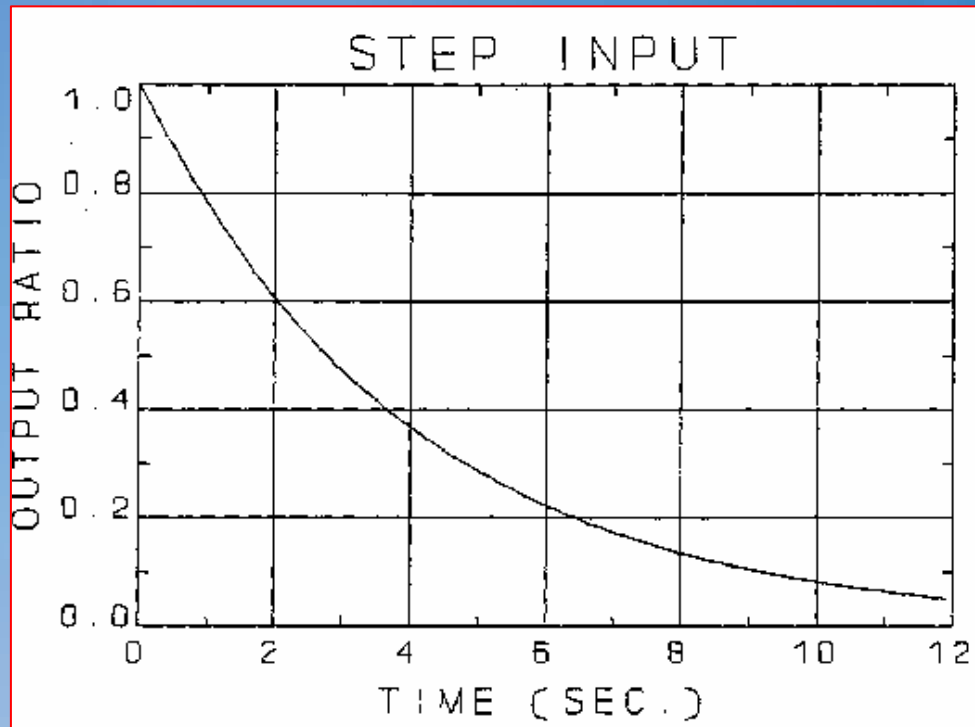
$$x(0) = x_c + C = 0 \Rightarrow C = -x_c$$

$$x(t) = x_c(1 - e^{-t/\tau}).$$

$$t = \tau: x(t) = 63,2\% x_c$$

$$t = 2\tau: x(t) = 86,5\% x_c$$

$$t = 3\tau: x(t) = 95,0\% x_c$$



Resposta para uma entrada função degrau negativa com  $\tau = 4$  s.

# Entrada na Forma de Rampa

Função rampa

$$x_i(t) = 0 \text{ para } t < 0$$

$$x_i(t) = at \text{ para } t \geq 0$$

$a = \text{constante}$

condição inicial:  $x(0) = 0$ .

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = at$$



Solução do estado estacionário:

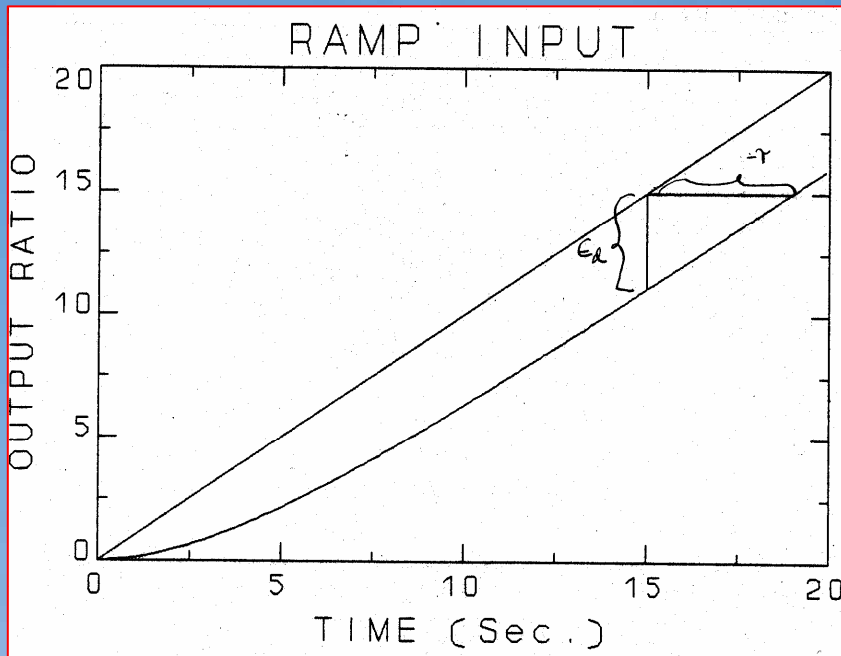
$$x_s(t) = k_0 + k_1 t \Rightarrow k_0 = -a\tau \text{ e } k_1 = a$$

Solução do estado transiente:

$$x = C e^{-t/\tau}$$

Solução geral:

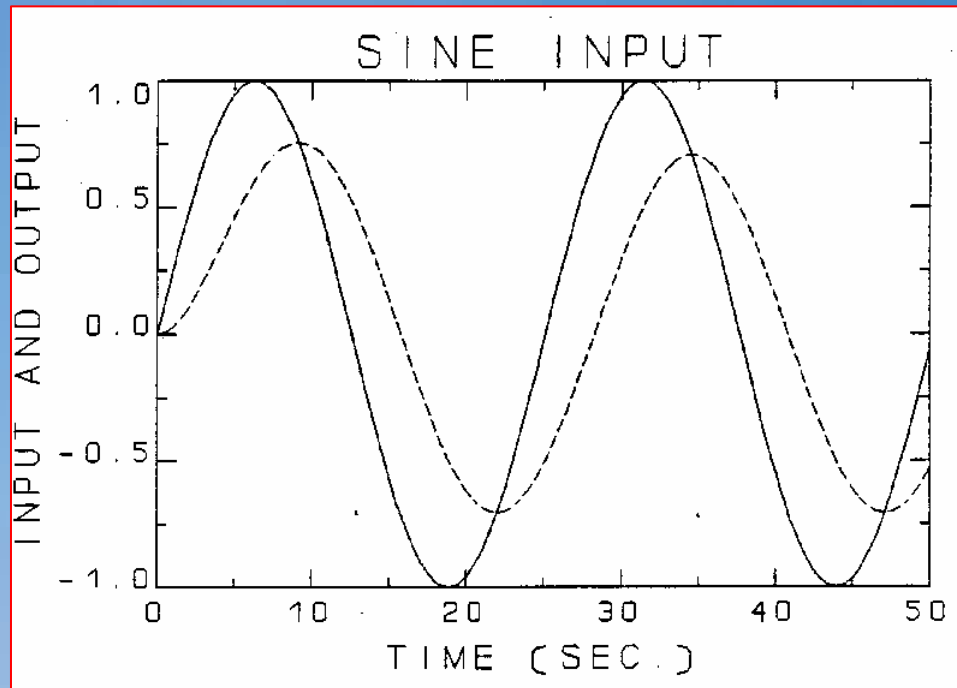
$$x(t) = at - a\tau(1 - e^{-t/\tau})$$



Resposta para uma entrada na forma de função rampa. A relação de saída é  $x(t)/a$ . A linha vertical em  $t = 15s$  mostra o erro dinâmico e a linha horizontal o atraso dinâmico

Erro dinâmico: 
$$e_d = x(t) - x_r(t) = -at(1 - e^{-t/\tau})$$

## Entrada na Forma Senoidal



Entrada e saída senoidal normalizada para  $\tau\omega = 1$

Sinal de entrada:  $x_i(t) = A_i \sin(\omega t)$

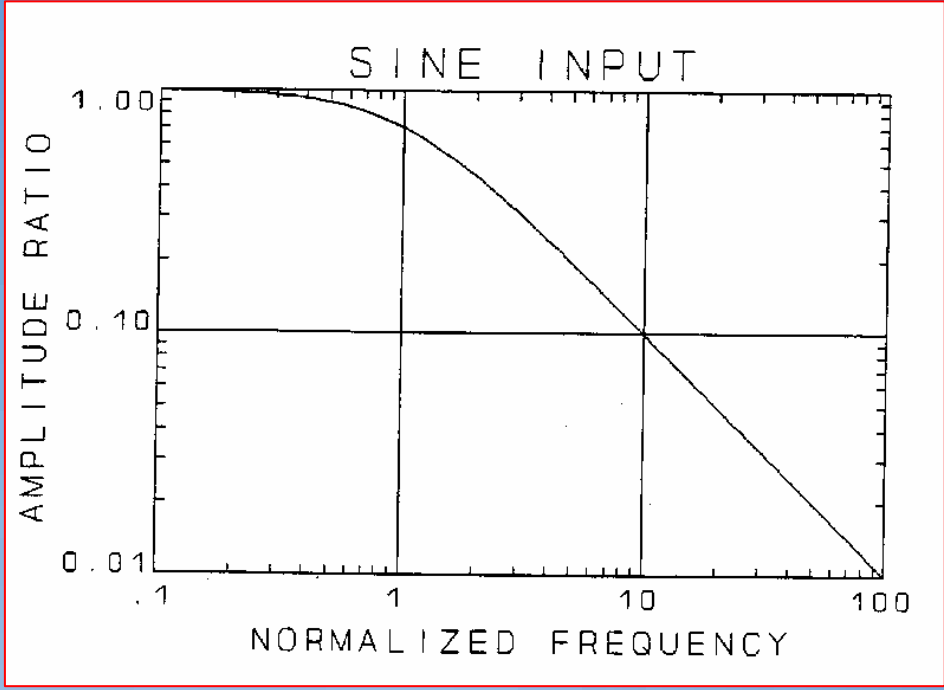
Solução estacionária:  $x_s(t) = b_0 \sin(\omega t) + b_1 \cos(\omega t)$

$$x_s(t) = \frac{A_i}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}} \sin(\omega t + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1}(-\tau\omega).$$

$$\frac{A}{A_i} = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}}$$

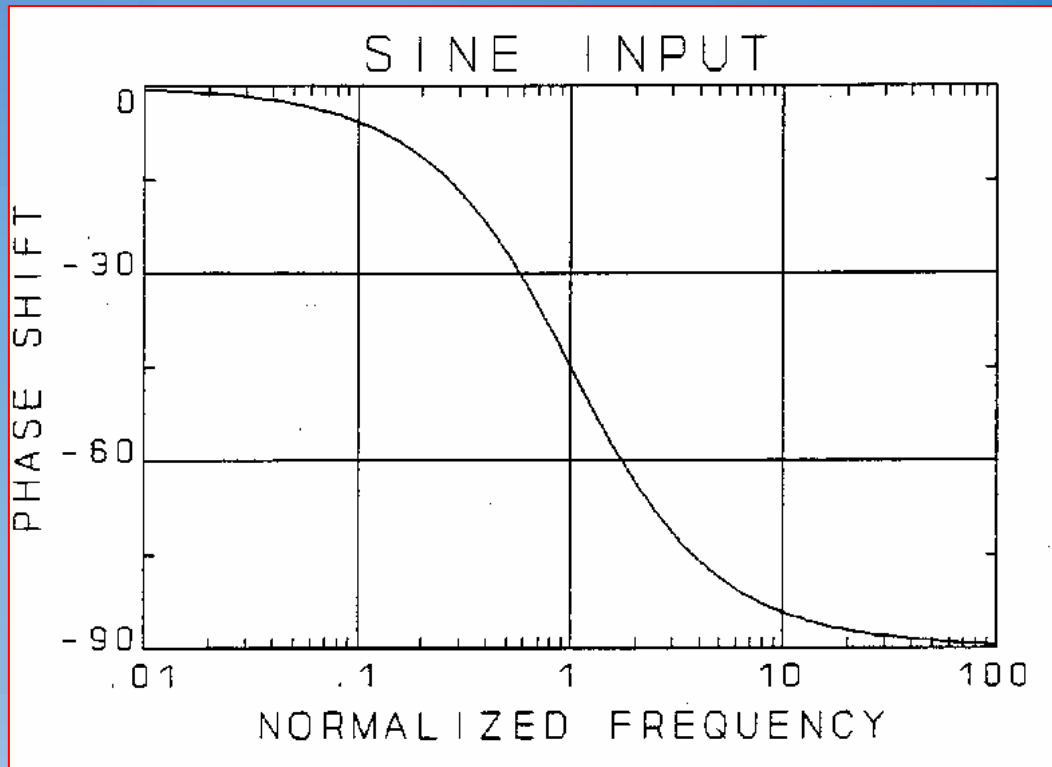
$$\frac{A}{A_i} = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}}$$



Razão entre a amplitude do sinal de saída em relação ao de entrada em função da frequência normalizada para um sistema de primeira ordem.



$$\phi = \tan^{-1} (-\tau\omega).$$



Diferença de fase em função da frequência normalizada para um sistema de primeira ordem.

$$\frac{A}{A_i} = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}} \leq 1$$

$$\lim_{\tau\omega \rightarrow 0} \frac{A}{A_i} = 1$$

$$\lim_{\tau\omega \rightarrow \infty} \frac{A}{A_i} = 0$$

Baixa frequência

Alta frequência

$$\tau\omega = 1 \Rightarrow A/A_i = 0.707$$

# *Anemometria*

- **A velocidade do vento é turbulenta**
- **Variações de velocidade, direção e período**
- **Descrição do vetor vento: fluxo médio + rajadas**
- **Média temporal acima de 10 minutos (WMO)**
- **O instrumento ideal: leve, forte e rápida resposta**

## Unidades de conversão para a velocidade do vento

Multiplicar a unidade pelo fator abaixo para obter:

<b>unidades</b>	$\text{m s}^{-1}$	nó	$\text{km h}^{-1}$	$\text{pé s}^{-1}$	$\text{mi h}^{-1}$
$\text{m s}^{-1}$	1,0000	1,9438	3,6000	3,2808	2,2369
nó	0,5144	1,0000	1,8520	1,6878	1,1508
$\text{km h}^{-1}$	0,2778	0,5400	1,0000	0,9113	0,6214
$\text{pé s}^{-1}$	0,3048	0,5925	1,0973	1,0000	0,6818
$\text{mi h}^{-1}$	0,4470	0,8690	1,6093	1,4667	1,0000

**Força do vento:**

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2$$

$C_d$  = coeficiente de arrasto,  $0 < C_d < 1$ ;

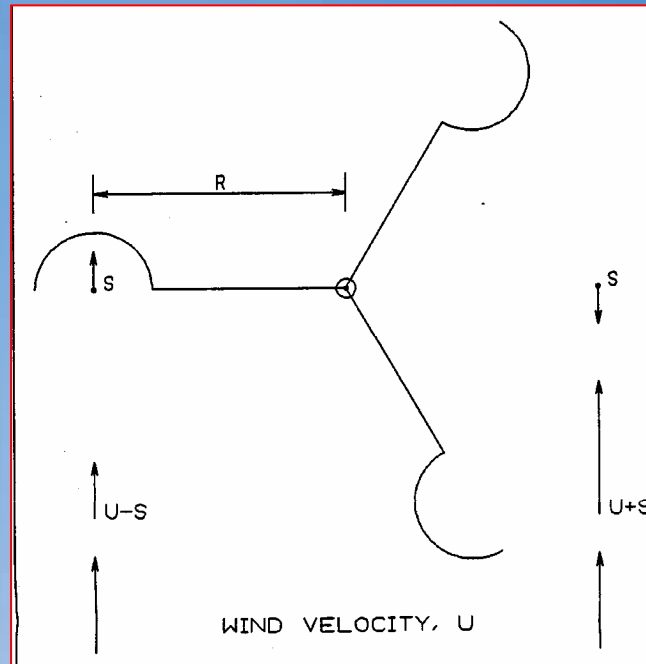
$\rho$  = densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$A$  = A área de seção reta do sensor ( $\text{m}^2$ );

$V$  = velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

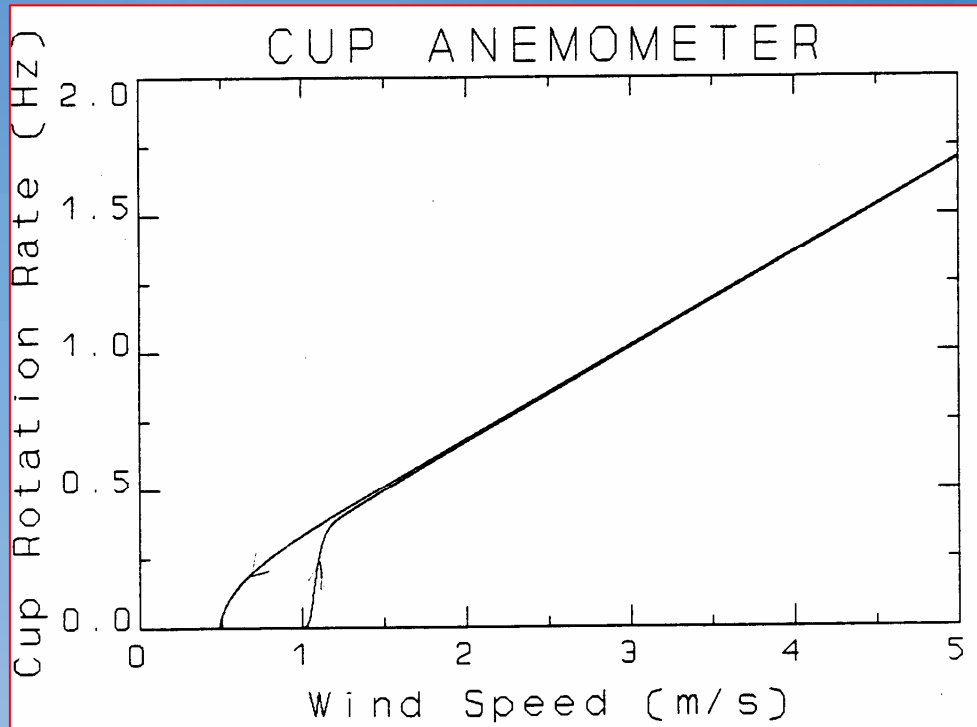
# Métodos de medição

## •Anemômetros de Copo e Ventoinha



Esquema de um anemômetro de copos que mostra a força de vento que atua nos copos.

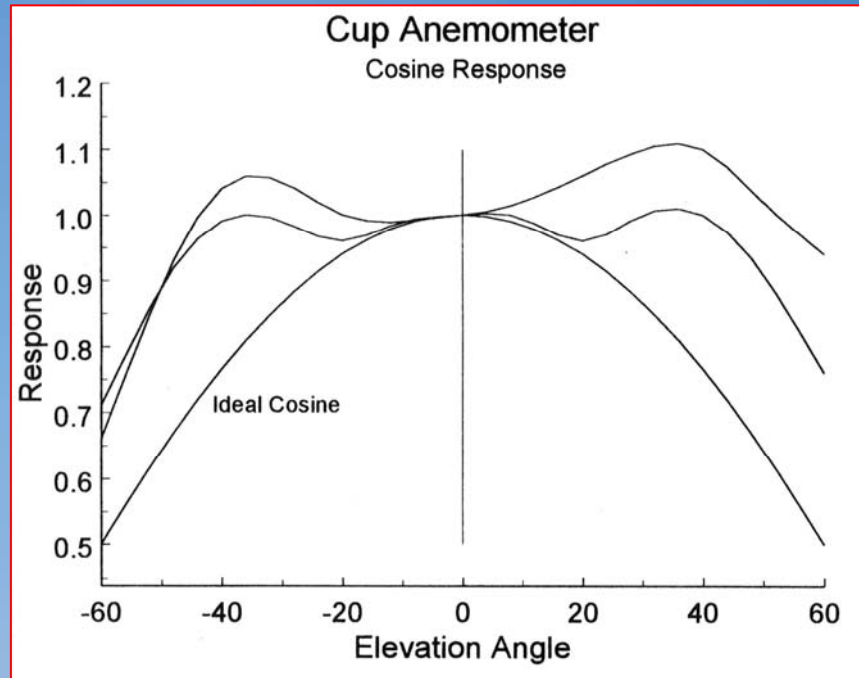
- A saída de um anemômetro de copo (ventoinha) é a taxa de rotação mecânica da roda de copos (do suporte);
- A sensibilidade estática é quase constante acima da velocidade de limiar e é uma função da roda de copos ou do desenho da ventoinha.
- Valores típicos são 30 a 60 RPM/m s<sup>-1</sup> para uma roda de copos e 180 a 210 RPM/m s<sup>-1</sup> para uma ventoinha.
- Uma ventoinha sempre gira mais rápido que uma roda de copos para a mesma intensidade do vento.



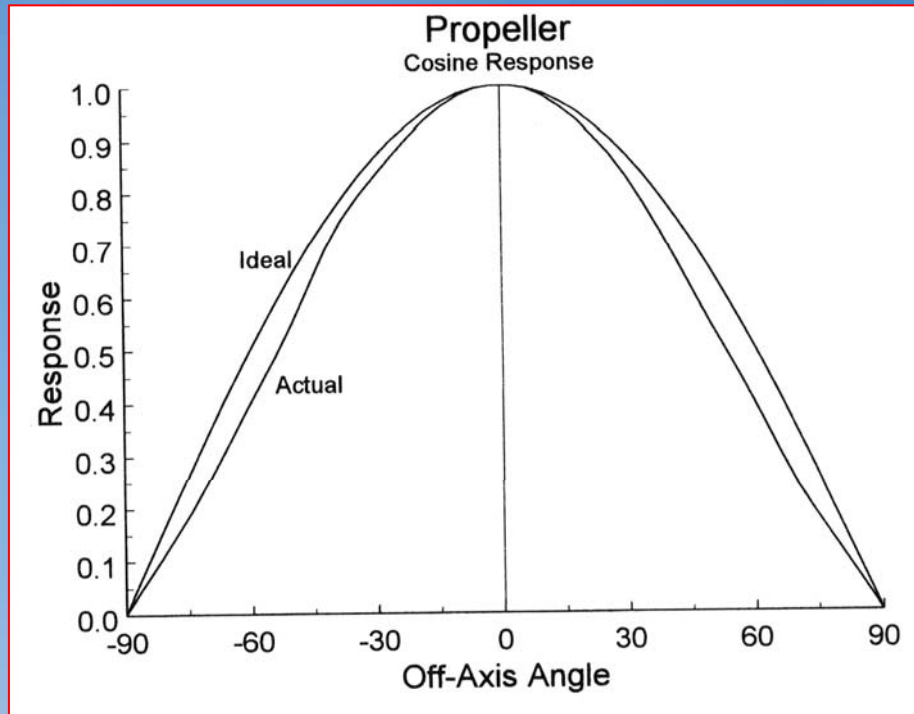
Frequência de rotação de um anemômetro de copo ( $R = 14$  cm) em função da velocidade num túnel de vento .



- **Desempenho estático** do anemômetro: intervalo de variação e limiar (quando para de girar);
- O **efeito do limiar** é não linear e estende bem acima da velocidade de limiar em geral especificada pelo fabricante;
- A velocidade de limiar é uma função da **vibração e do atrito** do suporte o qual aumenta com o tempo de uso do anemômetro.
- O anemômetro de copo deveria responder apenas ao componente horizontal do vetor vento. A velocidade indicada seria proporcional ao **cosseno do ângulo** do vetor vento com relação a horizontal.



Resposta cosseno para dois anemômetros de copo.



Resposta cosseno de um anemômetro de ventoinha.

O desempenho dinâmico do anemômetro de copo num túnel de vento com velocidade constante pode ser descrito por uma equação diferencial linear de primeira ordem:

$$\tau \frac{dU}{dt} + U = U_i$$

$U_i$  = velocidade de vento ( $\text{m s}^{-1}$ );

$U$  = velocidade do vento medida ( $\text{m s}^{-1}$ );

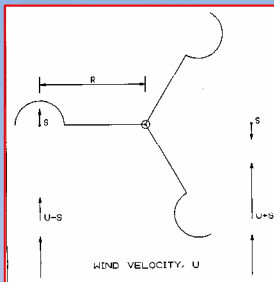
$\tau$  = constante de tempo.

A constante de tempo e dada por:

$$\tau = \frac{I}{\rho R^2 C_d A U_i}$$

$I$  = momento inércia da roda de copos (kg m<sup>2</sup>);

$R$  = raio da roda de copos (m).



- ✓ Testes de túnel de vento:  $\tau = \lambda/U$ ,  $\lambda$  é denominado de **constante de distância (m)**;
- ✓ A constante de tempo não é constante;
- ✓ Supõe-se que as flutuações da velocidade do vento são pequenas comparadas à média;
- ✓ Substitui-se a velocidade do vento médio por  $U_i$  na equação da constante de tempo;
- ✓ A especificação de desempenho dinâmico para anemômetros de copo e de ventoinha é dada pela constante de distância  $\lambda$  e não pela constante tempo.

A constante de tempo ( $\tau = \lambda/U$ ) e a frequência de entrada ( $\omega$ ) pode ser expressa em termos de um comprimento de onda de entrada:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi U/\lambda_i$$



$$\tau\omega = 2\pi \frac{U}{\lambda_i} \frac{\lambda}{U} = 2\pi \frac{\lambda}{\lambda_i}$$

$\lambda_i = \text{comprimento de onda de rajada.}$

Para  $2\pi\lambda/\lambda_i = 1 \Rightarrow A_o/A_j = 0.707$

(Amplitude medida é 70% da amplitude de entrada)

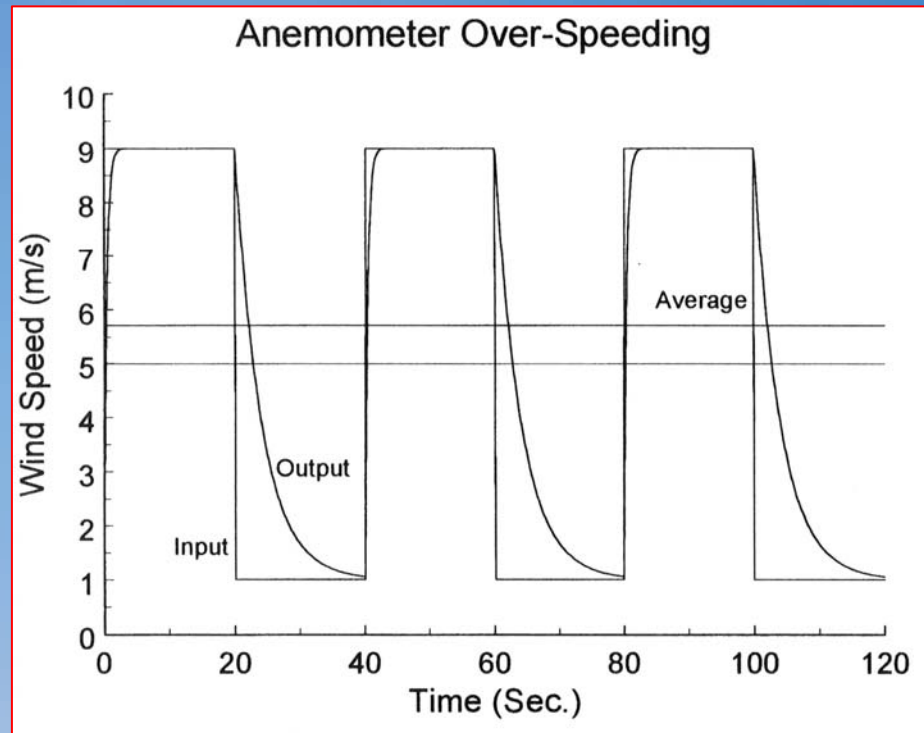
Para  $\lambda_i < 2\pi/\lambda \Rightarrow A_o/A_j < 0.707$

Anemômetros mais comuns:  $1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$

Exemplo:  $\lambda = 3 \text{ m} \Rightarrow$  redução da amplitude das rajadas com comprimento de onda menor que  $2\pi/\lambda = 19 \text{ m}$  para menos que 70% da amplitude de entrada.

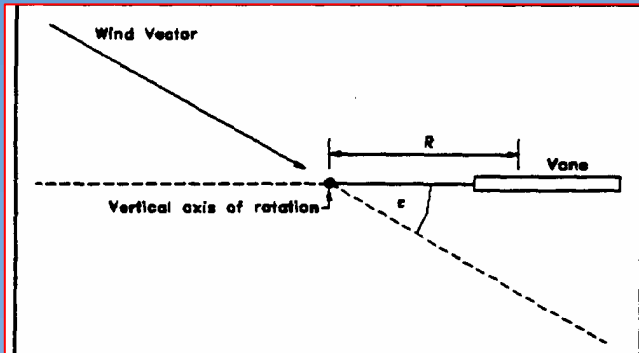


# SUPERESTIMATIVA DO VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO



Sinal de entrada retangular (input) e sinal de saída (output) de um anemômetro de copo ou ventoinha.

## •Pá direcional



Esquema de uma Pá direcional

O potenciômetro é o transdutor elétrico mais comum utilizado nas pás direcionais; converter o ângulo azimutal ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ) em uma voltagem proporcional ao ângulo. Apresenta zona morta de  $3^\circ$  a  $5^\circ$  (Norte).

Equação do movimento da pá direcional:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{NR}{U} \frac{d\theta}{dt} + N\theta = \theta_i$$

$I$  = momento de inércia da pá direcional;

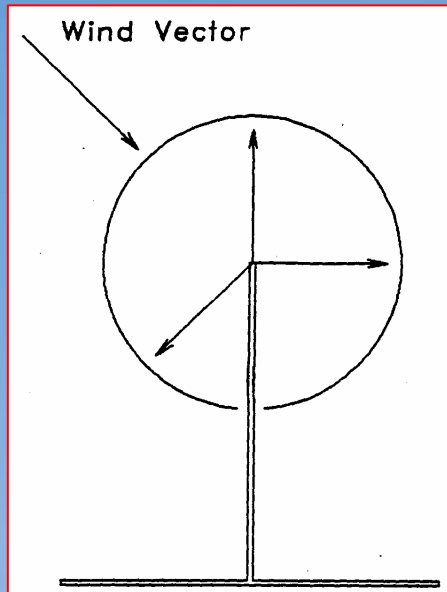
$N = \frac{1}{2} C_d \rho A U^2 R$ , torque aerodinâmico por unidade de ângulo;

$R$  = distância do eixo de rotação ao centro efetivo da força aerodinâmica sobre a pá direcional.

## Pá direcional ideal

- Baixo atrito no suporte; Equilíbrio estático (contrapeso);
- Torque do vento máximo;
- Momento de inércia mínimo;
- Taxa de amortecimento entre 0.3 e 0.7;
- Baixo limiar de velocidade ( $\sim 0.5 \text{ m s}^{-1}$ );
- Resistência a vento superior a  $50 \text{ m s}^{-1}$

## Esfera de arrasto



Anemômetro de esfera de arrasto.  
As setas representam os três apoios dimensionais e o sistema transdutor.

Equação de calibração estática:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho A C_d \vec{U} |\vec{U}|$$

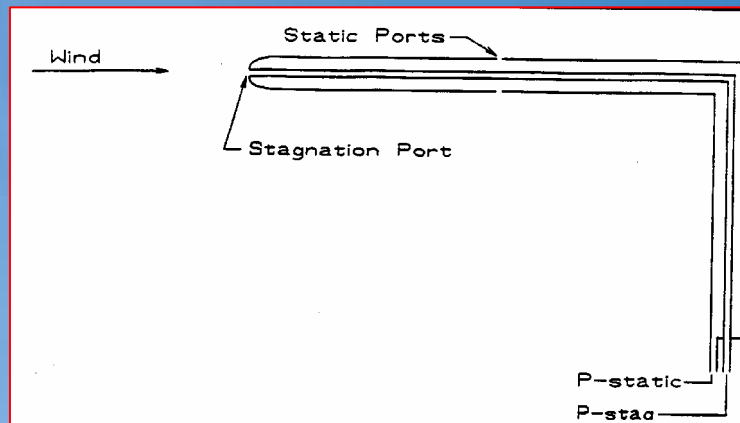
$F$  = vetor força 3D;

$\rho$  = densidade de ar;

$A$  = área de seção transversal.

Obs. Cada componente da velocidade depende de todos os três componentes da força.

# Tubo de Pitot Estático



p-estático = p, pressão atmosférica ambiente;

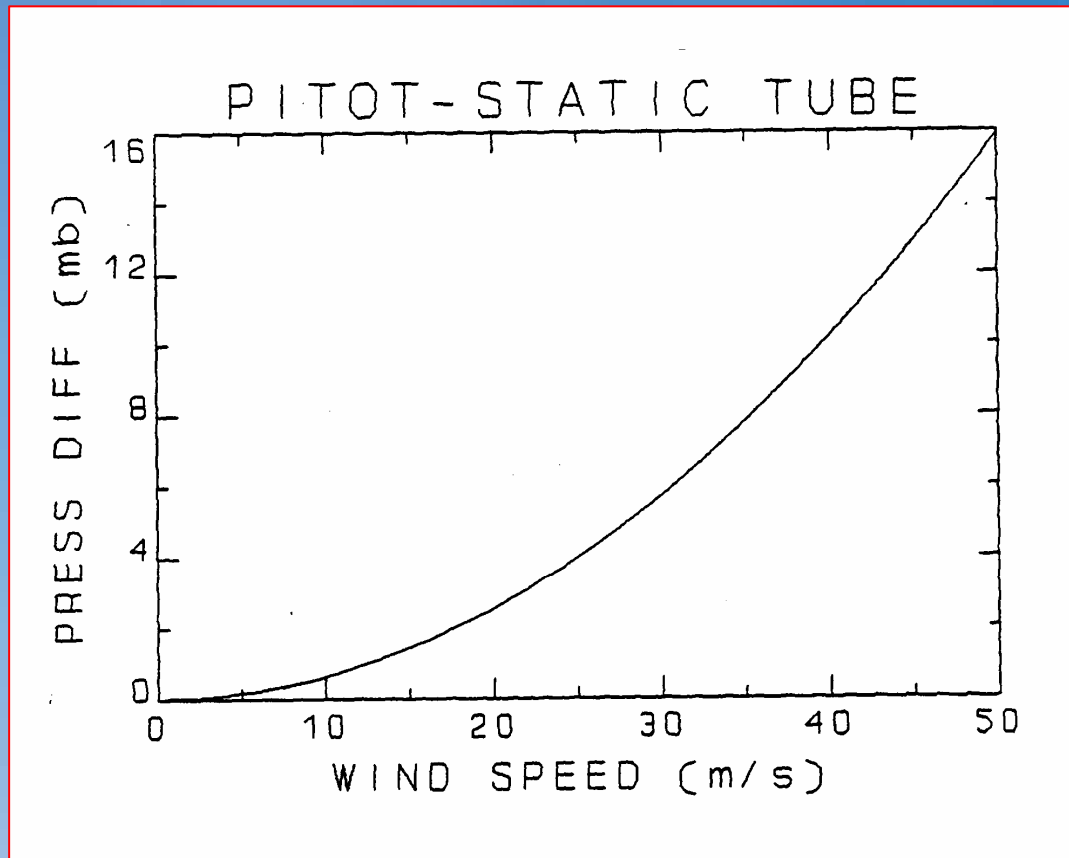
p-estagnação =  $0.5\rho V^2 + p$

$\Delta p = (p\text{-estagnação}) - (p\text{-estático}) = 0.5 \rho V^2.$

Equação de calibração:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

A calibração é uma função de pressão atmosférica e da temperatura do ar uma vez que  $\rho = p/RT$ , onde R é a constante de gás para o ar seco.



Curva de transferência estática de um tubo de Pitot estático mostrando a diferença de pressão entre o pórtrico de estagnação e os pórtricos estáticos como uma função da velocidade do vento.



- O tubo de pitot estático deve ser orientado na corrente de ar.
- Um tubo típico tolerará erros de desalinhamento até  $\pm 21^\circ$
- Inadequado para medição do vento atmosféricos.
- Ideais para o uso em túneis de vento (calibração de anemômetros);

## Dissipação de calor (filamento aquecido)

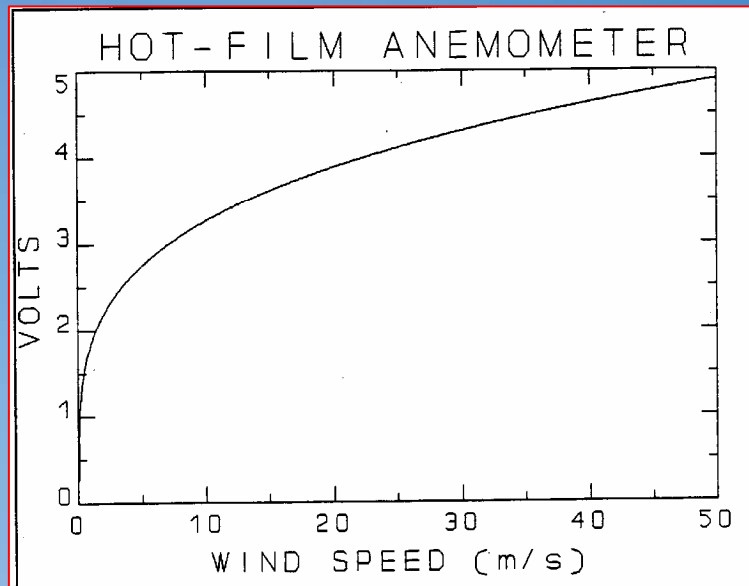
- Anemômetros de **arame e filme** aquecido medem a velocidade do vento por meio do resfriamento dos mesmos pelo fluxo de ar que passa pelo elemento sensível;
- O tempo de resposta de arames e filmes é função da massa térmica dos elementos;
- Arames são sensores de vento são mais rápidos que os convencionais (**fiões de platina** de até 5  $\mu\text{m}$  em diâmetro);
- Estes sensores são adequados para medir **turbulência** atmosférica ou para uso em aeronaves.
- Sensores de filme são feitos pela deposição de um **filme fino de platina** sobre um cilindro de **quartzo ou vidro** e então isolados com uma camada muito fina de **quartzo ou cerâmica**.

Num arame operado à temperatura constante, a corrente  $I$  através do sensor é função da velocidade do vento pela lei de King:

$$I^2 = A + B\sqrt{V}$$

$A$  e  $B$  são constantes;

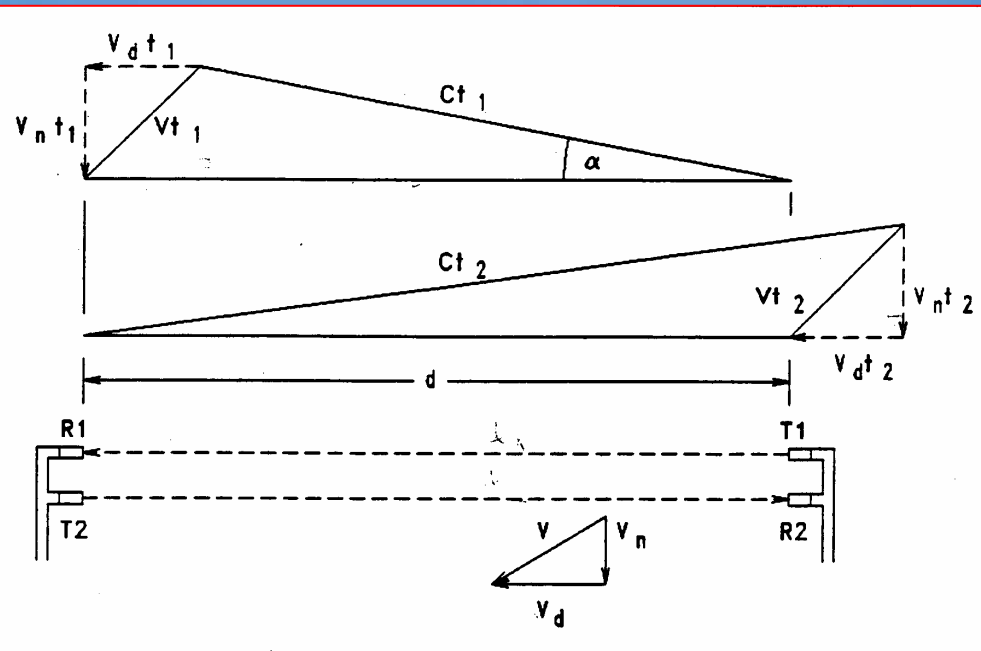
$V > 5 \text{ m s}^{-1}$ .



Curva de transferência estática de um anemômetro de arame aquecido.

- A calibração do sensor depende da **densidade de ar** e das características do arame (ou filme) incluindo possíveis contaminações atmosféricas.
- Normalmente, monitora-se a velocidade média do ar simultaneamente com um anemômetro de copo para obter uma verificação da calibração.
- As características de desempenho dinâmico desses sensores podem ser bastante complexas, mas pode-se aumentar a frequência de resposta diminuindo o **tamanho do sensor**
- Um anemômetro de filme quente grande pode ter uma frequência de resposta bastante ruim no intervalo de 10 até 100 Hz.

# Velocidade do Som



Anemômetro sônico com o vetor vento  $V$ . O componente ao longo do caminho é  $V_d$  e o componente normal ao caminho é  $V_n$ . Sendo  $t_1$  o tempo necessário para um pulso sonoro ir do transmissor  $T_1$  até o receptor  $R_1$ , e  $t_2$  o tempo para ir de  $T_2$  até  $R_2$ . A frequência do som utilizada é tipicamente da ordem de 230 kHz.  $C$  é a velocidade do som.

$$\cos \alpha = \frac{d - V_d t_1}{C t_1} = \frac{d + V_d t_2}{C t_2}$$

Tempos de trânsito do som:

$$t_1 = \frac{d}{C \cos \alpha + V_d} \qquad t_2 = \frac{d}{C \cos \alpha - V_d}$$

Diferença entre os tempos de trânsito:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2dV_d}{C^2}$$

$$C^2 = \gamma RT \text{ para } C^2 \gg V_d^2$$

$\gamma = 1.4$ , razão entre os calores específicos;

$R = 287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ , constante do gás para ar seco;

$T$  é temperatura em K.

Velocidade do vento:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2V_d}{d}$$

Temperatura do ar:

$$\frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{d}{C^2} = \frac{d}{\gamma RT}$$



## O Anemômetro sônico:

- Faz 200 medidas por segundo (200 Hz);
- Amostra 10 medidas para reduzir ruídos;
- Tem resolução de  $1 \text{ cm s}^{-1}$  e range de  $\pm 30 \text{ m s}^{-1}$ .
- Pode perder sinal devido a chuva u neve úmida.

## Calibração.

- Os sensores de vento são calibrados em um túnel de vento conjuntamente com instrumentos de referência;
- O túnel de vento deve ser grande bastante para acomodar os sensores e fornecer um escoamento estável e estacionário;
- A pá direcional pode ser aferida com um motor de rotação constante.

# Exposição

- A altura padrão para medição do vento de superfície é de 10 m (WMO);
- Nenhuma obstrução ao fluxo do vento deve estar a mais que 3° acima do horizonte ou seja a distância do anemômetro até um obstáculo deve ser pelo menos 20 vezes a altura da obstrução;
- Uma vez que o fluxo do vento é perturbado por obstruções, inclusive edifícios, o anemômetro não deve ser colocado em cima de construções.

# *Desempenho Dinâmico - 2ª ordem*

Equações diferenciais descrevem o comportamento de sistemas físicos nos quais uma redistribuição de energia está ocorrendo.

Em um sistema mecânico, uma massa em movimento armazena energia cinética e pode armazenar energia potencial em virtude de sua posição em um campo de força.

Quando um sistema mecânico armazena energia potencial e dissipa energia cinética, a equação diferencial é de segunda ordem, isto é:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f_d \frac{dx}{dt} + x = F(t)$$

$x$  = posição;

$dx/dt$  = velocidade;

$m$  = massa;

$f_d$  = fator de dissipação;

$F$  = força externa.

Esta equação é aplicada a pá direcional, que armazena energia cinética (momento de inércia) e potencial (orientação relativa ao vento) e dissipa.

- A ordem de uma equação diferencial é sempre igual ao número de reservatórios de armazenamento de energia.
- Em um sistema mecânico, estes reservatórios incluem os elementos de armazenamento de energia cinética mais os elementos de armazenamento de energia potencial.
- Capacitores e indutores são elementos de armazenamento de energia em sistemas elétricos.
- Em sistemas térmicos, energia é armazenada em termos de massas térmicas.

- A resposta transiente, ou função complementar em condições matemáticas, é obtida quando a função forçante é nula e o sistema é lançado de um conjunto de condições iniciais no momento  $t = 0$ ;
- A distribuição de energia nos elementos de armazenamento dos sistemas na hora do lançamento deve tender a zero devido a dissipação de energia sempre presente;
- Em termos de sistema, a saída para uma dada distribuição de energia inicial e entrada controlada é a solução transiente mais a solução de estado estacionário;
- Matematicamente, a solução da equação para um determinado conjunto de condições iniciais e uma função forçante é a soma de uma função complementar com uma função particular.

- Num sistema linear, a resposta para um conjunto de sinais de entrada é simplesmente a somatória das respostas individuais a cada sinal de entrada (princípio de superposição);
- Esta propriedade é muito útil porque permite a análise da resposta a sinais complexos no domínio de frequência por superposição de respostas para frequências individuais;
- Esta é a justificativa para usar modelos lineares até mesmo quando o ajuste está longe do ideal.



- Um sistema físico está estático quando a distribuição de energia dentro do sistema é constante;
- Quando há uma troca de energia dentro do sistema, ele está em um estado dinâmico e seu desempenho é descrito por uma equação diferencial que contém derivada com relação ao tempo;
- Para determinar as características estáticas tais como o limiar, devem ser feitas medidas da saída para muitos valores diferentes da entrada;
- Cada medida é feita enquanto o sistema é estático. Durante a transição de um estado estático para outro, o sistema é dinâmico. Nós esperamos até a troca de energia dinâmica cessar antes de fazer a medida estática;

- Quando forças são aplicadas em pontos discretos e são transmitidas através de componentes discretos dentro do sistema, tal sistema pode ser definido por meio de um conjunto de parâmetros;
- Mas quando é necessário descrever a variação de um componente físico nas coordenadas do espaço, o sistema deve ser descrito com parâmetros distribuídos e deve ser modelado por uma equação diferencial parcial;
- A análise do desempenho dinâmico se preocupa com a modelagem de sistemas de parâmetro agrupados, com equações diferenciais ordinárias, onde o tempo é a variável independente.

## Sistemas de Segunda Ordem

$$\left( \frac{1}{\omega_n^2} D^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} D + 1 \right) x = x_i$$

$\omega_n$  = frequência natural não-amortecimento;

$\zeta$  = taxa de amortecimento.

## Sinal de entrada do tipo função degrau

$$x_i(t) = x_c \text{ para } t < 0;$$

$$x_i(t) = 0 \text{ para } t \geq 0;$$

$$x_c = \text{constante.}$$

Condições iniciais:

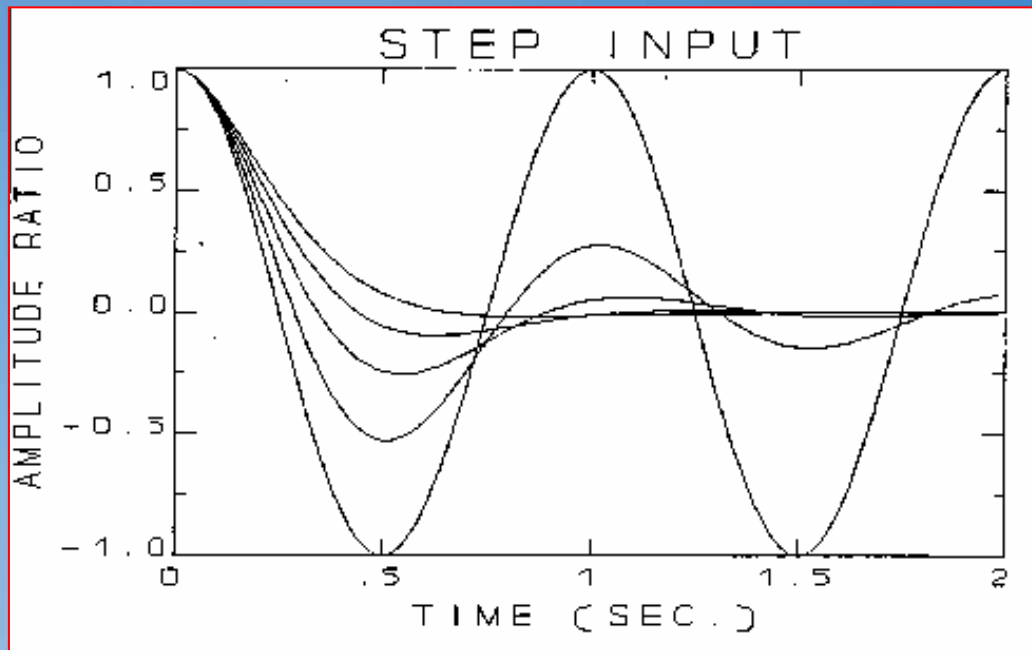
$$x(0) = x_c;$$

$$Dx(0) = 0.$$

**Solução:**

$$x_T(t) = \frac{x_c}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$



*Razão de amplitude,  $x(t)/x_0$ , para taxas de amortecimento de 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 e frequência natural não-amortecimento de  $w_n = 2\pi$ .*

## Sinal de entrada do tipo rampa

$$x_i(t) = at$$

Solução do estado estacionário:

$$x_s(t) = k_1 + k_2 t$$

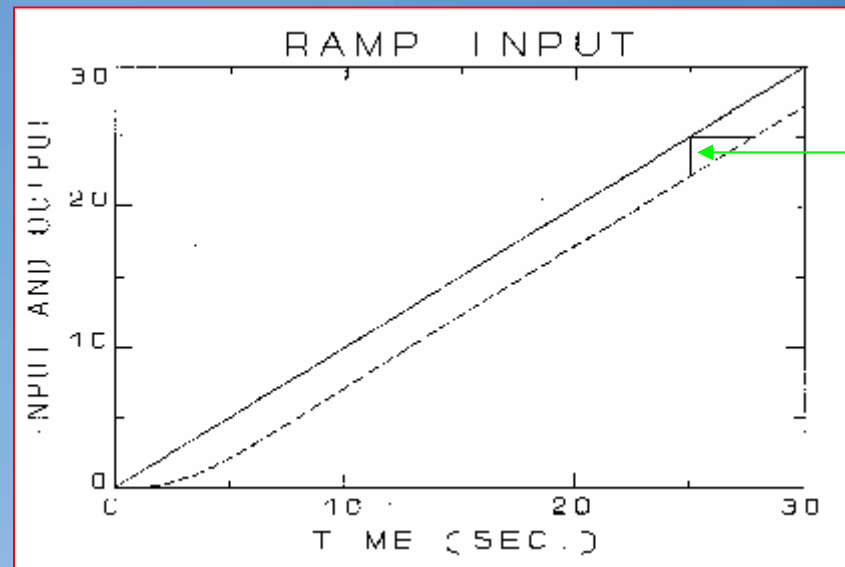
substituindo em

$$\left( \frac{1}{\omega_n^2} D^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} D + 1 \right) x = x_i$$

$$k_1 = -2a\zeta/\omega_n$$

$$k_2 = a$$

$$x_s(t) = a \left( t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right)$$



$$\varepsilon_D = x_s(t) - x_f(t) = -\frac{2\zeta a}{\omega_n}$$

Sinal de entrada tipo rampa (linha sólida) e se saída (linha tracejada). A linha vertical ( $t = 25$  s) corresponde ao erro dinâmico e a linha horizontal é o atraso dinâmico. Neste caso,  $\omega_n = 0.5$ ,  $\zeta = 0.7$  e  $a = 1$ .



# Sinal de entrada Senoidal

$$x_i(t) = A_i \sin(\omega t)$$

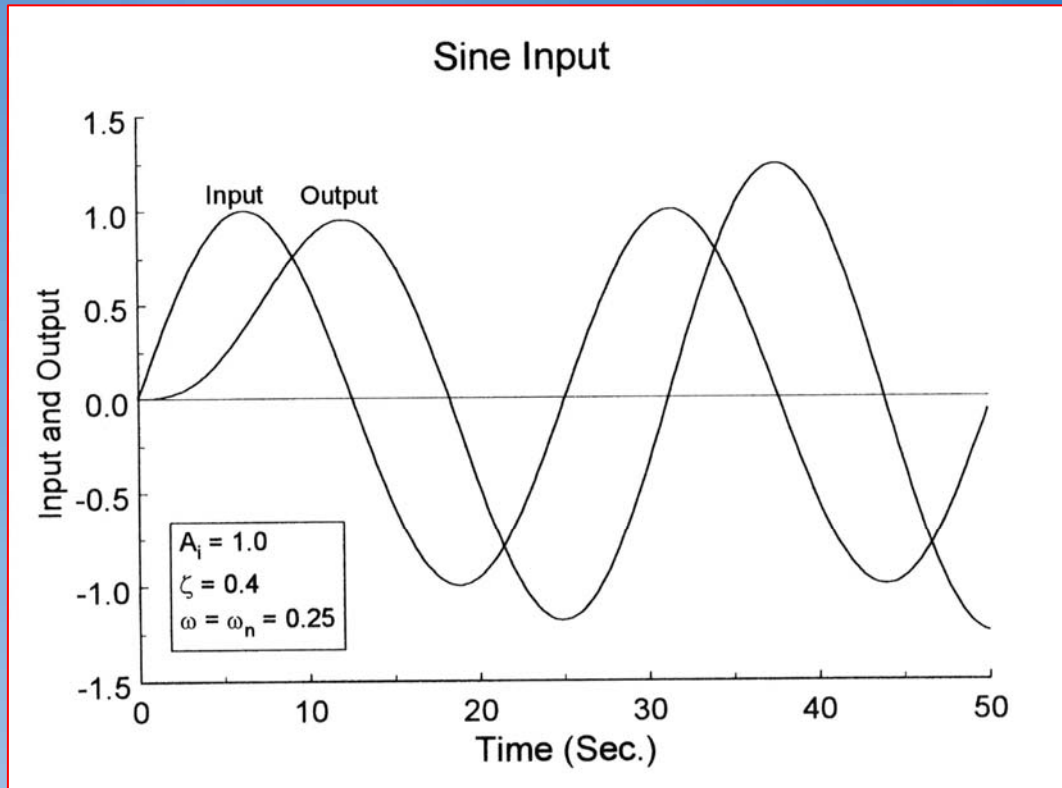
solução do estado estacionário:

$$x_s(t) = k_1 \sin(\omega t) + k_2 \cos(\omega t)$$

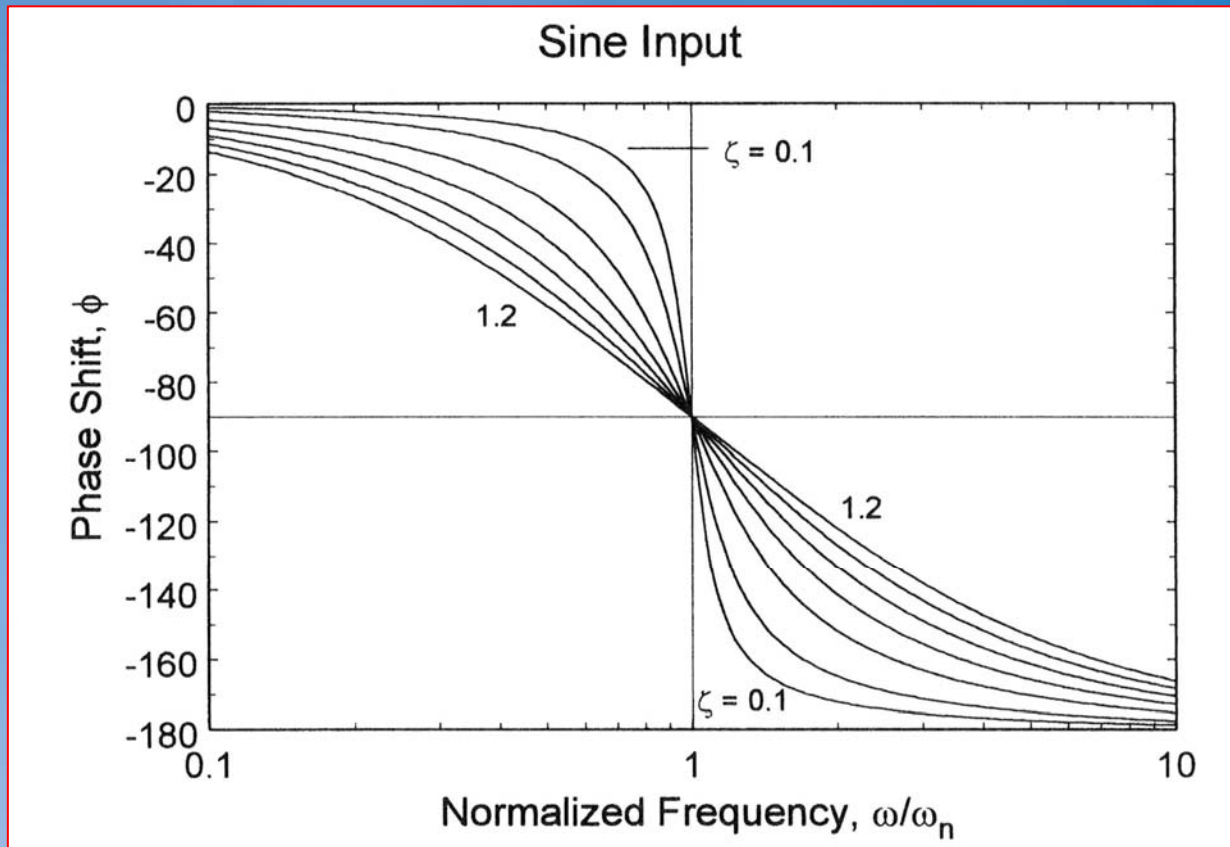
## Solução

$$x_S(t) = \frac{A_I}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( -\frac{2\zeta \omega / \omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right)$$



*Entrada senoidal (input) e saída (output), com  $A_i = 1$ ,  $\omega/\omega_n = 0,25$  e  $\zeta = 0,4$ .*



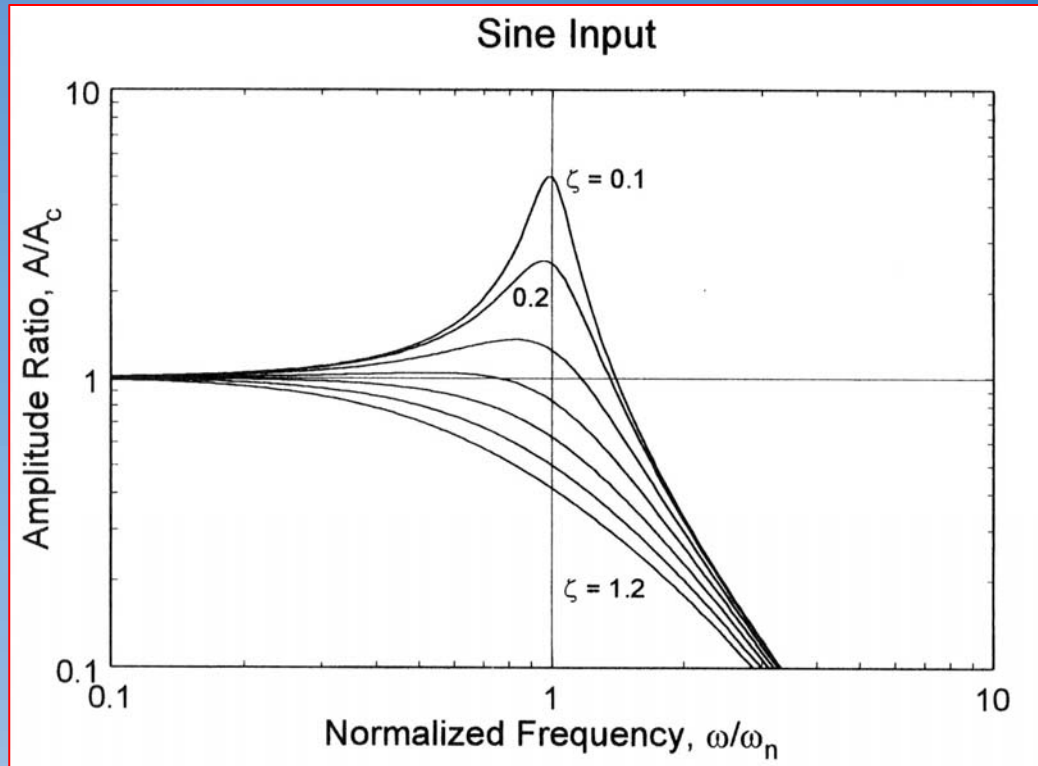
Diferença de fase como uma função da frequência normalizada para um sistema de segunda ordem. As curvas são para taxas de amortecimento de 0,1 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2.

Razão entre a amplitude de saída ( $A_o$ ) e de entrada ( $A_i$ )

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\lim_{\frac{\omega}{\omega_n} \rightarrow 0} \frac{A_o}{A_i} = 1$$

$$\lim_{\frac{\omega}{\omega_n} \rightarrow \infty} \frac{A_o}{A_i} = 0$$



*Razão de amplitude para entrada senoidal. A curva do topo é para uma taxa de amortecimento de 0,1, os outros são para razões de amortecimento 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2.*

# *Precipitação*

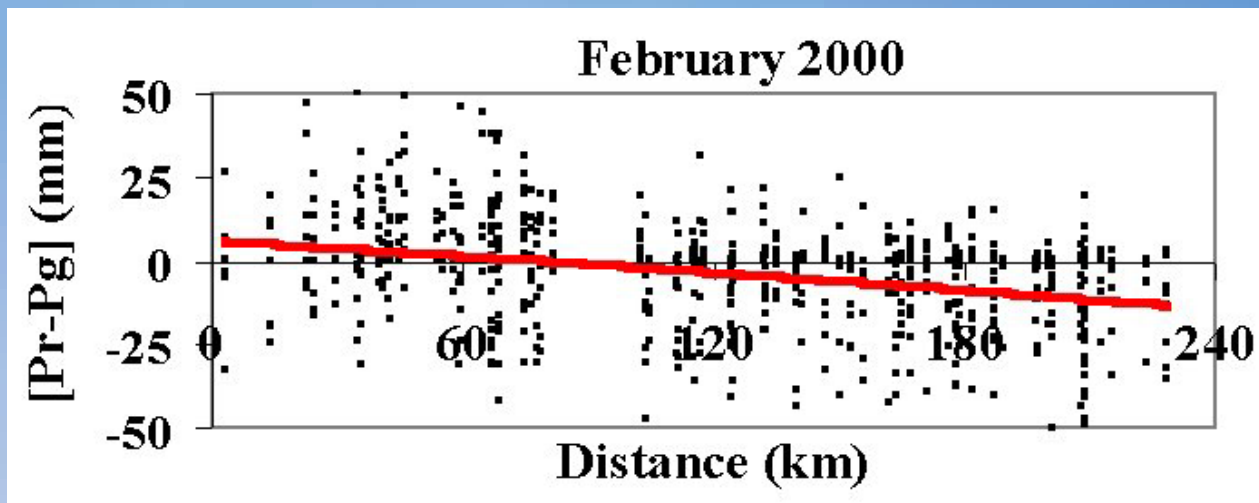
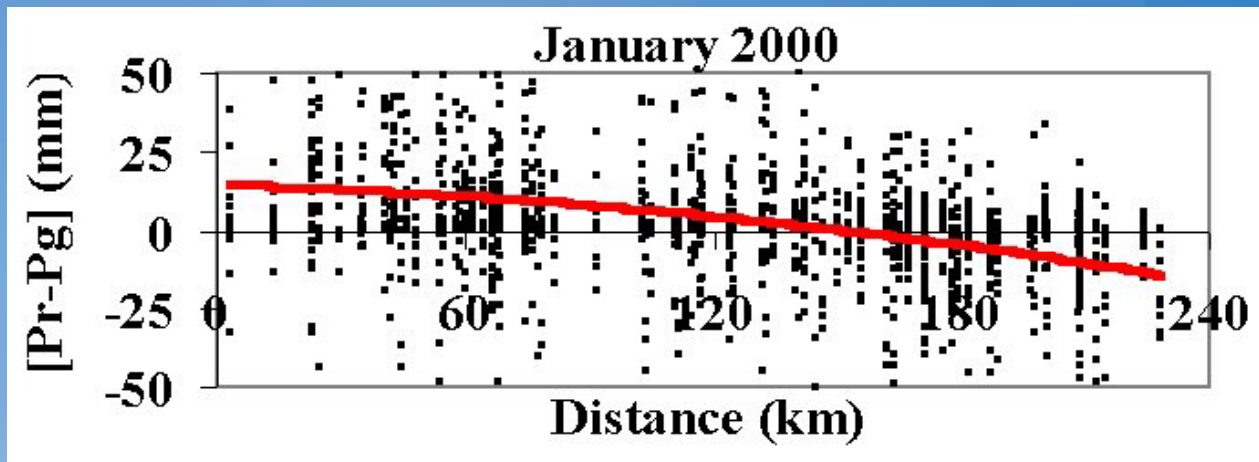
**Medição de chuva sobre grandes áreas - variabilidade natural;**

**As técnicas de medição existentes – inadequadas;**

**Baixa amostragem - técnicas pontuais;**

**Grandes erros nas medições “in situ” e por sensoriamento remoto.**

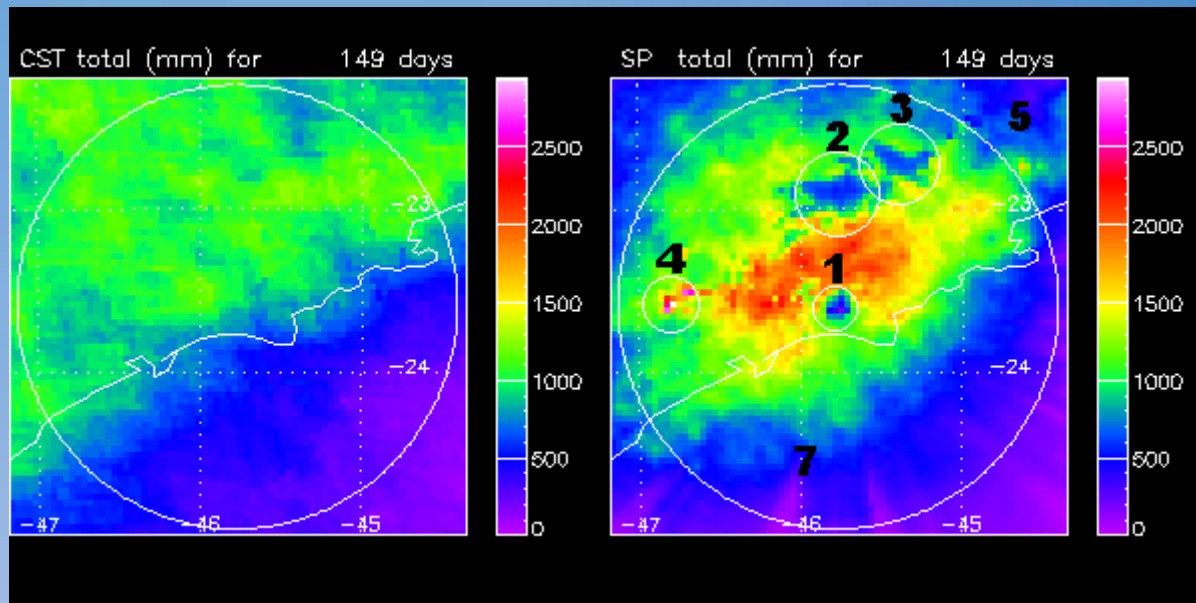
# GAUGE X RADAR





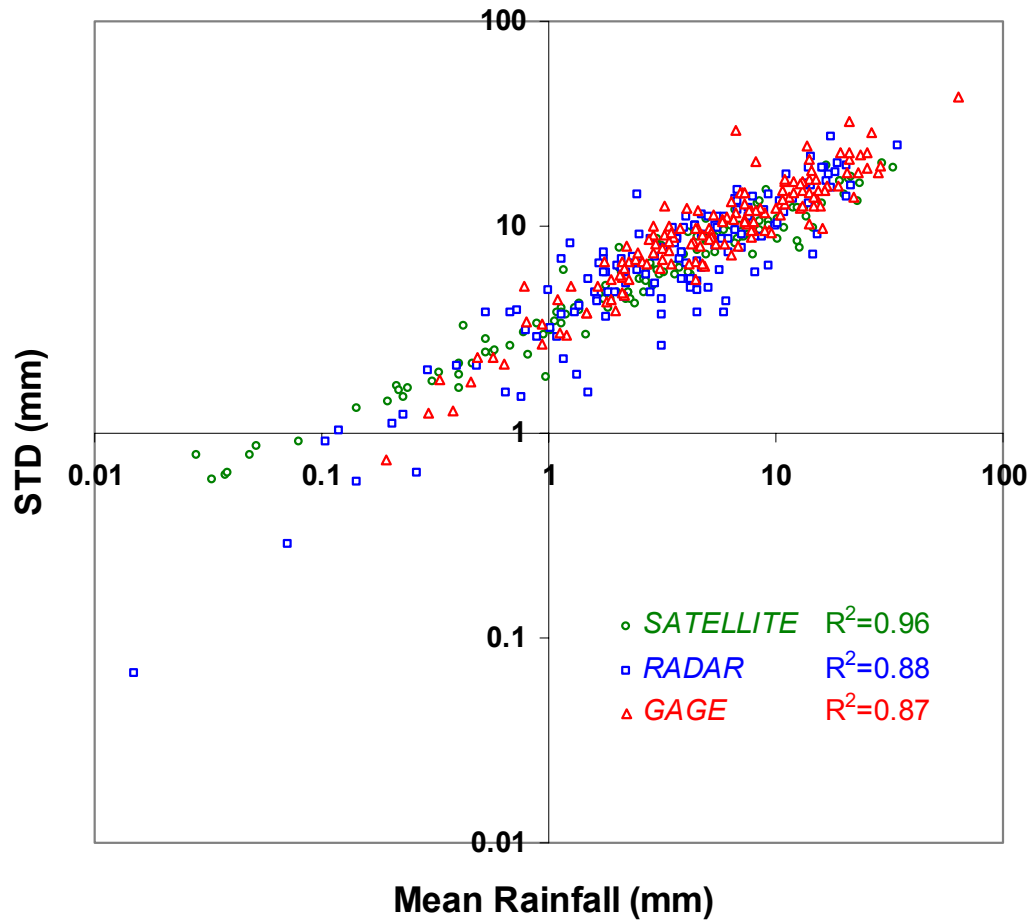
# RADAR X SATELLITE

## Total Rainfall (mm)



- 1 = Ground Clutter Filtering (2 and 3)
- 4 = Grind Clutter Contamination
- 5 = Range Effect
- 7 = Signal Processing

# GAUGE X RADAR X SATELLITE



## Definição

A precipitação pode ser definida como fluxo de água líquida ou sólida um plano horizontal por unidade de tempo ( $M_w$  em  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

Supondo que a densidade da água é constante, o fluxo volumétrico é  $V_w = M_w / \rho_w$  em  $\text{m s}^{-1}$  ou em unidades de  $\text{mm h}^{-1}$  ou  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

## Métodos de medição

- Puntual (totalizador, caçamba, ótico)

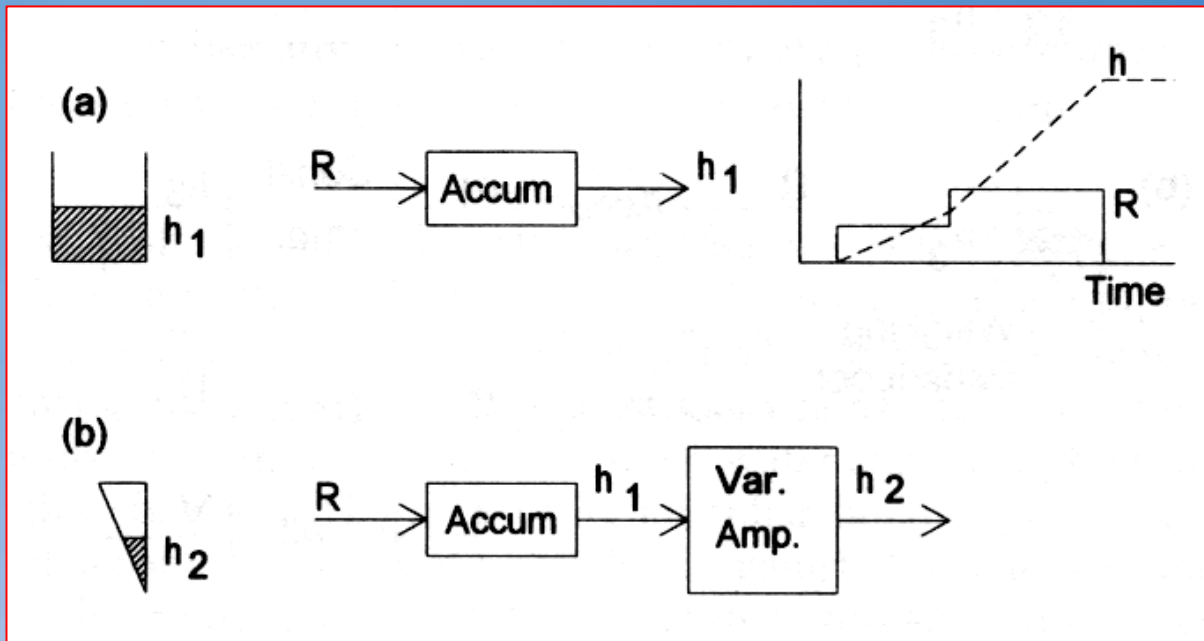


Ilustração esquemática de pluviômetros totalizadores.

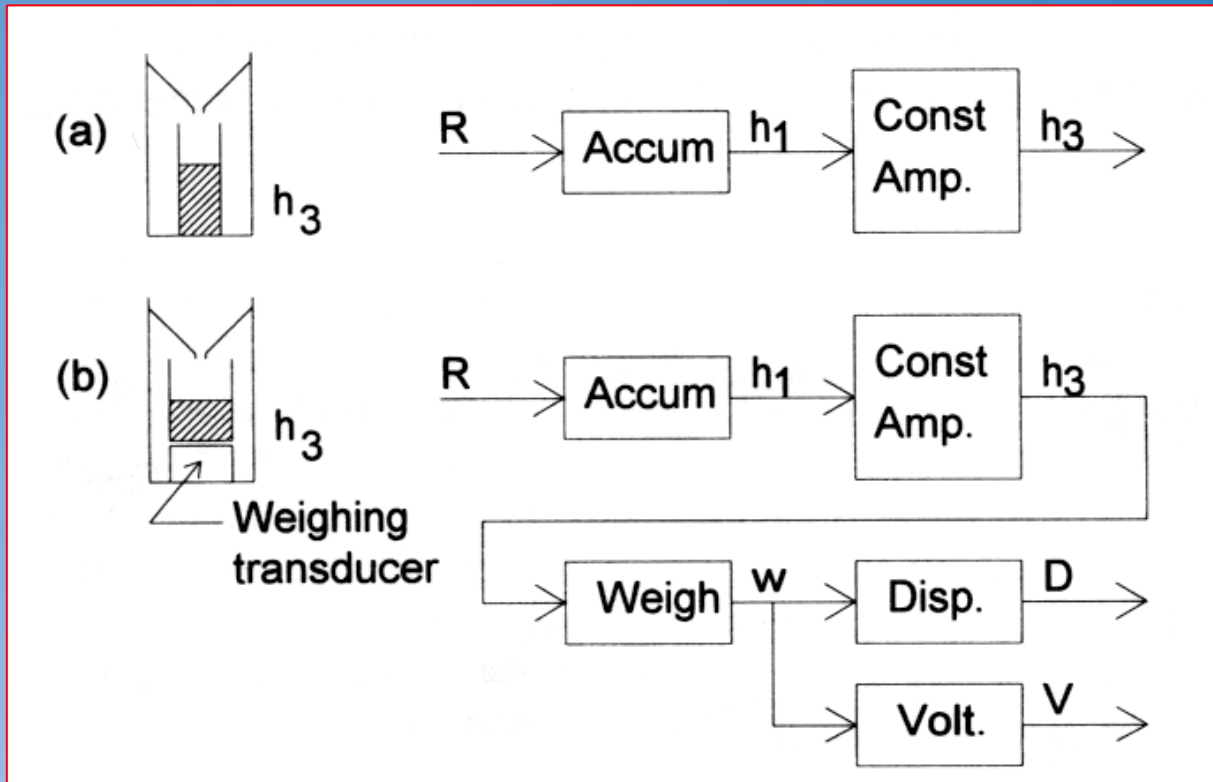
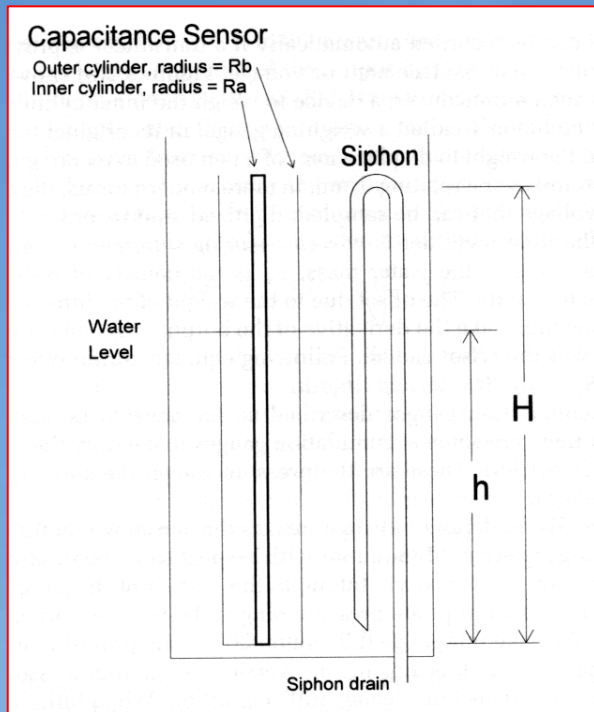


Ilustração esquemática de pluviômetros totalizadores.



Sensor de profundidade capacitivo e sifão automático.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln(r_b / r_a)} [1 + f(\kappa - 1)]$$

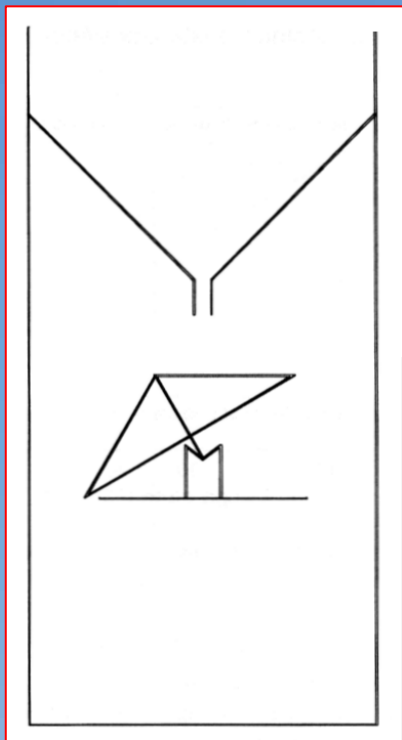
$C$  = capacitância;

$\epsilon_0$  = permissividade do ar;

$\kappa$  = constante dielétrica da água;

$h = fH$ , altura d'água.

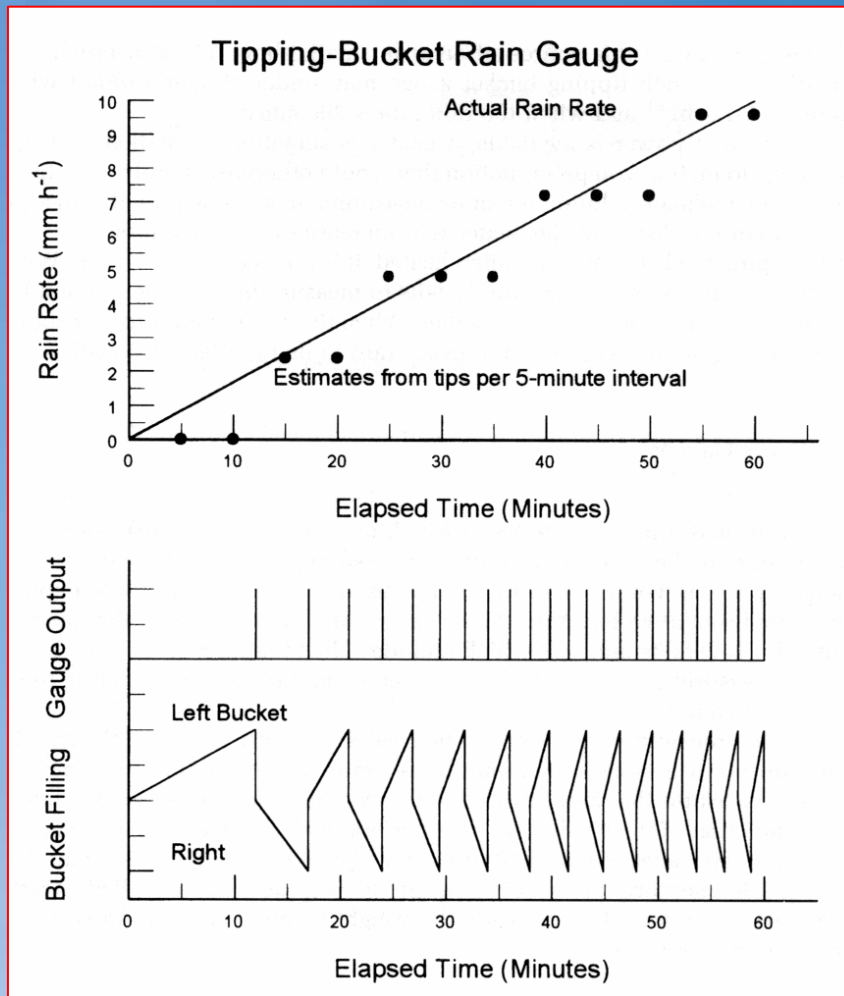
Capacitância -> frequência -> Voltagem



**Pluviômetro basculante**

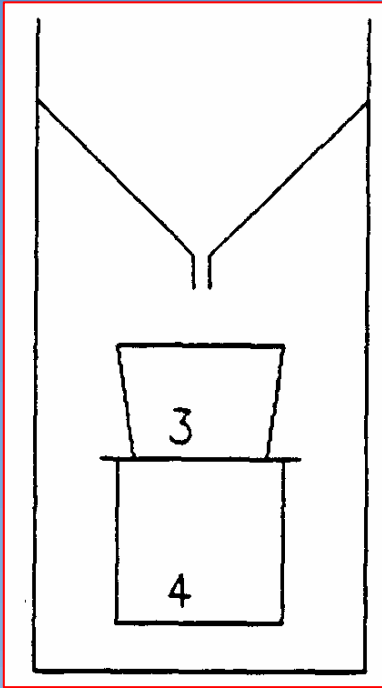
A água que chega a uma das vasilhas. Quando esta enche, seu centro de gravidade muda e ela bascula e esvazia a água coletada, trazendo a outra vasilha em posição de coletar água. Cada inclinada corresponde a 0.1 mm, 0.2 mm ou 0.25 mm de chuva. Quando a bascula inclina, aciona um interruptor que gera um pulso elétrico.

Este pluviômetro subestima a chuva quando a taxa de precipitação é muito baixa ( $<10\text{mm h}^{-1}$ ) ou muito alta ( $> 200\text{mm h}^{-1}$ ).



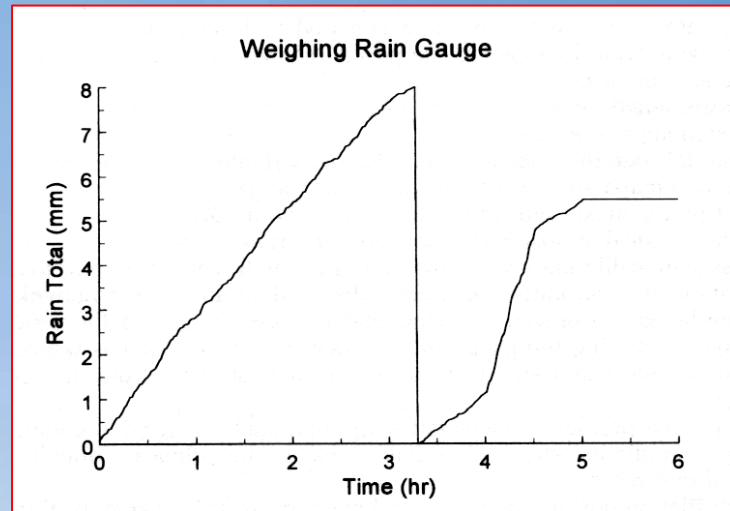
Medição com pluviômetro de caçamba para  
taxas de precipitação crescentes.

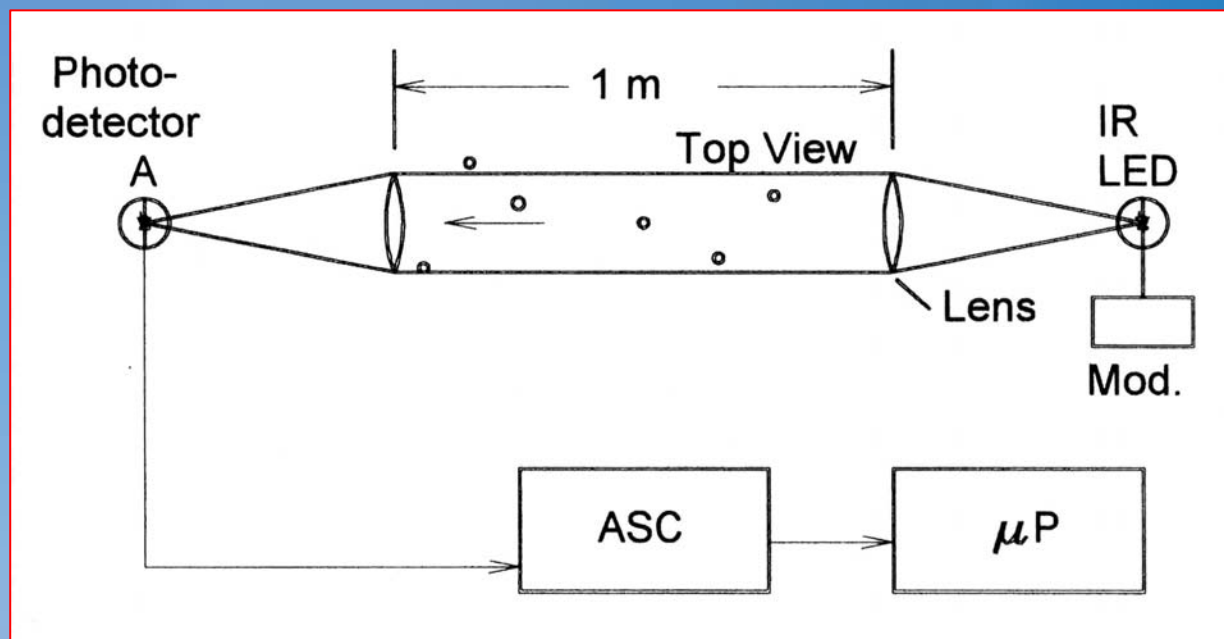




Pluviômetro de balança

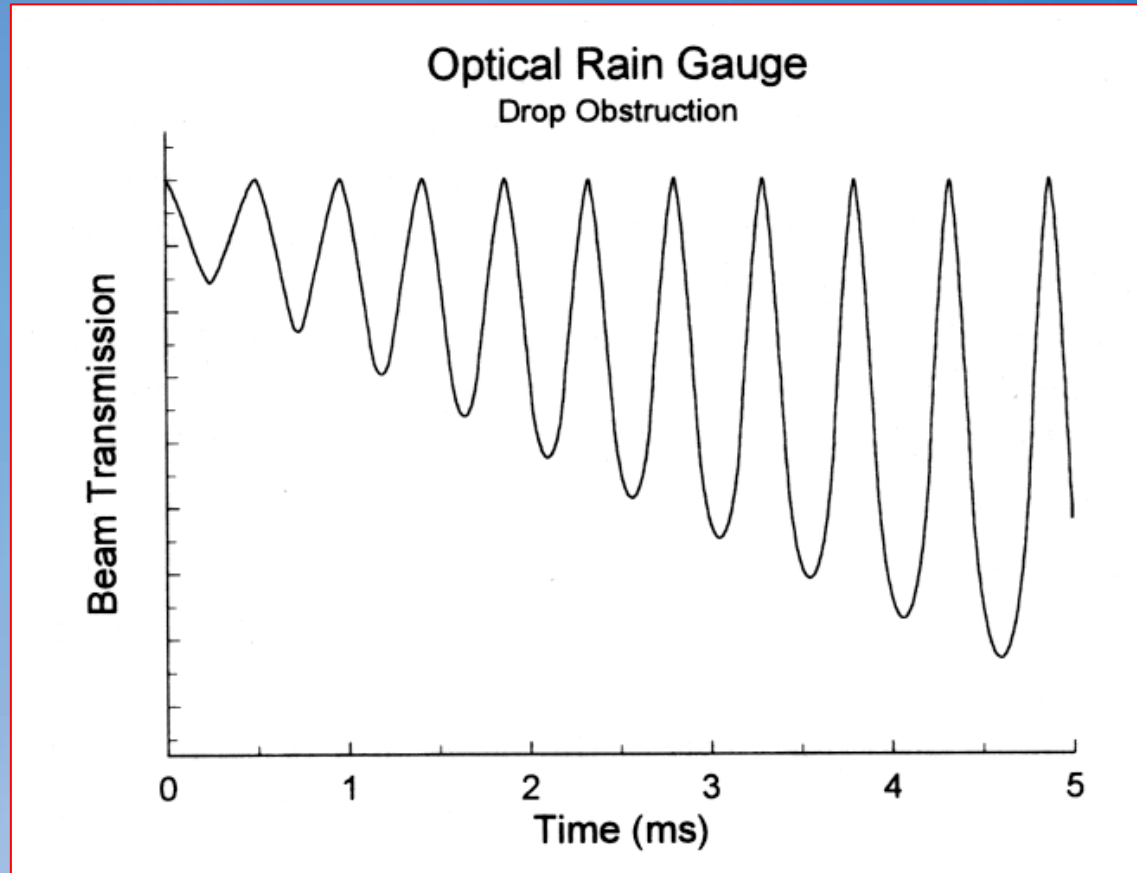
O pluviômetro de balança compreende um recipiente montado sobre uma mola ou um mecanismo de pesagem. O mecanismo de equilíbrio pode acionar um registrador gráfico. Este é mais difícil de automatizar embora, às vezes, o registrador gráfico seja substituído por um medidor de tensão para converter o peso em sinal elétrico.



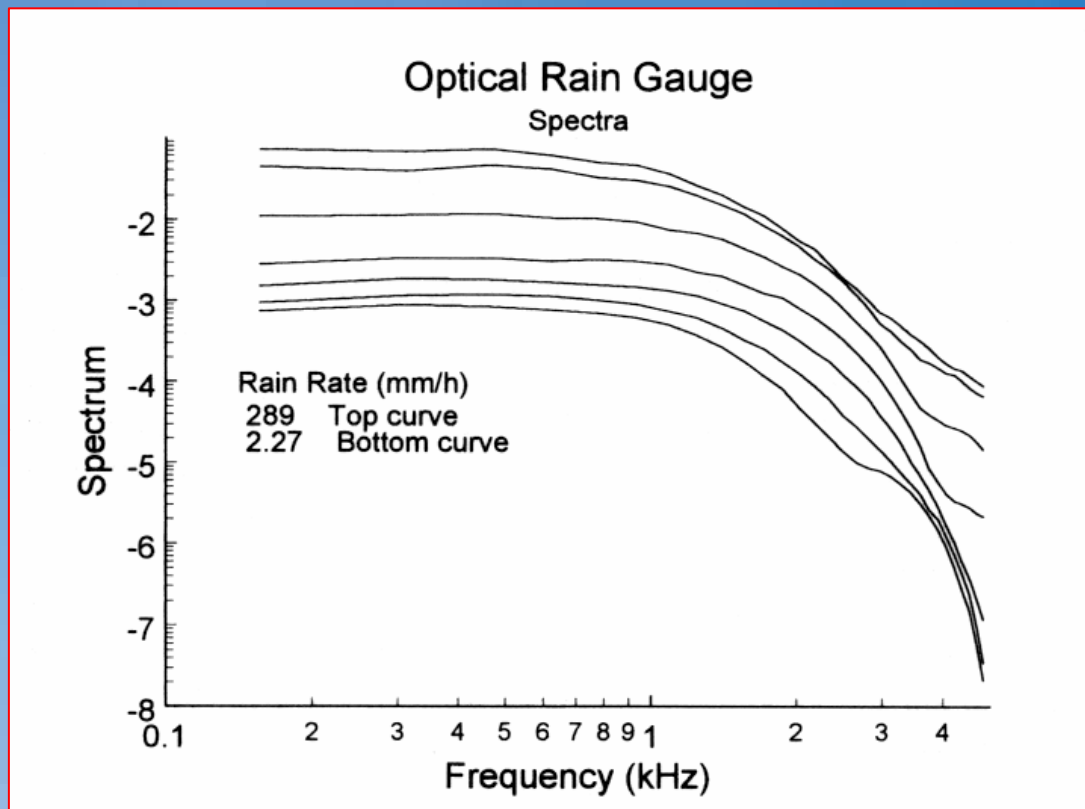


**Pluviômetro óptico.** A luz emitida por um diodo IR (LED) passa por uma lente e atravessa 1m de atmosfera, é focada por outra lente e incide sobre um fotodetector. Gotas, gotículas, neve, etc atravessam o feixe e causam cintilação (flutuação rápida) da luz recebida pelo fotodetector.

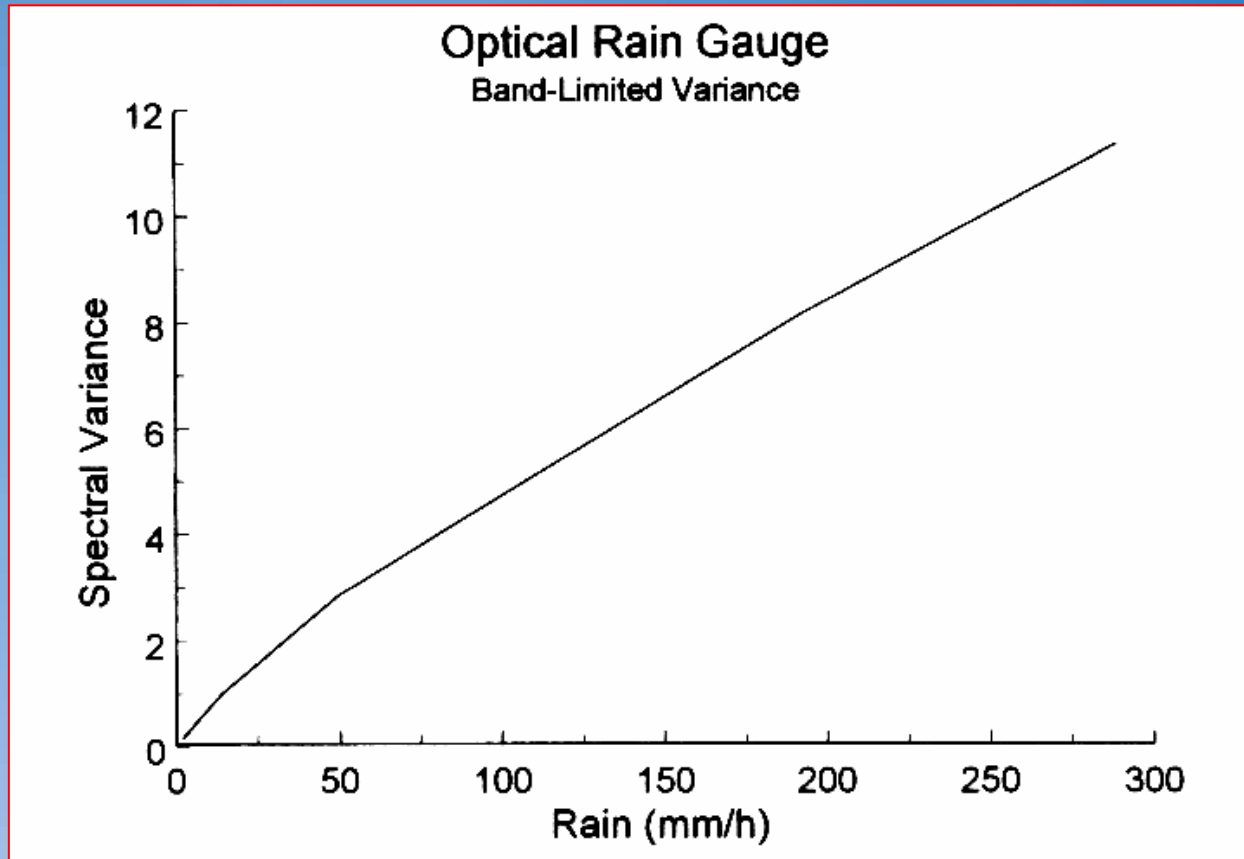
- A frequência de cintilação é proporcional à taxa de precipitação
- A amplitude é relacionada ao tipo (chuva ou neve). Este instrumento pode detectar a presença de chuva ou neve detectando a frequência de cintilação.
- A razão da amplitude do sinal em duas diferentes bandas de frequência pode determinar se há chuva ou neve (a neve produz uma amplitude do sinal mais baixa).
- Esta razão também compensa possíveis oscilações na intensidade do sinal devido a mudanças na fonte, sujeira na lente, etc.
- Falhas na fonte ou bloqueio do feixe também podem ser detectados e informados.



Obstrução por gotas de 1; 1,3; 1.6;...3,7 mm sucessivamente.



Análise espectral para taxas de precipitação de 289,0; 192,0; 49,7; 14,0; 6,33; 3,46 e 2,27 mm h<sup>-1</sup>. O sinal atenuado é amostrado a cada 50  $\mu$ s. A chuva corresponde a variância temporal da potência do sinal na banda de frequência de 1 a 4 kHz.



Potência espectral média entre 1 e 4 kHz em função da taxa de precipitação.

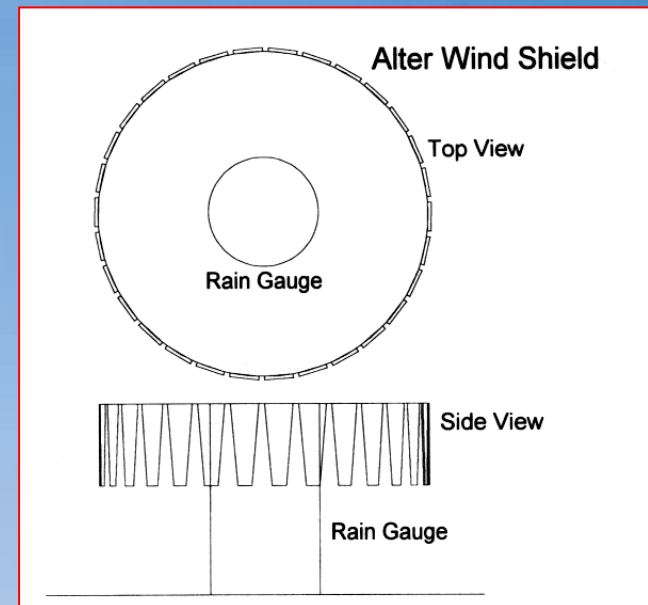
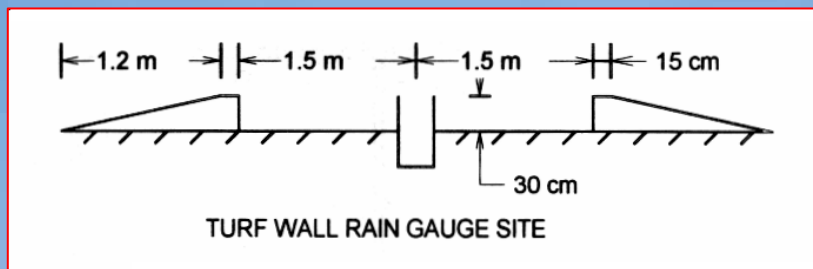
## Exposição

- Pluviômetros de basculante e de balança estão sujeitas a erros devido à evaporação e a respingo fora do coletor e à inclinação do pluviômetro em relação ao eixo vertical;
- Mais importantes fontes de erro: exposição e a representatividade;
- Turbulência causa fluxo ao redor do pluviômetro, com isto gotas de chuva pequenas e neve podem ser desviadas para fora do pluviômetro, ou seja, subestima a chuva;
- Experimentais mostram que a redução pode ser de 20% para ventos de 5 a 10m s<sup>-1</sup> e acima de 80% para ventos acima de 10m s<sup>-1</sup>.

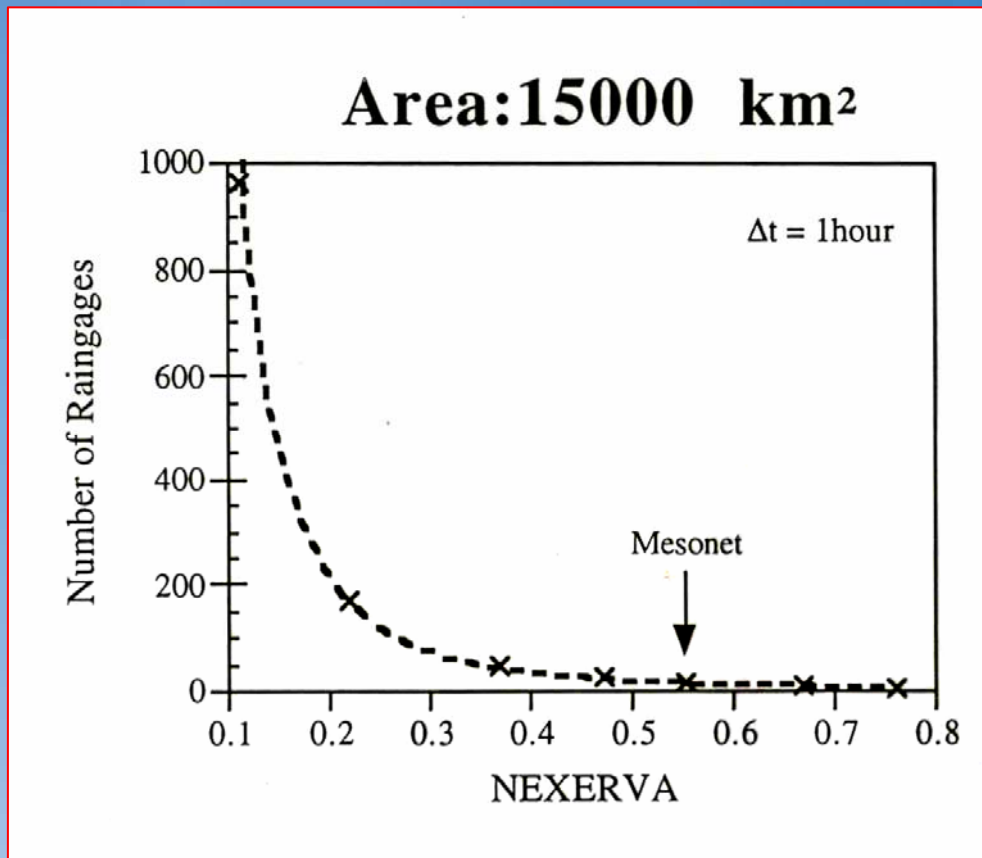
- O local de instalação ideal é uma área livre de obstruções que criam grandes turbilhões e desviariam o escoamento. Os ventos devem ser fracos para permitir que a chuva e neve caiam verticalmente. Estas condições podem ser razoavelmente boas para gotas grandes de chuva, mas é quase impossível para a neve.
- Um pluviômetro a jusante de uma obstrução pode coletar mais ou menos precipitação, dependendo da obstrução, da velocidade do vento e do tamanho das partículas.
- A exposição habitual deixa a abertura do pluviômetro (coletor) a alguma distância do solo (Brasil 1,5m) e longe de obstruções.



Às vezes uma tela especial de vento é colocada ao redor do pluviômetro, o que cria turbulência e tende a minimizar o viés sistemático do vento. Pluviômetros nunca devem ser colocados ao redor ou em cima de um edifício.

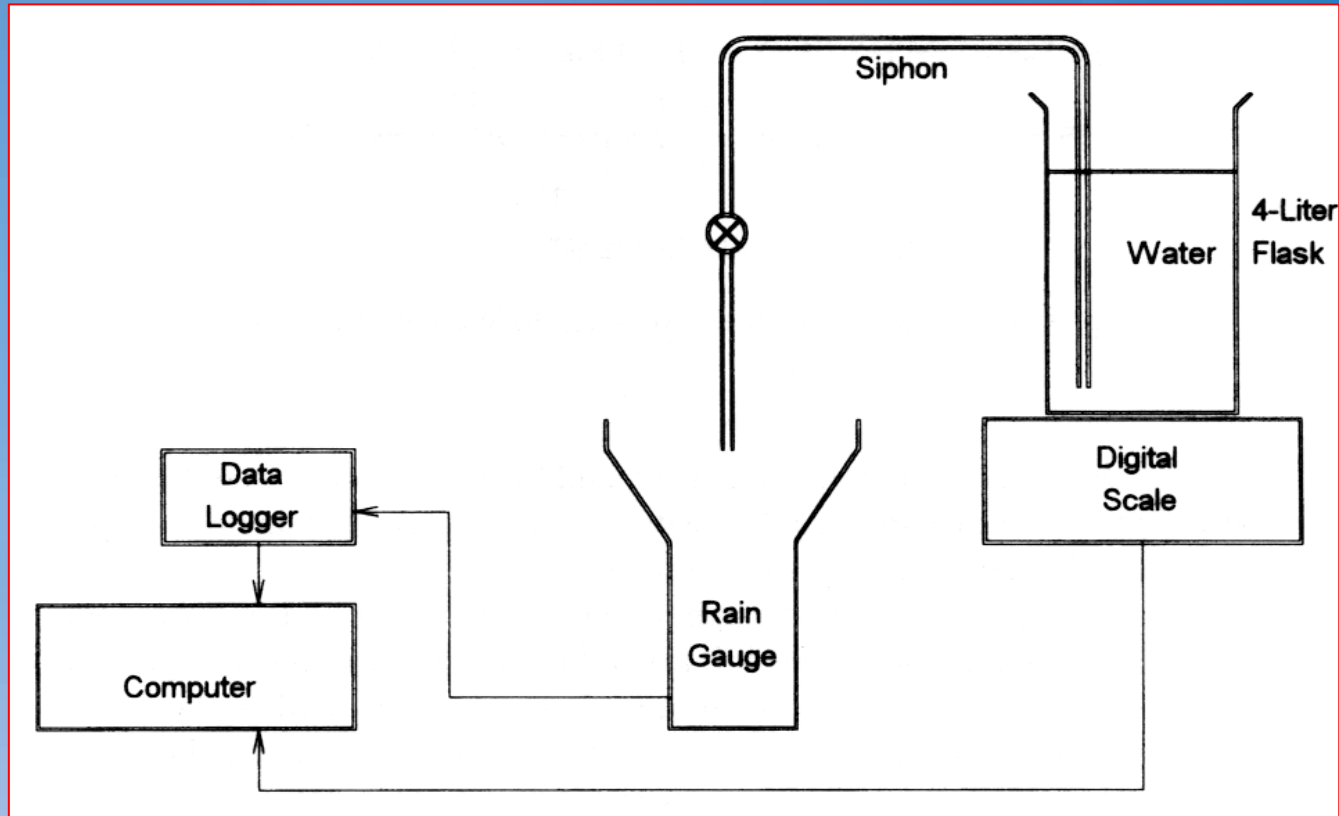


- Todos os pluviômetros descritos acima são suscetíveis ao erro de amostragem.
- Um pluviômetro num área de 700-800 km<sup>2</sup> corresponde a uma fração de área coberta da ordem de 10<sup>-6</sup>.
- Esta amostragem é muito ruim para qualquer tipo de chuva, principalmente tempestades isoladas.
- Para chegar a 30% de precisão em chuvas fortes é necessário um pluviômetro por 100 km<sup>2</sup>.



Número de pluviômetros em função do erro de estimativa da chuva horária numa área de 15000 km.

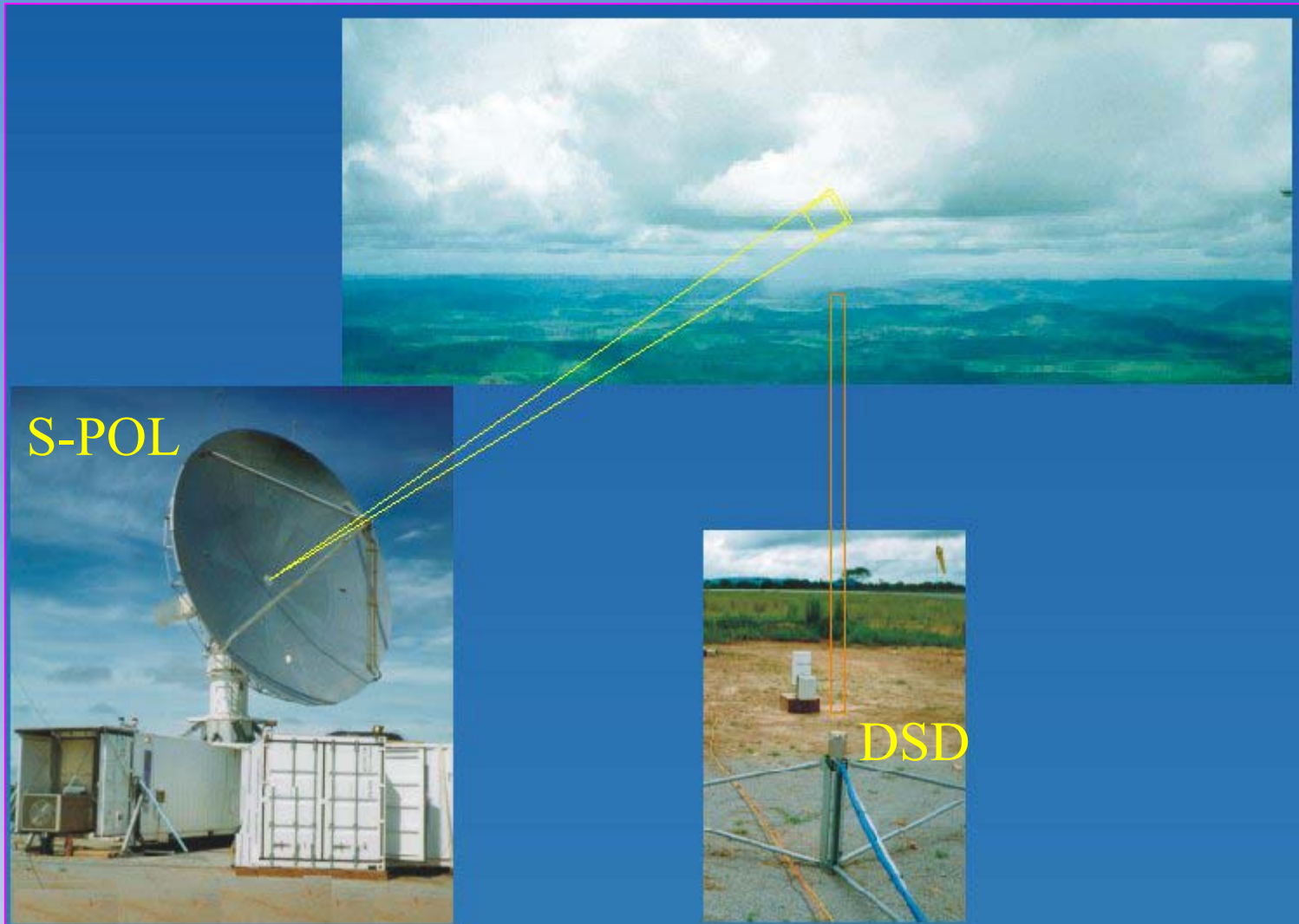
# Calibração

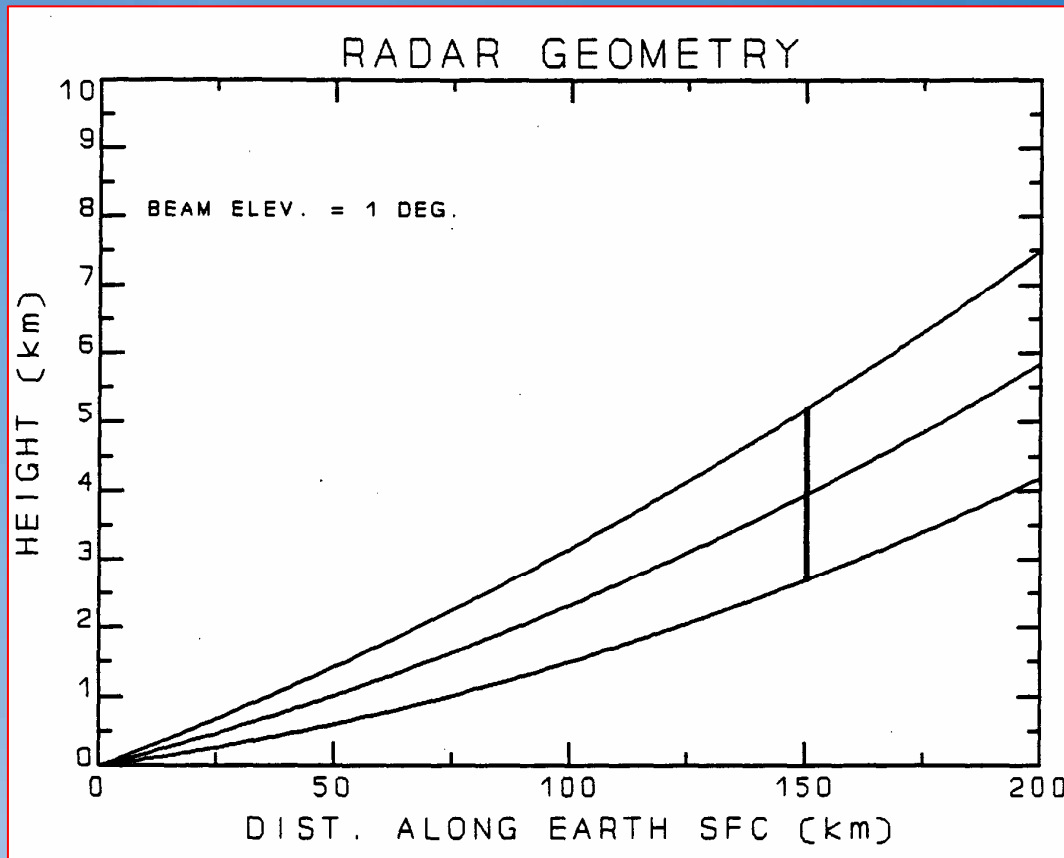


Sistema de calibração de pluviômetros automático.

# Métodos de medição

## •Volumétrico (radar meteorológico)





Geometria de um feixe de onda do radar meteorológico.

A equação de radar meteorológico :

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 l^2 c \tau \theta_1^2 |K_w|^2 Z}{2^{10} (\ln 2) r^2 \lambda^2}$$

$P_r$  = potência recebida (W);

$P_t$  = potência transmitida (W);

$g$  = ganho da antena;

$l$  = fator de atenuação (absorção);

$\tau$  = largura do pulso (s);

$\theta_1$  = largura do feixe da antena (rad);

$r$  = distância do alvo (m),

$\lambda$  = comprimento de onda eletromagnética (m),

$|K_w|^2$  = refratividade da água,

$Z_e$  = refletividade efetiva ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ). [dBZ =  $10 \log_{10} Z$  ( $Z$  0 -  $10^6$ )]

*Normalmente, usa-se  
dBZ =  $10 \log_{10} Z$ , pois  
Z varia de 0 a  $10^6$*

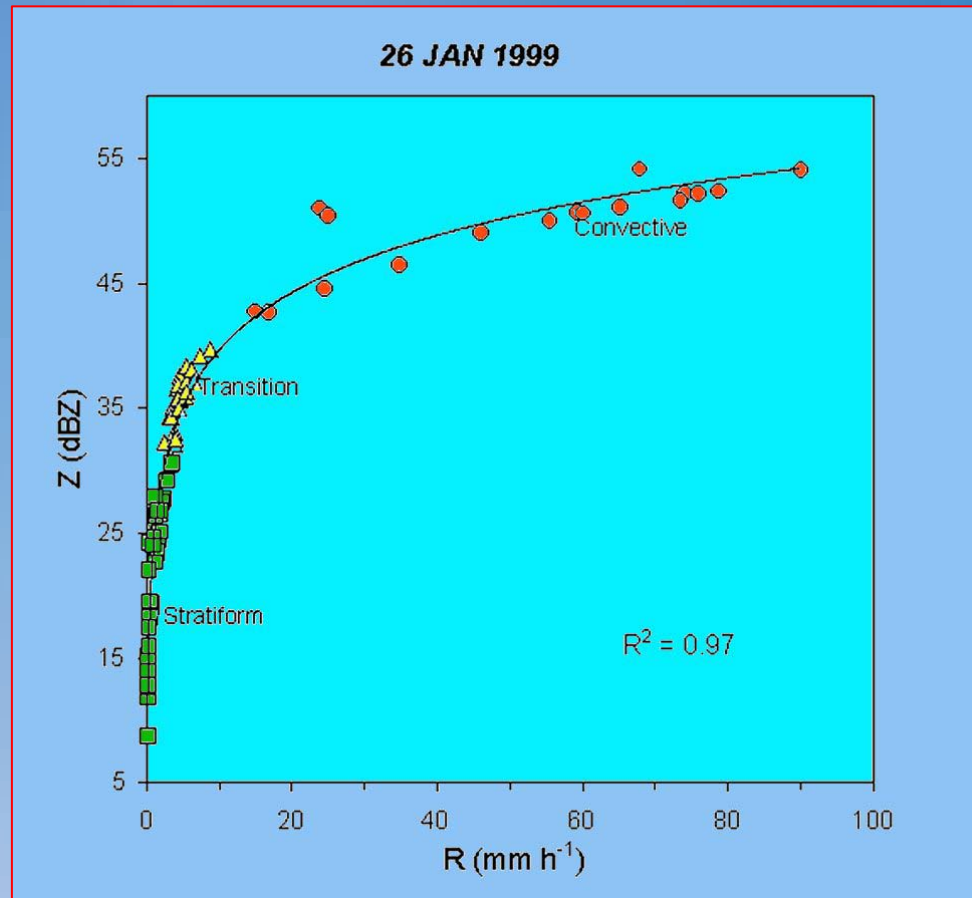
## Refletividade:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD$$

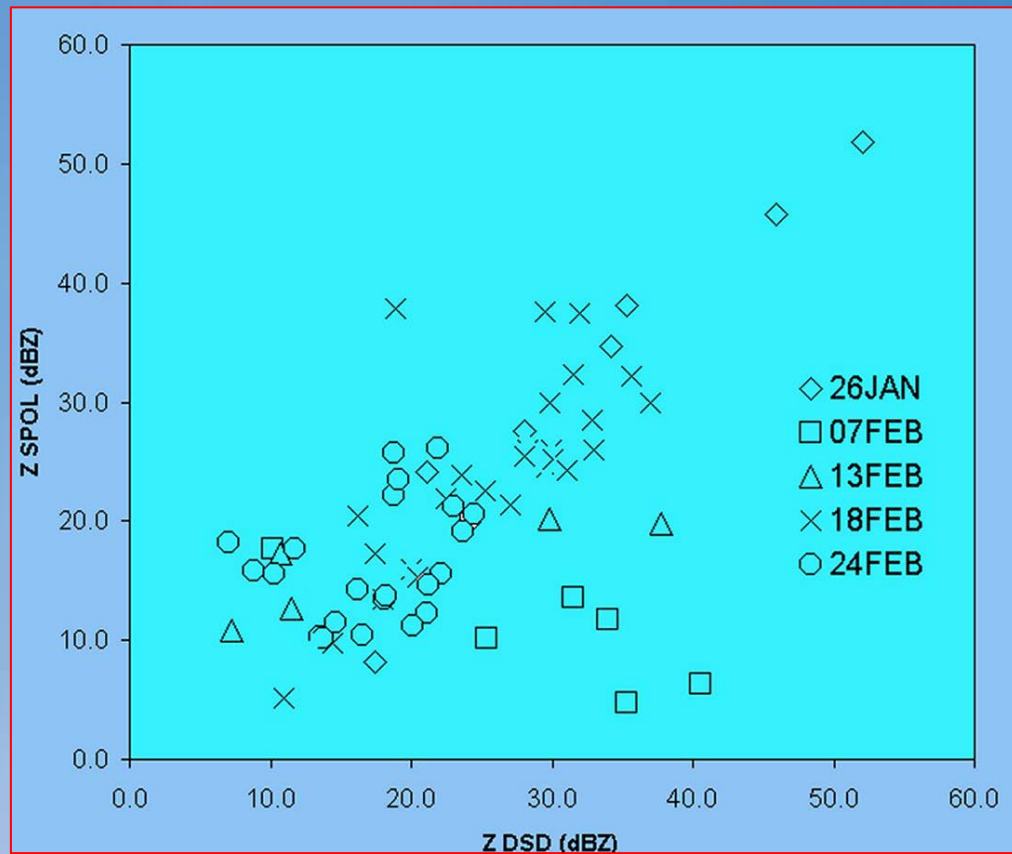
## Taxa de precipitação:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 N(D) w_T(D) dD$$





Relação entre Z e R com DSD em Rondônia.



Refletividade medida com radar (ZPOL) e estimada com DSD.

## Fontes de erro da estimativa de chuva com RADAR:

- 1) Calibração eletrônica do radar;
- 2) Espectro do tamanho de gotas desconhecido;
- 3) Ventos horizontais e verticais,
- 4) Atenuação por gases, chuva e radoma;
- 5) Aumento da refletividade por espalhamento;
- 6) Preenchimento incompleto do feixe de onda do radar;
- 7) Evaporação e gradientes de taxa de chuva.

# *Radiação*

Medição de radiação solar e terrestre.

Unidade de radiação  $W m^{-2}$

Fatores de conversão:

$1 W m^{-2}$	=	$1.433 \times 10^{-3} cal cm^{-2} min^{-1}$
	=	$1.433 \times 10^{-3} langley min^{-1}$
	=	$1.0 J s^{-1} m^{-2}$
	=	$1000 erg s^{-1} cm^{-2}$
	=	$0.317 BTU ft^{-2} h^{-1}$
	=	$5.283 \times 10^{-3} BTU ft^{-2} min^{-1}$

# Definições

Fluxo radiante - quantidade de radiação vinda de uma fonte por unidade de tempo  $W$  (J/s).

Intensidade radiante - fluxo radiante que deixa um ponto em uma fonte, por unidade de ângulo sólido do espaço que cerca este ponto em  $W \text{ sr}^{-1}$ .

Radiância - fluxo radiante emitido por uma unidade de área de uma fonte ou difundido por unidade de área de uma superfície em  $W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

Irradiância - fluxo radiante incidente, vindo de todas as direções (hemisférico), em uma superfície receptora por unidade de área de superfície em  $W \text{ m}^{-2}$ .

Absortância, refletância e transmitância - fração do fluxo incidente que é absorvido, refletido ou transmitido por um meio.

Radiação solar global - irradiância solar recebido em uma superfície horizontal em  $W m^{-2}$ . Radiação direta e difusa medida numa superfície horizontal. Medição por **piranômetro**.

Radiação solar direta - radiação emitida por unidade de ângulo sólido do disco solar, recebida em uma superfície perpendicular ao eixo deste cone (do ângulo sólido). Radiação solar não espalhada pela atmosfera ou refletida pela superfície ( $W m^{-2}$ ). Medição por **pireliômetro**.

Radiação solar difusa - radiação espalhada na direção da superfície vinda de todas as direções de um hemisfério sem contabilizar a radiação solar direta ( $\text{W m}^{-2}$ ). Pode ser medida por um **piranômetro** com obstrução do disco solar ou calculada a partir da radiação global (**piranômetro**) e a radiação solar direta (**pireliômetro**).

Radiação fotossinteticamente ativa - faixa da radiação solar entre 400 nm e 700 nm absorvida pelas plantas no processo de fotossíntese. Mede-se em moles de fótons que é o número de Avogadro de fótons,  $6.022 \times 10^{23}$  fótons.

Irradiância emitida por um corpo negro (Lei de Planck):

$$E_{\lambda}^* = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}$$

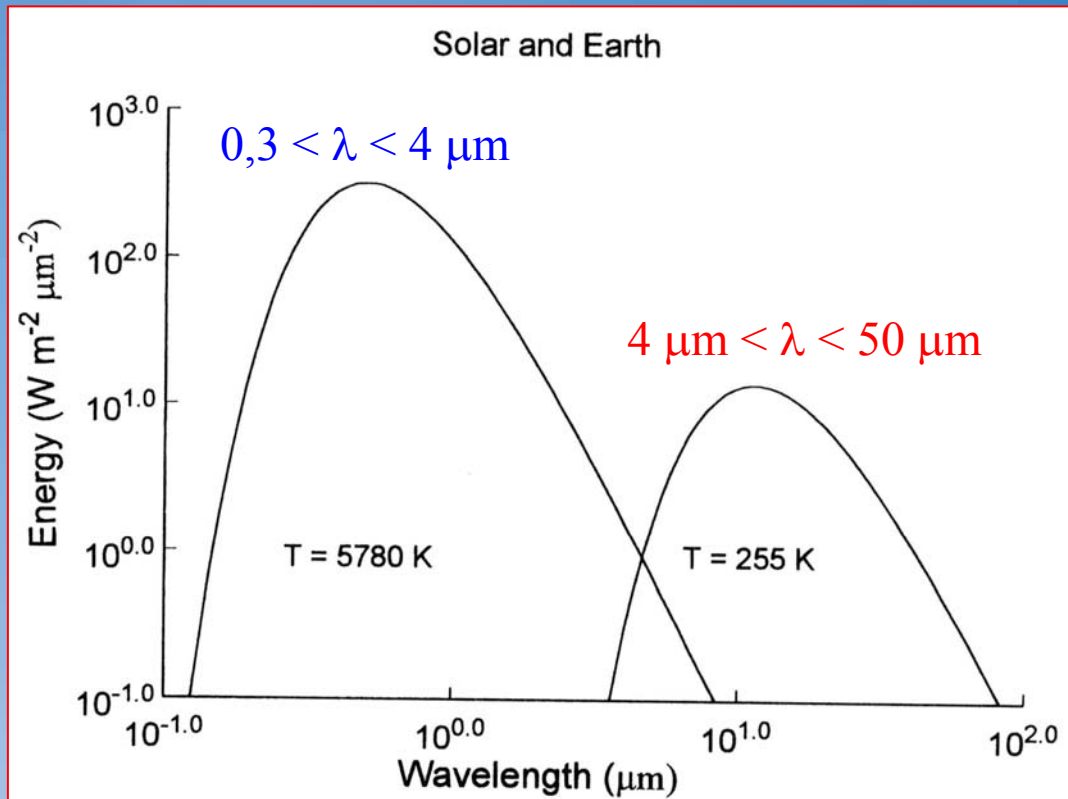
$h = 6,626176 \times 10^{-34}$  J s, constante de Planck;

$k = 1,380662 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>, constante de Boltzmann;

$c = 2,9979 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>, velocidade da luz.



# Radiação Solar e Terrestre



Energia radiante solar e terrestre. A energia solar foi corrigida pela fração interceptada pela Terra e atmosfera, superfície e albedo da Terra.

Máxima irradiância (Lei de Wien):

$$\lambda_m = \frac{2897.8 \mu m K}{T}$$

Pico de emissão da radiação solar em  $0,5 \mu m$  ( $T = 5780 K$ );

Pico de emissão da radiação terrestre em  $11,4 \mu m$  ( $T=255 K$ ).

# Métodos de medição

- Instrumentos de medida de radiação podem ser classificados de acordo com o seu uso;
- O termo genérico para todos os instrumentos de medida de radiação é o radiômetro.

Piranômetro - mede a radiação solar global, ou seja, mede a radiação solar direta e difusa proveniente de todo hemisfério. O sensor numa superfície horizontal plana.

Pireheliômetro - mede a radiação solar direta.

Pirradiômetro - mede a radiação total, onda curta e onda longa.

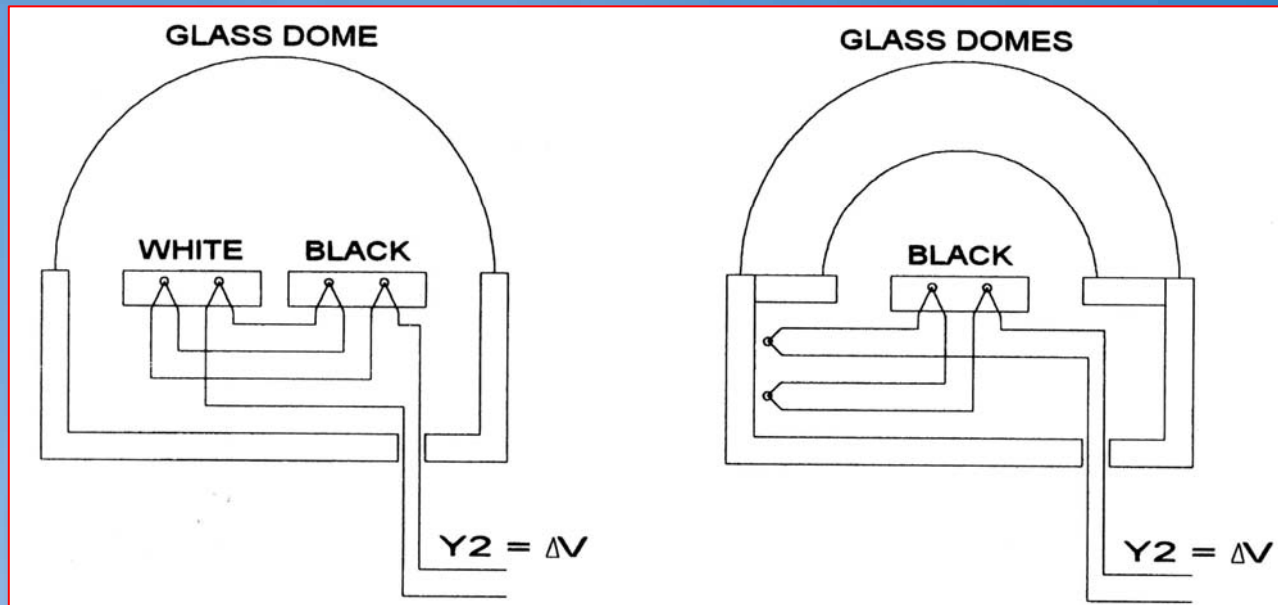
Pirgeômetro - mede a radiação de onda longa (terrestre ou atmosférica).

Pirradiômetro líquido – mede a radiação líquida, ou seja, o saldo de radiação entre a superfície e a atmosfera, incluindo a radiação solar.

## ***Detectores térmicos***

- Medem a mudança de temperatura (ganho/perda de calor) devido a absorção/emissão de radiação por uma superfície negra.

- A mudança de temperatura é uma medida em relação à uma superfície branca ou ao corpo do instrumento.



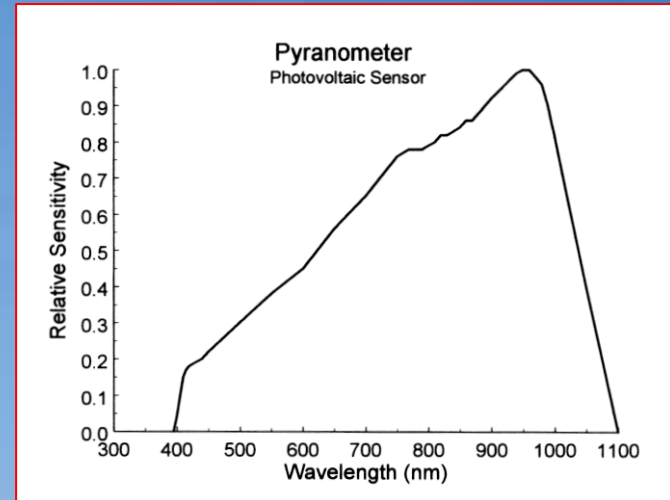
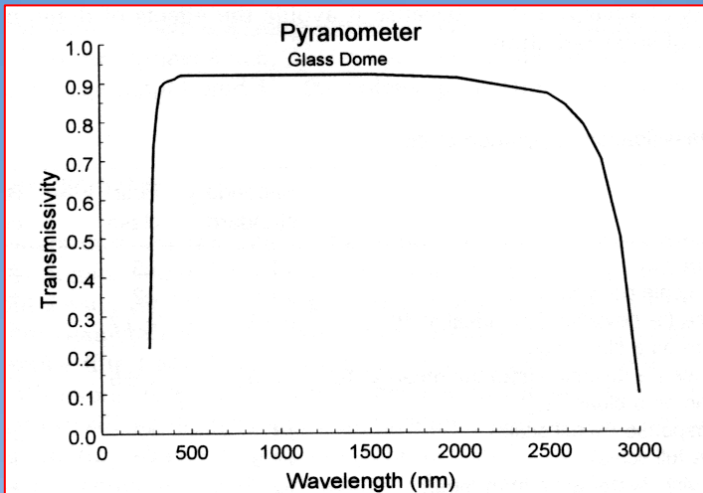
Piranômetros de termopilha que mostra apenas dois pares de termopares (normal: 10 - 100 pares).

- **Piranômetro** requer **domo de vidro** para filtrar a radiação atmosférica e deixar passar a radiação de  $0,25 \mu\text{m}$  até  $2,8 \mu\text{m}$ . Os mais refinados permitem a passagem de até  $4.5 \mu\text{m}$ ;
- O domo de vidro protege o elemento sensível do vento e de contaminantes atmosféricos;
- Uma superfície negra para luz visível pode não ser negra no infravermelho (cinza);
- Sensibilidade típica:  $10 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ ;
- Constante de tempo: 5 s.
  
- **Pirgeômetro** utiliza um filme fino de polietileno.

## ***Detectores de fóton***

- **Piranômetro** detector fotovoltaico de silício é sensível a radiação solar entre 400 a 1100 nm;
- Deve ser calibrado com um sensor alta qualidade (Piranômetro de Precisão Espectral da Eppley) por causa causa do grande erro de resposta espectral;
- O erro de calibração resultante, sob condições de radiação solar natural, esta entre  $\pm 3$  a  $\pm 5\%$ ;
- Os detectores de fóton custam muito menos que um detector de termopilha. Porém, eles não podem ser usados para medir radiação infravermelha ou ultravioleta próximo.





Resposta espectral de piranômetros termopilha e fotovoltaico.

# Erros de medição

Erro absoluto de calibração - erro na calibração de um sensor, devido ao uso de um sensor de referência defeituoso. O erro de calibração mínimo é obtido enviando um sensor para calibração na NIST (sigla) . Todas as outras calibrações envolvem o uso de outros padrões que devem ser relacionados ao da NIST e normalmente devem ter erros adicionais envolvidos ;

Erro de resposta espectral - o sensor não responde ao espectral ideal. Por exemplo, o piranômetro ideal deveria absorver toda a radiação incidente entre 280 e 2800 nm. Se um piranômetro diverge muito deste ideal ele, ainda, pode ser usado para medir radiação solar global com o fator de correção apropriado;

Erro de cosseno - erro devido a correção cosseno inexata que produz erro a baixos ângulos de elevação solar. A irradiância devido a um feixe é proporcional ao cosseno deste ângulo. É dito que um radiômetro cuja resposta para feixes que vêm de diferentes direções segue a mesma relação e tem correção de cosseno;

Erro de azimute - mudança na saída do sensor quando o sensor é girado sobre o eixo normal a um dado ângulo e radiação incidente. Falta de simetria;

Erro de Linearidade - a saída do sensor não é proporcional a entrada;

Erro de Histerese - a resposta do sensor é diferente quando a radiação aumenta e quando a radiação diminui para um mesmo valor de entrada;

Erro de coeficiente de temperatura - o sensor é sensível a temperatura;

Erro de tempo de resposta – o sinal de entrada está mudando rapidamente e o sensor não responde a essa mudança;

Erro de estabilidade a longo prazo - causado pela mudança das características do sensor com tempo;

Erros de montagem e aplicação - incluem reflexões ou obstrução do mastro de apoio ou edifícios adjacentes; pó e fezes de pássaro no sensor; impacto que pode causar dano ao sensor; uso de constante de calibração incorreta e falta de calibração periódica.

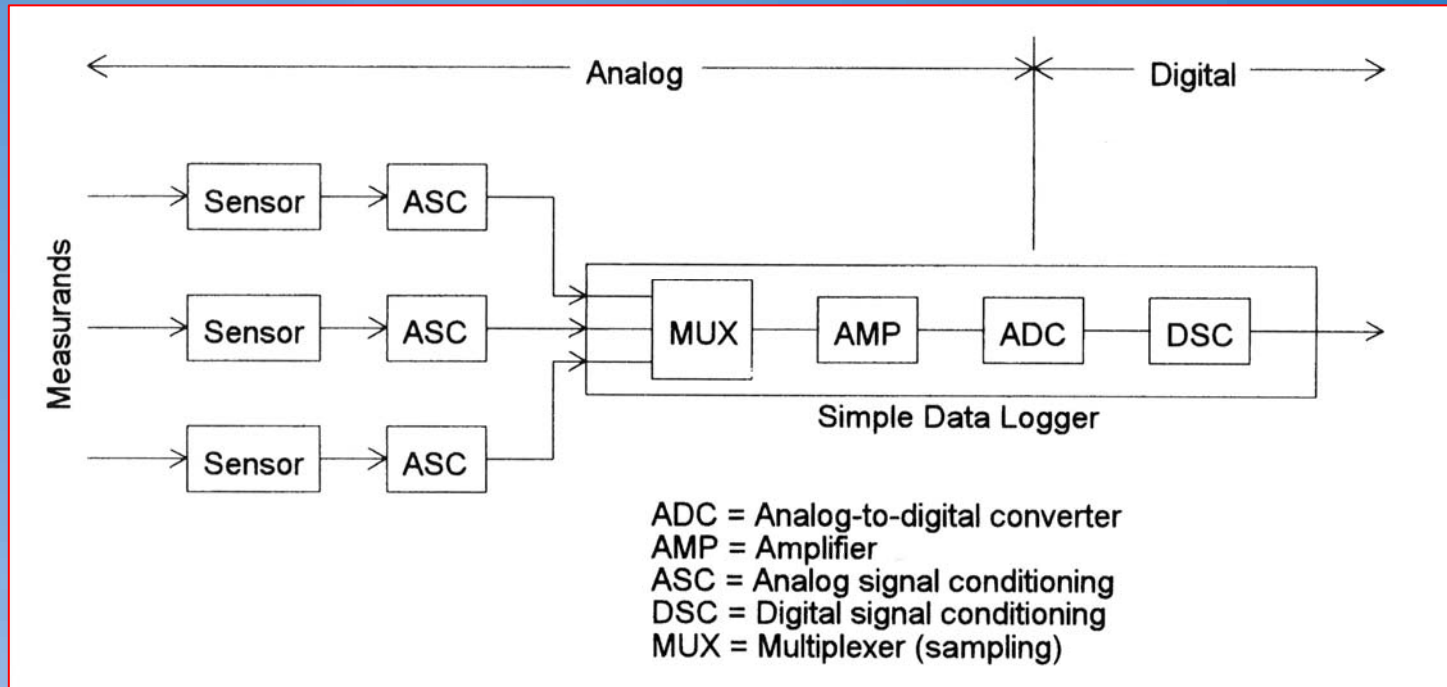
Table 10-2 Classification of pyranometers.

Characteristic	Secondary standard	First class	Second class
Resolution ( $\text{W m}^{-2}$ )	$\pm 1$	$\pm 5$	$\pm 10$
Stability (% full scale per year)	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$
Cosine response (% deviation from ideal at $10^\circ$ solar elevation on a clear day)	$< \pm 3$	$< \pm 7$	$< \pm 15$
Azimuth response (% deviation from the mean at $10^\circ$ solar elevation on a clear day)	$< \pm 3$	$< \pm 5$	$< \pm 10$
Temperature response (% full scale)	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$
Non-linearity (% full scale)	$\pm 0.5$	$\pm 2$	$\pm 5$
Spectral sensitivity (% deviation from mean absorptance)	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$
Response time (99% response)	$< 25 \text{ s}$	$< 60 \text{ s}$	$< 4 \text{ min}$

# *Amostragem e conteúdo de informação*

O sinal de saída de um sensor é sempre analógico. Ele pode tomar muitas formas, inclusive tensão ou corrente, resistência, etc. Podem ser convertidos em outras formas de energia por transdutores ou condicionadores de sinal analógico.

Sensor	Raw Sensor Output	Transducer or Analog Signal Conditioning	Resulting Analog Signal
Thermocouple	Voltage	Amplifier	Voltage
RTD, thermistor	Resistance	Bridge circuit	Voltage
Rain gauge	Frequency or period	–	Frequency or period
Wind vane	Angular position	Potentiometer	Voltage
Cup and propeller anemometers	Rotation rate	DC generator	DC voltage
Cup and propeller anemometers	Rotation rate	Relay or light chopper	Frequency or period
Aneroid barometers	Deflection or position	Capacitive circuit	Frequency or period
Liquid-in-glass thermometers	Position	–	Position

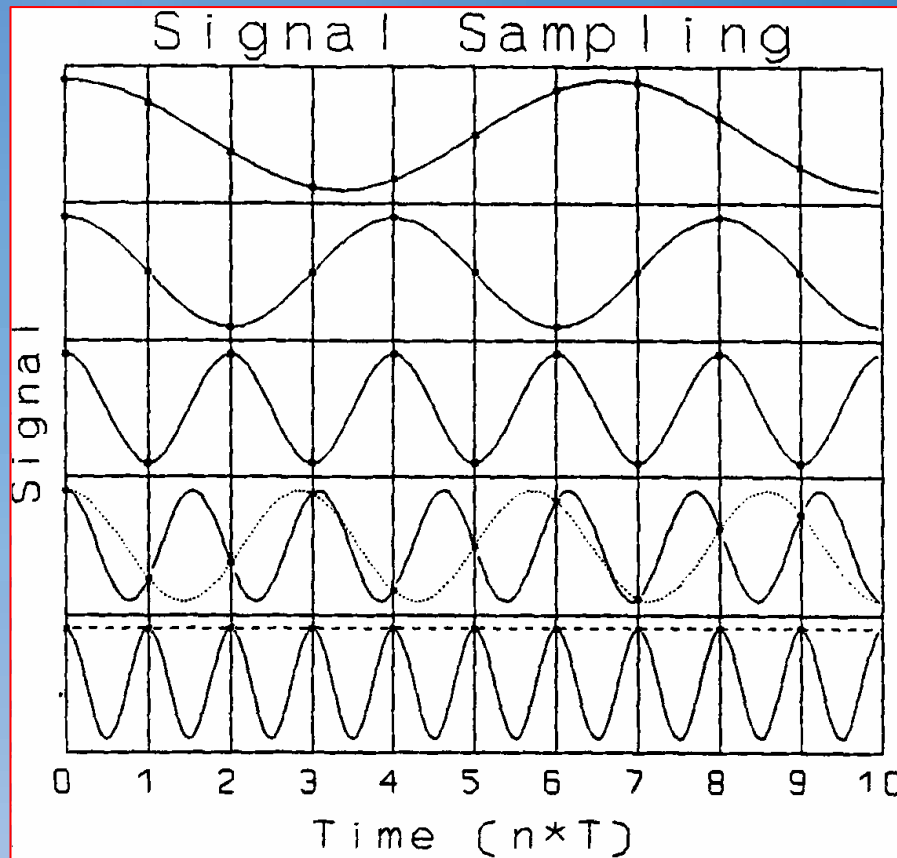


Trajetória do sinal de entrada do sensor ao data logger.



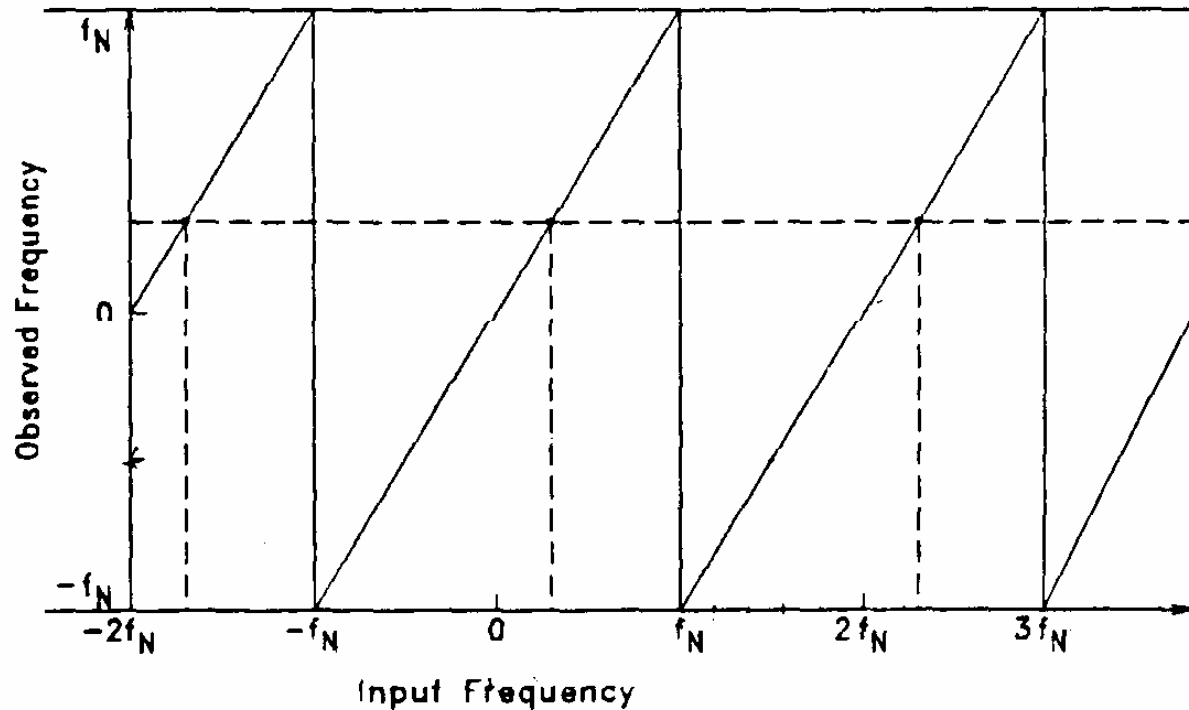
# Amostragem

- Um sinal analógico pode ser amostrado no espaço ou no tempo;
- O sinal é analógico, ou seja, tem um intervalo contínuo de amplitude;
- O processo de amostragem pode causar uma distorção do sinal denominado de frequência de dobramento se este contém frequências acima de um certo limiar,
- A frequência Nyquist é definida como  $f_N = 1/(2\Delta T)$ , onde  $\Delta T$  é o intervalo de amostragem.



*Ondas cosseno de frequência crescente amostradas num intervalo  $T$ .*

# Frequency Folding



Frequência de dobramento. Uma frequência observada nos dados amostrados pode vir de muitas frequências de entrada possíveis.

# Conversão analógico para digital

Elementos essenciais de um ADC:

- 1) Um sinal analógico de entrada;
- 2) Definição de um intervalo de entrada;
- 3) Uma quantidade de referência;
- 4) Uma saída em quantidades discretas sobre um número finito de estados.

Um ADC converte a intervalos de tempo discretos ou contínuos.

- O intervalo do sinal de entrada de um ADC pode ser uma voltagem (-5 a 5 volts), frequência (10 HZ a 1 MHz), ângulo (0 a 360 graus), etc. Deve ser definido para permitir representação da saída com um número finito de estados.
- Um valor de referência permite que o conversor determine a magnitude da entrada do sinal para os possíveis estados. O valor de referência pode ser gerado dentro do ADC ou pode ser externo a ele.
- A saída é representada por um número finito de estados que representam o intervalo de entrada do ADC. Esta é a essência de um sinal digital.
- A saída pode ser expressa em qualquer sistema numérico. O binário é usado quando a saída de ADC é enviada a um computador, e decimal se a saída se dirige para a exibição diretamente, como em um voltímetro digital.

# Definições

A = Sinal analógico de entrada;

D = Sinal digital de saída;

$A_L$  = Limite inferior do intervalo de entrada de ADC;

$A_H$  = Limite superior do intervalo;

$S_p$  = Amplitude (Span) =  $A_H - A_L$ ;

$N_S$  = Número de estados disponível na saída, D;

Q = Quantum de entrada representado por um estado de saída, uniformemente distribuído em cima do intervalo de entrada;  $Q = S_p/N_S$

- O ADC para computador utiliza o sistema binário;
- Supõem-se que a saída é um binário positivo inteiro;
- $N_B$  = número de bits usado;
- Intervalo de  $D$  é  $(0, N_S - 1)$ , onde:

$$Q = \frac{S_P}{N_S} = \frac{S_P}{2^{N_B}}$$

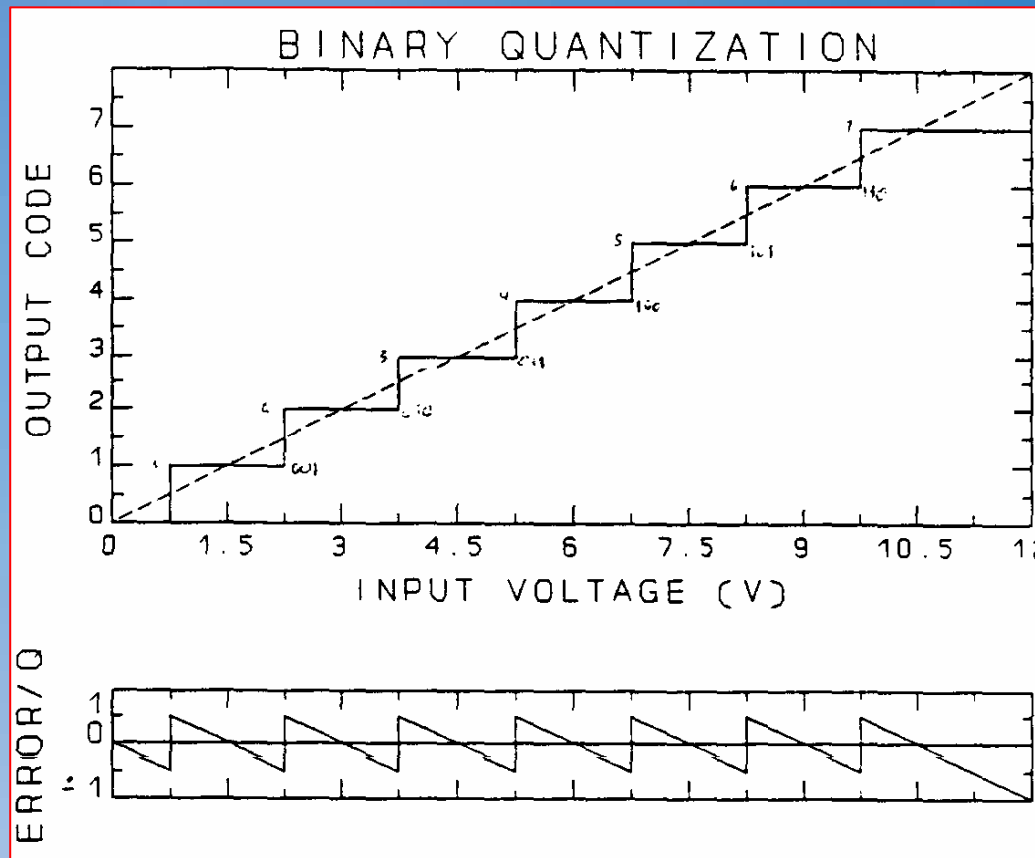
- A saída é dada por:  $D = \text{INTEIRO} \left[ \frac{A - A_L}{Q} + 0.5 \right]$

- Tal que:  $0 \leq D \leq N_S - 1$

Exemplo: ADC binário de 12 bits com um intervalo de entrada de -5 a 5 volts.  $A_L = -5V$ ,  $A_H = 5V$ ,  $N_B = 12$ ,  $N_S = 409$ ,.  $Q = 2,441mV$ .

Entrada A (V)	Saída D (binário)	Saída D (decimal)
-5,000	0000 0000 0000	0
0,000	0111 1111 1111	2047
3,142	1110 0000 0000	3335
4,996	1111 1111 1110	4094
4,997	1111 1111 1111	4095
5,000	1111 1111 1111	4096





Quantificação binária de 3 bit.

# Conteúdo de informação

- Um sistema de medição inclui um ou mais sensores, transdutores, um conversor analógico-digital, e outros módulos;
- Se o range do sensor é mapeado no intervalo do ADC, este é um conversor binário, pode-se calcular a probabilidade de qualquer possível estado de saída de um ADC.

Se nenhuma informação a priori há sobre o estado de entrada, então todos os sinais saída do ADC são estados igualmente prováveis:  $p_1 = p_2 = \dots = p_i = 1/n$  e isto pode ser normalizado como:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

Conteúdo de informação médio ou entropia de informação de um sinal digital:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

$P_i$  = probabilidade de ocorrência de cada estado digital. Todos sinais digitais têm um número finito de estados.

## Conteúdo de informação de um Sinal Analógico

- Sinal analógico é contínuo, ou seja, tem um número infinito de estados. Pode-se aplicar as idéias da teoria de informação a sinais analógicos de um sensor com um número finito de estados num intervalo definido.
- O tamanho dos estados finitos pode ser equivalente a imprecisão. Por causa do conteúdo de ruído de todos sinais analógicos, há incertezas no valor exato do sinal.

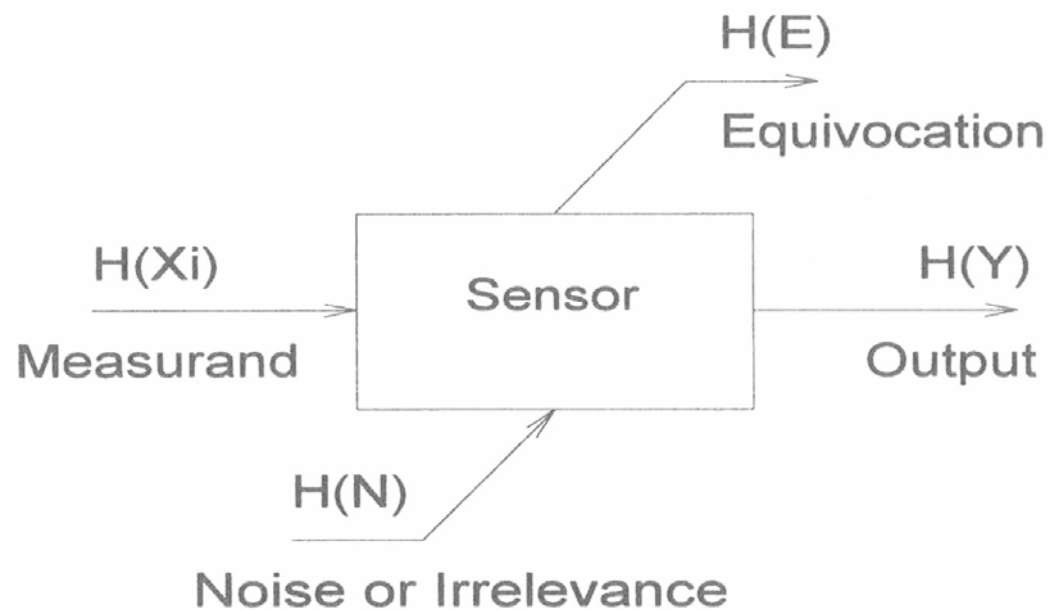
$\Delta x$  = imprecisão.

O conteúdo de informação médio de um sinal analógico é:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \Delta x \ln(P_i \Delta x)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \Delta x = 1$$

$$\Delta x \rightarrow 0 \Rightarrow H \rightarrow \infty$$



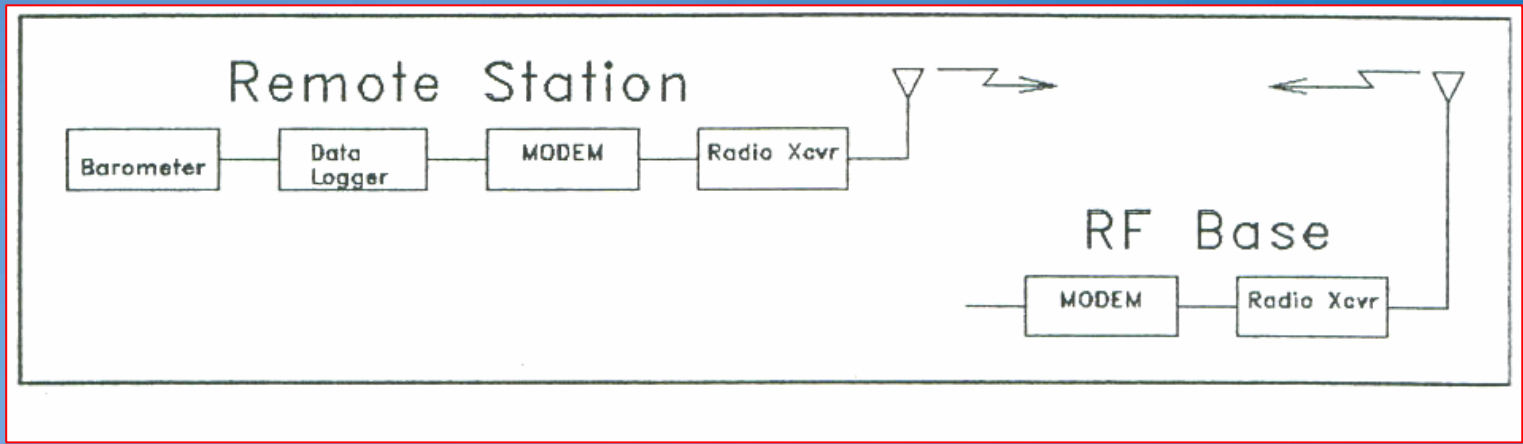
fluxo de informação em um sensor  
do mesurando para a saída.

# Transmissão de dados controle de qualidade

Quase todo sistema de medição precisa de algum tipo de comunicação de dados seja por cabo direto, telefone, rádio e satélite.

O tipo de sistema de comunicações utilizado freqüentemente impõe limitações no sistema de medição. Graças aos microprocessadores, os dados são quase sempre transmitidos na forma digital.





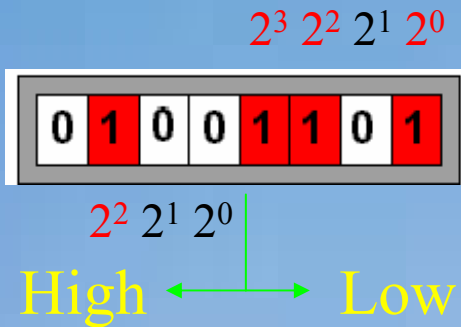
- No exemplo acima, um barômetro digital transmite dados digitais seriais em código ASCII para o data logger;
- Os dígitos são transmitidos serialmente, o decimal mais significativo primeiro;
- Entre cada dígito, os oito bits que compõe o código ASCII são transmitidos serialmente, o bit menos significativo primeiramente.

American Standard Code for Information Interchange (ASCII)									
Low Hex Digit		High Hex Digit (Not including parity)							
HEX	DEC	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p
1	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
2	2	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
3	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
4	4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
5	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
6	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
7	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
8	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
9	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
A	10	LF	SS	*	:	J	Z	j	z
B	11	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
C	12	FF	FS	,	<	L	\	l	
D	13	CR	GS	-	=	M	]	m	}
E	14	SO	RS	.	>	N	^	n	~
F	15	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

Some special ASCII characters.			
NUL	The all-zeros character	HT	Horizontal tab (tab)
SOH	Start of heading	LF	Line feed
STX	Start of text	VT	Vertical tab
ETX	End of text	FF	Form feed
EOT	End of transmission	CR	Carriage return
ACK	Acknowledge	NAK	Negative acknowledge
BEL	Bell	ESC	Escape
BS	Backspace	SP	Space

**B**inary digi**T**) = BIT

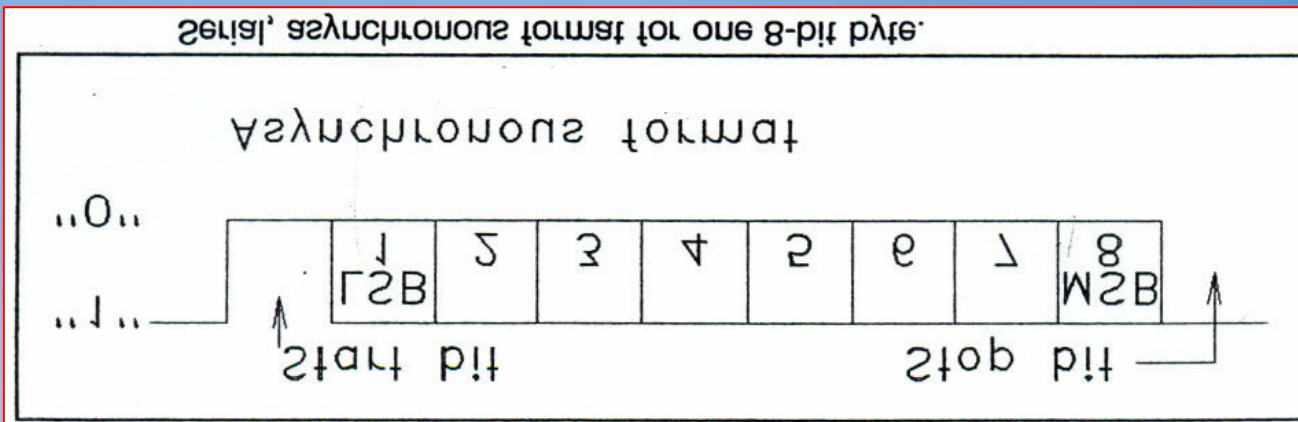
**B**inar**Y** Table = BYTE



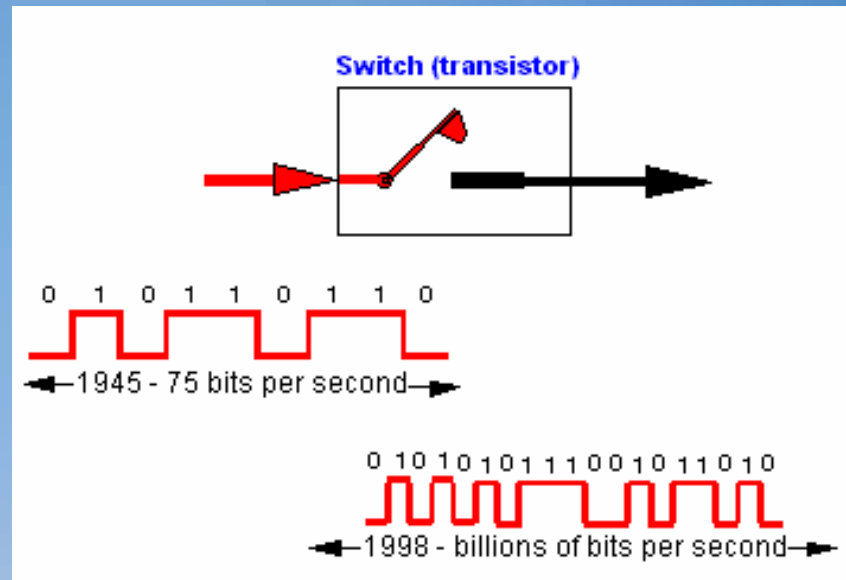
Letter	Binary Code	Letter	Binary Code
A	01000001	a	01100001
B	01000010	b	01100010
C	01000011	c	01100011
D	01000100	d	01100100
E	01000101	e	01100101
F	01000110	f	01100110
G	01000111	g	01100111
H	01001000	h	01101000
I	01001001	i	01101001
J	01001010	j	01101010
K	01001011	k	01101011
L	01001100	l	01101100
M	01001101	m	01101101
N	01001110	n	01101110
O	01001111	o	01101111
P	01010000	p	01110000
Q	01010001	q	01110001
R	01010010	r	01110010
S	01010011	s	01110011
T	01010100	t	01110100
U	01010101	u	01110101
V	01010110	v	01110110
W	01010111	w	01110111
X	01011000	x	01111000
Y	01011001	y	01111001
Z	01011010	z	01111010

Use of a parity bit to check data transmission.

Line	P	7	6	5	4	3	2	1	
1	1	1	0	0	0	0	0	1	ODD
2	1	1	0	0	0	0	1	1	EVEN
3	1	1	0	0	0	0	1	0	ODD



# Transmissão de dados binários



**Erros na transmissão de dados podem muito altos.**

**Há três possíveis soluções:**

- 1) Melhorar o sistema de comunicação com melhora margem de operação;**
- 2) Usar códigos de detecção de erros nos dados;**
- 3) Usar sistema de retransmissão de dados quando um erro for detectado.**



## Conferência de Redundância Cíclica (CRC)

Os dados a serem transmitidos podem ser representados como uma série de bits. Esta série de bits pode ser considerada como um polinômio, ignorando-se os limites.

Exemplo: uma mensagem de 24 bits: 101100111000101010001110

Polinômio:  $D(x) = x^{23} + x^{21} + x^{20} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{11} + x^9 + x^7 + x^3 + x^2 + x^1$

Polinômio gerador:  $G(x) = \frac{D(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)}$

O CRC é o restante  $R(x)$ :



O restante de 16 bits é somado ao fim da mensagem.

A estação que estiver recebendo a mensagem fará o mesmo cálculo para verificar o CRC.

Este método pode detectar erros com com probabilidade de 99,955%.

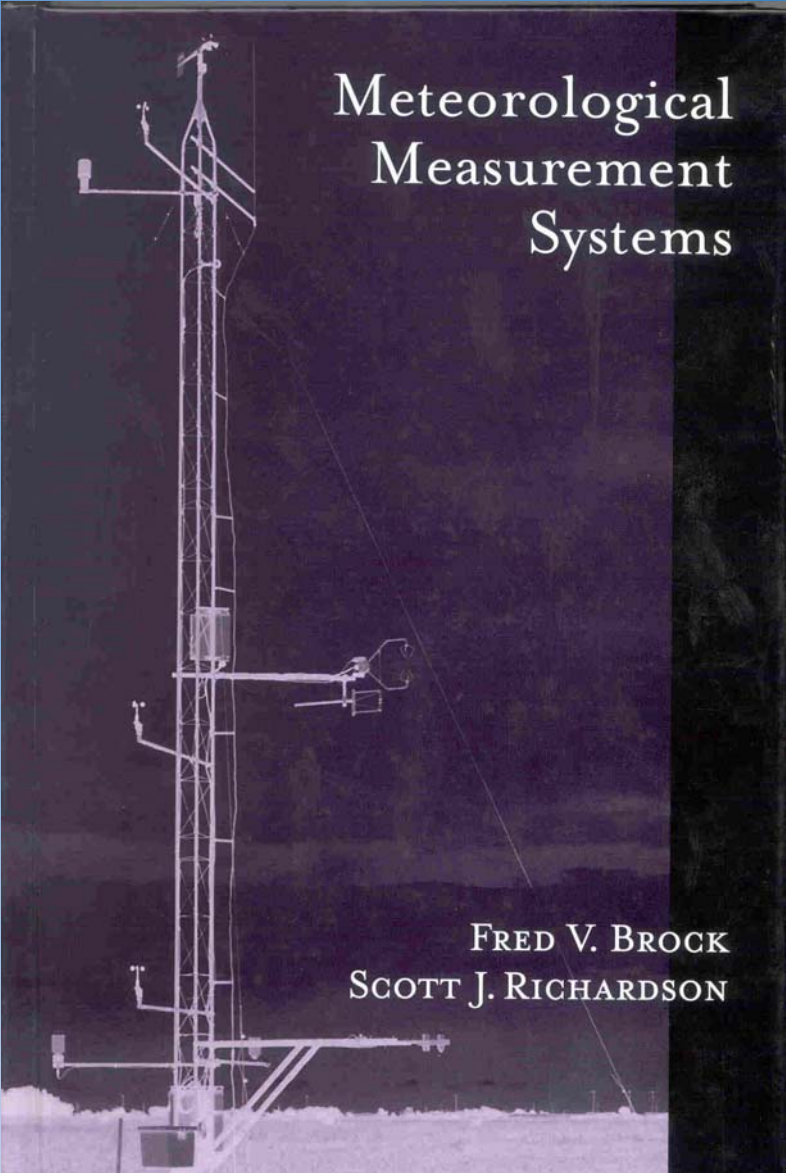
## Controle de qualidade dos dados (CQD)

- Objetivo: manter a mais alta qualidade do banco de dados;
- As falhas nos dados têm de ser detectadas rapidamente;
- A ação corretiva tem de ser eficiente;
- Dados duvidosos têm de ser separados para verificação;
- O banco de dados deve incluir bits de status associado a cada dado;

- O sistema de CQD não deve alterar os dados mas apenas estabelecer o seu status quanto a qualidade dos mesmos;
- O sistema CQD poderia talvez indicar os dados que fossem realmente válidos mas representassem condições meteorológicas inesperadas ou incomuns;
- Os dados indicados poderiam ficar disponíveis a alguns usuários, mas não deveriam ficar disponíveis para uso operacional de rotina;

## **Componentes mais importantes: do CQD:**

1. Calibração em laboratório
2. Intercomparações de campo;
3. Monitoramento de dados em tempo real;
4. Documentação;
5. Revisões independentes;
6. Publicação da avaliação da qualidade de dados.



# Meteorological Measurement Systems

FRED V. BROCK  
SCOTT J. RICHARDSON

**Sistemas de Medição em Hidrometeorologia**  
**1º Semestre de 2008**