Características generalizadas de desempenho de instrumentos

O Problema da Combinação de erros na precisão global do sistema de medição

Sistema de medição $\Rightarrow$ conjunto de componentes, cada um sujeito a sua imprecisão individual

Questões Importantes sobre o Problema

"*Se imprecisões individuais são conhecidas, como calcular a imprecisão global?*"

"Se é necessário que a imprecisão global tenha um determinado valor, qual a imprecisão permitida a cada componente do sistema de medição?"

Propagação de erros

Considere o problema de calcular uma quantidade ***N***, tal que:

$$N = f(u_1, u_2, u_3, \ldots, u_n)$$

u_i, $i=1,2,\ldots,n$ $\rightarrow$ quantidades medidas com erros $\pm\Delta u_i$

$\Rightarrow$ $\pm\Delta$N provocado em ***N***

Δu_i podem ser considerados:

- Limites absolutos dos erros;
- Limites estatísticos:

a) Erro provável: $e_p \equiv 0.674\, s$, em que s^2 é a variância;

b) $3s$

c) incertezas

Caso 1: Erros Δu_i são limites absolutos nos erros individuais

Neste caso: ΔN é calculado como erro absoluto

$$N \pm \Delta N = f(u_1 \pm \Delta u_1,\ u_2 \pm \Delta u_2,\ u_3 \pm \Delta u_3,\ \ldots,\ u_n \pm \Delta u_n)$$

Expandindo a função *f* em Série de Taylor, tem-se:

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, \ldots, u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, \ldots, u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + \ldots + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n} +$$

$$\frac{1}{2}\left[(\Delta u_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_1^2} + (\Delta u_2)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_2^2} + \ldots + (\Delta u_n)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_n^2}\right] + \ldots$$

Comentários

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, ..., u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, ..., u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + ... + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n} +$$

$$\frac{1}{2}\left[(\Delta u_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_1^2} + (\Delta u_2)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_2^2} + ... + (\Delta u_n)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_n^2} \right] + ...$$

os $\dfrac{\partial f}{\partial u_i}$ são avaliados nos pontos u_i conhecidos

Δu_i são pequenos na prática $\Rightarrow$ $(\Delta u_i)^2$ podem ser desprezados

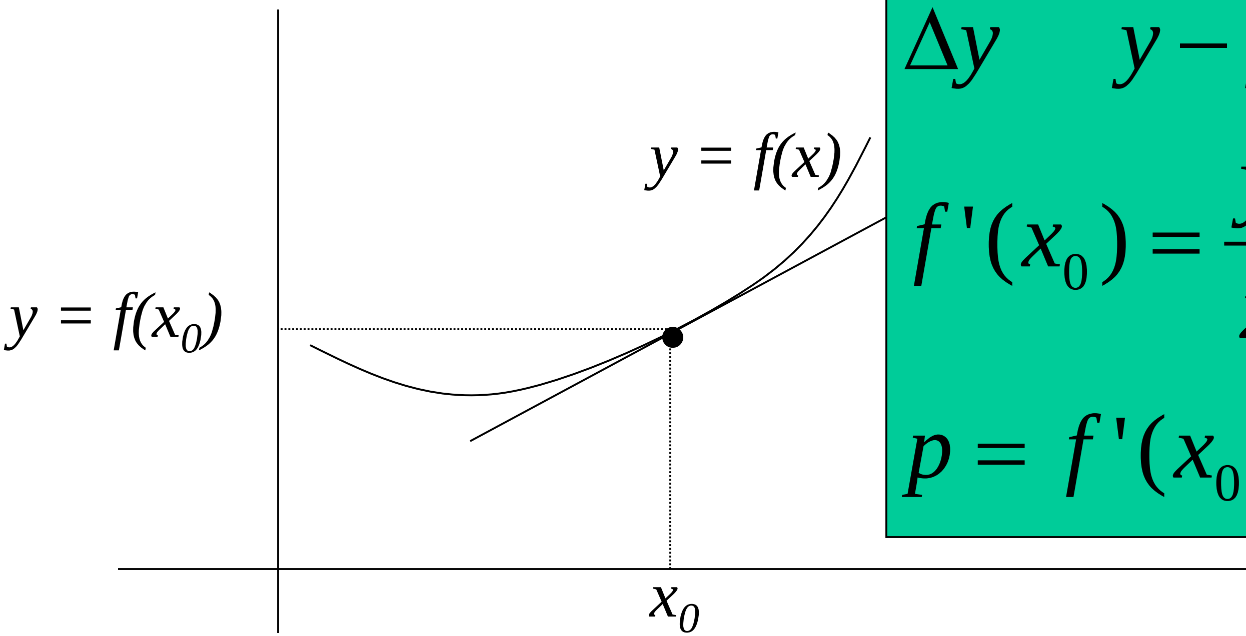
Comentários

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, \ldots, u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, \ldots, u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + \ldots + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n} + \frac{1}{2}\left[\left(\Delta u_1\right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_1^2} + \left(\Delta u_2\right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_2^2} + \ldots + \left(\Delta u_n\right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_n^2} \right] + \ldots$$

Δu_i são pequenos na prática $\Rightarrow$ $(\Delta u_i)^2$ podem ser desprezados

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, \ldots, u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, \ldots, u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + \ldots + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}$$

Conceito de aproximação linear



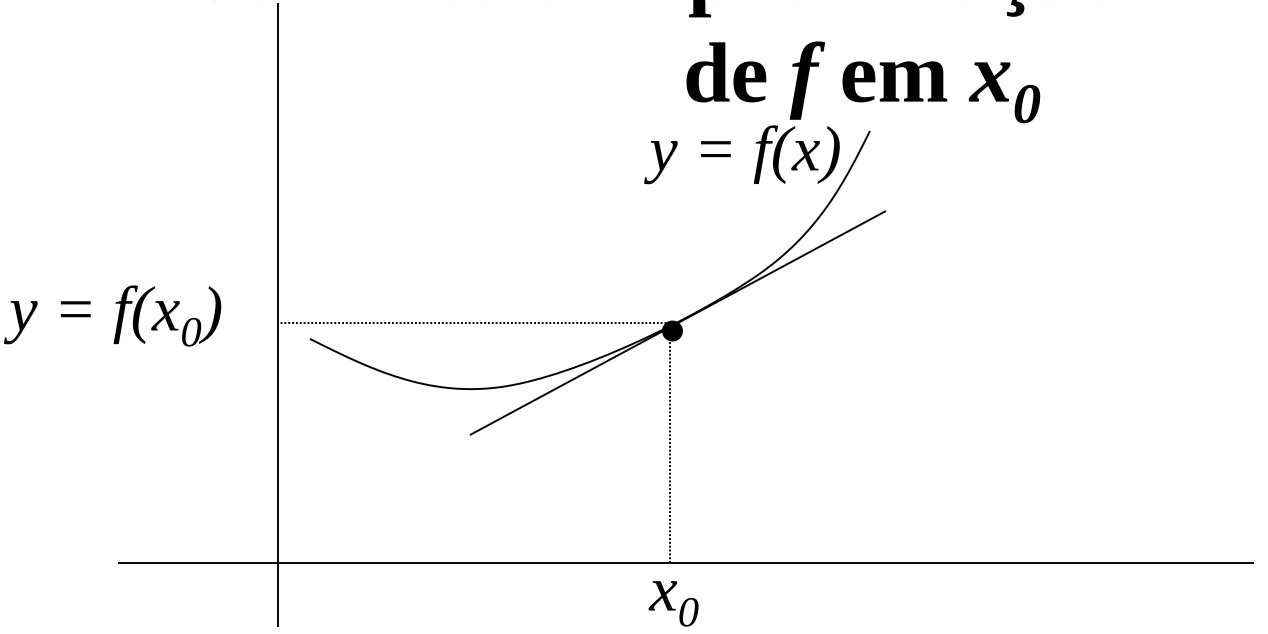
$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{x - x_0}{y - y_0}$$

$$f'(x_0) = \frac{y - y_0}{x - x_0}$$

$$p = f'(x_0)(x - x_0) + y_0$$

- Próximo de x_0 a reta tangente se aproxima estreitamente da curva
- Dado que $\Delta x = x - x_0$ temos:

Conceito de Aproximação linear local de *f* em x_0

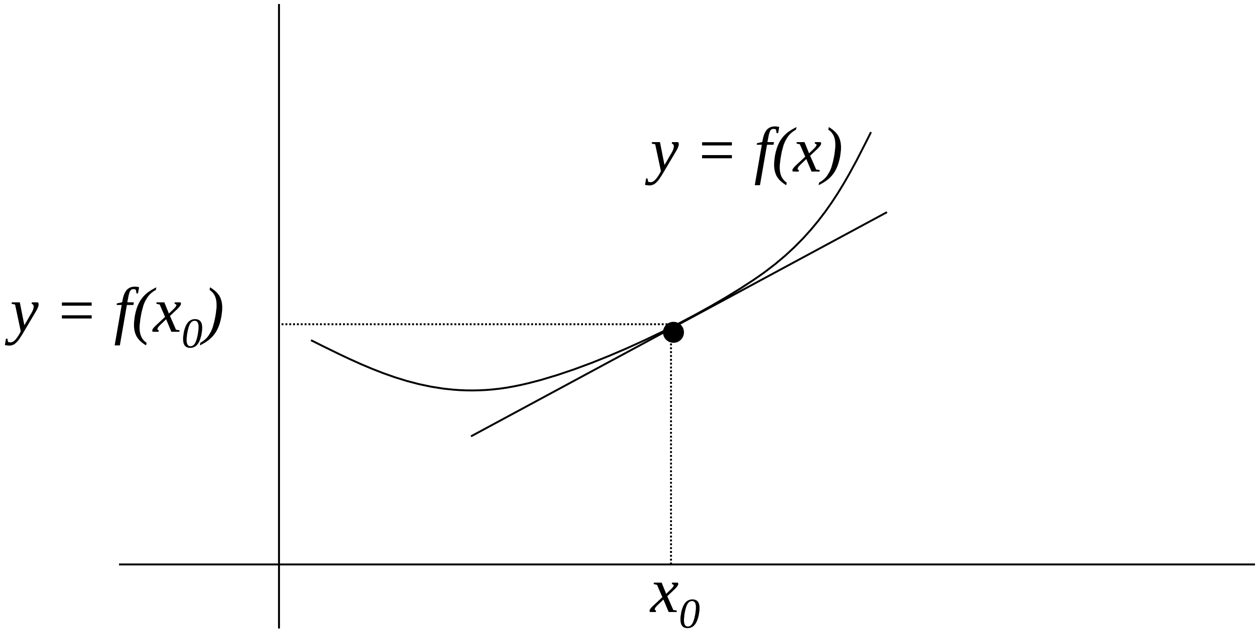


➢Dizer que esta reta se aproxima estreitamente da curva $y = f(x)$ para valores de x próximos de x_0 significa que a aproximação

$$p(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

fica cada vez melhor à medida que $x \to x_0$

Aproximação linear local de *f* em x_0



Dado que $\Delta x = x - x_0$

$f(x) \approx p(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ pode ser rescrita como

$f(x_0 + \Delta x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(\Delta x)$

Aproximação quadrática de uma função *f(x)*

- Em vez de usar uma aproximação linear podemos usar uma aproximação quadrática

- Neste caso queremos que:

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2$$

- Isto nos mostra um polinômio de aproximação em vez de uma reta

$$p(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2$$

- Neste caso, queremos que as primeiras derivadas o *p(x)* coincidam com as derivadas de *f(x)* **em $x = 0$**

Obtendo os valores das constantes do polinômio

- Ou seja, queremos que:

$p(0) = f(0)$, $p'(0) = f'(0)$, $p''(0) = f''(0)$

$p(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2$	$\longrightarrow$	$p(0) = c_0$
$p'(x) = c_1 + 2c_2x$	$\longrightarrow$	$p'(0) = c_1$
$p'(x) = 2c_2$	$\longrightarrow$	$p''(0) = 2c_2$

- A partir do anterior temos que

$c_0 = f(0)$, $c_1 = f'(0)$, $c_2 = 1/2f''(0)$

e portanto, $$f(x) \approx f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)x^2}{2}$$

Polinômio

Generalização do Conceito

- De maneira geral podemos tentar aproximar qualquer função usando um polinômio de grau *n*

$$p(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \ldots + c_nx^n$$

tal que $f(0) = p(0)$, $f'(0) = p'(0)$, $f''(0) = p''(0), \ldots, f^{(n)} = p^{(n)}(0)$

Obtendo as derivadas de p(x) temos:

$$p(x) = c_0 + c_1x^2 + c_2x^2 + c_3x^3 + \ldots + c_nx^n$$

$$p'(x) = c_1 + 2c_2x + 3c_3x^2 + \ldots nc_nx^{n-1}$$

$$p''(x) = 2c_2 + 3*2c_2x + \ldots + n(n-1)c_nx^{n-2}$$

$$p'''(x) = 3*2c_3 + \ldots + n(n-1)(n-2)c_nx^{n-3}$$

...

Obtendo as constantes

➢Obtendo os valores das derivadas para ***x = 0*** temos

$$\boldsymbol{f(0) = p(0) = c0}$$

$$\boldsymbol{f'(0) = p'(0) = c_1}$$

$$\boldsymbol{f''(0) = p''(0) = 2c_2 = 2!c_2}$$

$$\boldsymbol{f'''(0) = p'''(0) = 3*2c_2 = 3!c_2}$$

...

➢Desta maneira podemos inferir que os coeficientes de p(x) tem o seguinte formato:

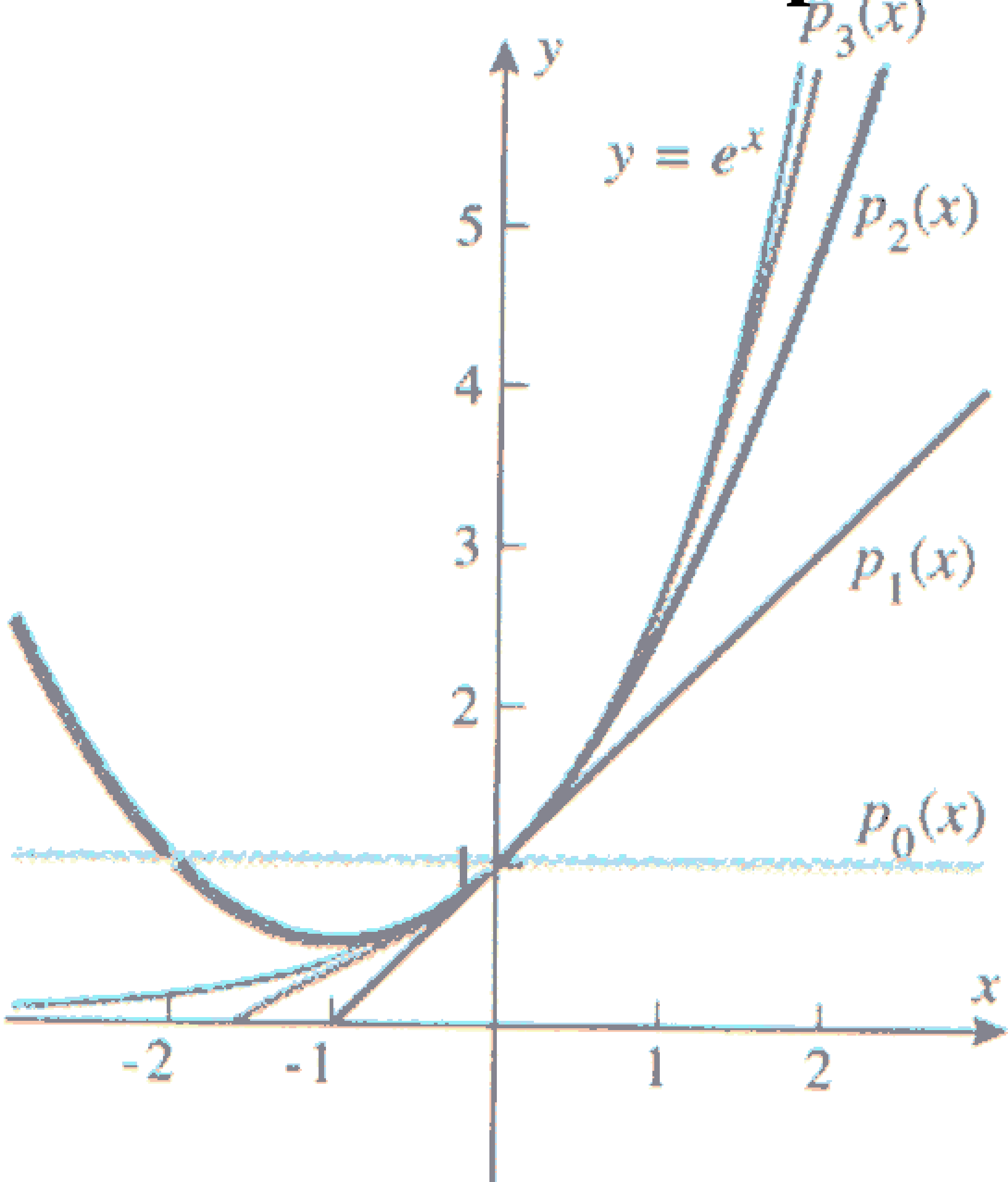
$$c_0 = f(0), c_1 = f'(0), c_2 = \frac{f''(0)}{2!}, c_3 = \frac{f'''(0)}{3!}, \ldots, \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$$

Polinômio de Maclaurin

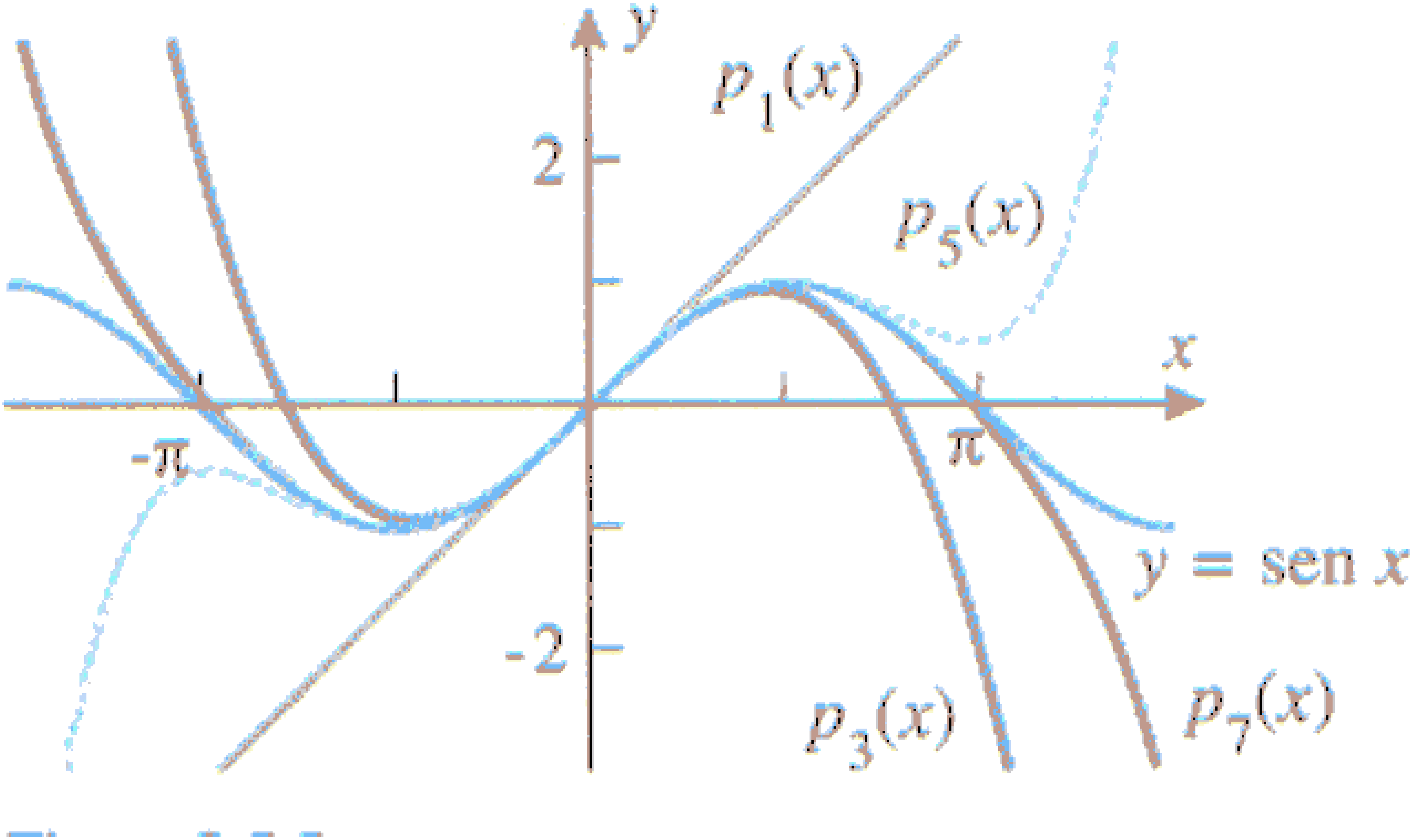
$$p_n(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3 + \ldots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n$$

➢Tem a propriedade de que o seu valor e o de suas ***n*** primeiras derivadas coincidem com os valores de ***f*** e o de suas ***n*** primeiras derivadas em ***x = 0***

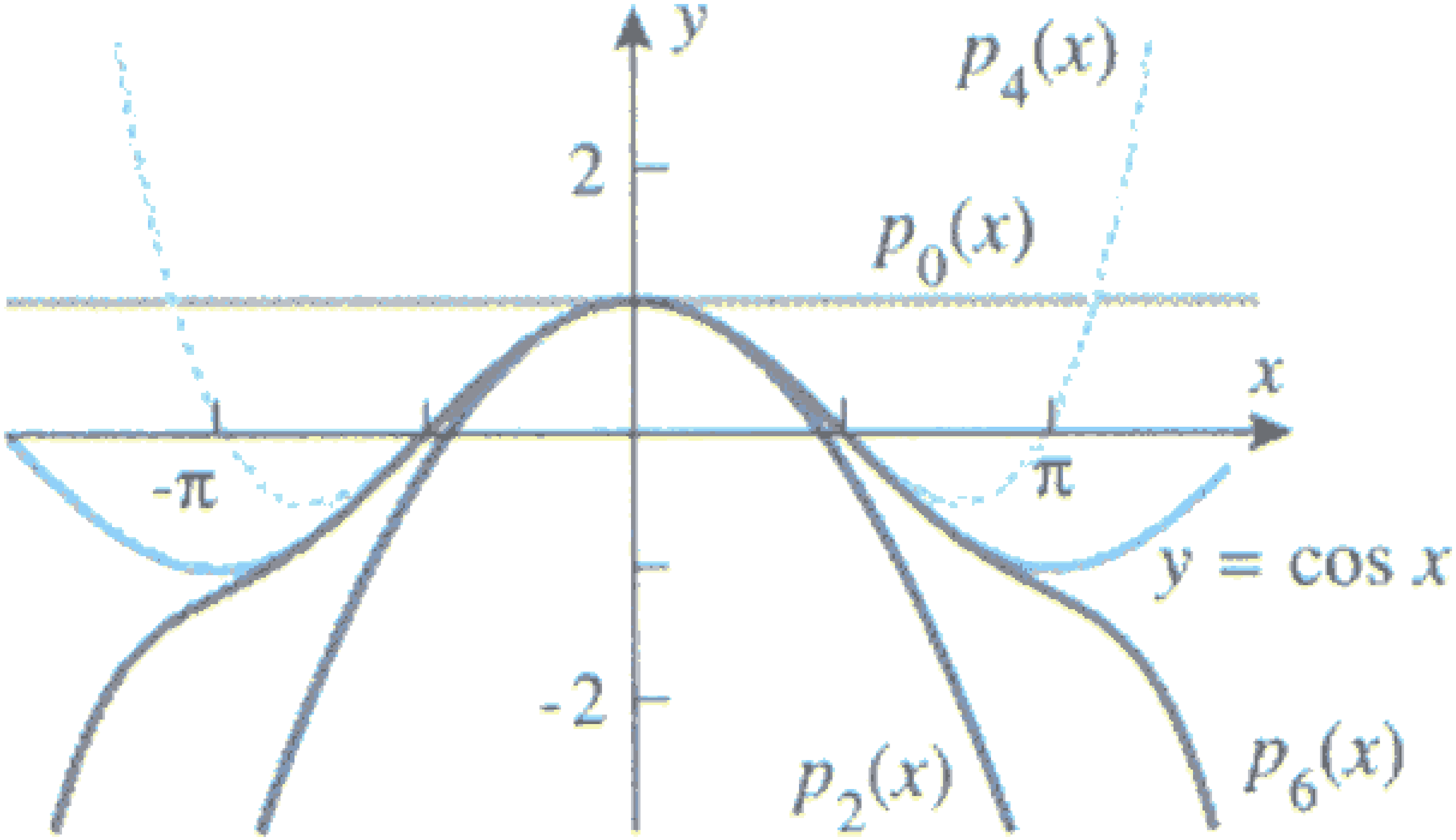
Polinômio de Maclaurin para e^x



Polinômio de Maclaurin para $y = sen\ x$



Polinômio de Maclaurin para
y = cos x



Polinômio de Taylor

- É a generalização do polinômio de Maclaurin para $\boldsymbol{x = x_0}$

- Partimos do polinômio seguinte:

$$p_n(x)=c_0 + c_1(x-x_0) + c_2(x-x_0)^2 + \ldots + c_n(x-x0)^n$$

- E podemos obter os coeficientes usando os método anterior:

$$p_n(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!}(x-x_0)^3 + \ldots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n$$

Polinômio de Taylor

- Sabendo que $\Delta x = x - x_0$ temos que

$$x = x_0 + \Delta x$$

- *Podemos substituir no polinômio de Taylor*

$$p_n(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + f'(x_0)(\Delta x) + \frac{f''(x_0)}{2!}(\Delta x)^2$$

$$+ \frac{f'''(x_0)}{3!}(\Delta x)^3 + \ldots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(\Delta x)^n$$

Polinômio de Taylor

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, ..., u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, ..., u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + ... + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n} +$$

$$\frac{1}{2}\left[(\Delta u_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_1^2} + (\Delta u_2)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_2^2} + ... + (\Delta u_n)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_n^2}\right] + ...$$

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, ..., u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, ..., u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + ... + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}$$

$$p_n(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + f'(x_0)(\Delta x) + \frac{f''(x_0)}{2!}(\Delta x)^2$$

$$+ \frac{f'''(x_0)}{3!}(\Delta x)^3 + ... + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(\Delta x)^n$$

Definição de Erro absoluto E_a

$$f(u_1 \pm \Delta u_1, u_2 \pm \Delta u_2, \ldots, u_n \pm \Delta u_n) = f(u_1, u_2, \ldots, u_n) + \Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1} + \Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2} + \ldots + \Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}$$

$$E_a = \Delta N = \left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| + \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| + \ldots + \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right|$$

E_a $\longrightarrow$ Erro Absoluto $\longrightarrow$ Máximo erro possível

Definição de Erro absoluto E_a

$$E_a = \Delta N = \left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| + \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| + \ldots + \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right|$$

- A fórmula do erro absoluto mostra quais variáveis (u_i) exercem maior influência na precisão do resultado global

- Caso o erro relativo seja desejado:

$$E_r = \frac{\Delta N}{N} \cdot 100 = \frac{100 E_a}{N}$$

Definição de Erro absoluto E_a

$$E_a = \Delta N = \left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| + \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| + \ldots + \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right|$$

- Resultado final pode ser expresso como:

$N \pm E_a$ ou $N \pm E_r$

Considerações sobre o controle do erro nas operações matemáticas

Ao realizar os cálculos, tomar cuidado com algarismos significativos!

"O resultado final deve ser sempre arredondado para um número de dígitos consistente com a precisão dos dados base"

Caso 2: a precisão global deve assumir determinada magnitude

A pergunta neste caso é: "*quais devem ser as precisões individuais de cada componente do sistema de medição?*"

- Infinitas combinações
- Método dos efeitos iguais

Método dos efeitos iguais (primeira abordagem)

$$E_a = \Delta N = \left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| + \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| + \ldots + \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right|$$

Assumindo que cada termo tem o mesmo efeito

$$\left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| = \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| = \ldots = \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right| = \frac{\Delta N}{n}$$

Método dos efeitos iguais (primeira abordagem)

$$\left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| = \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| = \ldots = \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right| = \frac{\Delta N}{n}$$

$$\Delta u_i \frac{\partial f}{\partial u_i} = \frac{\Delta N}{n}$$

$$\Rightarrow \Delta u_i = \frac{\Delta N}{n\left(\partial f / \partial u_i\right)}$$

ΔU_i: Erro admissível em cada componente ????

Método dos efeitos iguais (segunda abordagem)

Os erros Δu_i são considerados como limites estatísticos tais como $\pm 3s$, erros prováveis ou incertezas

$$E_{a_{rss}} = \sqrt{\left(\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \ldots + \left(\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2}$$

$E_{a_{rss}}$ apresenta o mesmo significado que Δu_i

Método dos efeitos iguais (segunda abordagem)

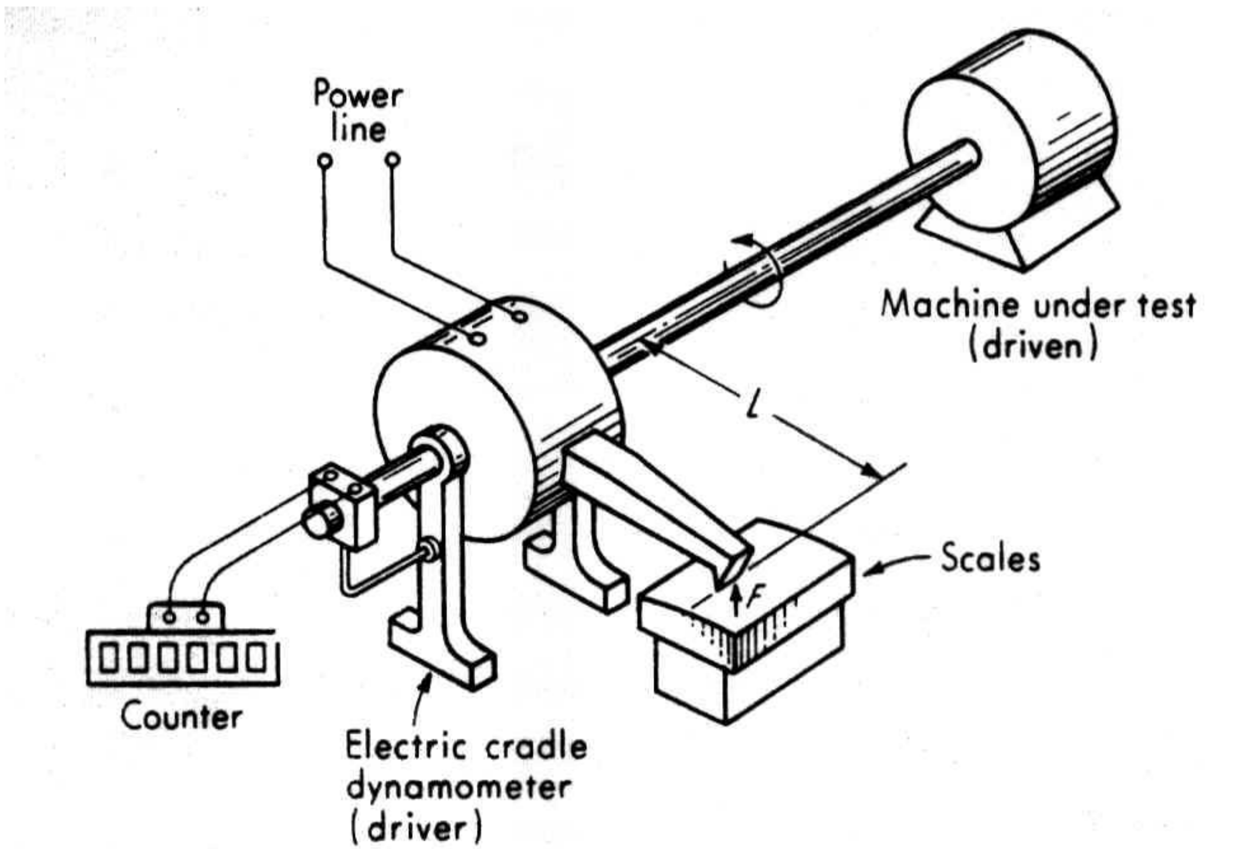
Se Δu_i representa limites $\pm 3s$, então $E_{a_{rss}}$ também representa um limite de $\pm 3s$ em relação ao resultado global (N)

Caso seja desejado um ΔN global, pode-se determinar Δu_i's tais que o valor global de ΔN não seja ultrapassado devido à combinação de seus efeitos

$$\Delta u_i \frac{\partial f}{\partial u_i} = \frac{\Delta N}{\sqrt{n}} \qquad i=1,2,\ldots,n$$

$$\Rightarrow \Delta u_i = \frac{\Delta N}{\sqrt{n}\left(\partial f / \partial u_i\right)}$$

Exemplo de experimento de Medição



$$Watts = \frac{2\pi RFL}{t} \qquad ou \qquad hp = \frac{2\pi RFL}{550t}$$

Fórmula de Potência

$$Watts = \frac{2\pi RFL}{t} \qquad ou \qquad hp = \frac{2\pi RFL}{550t}$$

R ≡ revoluções no eixo no tempo *t*

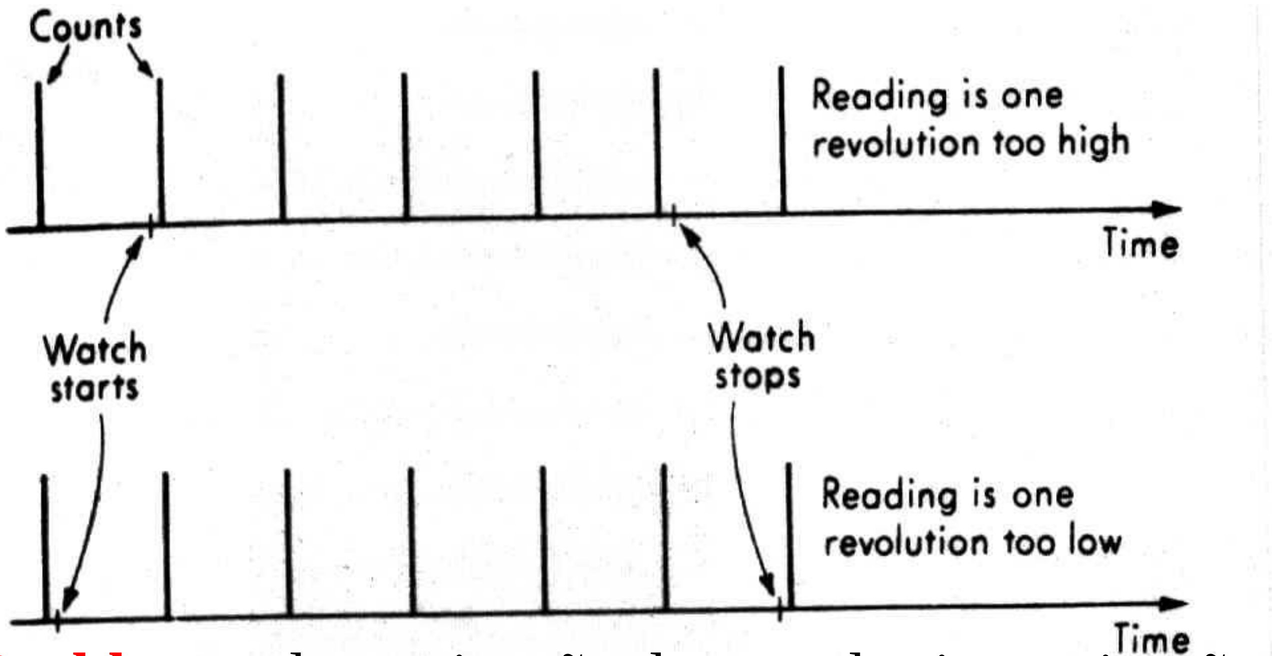
F ≡ força na extremidade do braço ou momento, *lbf (N)*

L ≡ comprimento do braço de momento, *ft (m)*

t ≡ tempo de duração do experimento, *s*

Considerações sobre o experimento

- Considerando que o conta-giros não perde nenhuma volta o erro máximo em R é ±1 (natureza digital)



- **Problema**: determinação do erro de sincronização entre o conta-giros e o cronômetro (fator humano)

- Método estatístico pode não ser justificável

- Estimativa = ±0,05 s

Considerações sobre o experimento

❖Medida do comprimento do braço de momento

➢**L** $\Rightarrow$ dependente do procedimento

➢Assumimos erro de ±0,05 *in*

❖Medida de Força

➢**F** $\Rightarrow$supor que foi calibrada estaticamente tal que s_{qi} = 0,0133 *lbf*

➢Limites ±3s resultam em ±0,040 *lbf*

Considerações sobre o experimento

Entretanto efeitos adversos:

Vibração:

a) redução de efeitos de atrito

b) maior precisão

Ponteiro no dinamômetro em movimento

a) Média aproximada mentalmente

b) Menor precisão

Suposição: efeitos opostos se cancelam

Fórmula de Potência (dados para fazer cálculos)

$$Watts = \frac{2\pi RFL}{t} \qquad ou \qquad hp = \frac{2\pi RFL}{550t}$$

R= 1202 ± 1,0 r

F = 10,12 ± 0,040 lbf

L = 15,63 ± 0,050 in

t = 60,0 ± 0,50 s

$$hp = \frac{2\pi}{550(12)} \times \frac{FLR}{t} = k\frac{FLR}{t}$$

Em termos de polegadas

Cálculos das derivadas parciais

$$hp = k\frac{FLR}{t}$$

$$\frac{\partial(hp)}{\partial F} = \frac{KLR}{t} = \frac{(0{,}000952)(15{,}63)(1202)}{60} = 0{,}298 hp / lbf$$

$$\frac{\partial(hp)}{\partial R} = \frac{KFL}{t} = \frac{(0{,}000952)(10{,}12)(15{,}63)}{60} = 0{,}00251 hp / r$$

$$\frac{\partial(hp)}{\partial L} = \frac{KFR}{t} = \frac{(0{,}000952)(10{,}12)(1202)}{60} = 0{,}193 hp / in$$

$$\frac{\partial(hp)}{\partial t} = \frac{KFLR}{t^2} = \frac{(0{,}000952)(10{,}12)(15{,}63)(1202)}{3600} = -0{,}0500 hp / s$$

Cálculos

- Considerando-se o erro absoluto como (para limites absolutos):

$$E_a = \Delta N = \left|\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right| + \left|\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right| + \ldots + \left|\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right|$$

E_a = (0,298)(0,040) + (0,00251)(1,0) + (0,193)(0,050) + (0,050)(0,50)

E_a = 0,0119 + 0,00251 + 0,00965 + 0,025 = 0,049

Cálculo da Potência

$$hp = k\,\frac{FLR}{t}$$

$$hp = \frac{(0{,}000952)(10{,}12)(15{,}63)(1202)}{60} = 3{,}02$$

$$hp = \frac{(2{,}0000)(3{,}1416)(10{,}120)(15{,}630)(1202{,}0)}{(550{,}00)(12{,}000)(60{,}000)} = 3{,}0167$$

Considerações sobre o número de algarismos usados nos cálculos

- Dependendo do número de algarismos usados podemos ter:

hp = 3,017

hp = 3,017 ± 0,049

hp = 3,017 ± 1,6%

- Ou ainda

- hp = 3,02 ± 0,05 (se usarmos um algarismo significativo para o erro)

Tendo em conta limites ± 3s

- Considerando erros em cada componente como limites ± 3×s, usamos:

$$E_{a_{rss}} = \sqrt{\left(\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \ldots + \left(\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2}$$

$$E_{a_{rss}} = \sqrt{0{,}0119^2 + 0{,}00251^2 + 0{,}00965^2 + 0{,}025^2} = 0{,}029\,hp$$

Comparando E_a e E_{arss}

- Podemos ver que E_{arss} é significativamente menor que E_a

- Podemos dizer que o erro é *possivelmente* tão grande como $E_a = 0{,}049$ mas *provavelmente* não maior que 0,029

Requisitando uma precisão máxima definida

- Vamos supor que desejamos um erro máximo de 0,5%
- Podemos calcular os erros máximos para cada medida individual
- Isto pode ser feito de duas maneiras:

$$\Delta u_i = \frac{\Delta N}{n(\partial f / \partial u_i)} \qquad i = 1,2,3,\ldots,n$$

$$\Delta u_i = \frac{\Delta N}{\sqrt{n}(\partial f / \partial u_i)} \qquad i = 1,2,3,\ldots,n$$

Calculando o máximo erro por elemento individual

$$\Delta u_i = \frac{\Delta N}{\sqrt{n}\left(\partial f / \partial u_i\right)} \qquad i = 1,2,3,\ldots,n$$

usamos

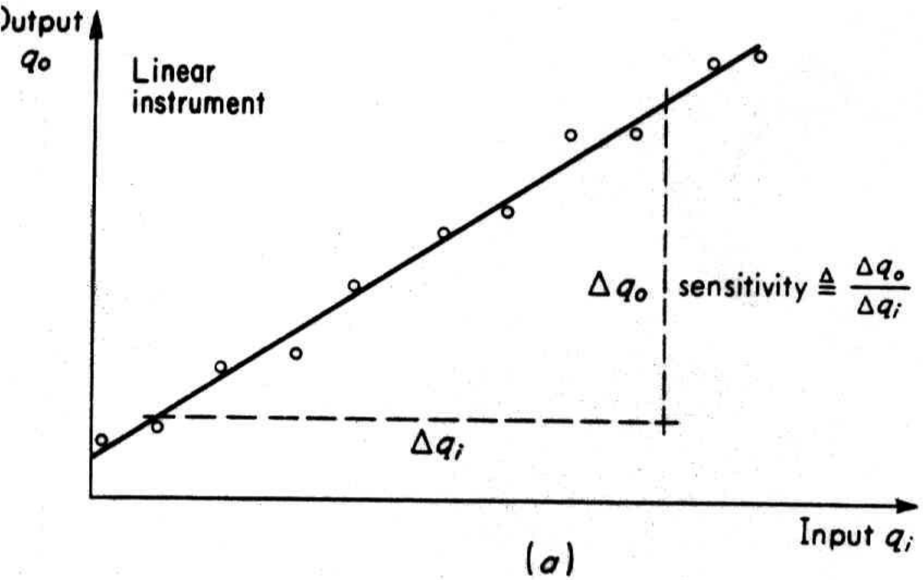
$$\Delta F = \frac{(3{,}02)(0{,}005)}{\sqrt{4}(0{,}298)} = 0{,}025 \quad lbf$$

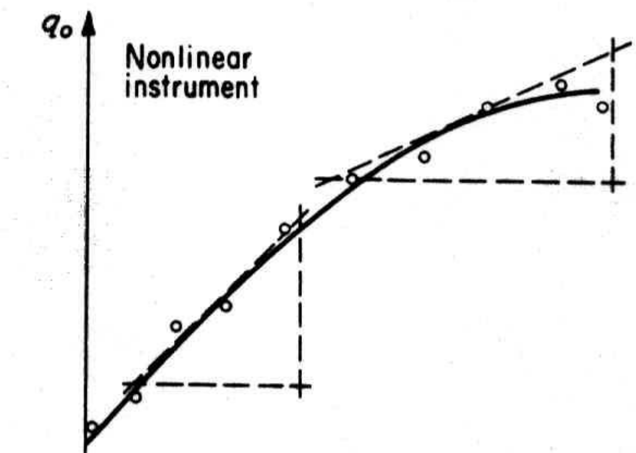
$$\Delta R = \frac{(3{,}02)(0{,}005)}{\sqrt{4}(0{,}0025)} = 3{,}0 \quad r$$

$$\Delta L = \frac{(3{,}02)(0{,}005)}{\sqrt{4}(0{,}193)} = 0{,}039 \quad in$$

$$\Delta t = \frac{(3{,}02)(0{,}005)}{\sqrt{4}(0{,}05)} = 0{,}15 \quad s$$

Definição de Sensibilidade estática





- Definição de sensibilidade estática:

É a inclinação da curva de calibração

Definição de Sensibilidade estática

- Por exemplo no medidor de pressão temos que:

$$q_0 = mq_i + c = 1{,}08q_i - 0{,}85$$

- Desta maneira temos que $m = 1{,}08\ KPa/KPa$

- Considerando que a escala apresenta deslocamento de 5º por KPa então:

- Sensibilidade estática = 1,08 × 5º = 5,4º/KPa

Sensibilidade estática

- Tem maior sentido físico
- Permite comparação com outros instrumentos

Sensibilidade estática e entradas interferentes/modificantes

❖Sensibilidade a entradas interferentes e modificantes, por exemplo: a temperatura

Temperatura: afeta as medidas de pressão

❑**Interferente**: efeitos de dilatação ou contração térmica nas diversas partes do instrumento

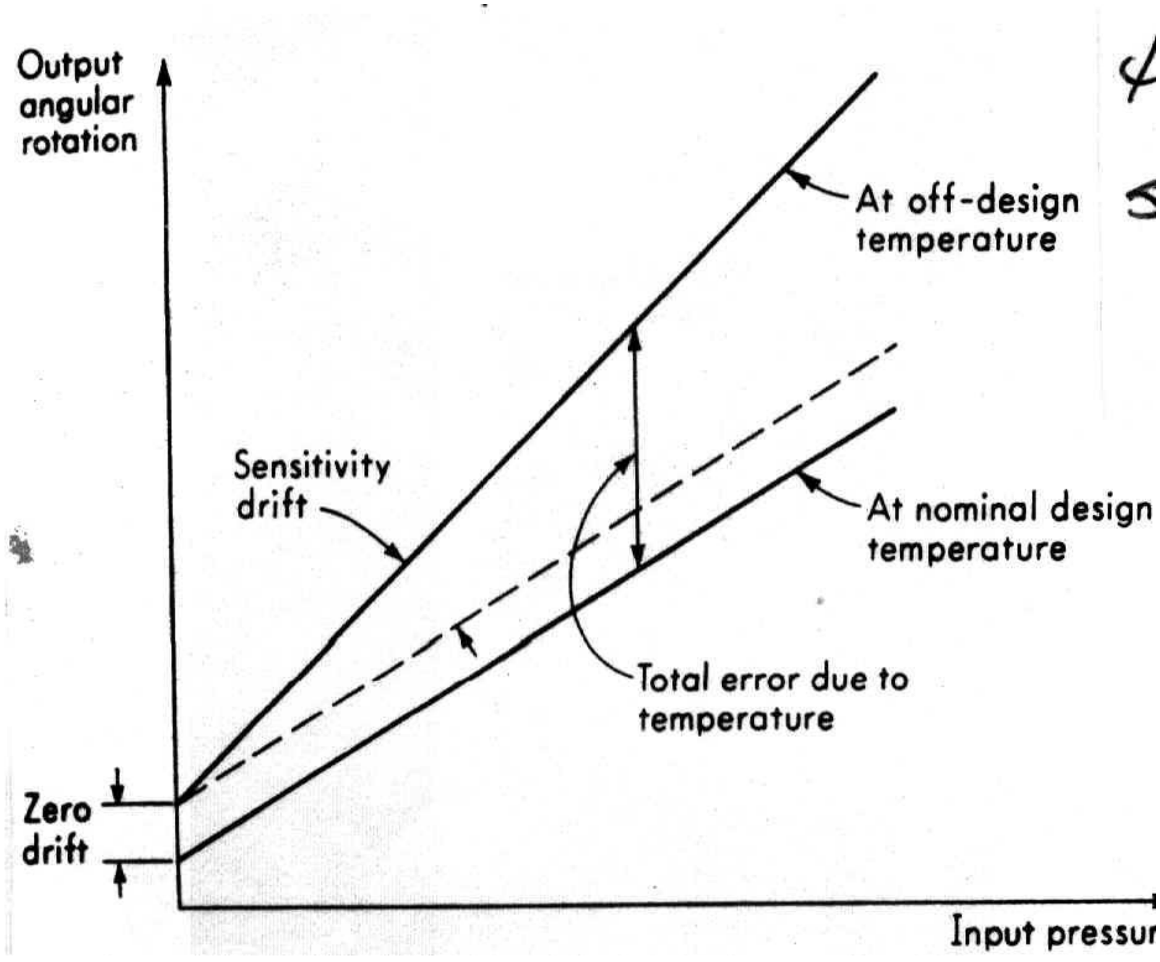
❑**Modificante**: modificação da constante elástica da mola, alterando a sensibilidade

Conceitos de *Deriva de Zero* e *Deriva de Sensibilidade*

- O primeiro efeito (temperatura como entrada interferente) é conhecido como Deriva de Zero (*zero drift*)

- O segundo efeito (temperatura como entrada modificante) é conhecido como Deriva de Sensibilidade (*sensitivity drift*)

Conceitos de *Deriva de Zero* e *Deriva de Sensibilidade*

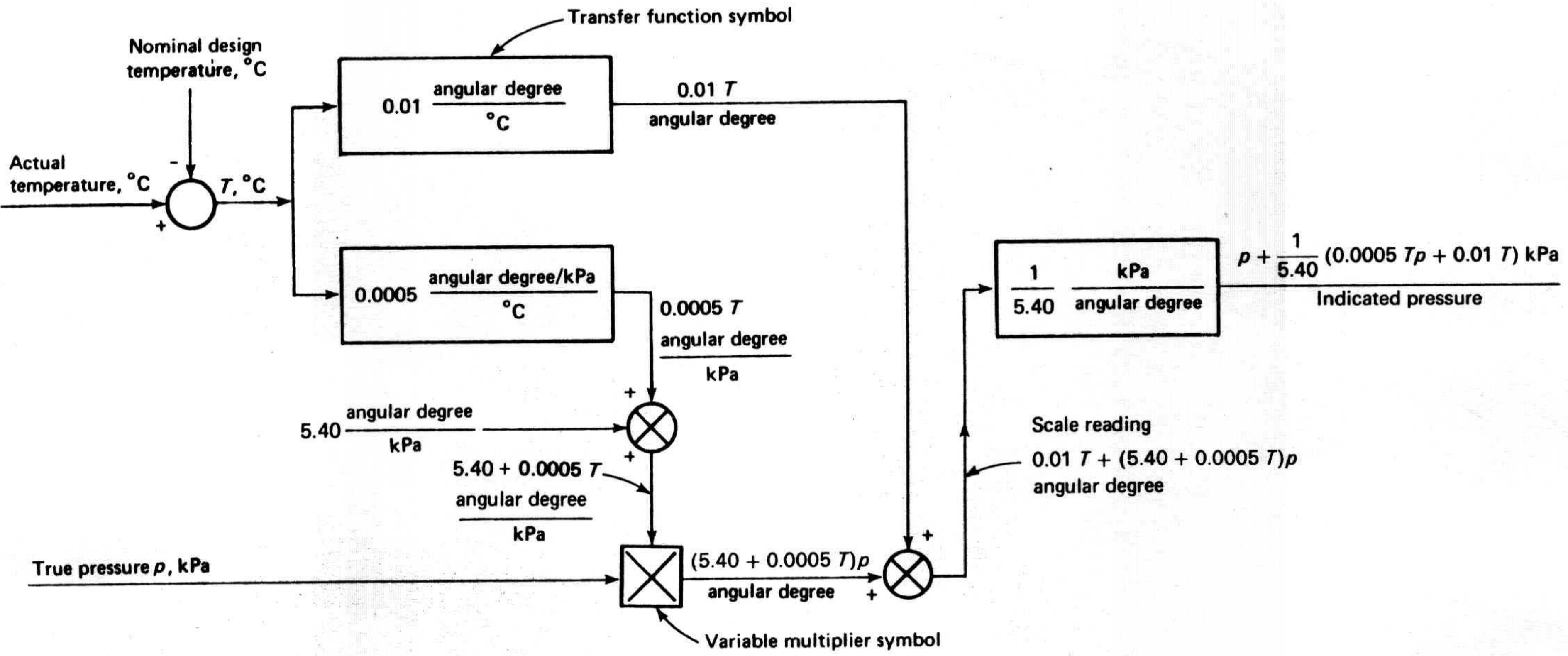


Conceitos de *Deriva de Zero* e *Deriva de Sensibilidade*

- Os efeitos de *deriva de zero* e *deriva de sensibilidade* podem ser avaliados quantitativamente através de testes de calibração adequados

- **Exemplo**: manômetro com escala angular

Diagramas de Blocos de um Medidor de Pressão



Conceitos de *Deriva de Zero* e *Deriva de Sensibilidade*

<u>**Deriva de zero**</u>: manter a pressão no nível zero enquanto a temperatura é variada (0,01º/ºC)

<u>**Deriva de sensibilidade**</u>: repetir a calibração estática para diferentes temperaturas (0,0005º/KPa)/ºC

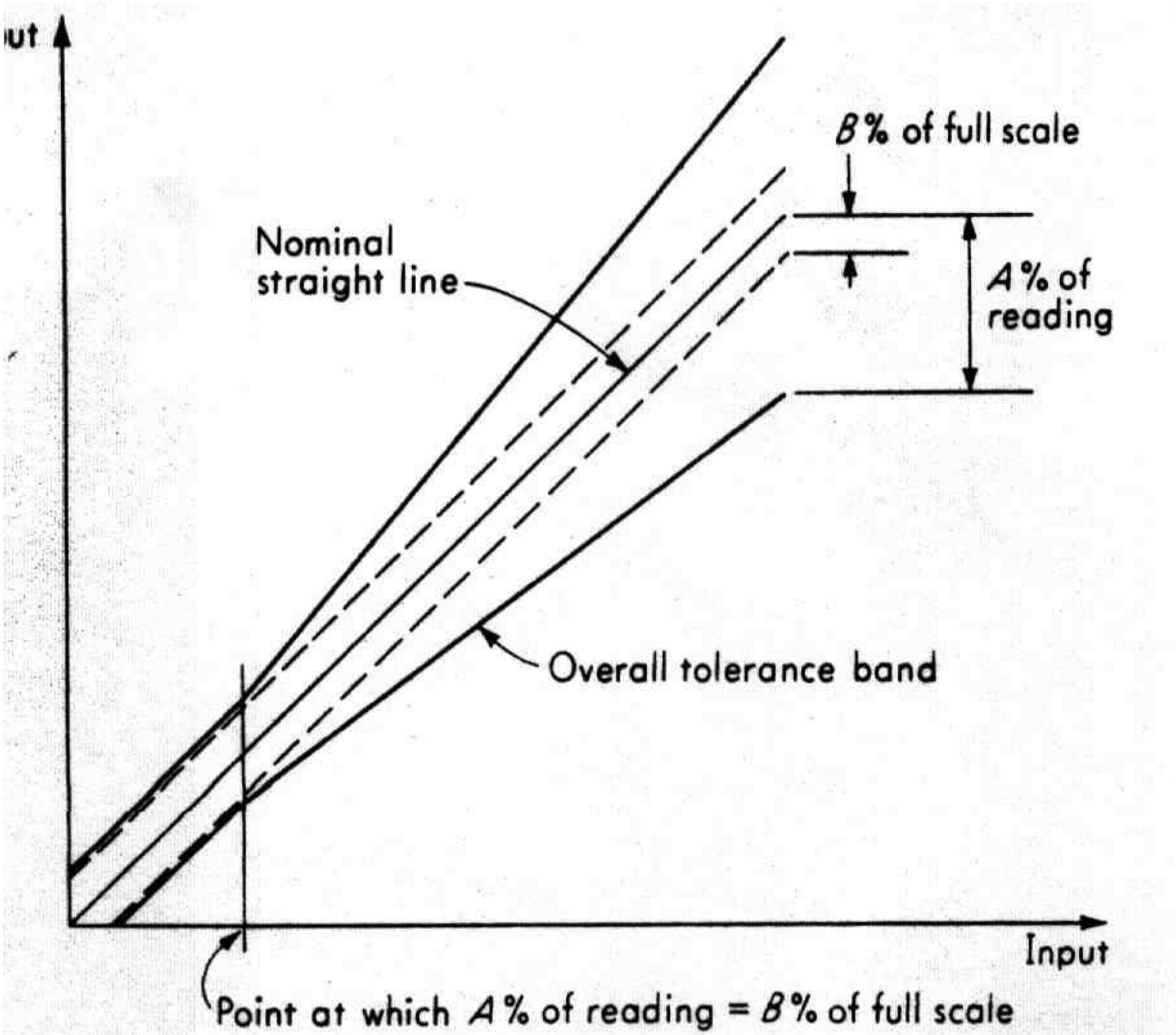
Conceito de Linearidade

<u>Definição</u>: quantificação de quão próximo de uma relação linear está o comportamento do instrumento

- Existem vários conceitos sobre linearidade:

- **Linearidade Independente**
- **Não-Linearidade Independente**

Conceito de Linearidade



Conceito de Linearidade

❑Reta de referência ⟹ Mínimos quadrados

<u>Quantificação</u>: máximo desvio de qualquer ponto de calibração em relação à reta de calibração

❖% da leitura real

❖% da leitura de fundo de escala

❖Pode ser uma combinação das duas anteriores

❖Max (±A% da leitura ±B% do fundo da escala)

❖±A% da leitura ⟹ especificação da constante de linearidade

❖B% do fundo da escala ⟹ impossibilidade prática de testes para pequenos desvios em torno de zero

Esclarecimento

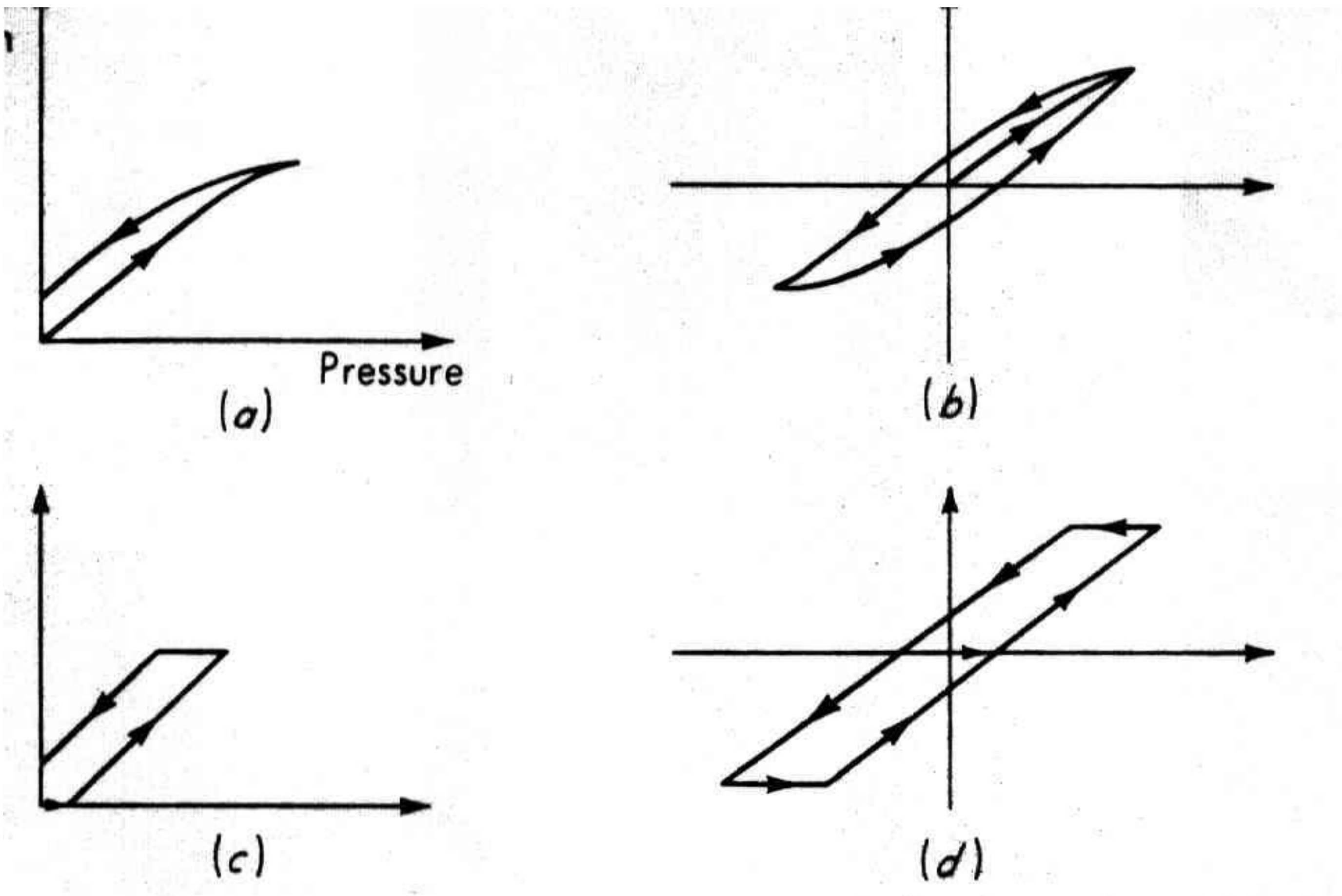
- Um fabricante pode falar sobre seu instrumento de seguinte maneira:

- ❖ O erro de leitura vai ser 3% do valor de fundo de escala (isto é linearidade independente)

- ❖ O erro de leitura vai ser 3% do valor lido (isto é linearidade dependente)

Histerese

Através da variação lenta da entrada desde zero até o fundo da escala e de volta até o zero, obtém-se a curva (a), caso não haja atrito entre partes móveis



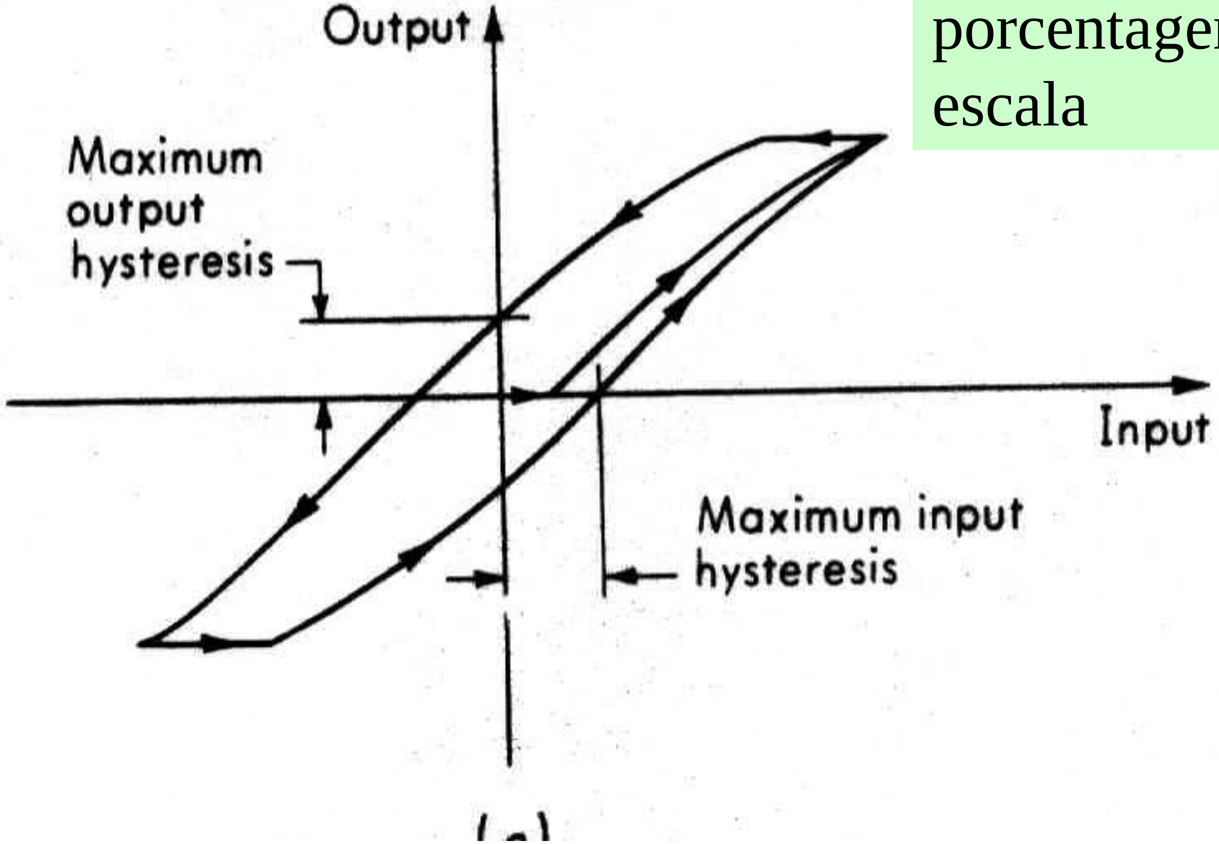
Histerese

- Atrito molecular interno ou amortecimento histerético dos componentes tencionados (mola)

- **2ª lei da Termodinâmica**: não existem processos perfeitamente reversíveis na prática

Histerese

Quantificada em relação à entrada ou à saída em porcentagem do fundo da escala



Limiar (*Threshold*)

- Se um instrumento é submetido a um aumento muito lento da entrada, a partir de zero, existirá um valor mínimo da entrada, abaixo do qual nenhuma variação da saída pode ser detectada

- Este valor define o limiar do instrumento (*threshold*)

Resolução

- Se a entrada é variada lentamente a partir de um valor arbitrário (≠ zero), a saída não varia até que um certo incremento na entrada alcançado

- Este incremento é chamado de **Resolução**

- A **resolução** define a menor mudança mensurável na entrada

- O **limar** define a menor entrada mensurável

- São quantificados em termos absolutos % do fundo da escala

Zona Morta

- Muitas vezes usado para designar histerese

- **Definição:** faixa total de valores de entrada possíveis para uma dada saída

Legibilidade e *SPAN*

Legibilidade de escala: característica própria dos instrumentos analógicos

Depende do instrumento e do observador

SPAN: faixa de valores da variável para o qual o instrumento é projetado para medir

Erros de Carregamento

Todo instrumento de medida extrai energia do meio medido, alternando o valor da quantidade medida

O erro produzido na medida devido a esse efeito é denominado de **erro de carregamento**

O erro de carregamento é caracterizado numericamente pelos conceitos de **rigidez** e **impedância**