

ES704 – Instrumentação Básica

01 – Introdução

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

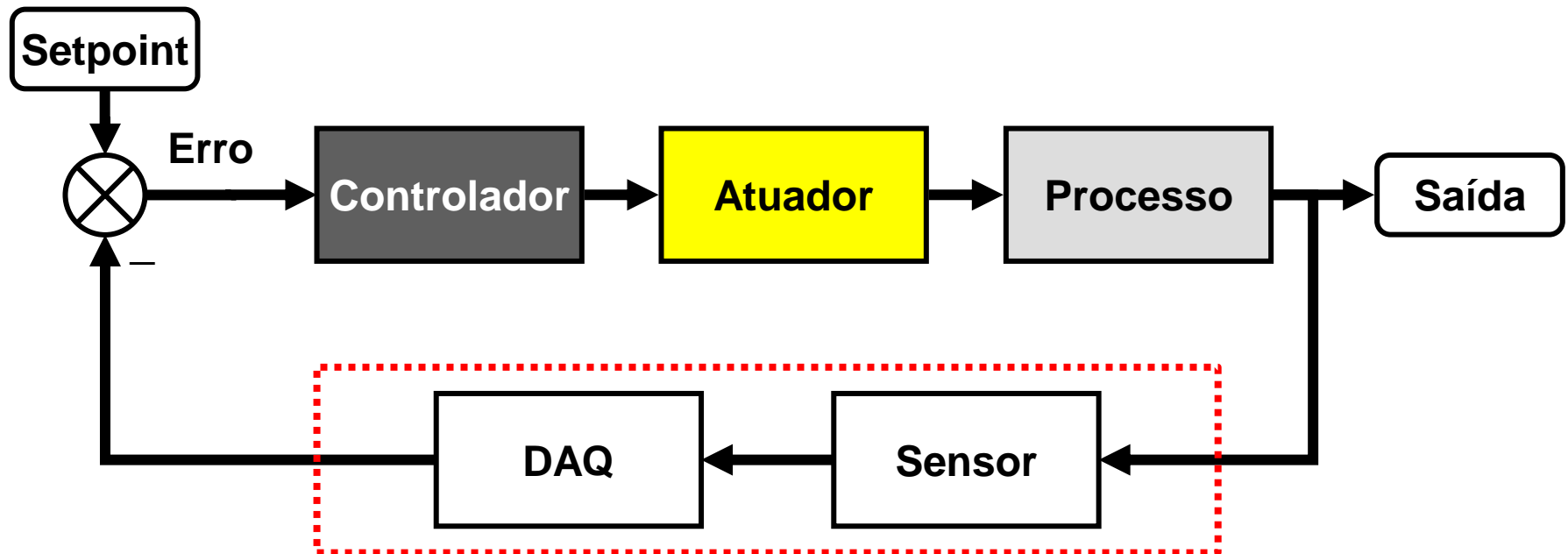
Índice

- **Índice:**
 - 1) Medição;
 - 2) Calibração;
 - 3) Erros e incertezas;
 - Questionário;
 - Referências;
 - Exercícios.

1. Medição

▪ 1.1. Sistema mecatrônico:

- **Objetivo:** regular a resposta da planta/processo de forma autônoma, fazendo com que a saída seja igual à entrada desejada (setpoint).



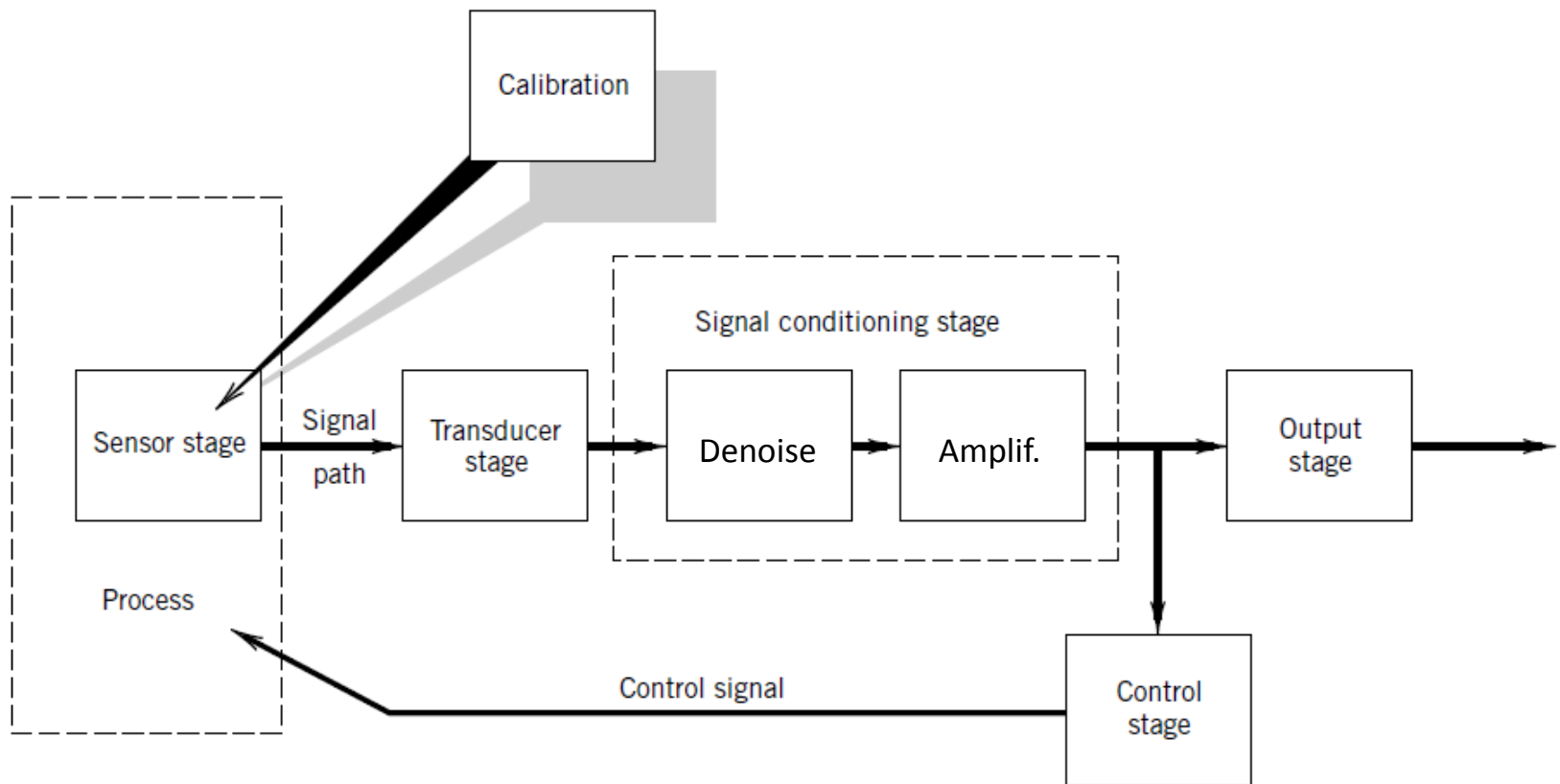
1. Medição

▪ 1.2. Medição:

- **Medição:** atribuir valor ou tendência à variável de interesse;
- **Variável:** quantidade física a ser determinada;
 - **Variável dependente/independente:** depende ou não de outras variáveis;
 - **Variável continua/discreta;**
 - **Variável controlada:** o valor pode ser mantido durante o experimento;
 - **Variável externa:** variável não-controlada, gera ruído e interferência;
- **Parâmetro:** grupo funcional de variáveis.

1. Medição

- 1.3. Sistema geral de medição:



1. Medição

- **1.3. Sistema geral de medição:**
 - **Sinais:** valores transmitidos entre os estágios do sistema;
 - **Sensor:** converte o fenômeno físico em uma variável medida;
 - **Transdutor:** converte o sinal do sensor em uma saída mensurável (elétrica, mecânica, óptica);
 - **Condicionamento de sinais:**
 - **Amplificação:** ganho de potência no sinal;
 - **Filtragem:** remoção de ruído;
 - **Saída:** indica ou armazena a variável medida;
 - **Controle:** retifica o sistema para minimizar o erro de medição.

1. Medição

- **1.4. Plano de medição:**
 - **Experimento:** ensaio realizado para determinar o valor ou comportamento de uma variável;
 - **Plano de medição:**
 - **1)** Identificar as variáveis e parâmetros controlados e externos do sistema;
 - **2)** Determinar os métodos e instrumentos (hardware/software) a serem empregados com base nos requisitos e tolerâncias de medição;
 - **3)** Processar, reduzir e analisar os dados. Se a resposta não for satisfatória, retornar ao passo 1.

2. Calibração

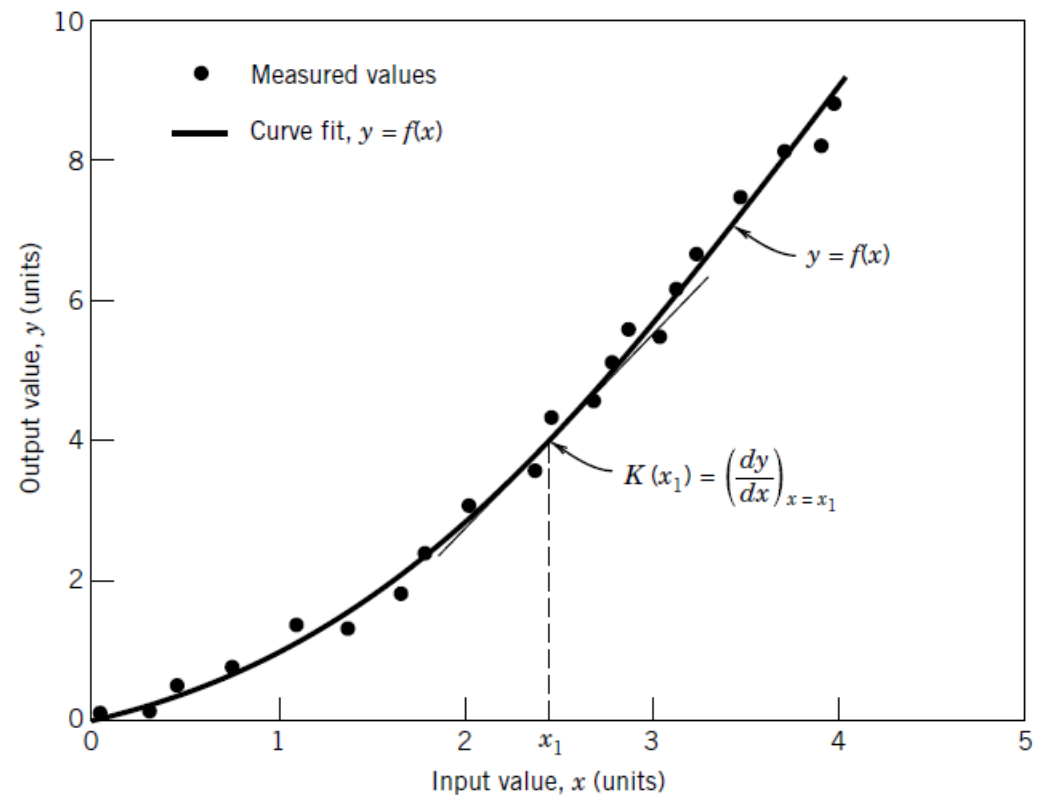
▪ 2.1. Calibração:

- **Calibração:** determinar matematicamente a relação entrada-saída de um sistema de medição;
- Aplicar excitações de entrada conhecidas, aferidas com um **padrão** ou instrumento de referência;
 - Variáveis possuem **dimensões** (comprimento, tempo etc.) e **unidades** (m, s, etc.);
 - **Padrões primários** definem o valor exato de uma unidade;
- A calibração deve seguir os procedimentos e especificações vigentes em **normas técnicas** (ISO, ASTM, IEC, ABNT, DIN, etc.)

2. Calibração

■ 2.2. Calibração estática:

- Aplicar uma entrada estática conhecida e medir a resposta do sistema;
- **Curva de calibração:** relação $y = f(x)$ entre a variável de saída y e a variável de entrada x ;
 - Não precisa ser linear!
 - Valores intermediários são **interpolados**.



2. Calibração

▪ 2.2. Calibração estática:

- **Sensibilidade estática (ganho):** relação entre saída e entrada, pode variar com o valor de entrada (regiões de baixa e alta sensibilidade).

$$K = \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (1.1)$$

- **Faixa dinâmica de entrada/saída (range):** intervalo no qual a curva de calibração é válida. Fora deste intervalo, a resposta é **extrapolada**.

$$r_i = x_{\max} - x_{\min} \quad (1.2)$$

$$r_o = y_{\max} - y_{\min}$$

2. Calibração

▪ 2.2. Calibração estática:

- **Resolução:** menor incremento que pode ser detectado pelo sistema de medição. Geralmente, é o menor incremento de escala ou dígito significativo indicado pelo sistema;
 - Sistemas dinâmicos apresentam resolução temporal, espacial e espectral;
- **Limiar (threshold):** valor de entrada mínimo (estímulo) que deve ser aplicado ao sistema para gerar um incremento em sua resposta.

2. Calibração

▪ 2.2. Calibração estática:

- **Método dos quadrados mínimos:**

- Determinação da curva de calibração pela **regressão** dos dados;
- Sejam $y(n)$ os pontos experimentais e $y_c(n)$ a função de calibração, deseja-se minimizar a soma dos quadrados das diferenças, $D = \sum [y(n) - y_c(n)]^2$;
- O grau de compatibilidade entre $y(n)$ e $y_c(n)$ é atestado pelo **coeficiente de determinação** R^2 : quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste de curva (\bar{y} é o valor médio de y).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - y_c)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

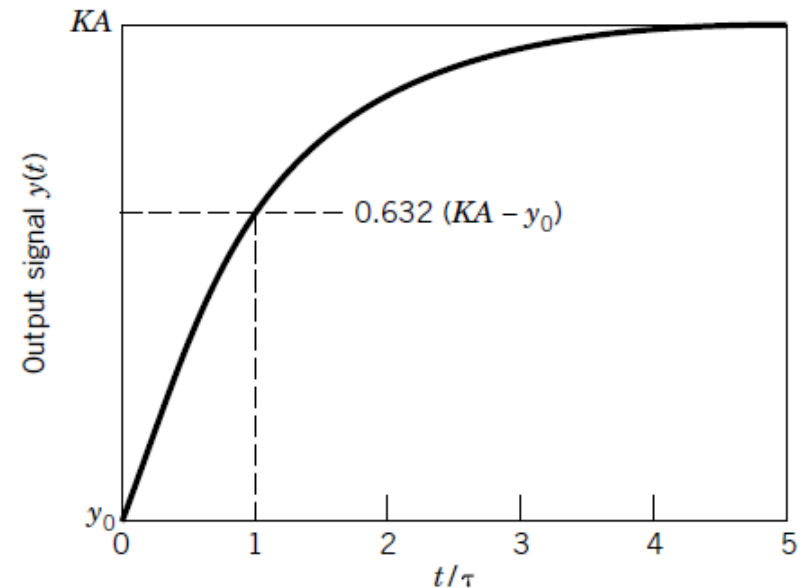
(1.3)

- Cuidado com o overfitting!

2. Calibração

■ 2.3. Calibração dinâmica:

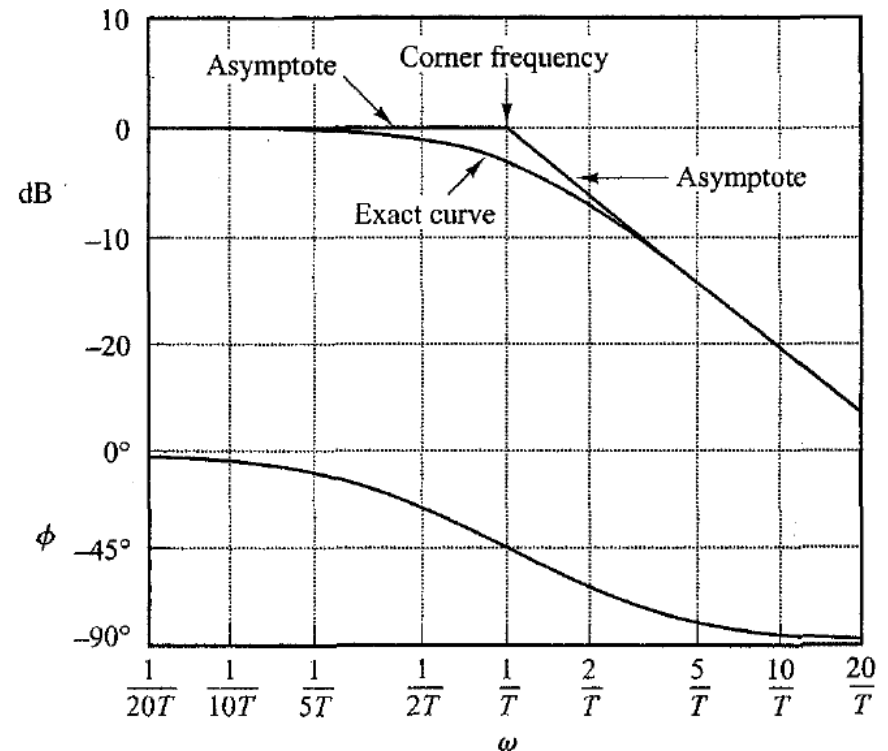
- Aplicar uma entrada dinâmica conhecida e medir a saída do sistema. A saída sempre segue a forma de onda da entrada;
- **Resposta ao degrau:**
 - **Constante de tempo:** tempo τ necessário para a saída atingir 63,2% do valor final;
 - Quanto menor τ , mais rápido o sistema responde ao estímulo de entrada.



2. Calibração

■ 2.3. Calibração dinâmica:

- **Resposta em frequência:** comparar a razão de magnitudes $M(\omega)$ e a defasagem $\phi(\omega)$ entre os sinais senoidais de entrada e de saída;
- Sistemas dinâmicos estáveis tendem a sofrer atenuação e defasagem com o aumento da frequência de entrada.



2. Calibração

▪ 2.3. Calibração dinâmica:

- **Banda de transmissão:** faixa de frequências na qual o ganho é praticamente unitário e a defasagem é mínima, geralmente $-3 < M(\omega) \leq 3$ dB;
- **Banda de filtragem:** faixa de frequências na qual o sinal é severamente atenuado e defasado, geralmente $M(\omega) \leq -3$ dB;
- **Largura de banda (bandwidth):** faixa de frequências no qual o ganho é até 3 dB abaixo do valor de ganho máximo do instrumento: $G - 3 \text{ dB} = 0.707G$.
- Obs: $P[dB] = 10 \log_{10} P$.

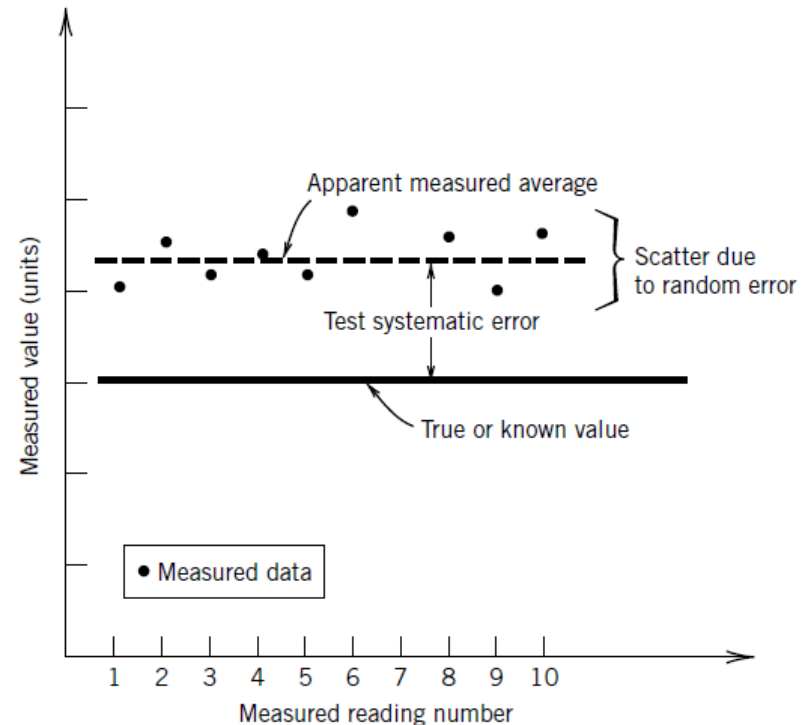
3. Erros e incertezas

■ 3.1. Erros de medição:

- **Erro:** diferença entre os valores medido y e real y' de uma variável:

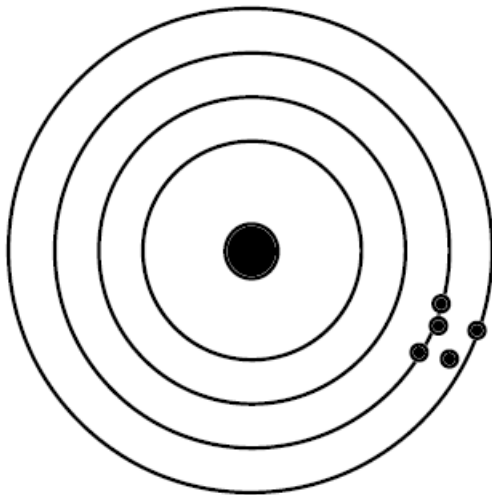
$$e = |y - y'| \quad (1.4)$$

- **Erros aleatórios:** causam espalhamento dos dados em relação em torno do valor real → afetam a **precisão** do sistema;
- **Erros sistemáticos:** geram tendências que defletem o valor medido em relação ao valor real → afetam a **exatidão** (accuracy).

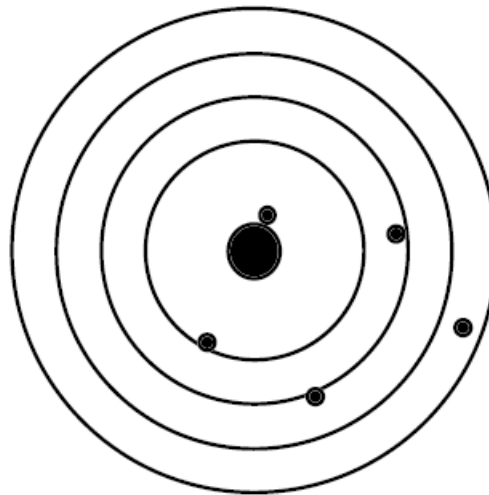


3. Erros e incertezas

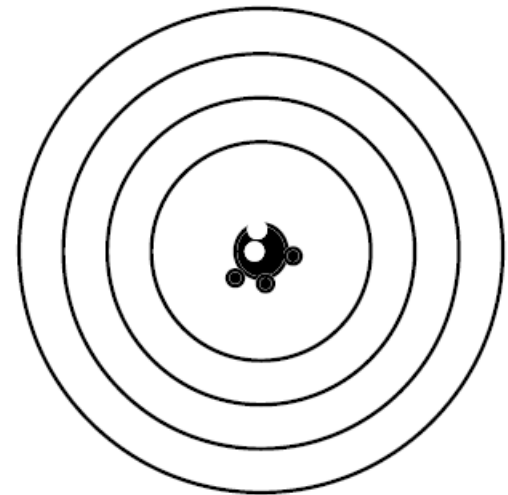
- 3.1. Erros de medição:



Alta precisão
Baixa exatidão



Baixa precisão
Baixa exatidão



Alta precisão
Alta exatidão

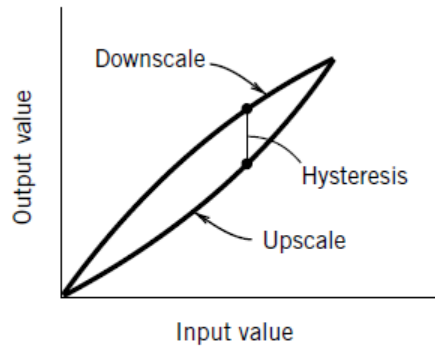
3. Erros e incertezas

▪ 3.2. Erros experimentais:

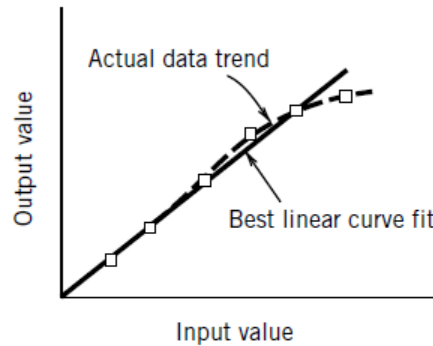
- **Histerese:** diferença na resposta do sistema excitado por entradas crescentes (upscale) e decrescentes (downscale);
- **Linearidade:** diferença da resposta em relação à curva de calibração linear;
- **Sensibilidade:** diferença no valor do ganho do sistema;
- **Retorno ao zero:** diferença na resposta do sistema para uma entrada nula.

3. Erros e incertezas

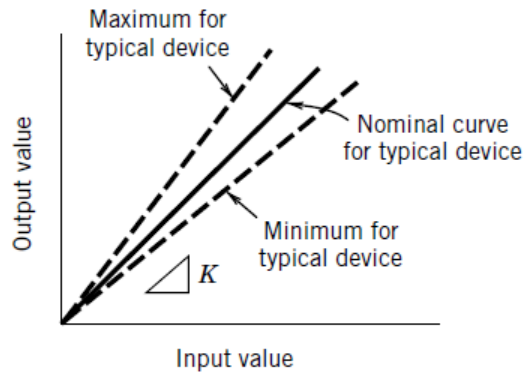
■ 3.2. Erros experimentais:



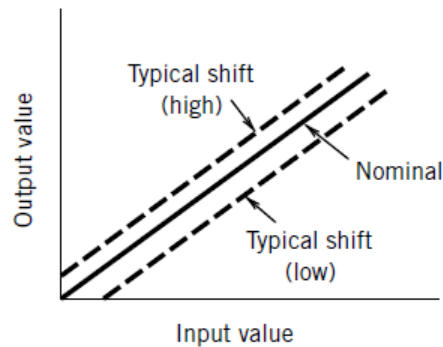
(a) Hysteresis error



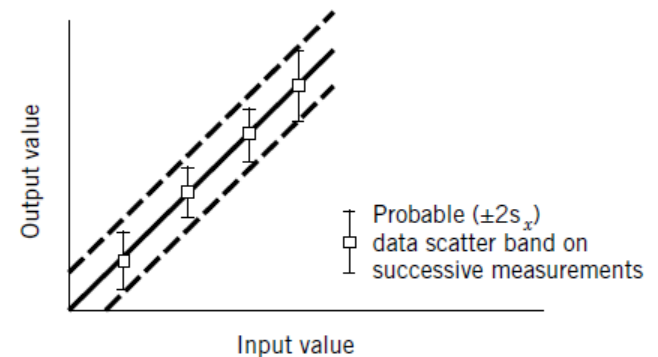
(b) Linearity error



(c) Sensitivity error



(d) Zero shift (null) error



(e) Repeatability error

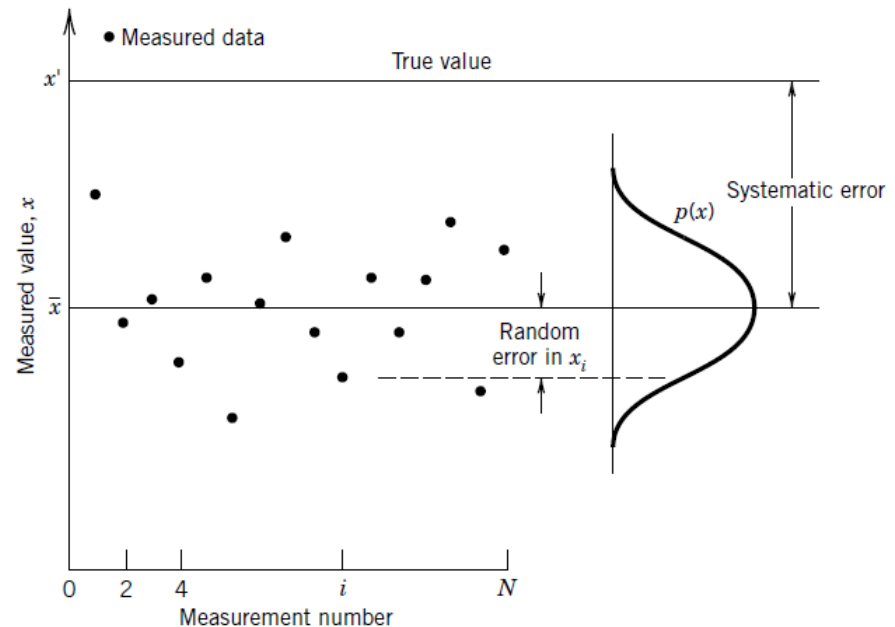
3. Erros e incertezas

▪ 3.2. Erros experimentais:

- **Repetibilidade:** capacidade do sistema em retornar o mesmo valor quando excitado com as mesmas condições de entrada;
- **Reprodutibilidade:** capacidade do sistema em retornar o mesmo valor em duplicatas, com diferenças no operador ou no aparato experimental;
- **Teste sequencial:** excitação do sistema em ordem crescente ou decrescente;
- **Teste aleatório:** excitação com ordem aleatória, converte efeitos sistemáticos em aleatórios;
- **Teste concomitante:** medição de uma mesma variável utilizando técnicas diferentes para fins de comparação.

3. Erros e incertezas

- **3.3. Incertezas:**
 - **Incertezas:** intervalo que representa os valores possíveis para uma variável medida;
 - **Erros são escalares, incertezas são intervalos;**
 - As incertezas podem ser relacionadas a erros sistemáticos ou aleatórios.



Questionário

▪ Questionário:

- 1) Qual é a importância do sistema de medição em um sistema mecatrônico?
- 2) Defina os estágios de um sistema de medição;
- 3) Explique a metodologia e os objetivos da calibração dinâmica e estática. A excitação é sempre unitária?
- 4) Por que é preferível que um sistema de medição possua resposta linear?
- 5) Qual é a diferença entre erro e incerteza? Precisão e exatidão? Reprodutibilidade e repetibilidade? Sensibilidade e resolução?

Referências

■ Referências:

- C.H.B. Cruz *et al.*, Guia para Física Experimental, Unicamp, 1997.
- R.S. Figliola, D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- A.S. Morris, Measurement & Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
- J.G. Webster, H. Eren (Ed.) Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2014.

Exercícios

Exercícios

- **Ex. 1.1)** Um sacarímetro é utilizado para medir a concentração de açúcar em uma amostra. O instrumento é constituído por um sensor de índice de refração interrogado através de um microcontrolador. O resultado da medição é apresentado em um LCD. Os dados de calibração estática do instrumento são apresentados no próximo slide.
 - a) Identifique os estágios do sistema geral de medição;
 - b) Identifique as variáveis independentes, dependentes e externas;
 - c) Trace a curva de calibração do instrumento. Determine a sensibilidade, faixa de operação, e a resolução.

Exercícios

- **Ex. 1.1)** (*continuação*) Ensaio de calibração estática.

Concentração (wt%)	Índice de refração
0	1,3330
10	1,3478
20	1,3639
30	1,3812
40	1,3999
50	1,4201
60	1,4419
70	1,4654
80	1,4906

Exercícios

- **Ex. 1.1.a)** Estágios do sistema de medição
 - Sensor: refratômetro, mede a intensidade da luz refletida;
 - Transdutor: fotodetector, converte intensidade luminosa em corrente elétrica;
 - Condicionamento de sinais: microcontrolador, composto por conversor AD, filtros digitais, e processamento de sinais;
 - Saída: display de cristal líquido;
 - Controle: não especificado, mas pode ser um módulo de compensação de temperatura, por exemplo.

Exercícios

- **Ex. 1.1.b)** Identificação de variáveis
 - Variáveis dependentes: índice de refração;
 - Variáveis independentes: concentração de açúcar, temperatura, comprimento de onda;
 - Variáveis externas: temperatura ambiente, alimentação elétrica do circuito.

Exercícios

▪ Ex. 1.1.c) Caracterização do sistema

- Sensibilidade:

$$\frac{dn}{dC} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ 1/wt\%}$$

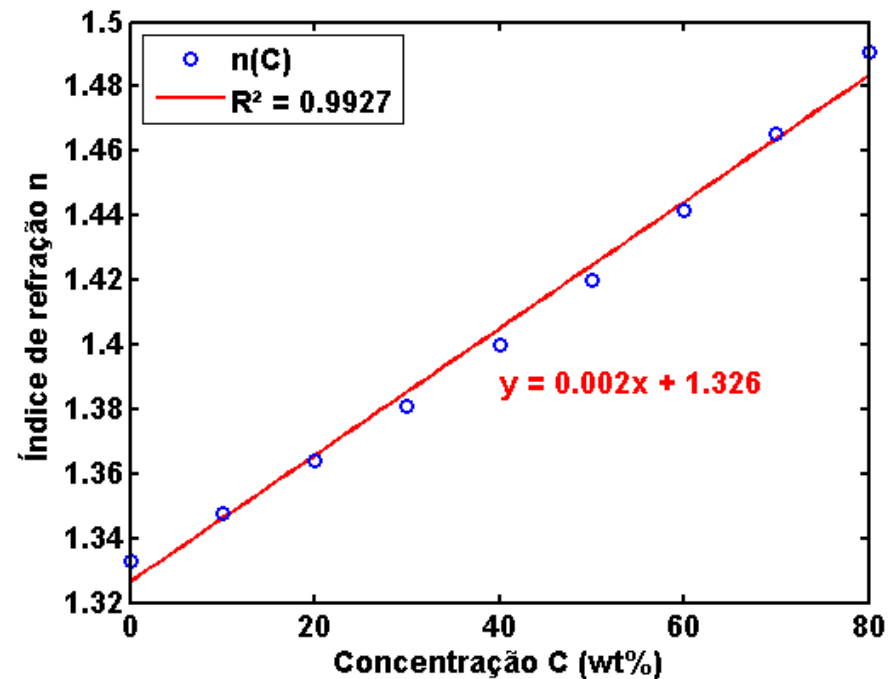
- Faixa dinâmica (in):

$$0 \leq C \leq 80\%$$

- Faixa dinâmica (out):

$$1.3330 \leq n \leq 1.4906;$$

- Resolução: menor dígito significativo indicado pelo LCD.

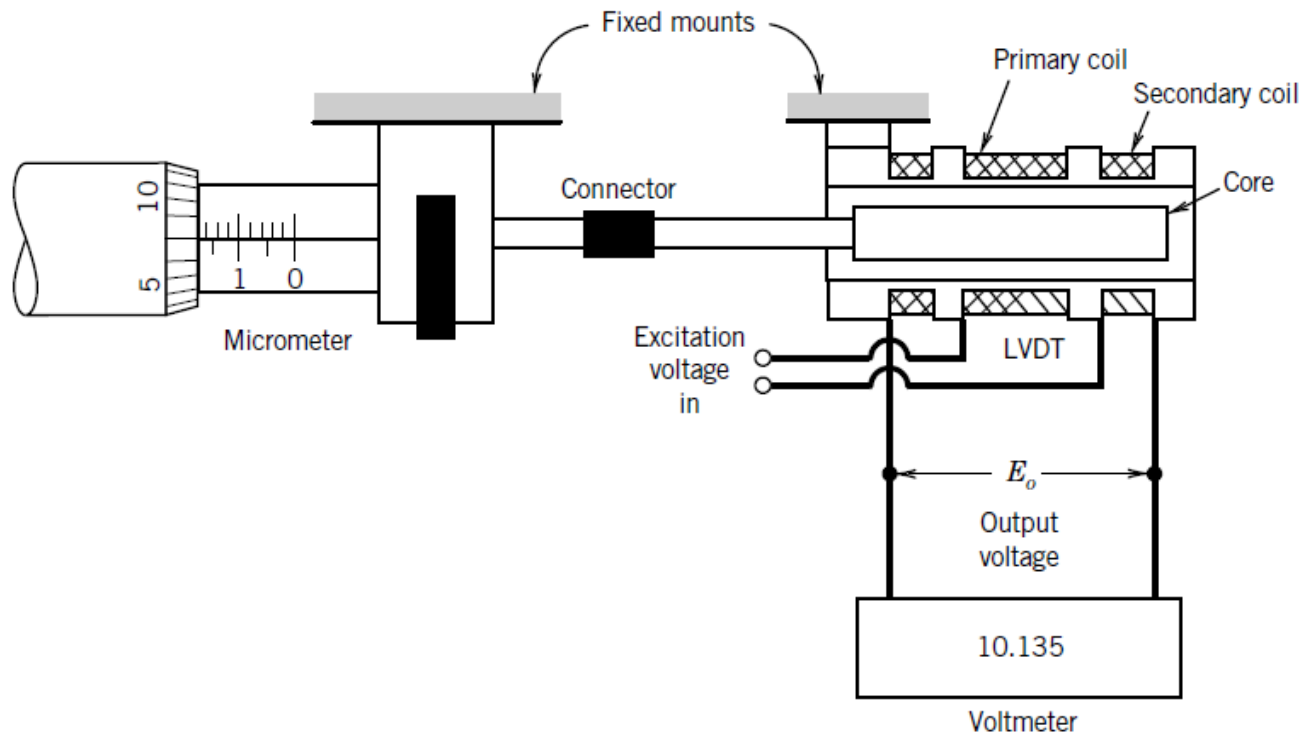


Exercícios

- **Ex. 1.2)** O LVDT é utilizado para medir deslocamentos lineares, de forma que a tensão de saída varia com o deslocamento de entrada. No ensaio de calibração, a posição é controlada por um micrômetro, enquanto que a tensão de saída é registrada com um multímetro. Adicionalmente, o dispositivo é alimentado por uma fonte de tensão.
 - a) Identifique os estágios do sistema geral de medição;
 - b) Identifique as variáveis independentes, dependentes e externas;
 - c) Descreva os ensaios de calibração estática e dinâmica para este dispositivo.

Exercícios

- **Ex. 1.2)** O LVDT é um transformador linear com núcleo móvel. A tensão de saída varia com a posição do núcleo que acopla o primário ao secundário do transformador.



Exercícios

- **Ex. 1.2.a)** Estágios do sistema geral de medição:
 - **Sensor:** núcleo do LVDT, converte posição em variação de relutância magnética;
 - **Transdutor:** transformador, converte tensão do primário ao secundário, modulada pela posição do núcleo;
 - **DAQ:** multímetro, condiciona e reduz a tensão medida no secundário;
 - **Saída:** multímetro, mostra os valores de tensão no display;
 - **Controle:** não se aplica, mas, na prática, a malha é fechada pelo operador...

Exercícios

- **Ex. 1.2.b)** Identificação das variáveis:
 - **Dependentes:** tensão no secundário (depende da tensão no primário e da posição do núcleo);
 - **Independentes:** tensão de alimentação do primário, posição do núcleo (controladas pelo operador);
 - **Externas:** temperatura, umidade, ruído de alimentação, ruído eletromagnético, etc.

Exercícios

- **Ex. 1.3)** No ensaio de calibração estática de um sensor de força, o dispositivo é excitado por uma célula de carga, resultando em uma tensão de saída. Foram registrados 22 pontos experimentais.
 - a) Obtenha a curva de calibração e determine a faixa de operação;
 - b) Determine a sensibilidade e a resolução do sensor;
 - c) Calcule o erro de histerese.

Exercícios

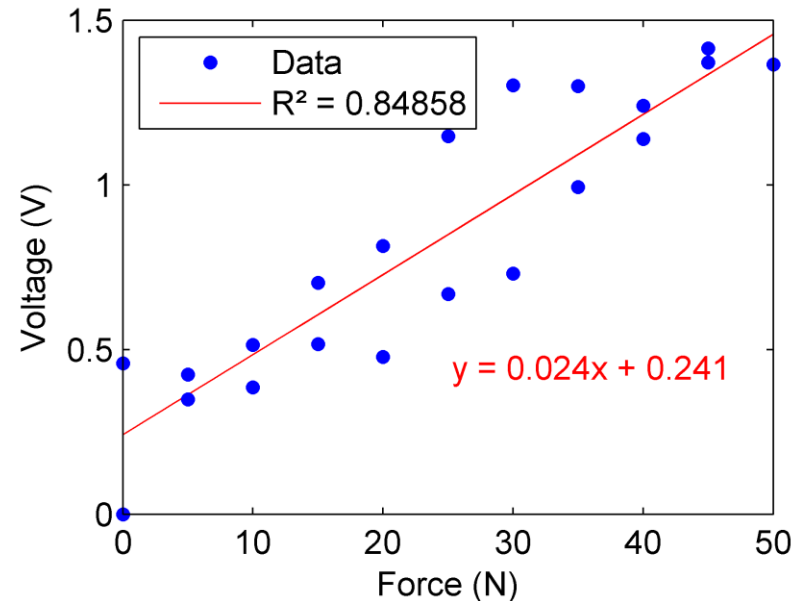
- Ex. 1.3) Calibração estática.

n	F (N)	V (mV)	n	F (N)	V (mV)
1	0	0	12	50	1,365
2	5	0,348	13	45	1,372
3	10	0,514	14	40	1,139
4	15	0,702	15	35	0,993
5	20	0,815	16	30	0,731
6	25	1,148	17	25	0,668
7	30	1,302	18	20	0,478
8	35	1,300	19	15	0,516
9	40	1,240	20	10	0,385
10	45	1,414	21	5	0,424
11	50	1,365	22	0	0,458

Exercícios

■ Ex. 1.3.a) Curva de calibração:

- Fitting linear.
Note que o valor de R^2 é reativamente baixo;
- Faixa dinâmica de entrada:
 $r_i = 50 - 0 = 50 \text{ N}$;
- Faixa dinâmica de saída:
 $r_o = 1.5 - 0 = 1.5 \text{ V}$.

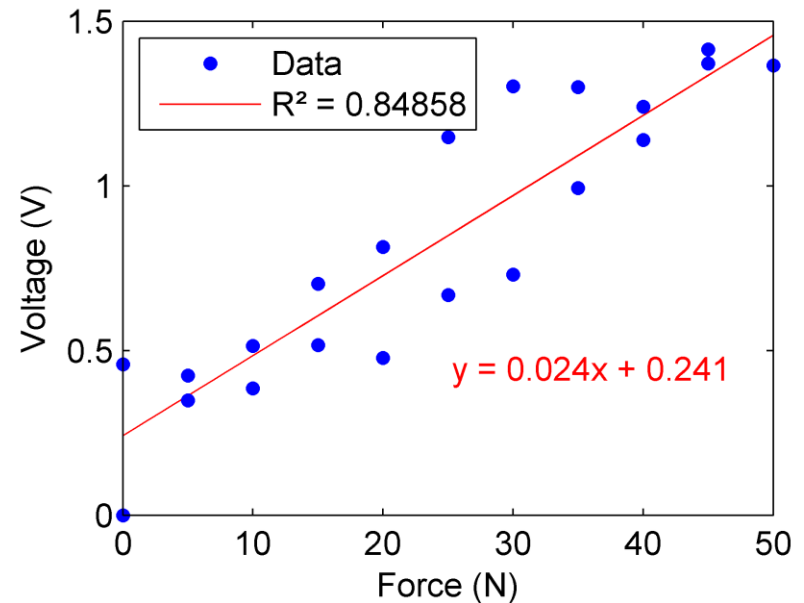


```
[f,g] = fit(x,y,'poly1');  
xf = [0:1:50]';  
yf = feval(f,xf);
```

Exercícios

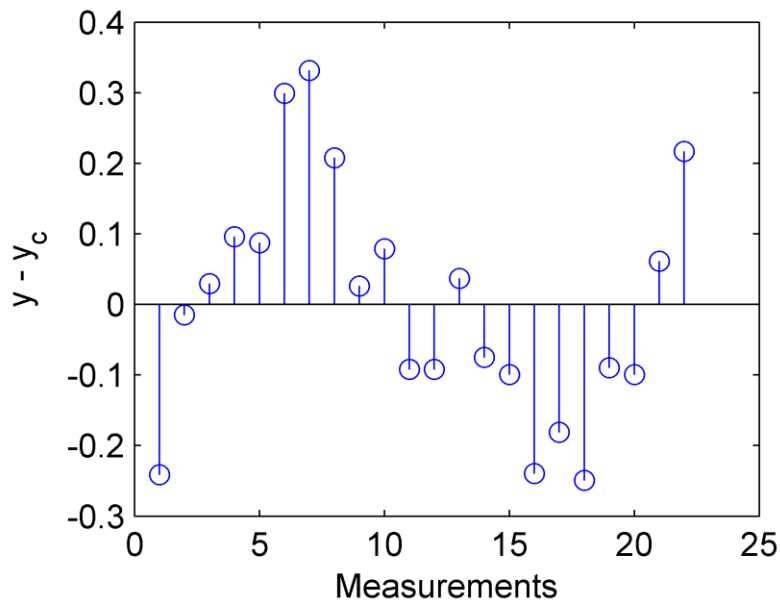
■ Ex. 1.3.b) Caracterização:

- Sensibilidade:
 $K = 0.024 \text{ V/N};$
- Resolução: considerando que um multímetro possui resolução $\Delta V = 0.01 \text{ mV}$,
$$\Delta F = \frac{\Delta V}{K} = 4.17 \times 10^{-4} \text{ N}.$$

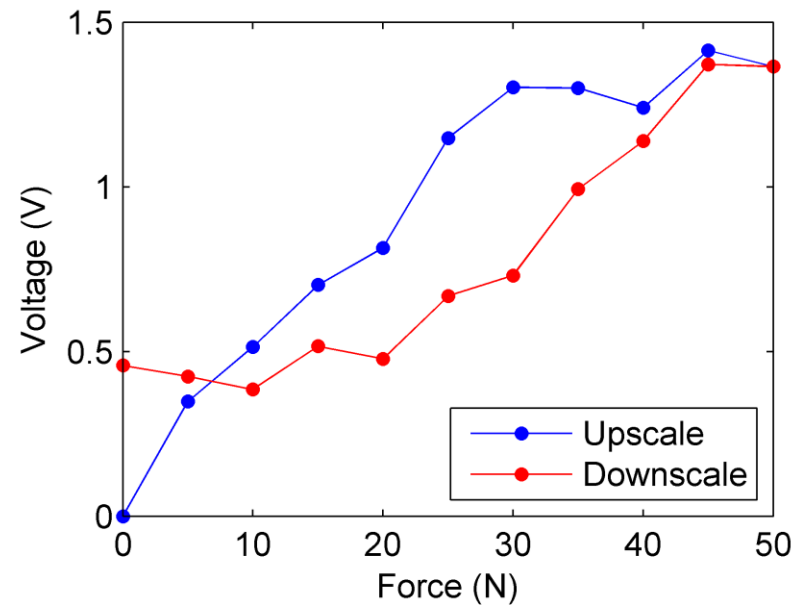


Exercícios

- **Ex. 1.3.b)** Erros de linearidade e histerese:



Erro médio absoluto de linearidade: 0,13 V



Erro médio absoluto de histerese: 0,24 V

Exercícios

- **Ex. 1.4)** A tabela abaixo apresenta os resultados para o ensaio de calibração de um multímetro.
 - a) Determine as faixas dinâmicas do instrumento;
 - b) Calcule a sensibilidade estática;
 - c) Avalie os erros de linearidade e histerese.

Table 1.6 Voltmeter Calibration Data

Increasing Input [mV]		Decreasing Input [mV]	
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
0.0	0.1	5.0	5.0
1.0	1.1	4.0	4.2
2.0	2.1	3.0	3.2
3.0	3.0	2.0	2.2
4.0	4.1	1.0	1.2
5.0	5.0	0.0	0.2

Exercícios

▪ Ex. 1.4.a,b) Faixa dinâmica e sensibilidade estática

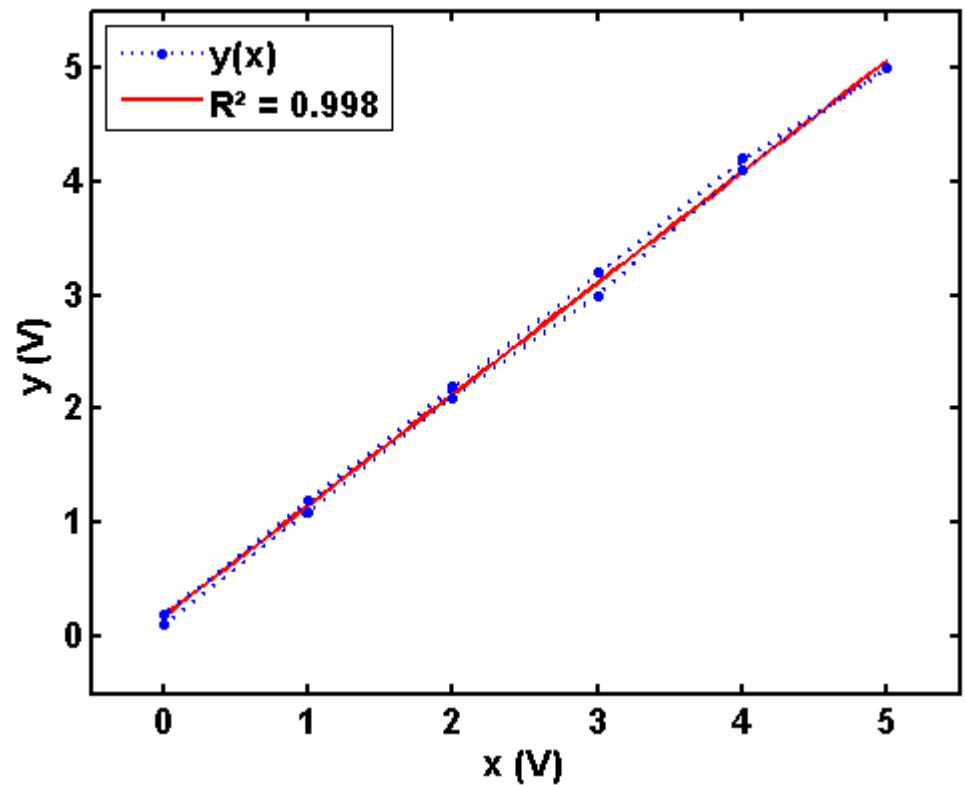
- Faixa dinâmica:

- $r_i = 5 \text{ V};$

- $r_o = 5 \text{ V};$

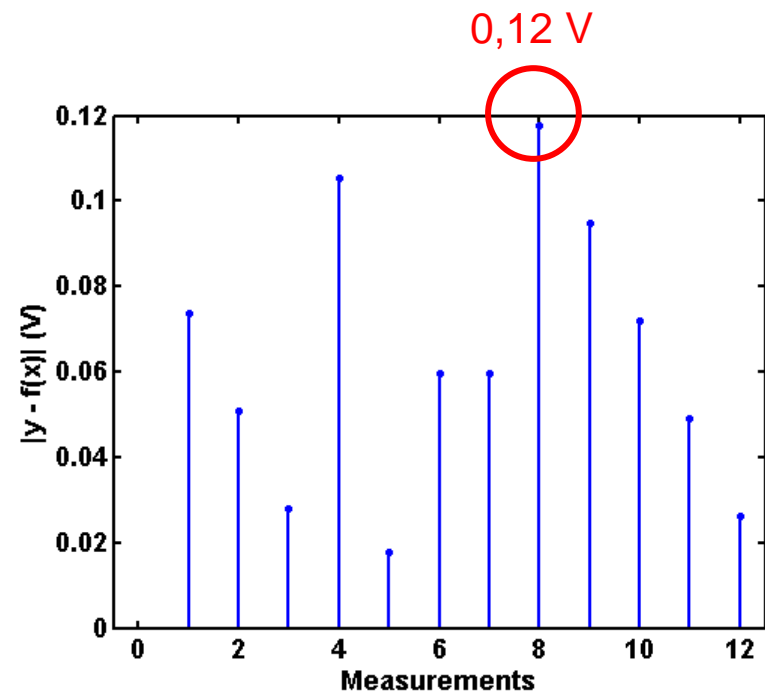
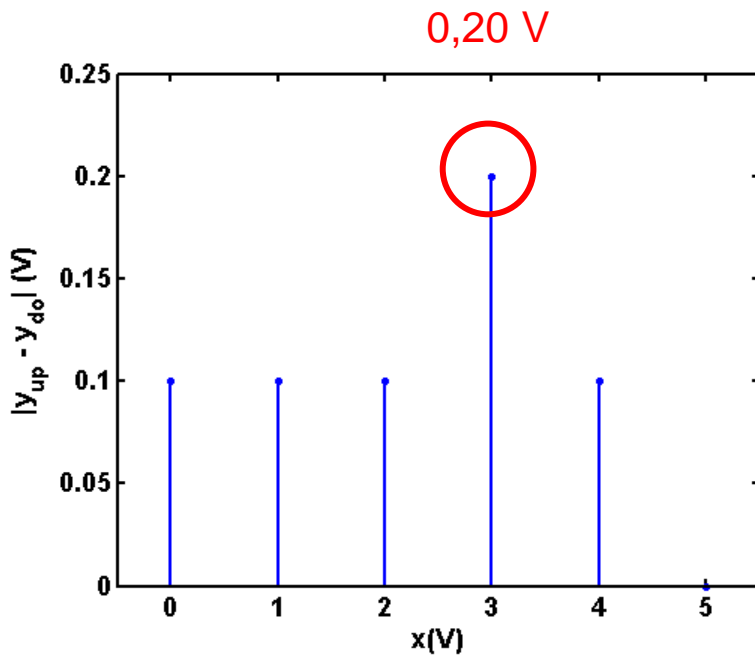
- Sensibilidade:

- $K = \frac{dy}{dx} = 0.98 \text{ V/V}$



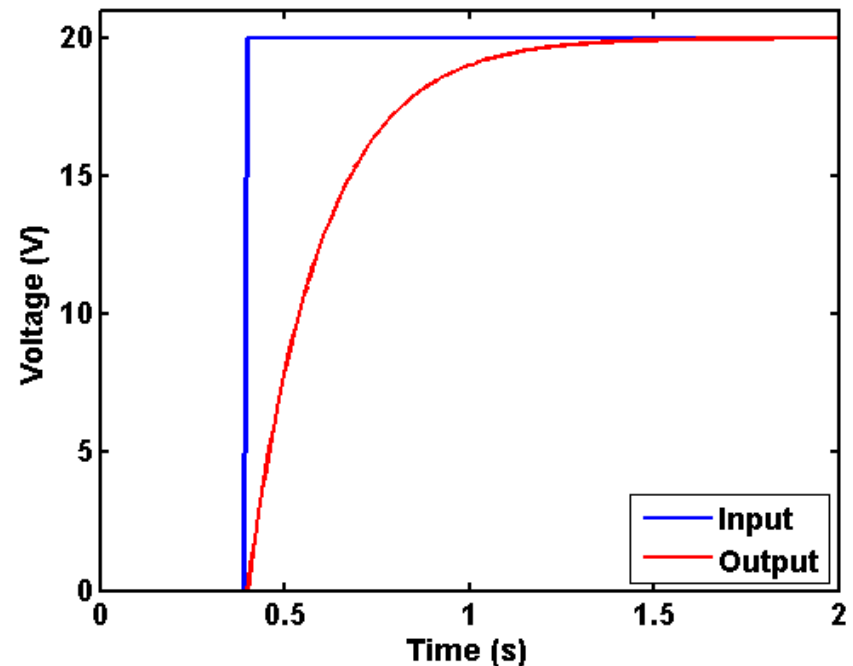
Exercícios

- Ex. 1.4.c) Erros de histerese e linearidade:



Exercícios

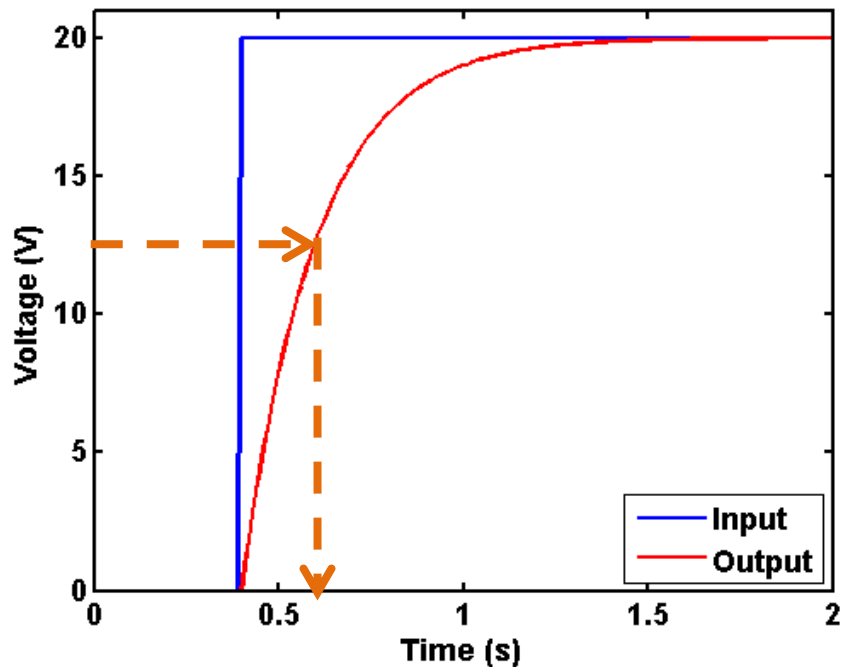
- **Ex. 1.5)** A figura abaixo apresenta a resposta dinâmica de um sensor a um degrau de 20 V.
 - a) Determine a constante de tempo do sistema;
 - b) Estime a largura de banda do sistema.



Exercícios

▪ Ex. 1.5.a) Constante de tempo:

- $y(\tau) = 0.632 \times 20 = 12.64 \text{ V};$
- $\tau = 0.6 - 0.4 = 0.2 \text{ s};$



Exercícios

▪ Ex. 1.5.b) Resposta em frequência:

- Supondo sistema de primeira ordem, a função de transferência é dada por $G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{1}{0.2s + 1}$;
- Do diagrama de Bode, a largura de banda (faixa de frequências acima de -3 dB) é de 5 rad/s (~0.8 Hz).

