

ES704 – Instrumentação Básica

## **04 – Medições elétricas**

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

# Índice

- **Índice:**

- 1) Medições elétricas;
- 2) Medições magnéticas;
- 3) Aquisição e condicionamento de sinais;
- Questionário;
- Referências;
- Exercícios.

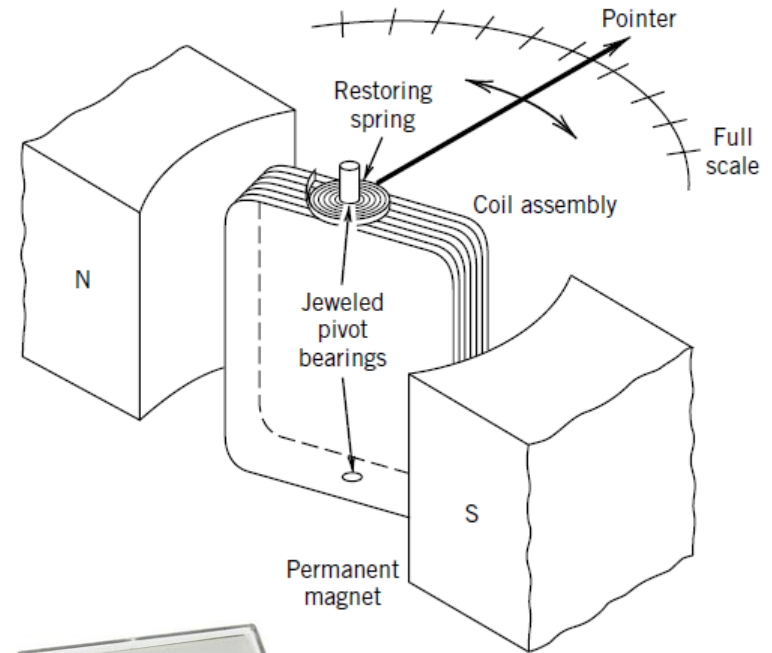
# 1. Medições elétricas

- 1.1. Medição de corrente:
  - Medidor de D'Arsonval:

- Baseado na **Lei de Força de Lorentz**:

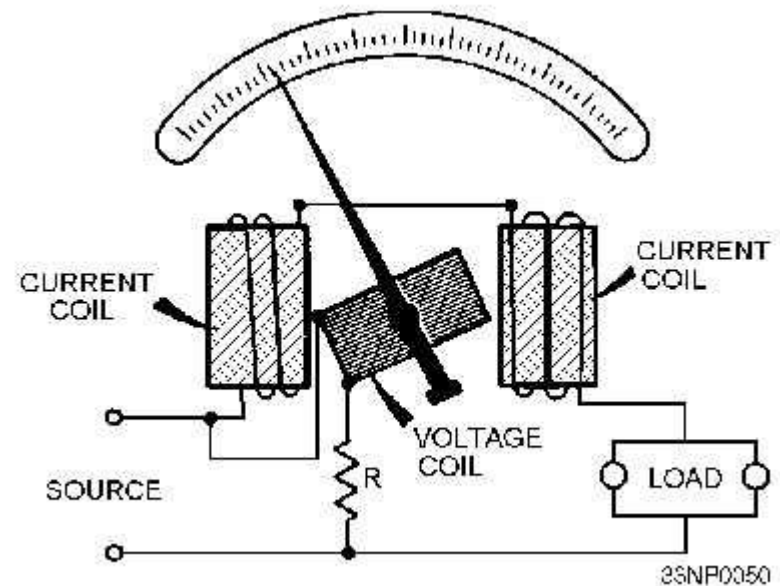
$$T \approx liB \quad (4.1)$$

- A corrente medida é conduzida através do enrolamento de comprimento  $l$ . A interação entre corrente DC  $i$  e campo magnético  $B$  constante produz um torque  $T$  que deflete o indicador sobre a escala.



# 1. Medições elétricas

- 1.1. Medição de corrente:
  - Eletrodinamômetro:
    - Variação do medidor de D'Arsonval onde os ímãs permanentes são substituídos por eletroímãs conectados em série com o enrolamento de armadura;
    - Permite medir correntes AC.



# 1. Medições elétricas

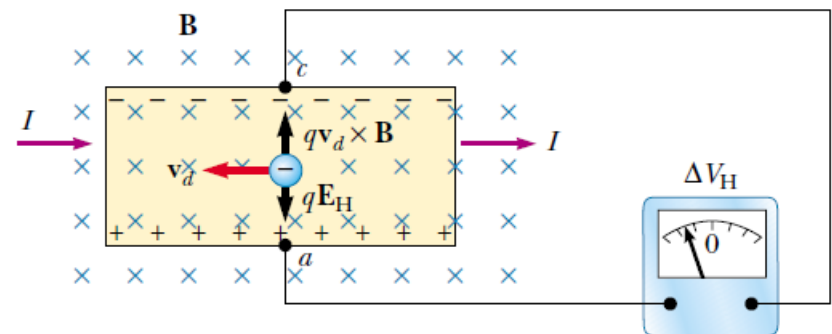
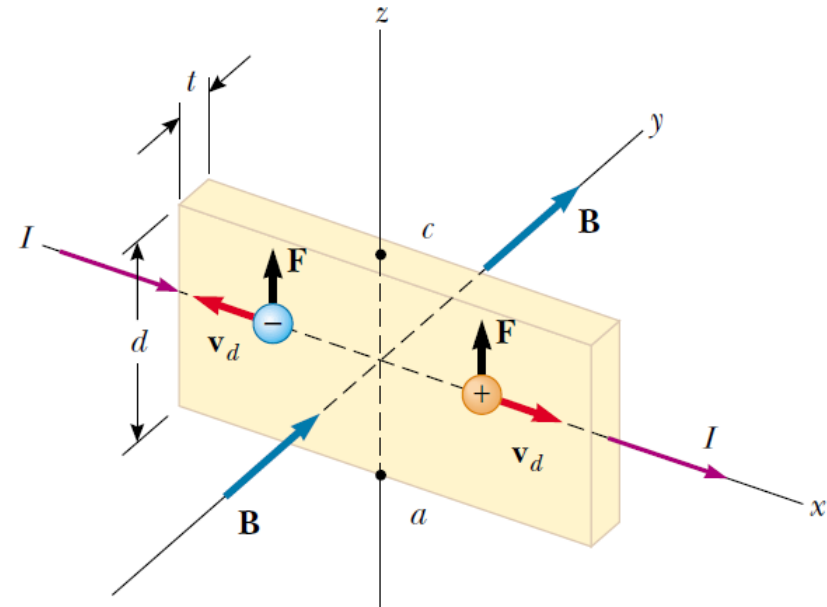
## ■ 1.1. Medição de corrente:

### • Sensor de efeito Hall:

- Baseado no efeito Hall:

$$\Delta V_H \approx dvB \quad (4.2)$$

- Uma tensão  $\Delta V_H$  é produzida quando uma corrente  $i$  (cargas elétricas  $q$  com velocidade  $v$ ) é conduzida por um condutor de dimensões finitas  $d$ , submetido a um campo magnético ortogonal  $B$ .

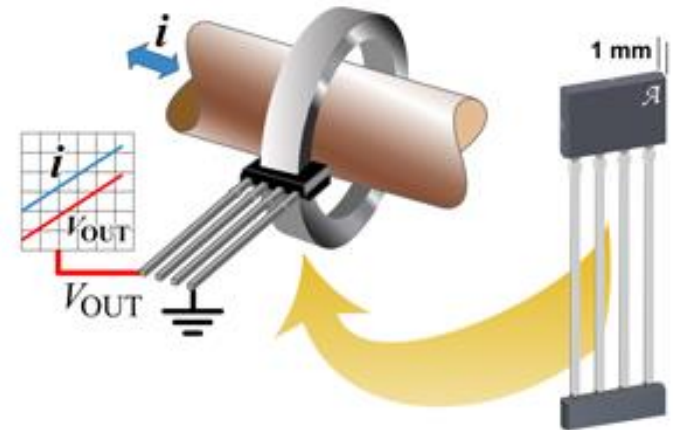


# 1. Medições elétricas

## ■ 1.1. Medição de corrente:

### • Sensor de efeito Hall:

- Em um **alicate amperímetro**, o anel é excitado com corrente DC  $i_0$ , sendo que a corrente a ser medida  $i$  produz um campo magnético  $B$  pela Lei de Ampère. A interação entre  $i_0$  e  $B$  produz a tensão de saída  $\Delta V_H$ ;
- Método não-invasivo.



# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.1. Medição de corrente:

- **Outros métodos:**

- **Impedância:** estimar a corrente pela queda de tensão proporcionada por um condutor;
- **Semicondutor:** estimar a corrente pela queda de tensão proporcionada pela resistência intrínseca de um semicondutor;
- **Óptico:** baseado no Efeito Faraday, onde o campo magnético causa rotação do estado de polarização da luz. Aplicado na medição de correntes elevadas (kA) de forma não-invasiva.

- **Obs:**

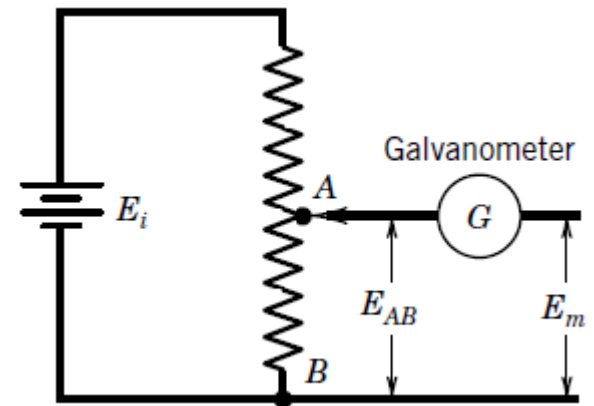
- **Amperímetro:** modo de deflexão;
- **Galvanômetro:** modo nulo.

# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.2. Medição de tensão:

### • Divisor de tensões:

- Compara uma tensão de referência  $E_i$  com a tensão medida  $E_m$ ;
- **Modo nulo:** o potenciômetro é ajustado até que a corrente no amperímetro seja nula.
- **Modo de deflexão:** a corrente do amperímetro é calibrada para obter  $E_m$ ;
- A tensão AC de entrada pode ser retificada em DC antes da medição.



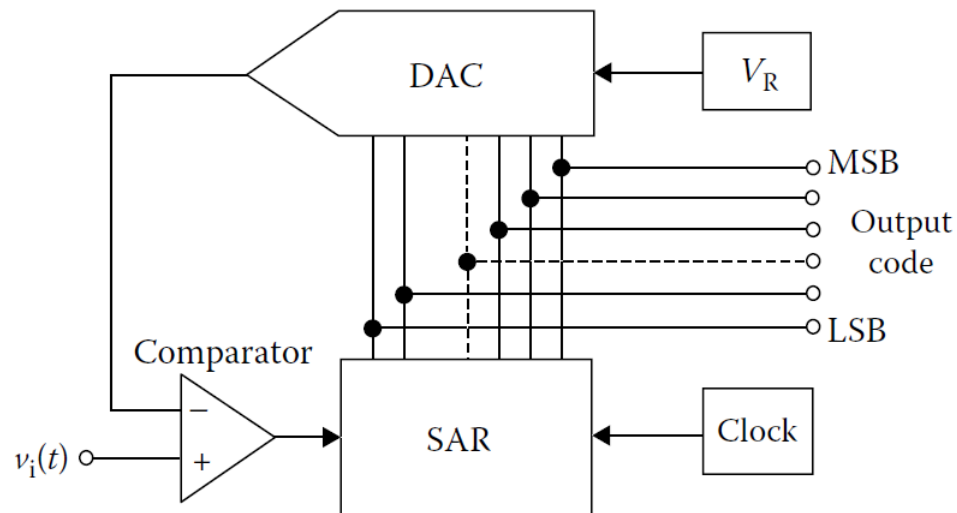


# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.2. Medição de tensão:

### • Voltímetros digitais:

- Realizam conversão A/D da tensão medida e determinam o seu valor através de comparadores de aproximação sucessivas;
- Utilizados em osciloscópios digitais.



# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.3. Medição de impedância:

- **Resistência:**

- **Ohmímetro:** medição de resistência elétrica por divisor de tensões;
- Medição indireta por tensão e corrente;

- **Capacitância:**

- Caracterização do dielétrico;
- Resposta ao degrau ou em frequência;

- **Indutância:**

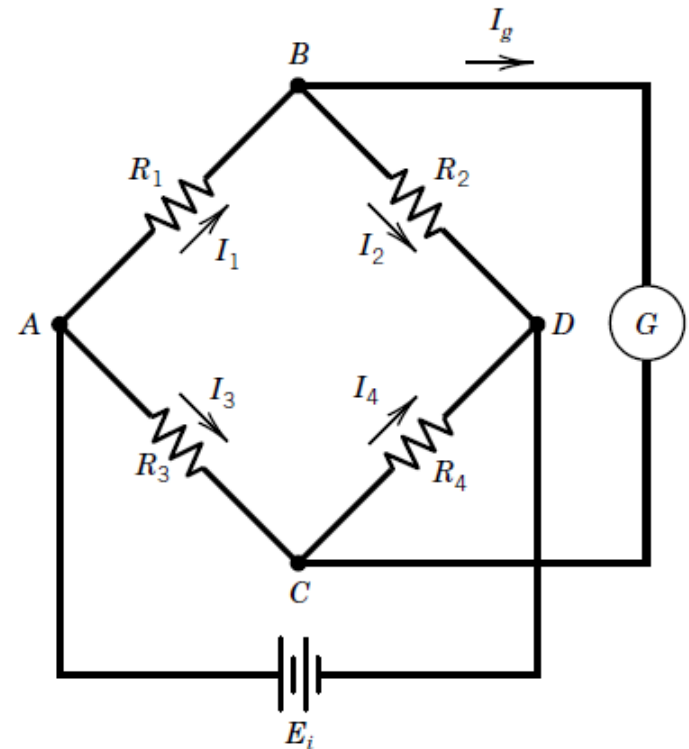
- Caracterização eletromagnética;
- Resposta ao degrau ou em frequência.

# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.3. Medição de impedância:

### • Ponte de Wheatstone:

- Circuito para medição de variação de resistência elétrica com alta sensibilidade;
- A corrente conduzida pelo galvanômetro  $i_G$  depende da tensão de excitação  $E_i$  e das resistências da ponte  $R_n$ ;
- Geralmente, formada por 1 resistor variável e 2 fixos, além do resistor desconhecido.



# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.3. Medição de impedância:

### • Ponte de Wheatstone:

- **Modo nulo:** os resistores variáveis são ajustados para  $i_G = 0$ , equilibrando a saída da ponte. Nesta condição,

$$\boxed{\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}} \quad (4.3)$$

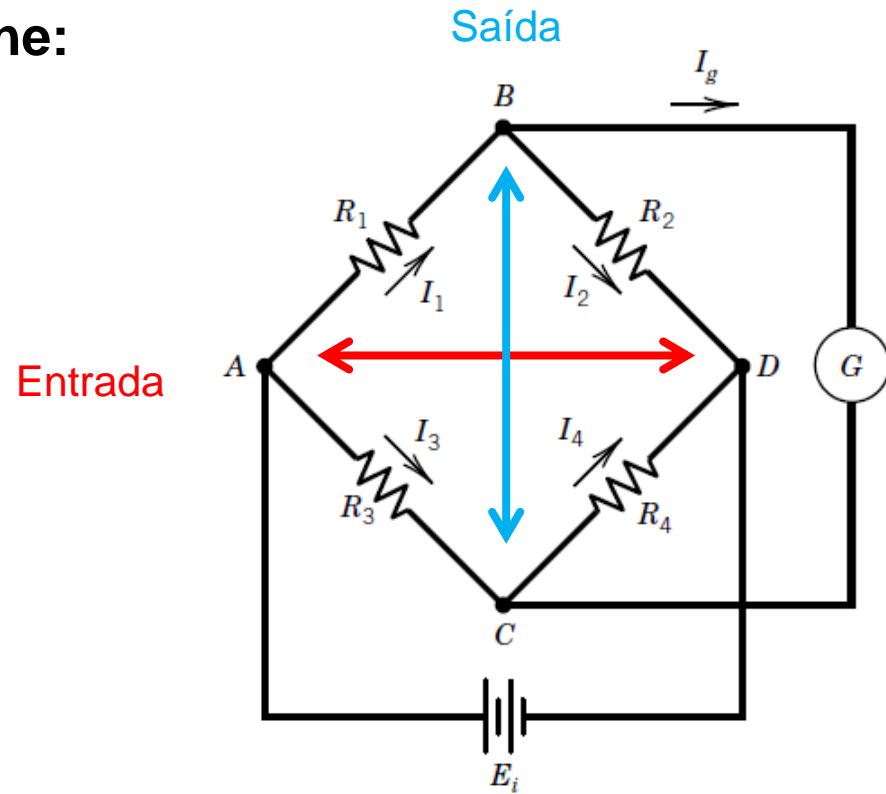
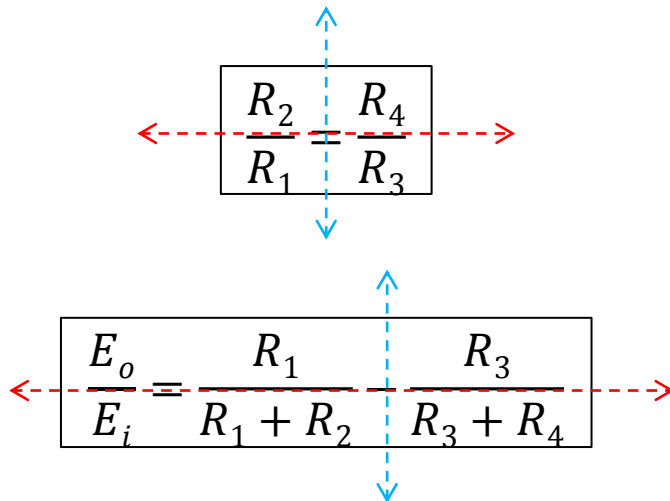
- **Modo de deflexão:** tensão de saída sobre o galvanômetro  $E_o$  é medida diretamente:

$$\boxed{\frac{E_o}{E_i} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}} \quad (4.4)$$

# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.3. Medição de impedância:

### • Ponte de Wheatstone:



# 1. Medições elétricas

## ▪ 1.3. Medição de impedância:

### • Ponte de Wheatstone:

- **Modo de deflexão:** considerando que a ponte está **equilibrada** ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  e  $E_o = 0$ ), uma variação na resistência  $R_1 = R + \Delta R$  produz variação na tensão de saída  $\Delta E_o$ . Assim,

$$\boxed{\frac{\Delta E_o}{E_i} = \frac{\Delta R/R}{4 + 2\Delta R/R}}$$

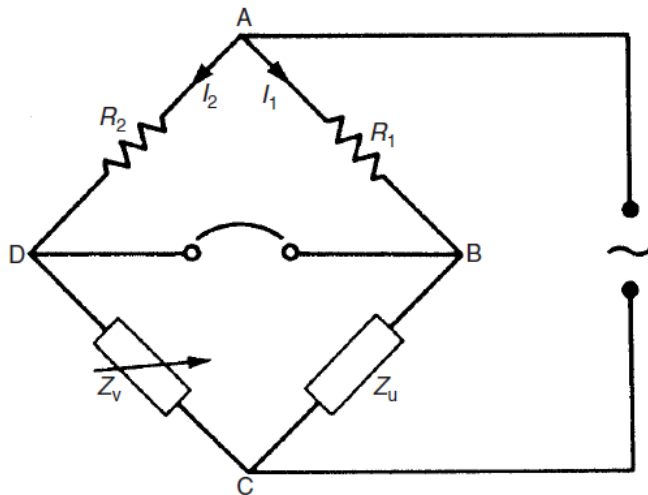
(4.5)

# 1. Medições elétricas

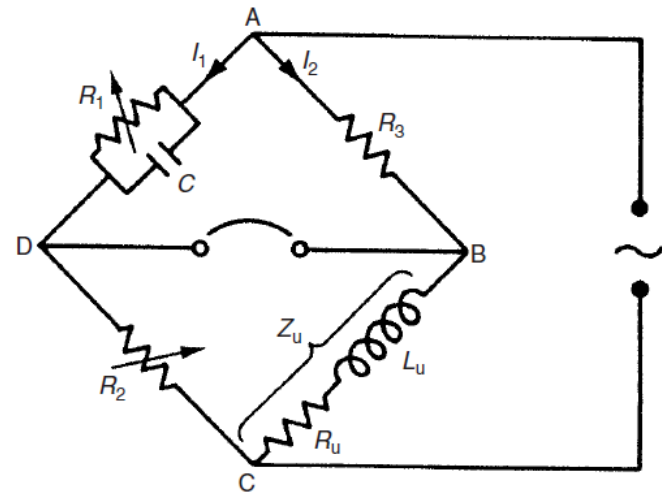
## ▪ 1.3. Medição de impedância:

### • Ponte de Maxwell:

- Modificação da ponte de Wheatstone para medir  $R$ ,  $L$  ou  $C$ . Note que  $E_i$  e  $E_o$  são tensões AC.



$$Z_u = Z_v \frac{R_2}{R_1} \quad (4.5)$$



$$Z_u = R_u + j\omega L = R_2 R_3 \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C \right) \quad (4.6)$$

## 2. Medições magnéticas

### ■ 2.1. Magnetômetro de indução:

- Utiliza antenas para capturar o campo (fluxo) magnético de interesse, produzindo uma força eletromotriz de saída pela Lei de Faraday de indução.

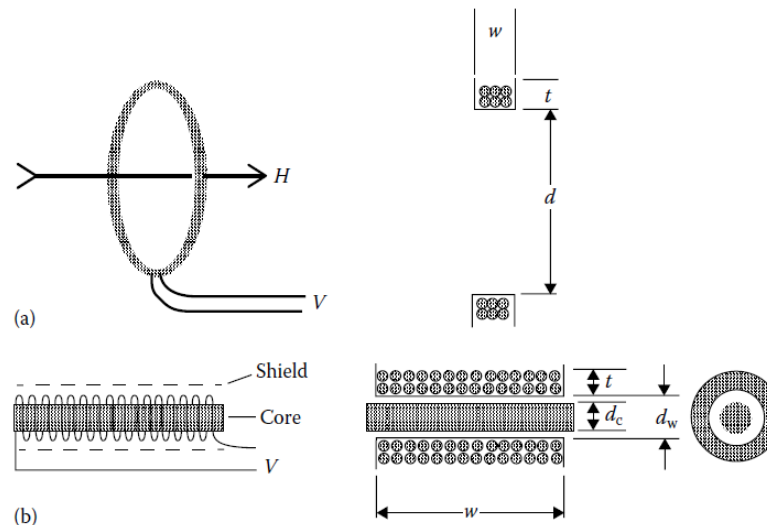


FIGURE 39.4 Induction or search coil sensors consist of a loop of wire (or a solenoid), which may or may not surround a ferromagnetic core: (a) Air-core loop antenna and (b) solenoid induction coil antenna with ferromagnetic core.



## 2. Medições magnéticas

### ▪ 2.2. Gaussímetro de efeito Hall:

- A tensão Hall é gerada pelo condutor/semicondutor retangular quando submetido a um campo magnético externo. Pode ser configurado para medir a magnitude e a direção do campo.

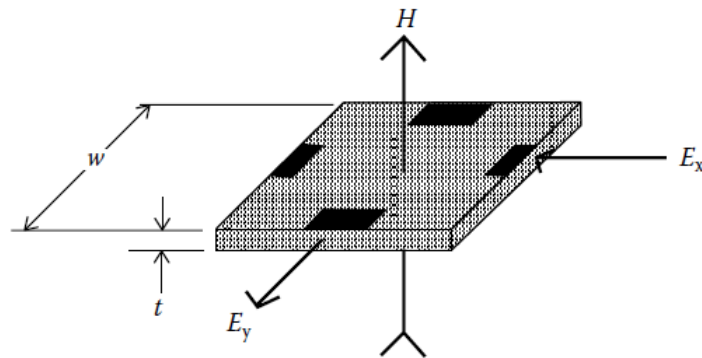


FIGURE 39.14 Hall effect sensor. A magnetic field  $H$  applied normal to the surface of the sensor, which is conducting current along the  $x$ -direction, will generate a voltage along the  $y$ -direction.  $E_x$  is the applied electric field along the  $x$ -direction, and  $E_y$  is the Hall effect electric field along the  $y$ -direction.

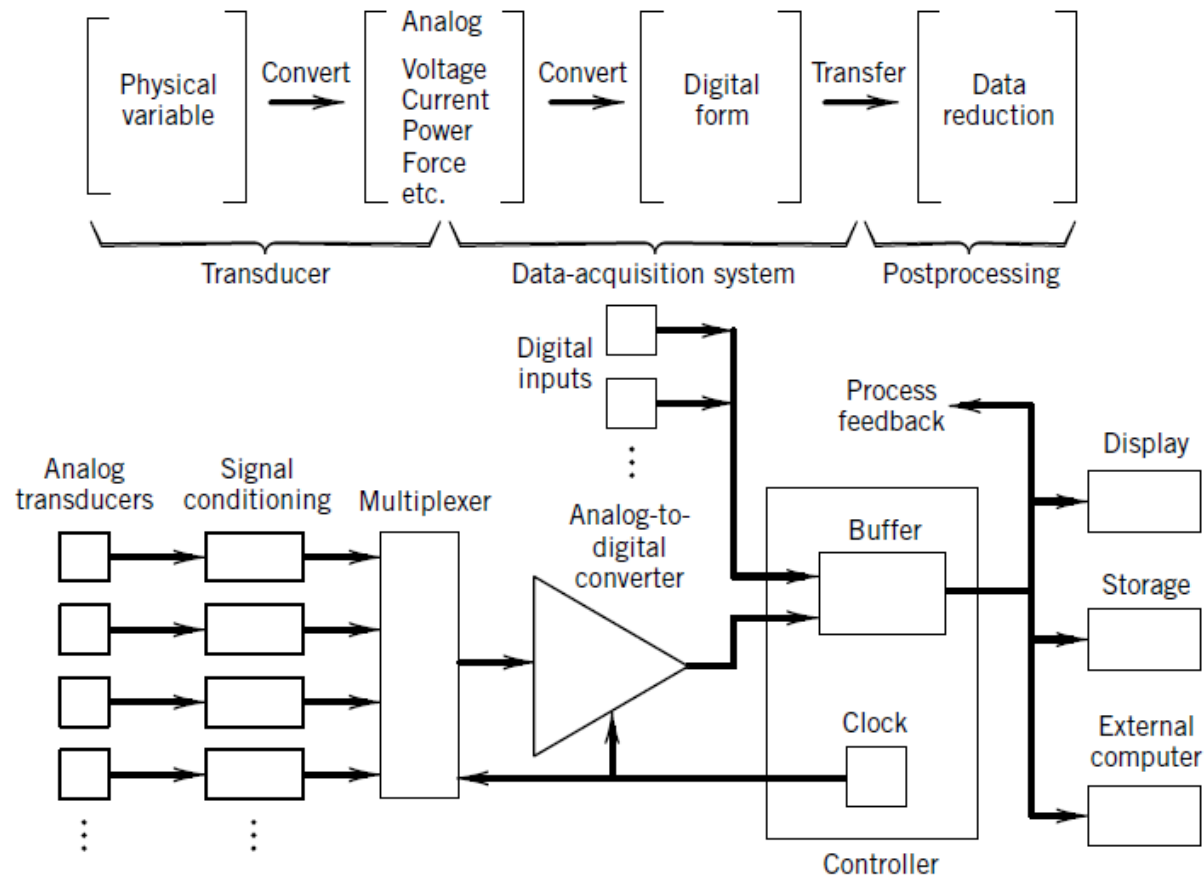
## 2. Medições magnéticas

### ▪ 2.3. Outros dispositivos:

- **Fluxgate:** transdutor toroidal com dois enrolamentos (excitação e medição). Campo magnético externo gera variação nos ciclos de saturação magnética do núcleo, detectada a forma de tensão (Lei de Faraday);
- **SQUID:** baseado na produção de uma corrente supercondutora à baixas temperaturas, onde a magnitude da corrente varia com o fluxo magnético sobre a junção;
- **Gaussímetro magnetorresistivo:** dispositivo cuja resistência elétrica varia com o campo magnético aplicado;
- **Transdutor magnetostritivo:** material que sofre contração mecânica sob aplicação de um campo magnético.

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.1. Sistema de aquisição de sinais:

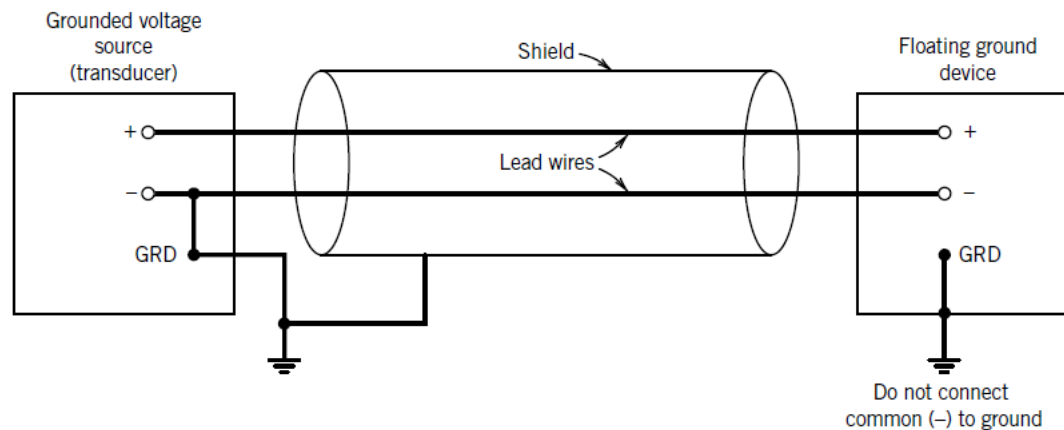


# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.2. Proteção de sinais:

- **Aterramento:**

- Utilizado como referência (zero) de tensão;
- **Loops de terra:** causados pela presença de referenciais diferentes no circuito, gerando diferença de potencial → ruído e interferência;
- Separar os terras de alimentação e sensoriamento.



# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.2. Proteção de sinais:

- **Blindagem:**

- Fios longos funcionam como antenas, causando ruído AC;
- **Blindagem:** utilização de material metálico aterrado para envolver os fios condutores;
- A blindagem intercepta os **campos elétricos** externos, enviando-os de volta ao terra;
- No caso de **campos magnéticos**, os fios devem ser trançados em pares para cancelar as tensões induzidas sobre os condutores;
- Tensões baixas ( $\sim$ mV) podem ser transmitidas em loops de corrente (4-20 mA) sem amplificação de ruído.

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.2. Proteção de sinais:

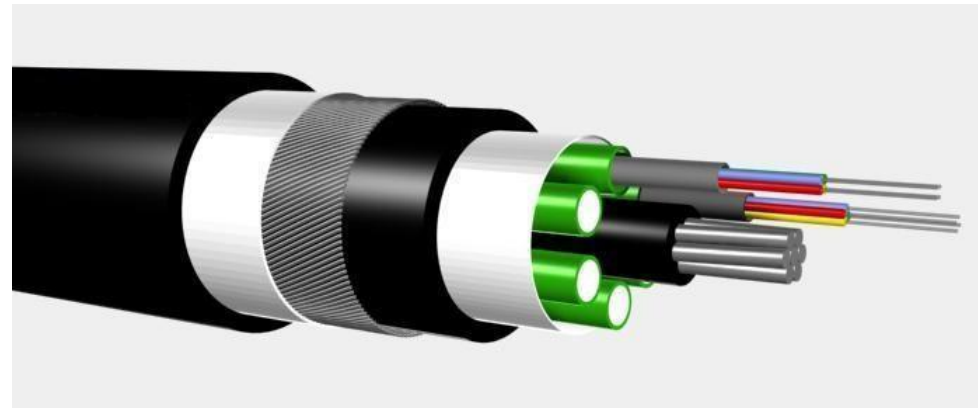
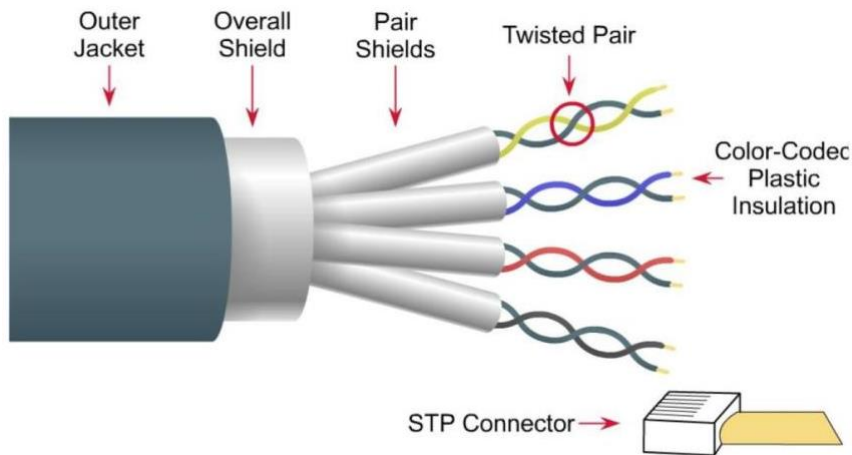
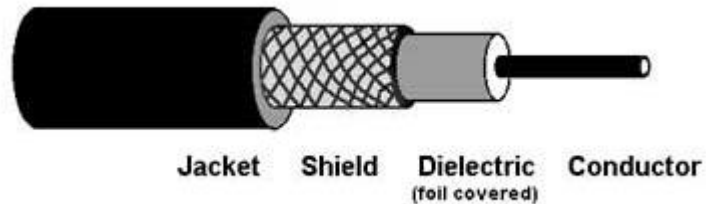
### • Cabeamento:

- **Cabo simples:** fio condutor envolvido em camada isolante, baixo custo e alta vulnerabilidade;
- **Cabo de par-trançado:** cabos simples trançados para cancelamento de ruído eletromagnético;
- **Cabo coaxial:** condutor simples envolto de um condutor externo e de uma camada de blindagem. As correntes nos condutores interno e externo são conduzidas em sentidos diferentes, cancelando os campos eletromagnéticos;
- **Cabo de fibra óptica:** transmissão de sinal por pulsos de luz, feita de vidro ou polímero. Imune à interferência eletromagnética.

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.2. Proteção de sinais:

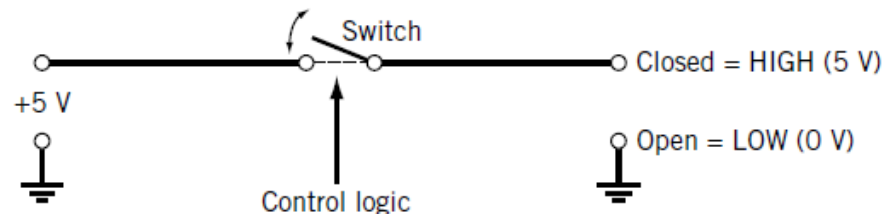
- Cabeamento:



# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.3. Aquisição de sinais:

- **Amostragem:** conversão de um sinal analógico em um sinal discretizado a uma taxa de amostragem  $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$ ;
- **Teorema de Nyquist:** para evitar aliasing,  $\Delta f \geq 2f_{\max}$ , onde  $f_{\max}$  é a maior frequência do sinal amostrado;
- **Quantização:** conversão de um sinal analógico em um sinal digital;
  - Sistemas TTL consideram  $< 0,8 \text{ V}$  como nível lógico baixo (0) e de 2 a 5,5 V como nível lógico alto (1);



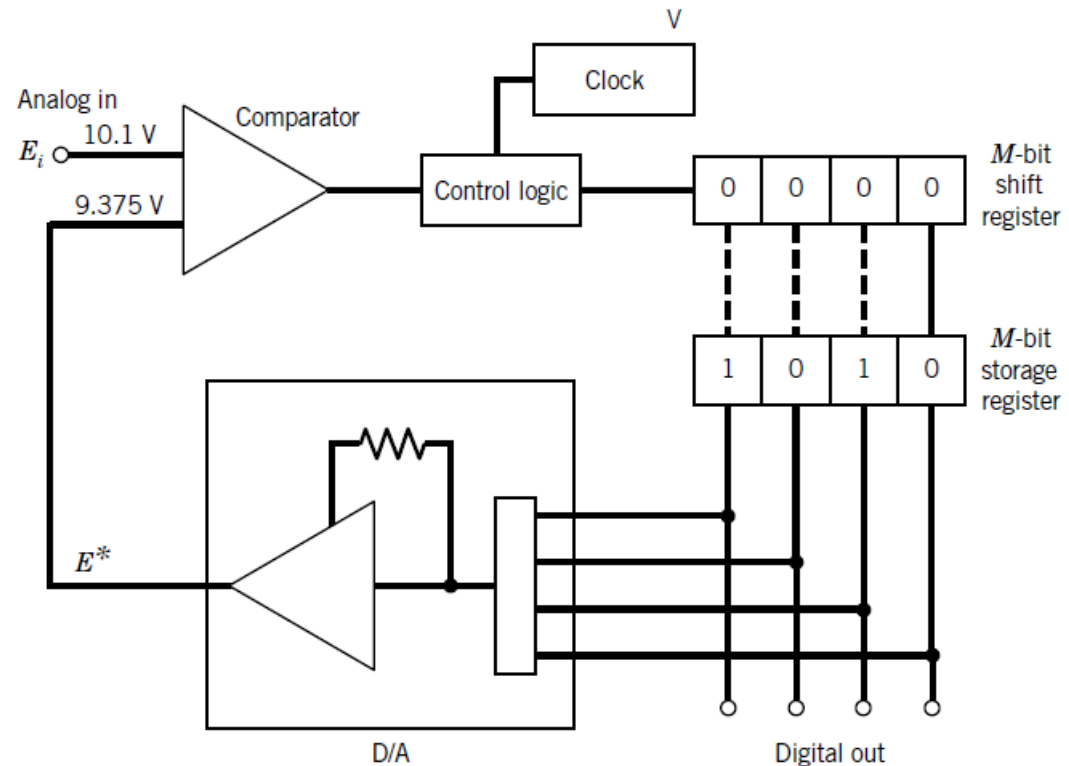


# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.3. Aquisição de sinais:

- **Conversor A/D de aproximações sucessivas:**

- Determina a tensão digital de saída por tentativa-e-erro;
- A relação entre tensão e código binário é tabelada para a faixa de aplicação do sistema.



# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.3. Aquisição de sinais:

- **Protocolos de comunicação digital:**

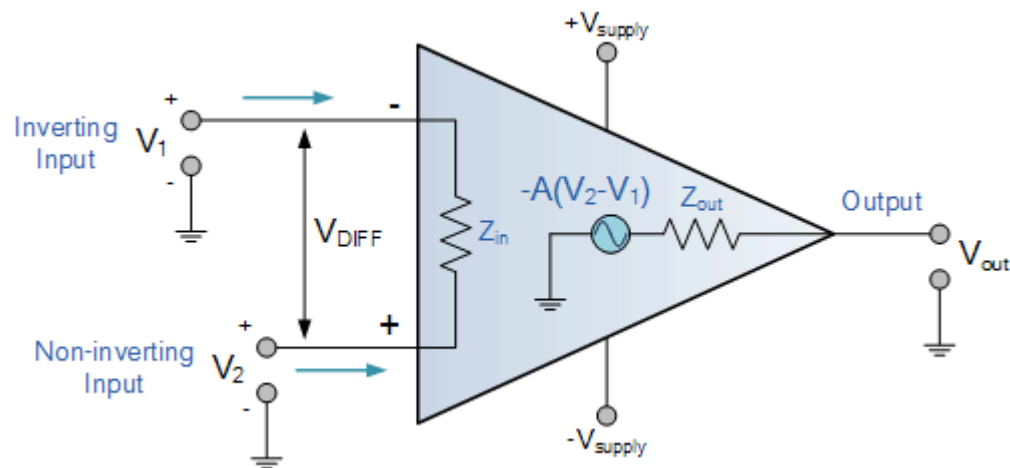
- **Serial RS-232C:** comunicação bidirecional cabeada bit a bit, utilizado em sistemas de telefonia e computadores;
- **Paralelo GPIB:** comunicação de alta velocidade, com transmissão de dados simultânea em grupos de bits (byte a byte). Utilizado em instrumentos científicos e computadores;
- **Universal serial bus (USB):** comunicação de alta velocidade com expansão para até 128 dispositivos. Os cabos são limitados a 5 m. Utilizado em comunicação de periféricos;
- **Bluetooth:** comunicação sem fio (wireless) entre dispositivos por meio de ondas de rádio. Não requer alinhamento físico entre emissor e receptor. Limitado a distâncias de até 10 m.

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.4. Condicionamento de sinais:

- **Amplificação:** Ganho de potência no sinal;
  - **Amplificadores operacionais (OPAMP)** são dispositivos semicondutores com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída;
  - Função de transferência:

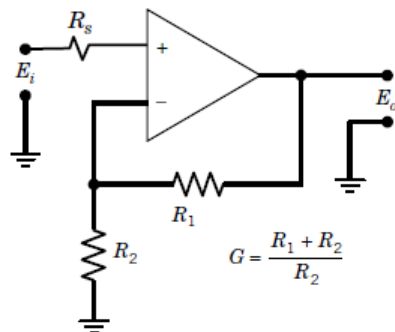
$$V_o = G(\omega)(V_1 - V_2)$$



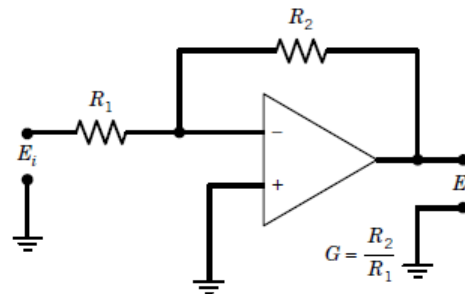
# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## 3.4. Condicionamento de sinais:

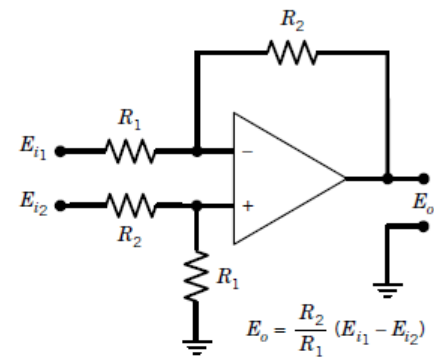
- Amplificação:** circuitos com OPAMP.



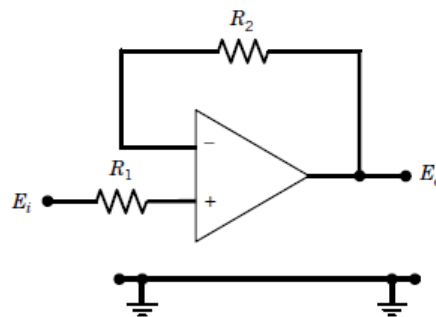
(a) Noninverting amplifier



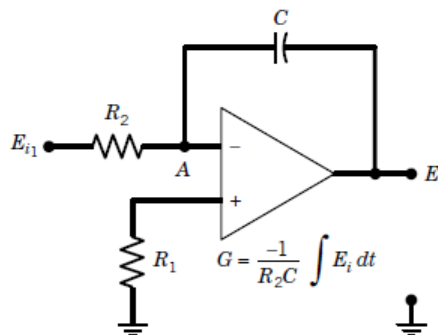
(b) Inverting amplifier



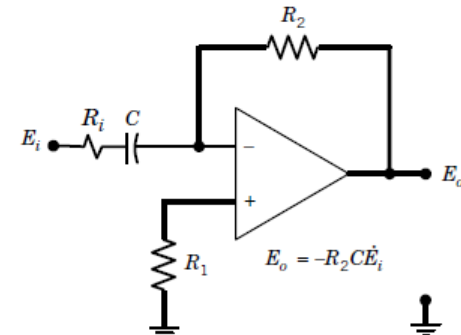
(c) Differential amplifier



(d) Voltage follower



(e) Integrator



(f) Differentiator

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.4. Condicionamento de sinais:

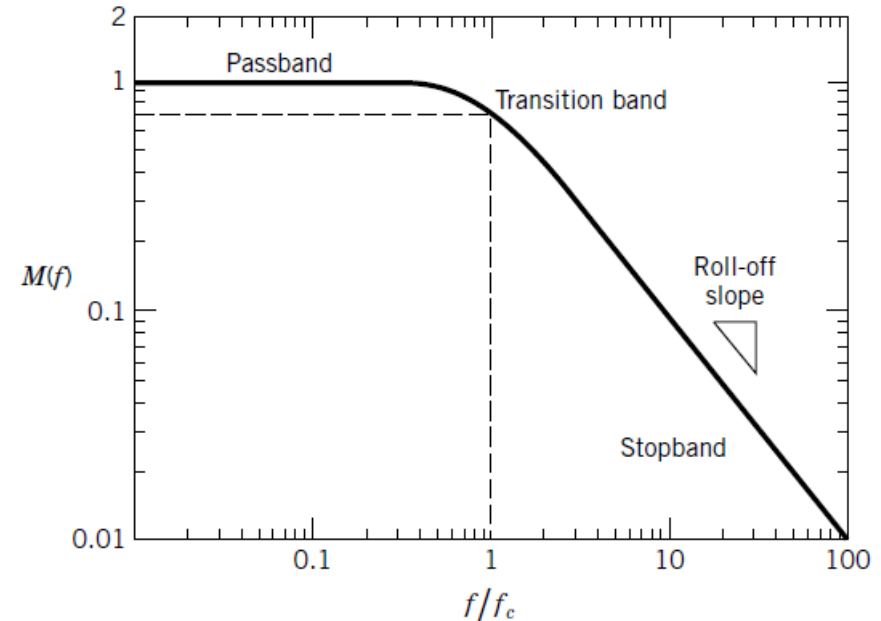
- **Filtragem:** supressão de componentes espectrais do sinal.
  - **Filtros analógicos:** implementados eletronicamente sobre o sinal analógico;
    - **Passivo:** circuitos RLC em cascata (Bessel e Butterworth);
    - **Ativos:** baseados na função de transferência de OPAMPs;
  - **Filtros digitais:** implementados computacionalmente sobre o sinal digital.
  - **Projeto de filtros analógicos:** [www.analog.com](http://www.analog.com) → Analog filter wizard
  - **Projeto de filtros digitais:** `fdatool` → Signal processing toolbox / MATLAB

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## ▪ 3.4. Condicionamento de sinais:

- **Filtragem:** características desejáveis em frequência

- 1) Comportamento plano na banda de passagem;
- 2) Resposta de fase linear na banda de passagem;
- 3) Transição rápida entre as bandas de passagem e corte.



# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

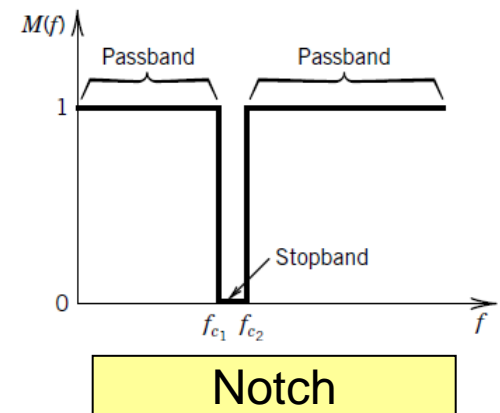
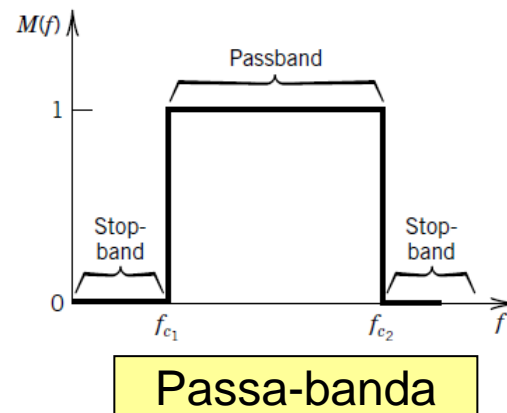
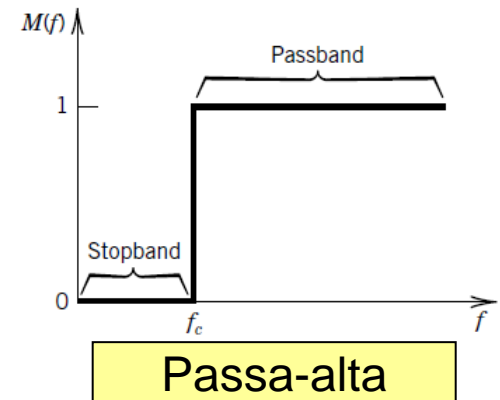
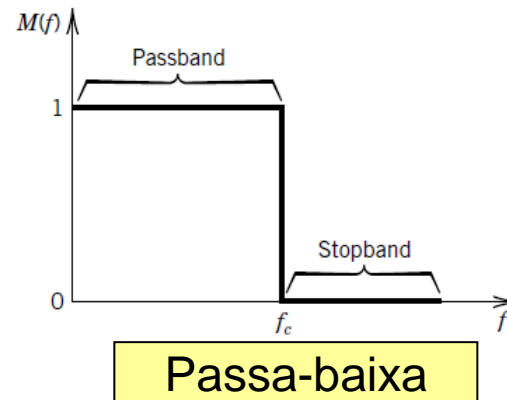
## ▪ 3.4. Condicionamento de sinais:

- **Filtragem:** tipos de filtros;
  - **Filtro passa-alta:** permite passagem de frequências maiores do que a frequência de corte  $f_c$  (cut-off);
  - **Filtro passa-baixa:** permite passagem de frequências menores do que a frequência de corte;
  - **Filtro passa-banda:** permite a passagem de sinal em apenas uma certa faixa de frequências (entre  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$ );
  - **Filtro rejeita-banda:** bloqueia a passagem de sinal em uma banda de frequências;
  - **Filtro notch:** bloqueia somente uma frequência.

# 3. Aquisição e condicionamento de sinais

## 3.4. Condicionamento de sinais:

- Filtragem:**  
tipos de filtros;





# Questionário

## ▪ Questionário:

- 1) O que é melhor: medir corrente em série com um amperímetro ou estimar a corrente pela tensão paralela uma carga? Justifique.
- 2) Como funciona um osciloscópio?
- 3) Como funciona a medição de fase de um sinal?
- 4) Quais são as vantagens e desvantagens das transmissões analógica e digital?
- 5) Qual é a diferença entre campo, densidade de fluxo, e fluxo magnético? A informação espacial importa em medições magnéticas?

# Referências

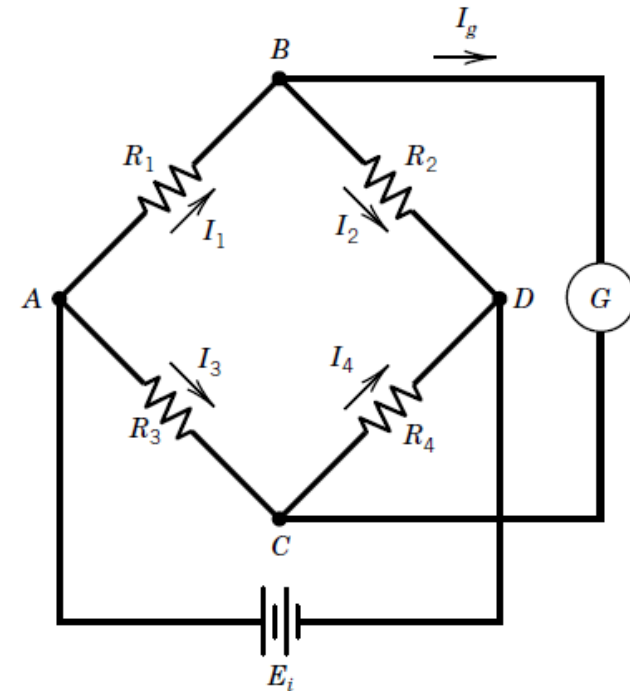
## ■ Referências:

- R.S. Figliola, D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentals of Physics, Willey, 2007.
- A.S. Morris, Measurement & Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
- A.S. Sedra, K.C. Smith, Microelectronic Circuits, CRC Press, 2004.
- J.G. Webster, H. Eren (Ed.) Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2014.

# **Exercícios**

# Exercícios

- **Ex. 4.1)** Uma ponte de Wheatstone alimentada com  $E_i = 10 \text{ V}$  possui uma resistência ajustável  $R_2 = 100 \Omega$  e duas resistências fixas  $R_3 = R_4 = 200 \Omega$ . Um sensor resistivo é instalado em  $R_1$ .
  - a) Para uma tensão de saída  $E_o = 0.56 \text{ V}$ , determine  $R_1$ ;
  - b) Determine o valor de  $R_2$  necessário para “zerar” a saída da ponte;
  - c) Supondo que a resistência do sensor varie de  $R = R_1 + \Delta R$ , determine a sensibilidade da ponte de Wheatstone equilibrada em modo de deflexão.



# Exercícios

## ▪ Ex. 4.1.a) Modo de deflexão

- Tensão de saída da ponte:  $E_o = E_i \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$
- $0.56 = 10 \left( \frac{R_1}{R_1 + 100} - \frac{200}{200 + 200} \right) \rightarrow R_1 = 125 \, \Omega;$
- Note que a ponte está inicialmente desequilibrada.

# Exercícios

## ▪ Ex. 4.1.b) Modo nulo

- Relação de resistências:  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ ;
- $R_2 = R_1 \frac{R_4}{R_3} = 125 \frac{200}{200} = 125 \, \Omega$ ;
- Ajustando  $R_2 = R_1 = 125 \, \Omega \rightarrow E_o = E_i \left( \frac{R_1}{2R_1} - \frac{R_3}{2R_3} \right) = 0 \, \text{V}$ .

# Exercícios

- **Ex. 4.1.c)** Sensibilidade, modo de deflexão

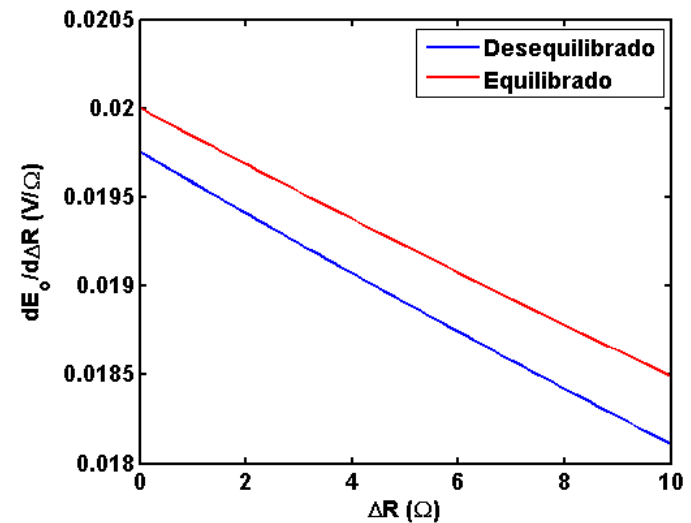
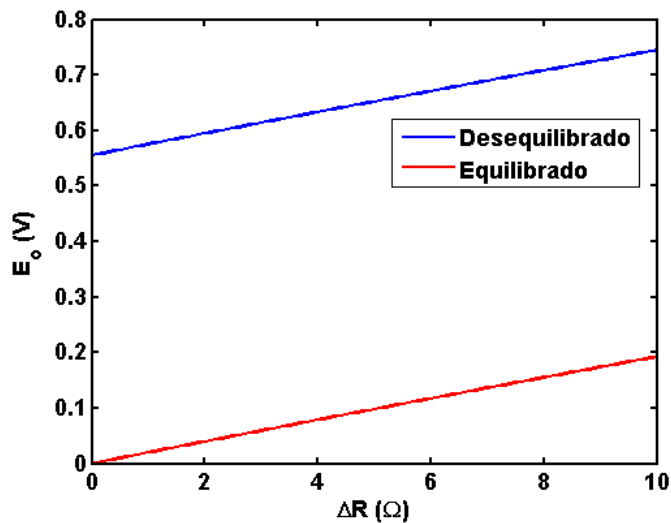
- Para a ponte equilibrada:

$$E_o = E_i \left( \frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + R_2 + \Delta R} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = 10 \left( \frac{125 + \Delta R}{250 + \Delta R} - \frac{1}{2} \right);$$

- Sensibilidade:  $\frac{dE_o}{d\Delta R} = 10 \left[ \frac{1}{250 + \Delta R} - \frac{125 + \Delta R}{(250 + \Delta R)^2} \right]$

# Exercícios

## ■ Ex. 4.1.c) Sensibilidade, modo de deflexão

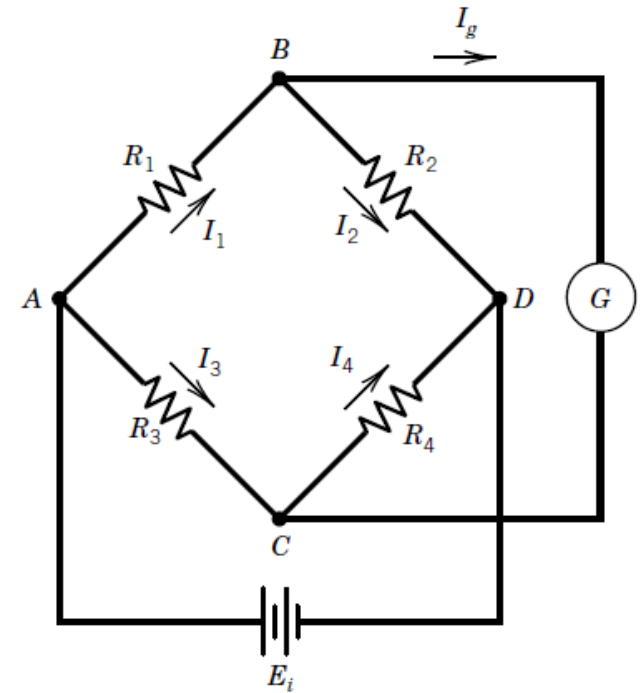


- A ponte de Wheatstone é altamente sensível para variações pequenas de resistência.



# Exercícios

- **Ex. 4.2)** Seja um transdutor de força acoplado na posição  $R_1$  da ponte de Wheatstone. O transdutor possui um resistência inicial de  $500\ \Omega$  (sem força aplicada) e sensibilidade de  $0,5\ \Omega/\text{N}$ .
  - Para a ponte inicialmente equilibrada e operando em modo de deflexão ( $E_i = 10\ \text{V}$ ), calcule a tensão de saída da ponte para excitações de 100, 200 e 350 N.



# Exercícios

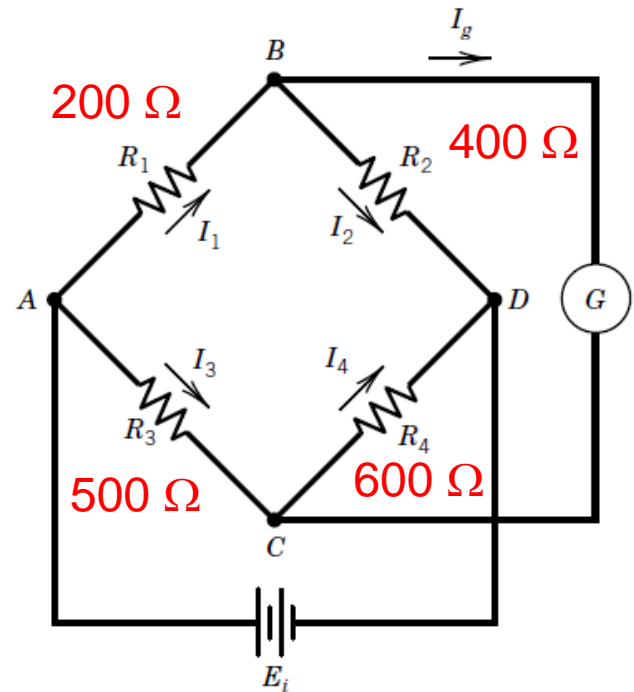
- **Ex. 4.2)** Ponte de Wheatstone, modo de deflexão:
  - Para uma ponte inicialmente equilibrada,  $E_o = 0$ ,  $R_1 = \dots = R_4 = R = 500 \, \Omega$ . A variação da tensão de saída em função da variação da resistência  $R_1$  é dada por

$$\Delta E_o = E_i \frac{\Delta R/R}{4 + 2\Delta R/R}$$

- $F = 100 \, \text{N} \rightarrow R_1 = R_0 + KF = 550 \, \Omega \rightarrow \Delta R = 50 \, \Omega$ ;
  - $\Delta E_o = 10 \frac{0.1}{4.2} = 0.24 \, \text{V}$ .

# Exercícios

- **Ex. 4.3)** Seja a ponte de Wheatstone abaixo.
  - a) Determine a tensão de saída para uma alimentação de 5 V;
  - b) Supondo que a resistência  $R_1$  aumentou em  $50\ \Omega$ , calcule a tensão em modo de deflexão.



# Exercícios

- **Ex. 4.3.a)** Tensão de saída (inicial):

$$E_o = E_i \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

- $E_o = 5 \left( \frac{200}{200+400} - \frac{500}{500+600} \right) = -0.61 \text{ V};$
- Note que a ponte está desequilibrada, pois  $E_o \neq 0$ .

# Exercícios

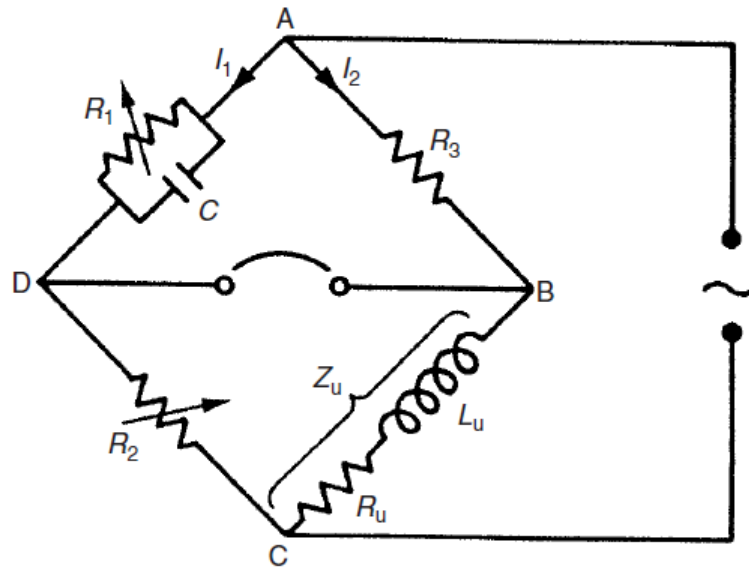
- **Ex. 4.3.b)** Tensão de saída (deflexão):

$$E_o = E_i \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

- $E_o = 5 \left( \frac{250}{250+400} - \frac{500}{500+600} \right) = -0.31 \text{ V};$
- A tensão de saída varia de forma linear com  $\Delta R_1$ ?

# Exercícios

- **Ex. 4.4)** Ponte de Maxwell.
  - a) Determine a função de transferência em modo de deflexão;
  - b) Determine a relação de impedâncias em modo nulo.



# Exercícios

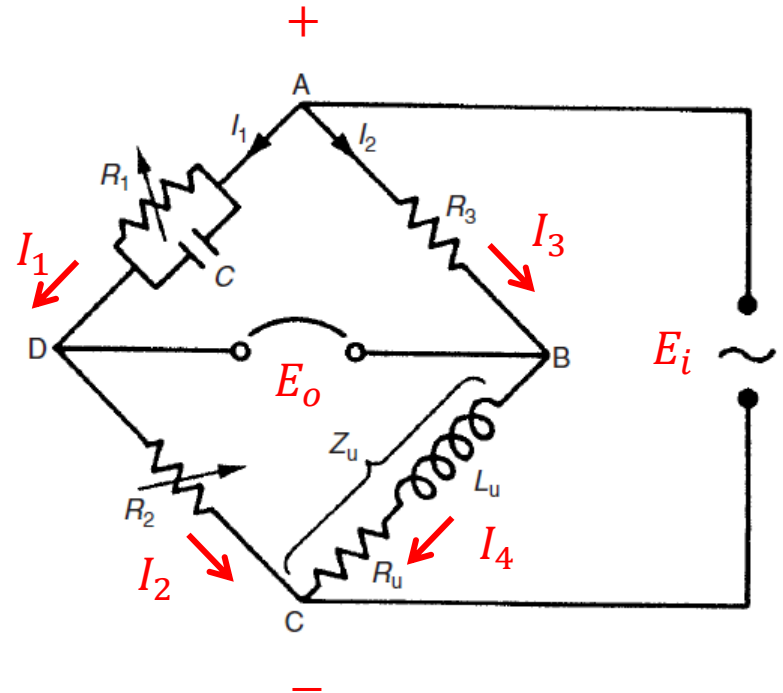
## ■ Ex. 4.4.a) Modo de deflexão:

### • Tensão DB:

- $E_o = -Z_1 I_1 + Z_3 I_3;$
- $E_o = Z_2 I_2 - Z_4 I_4;$

### • Tensão AC:

- $E_i = Z_1 I_1 + Z_2 I_2;$
- $E_i = Z_3 I_3 + Z_4 I_4;$



# Exercícios

- **Ex. 4.4.a)** Modo de deflexão:

- Seja  $I_1 = I_2$  e  $I_3 = I_4$ :

- $I_1 = \frac{E_i}{Z_1 + Z_2};$

- $I_3 = \frac{E_i}{Z_3 + Z_4};$

- Portanto,

- $E_o = -Z_1 I_1 + Z_3 I_3 = E_i \left( \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)$



# Exercícios

- **Ex. 4.4.a)** Modo de deflexão:

- $Z_1 = \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)^{-1}, Z_2 = R_2, Z_3 = R_3, Z_4 = R_4 + j\omega L_4;$

- $E_o = E_i \left( \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)$

# Exercícios

- **Ex. 4.4.b)** Modo nulo:
  - A tensão na saída da ponte é nula:
    - $E_o = 0;$
    - $\frac{I_1}{I_3} = \frac{Z_3}{Z_1} = \frac{Z_4}{Z_2};$
  - $Z_4 = R_4 + j\omega L_4 = R_2 R_3 \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)$

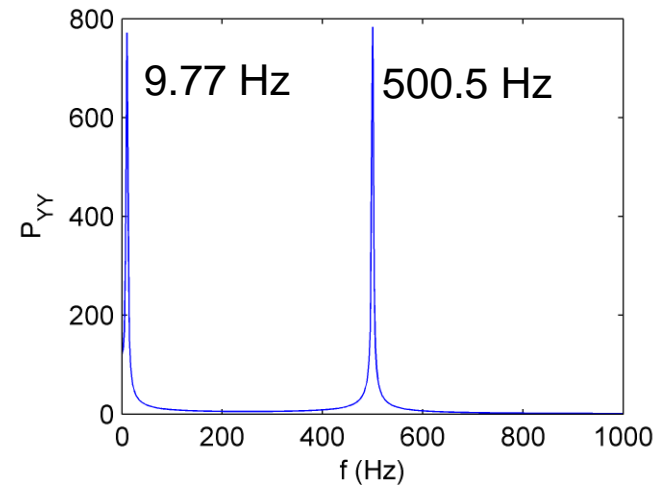
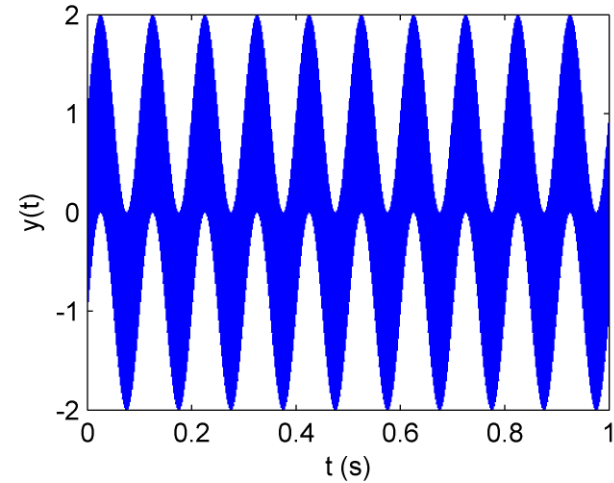
# Exercícios

- **Ex. 4.5)** Um sinal periódico composto é formado por componentes espectrais em 10 e 500 Hz. Projete um filtro passa-baixas para eliminar as componentes de alta frequência. Considere que o sinal é adquirido a uma taxa de amostragem de 10 kHz.

# Exercícios

- **Ex. 4.5)**
  - Análise no tempo e em frequência.

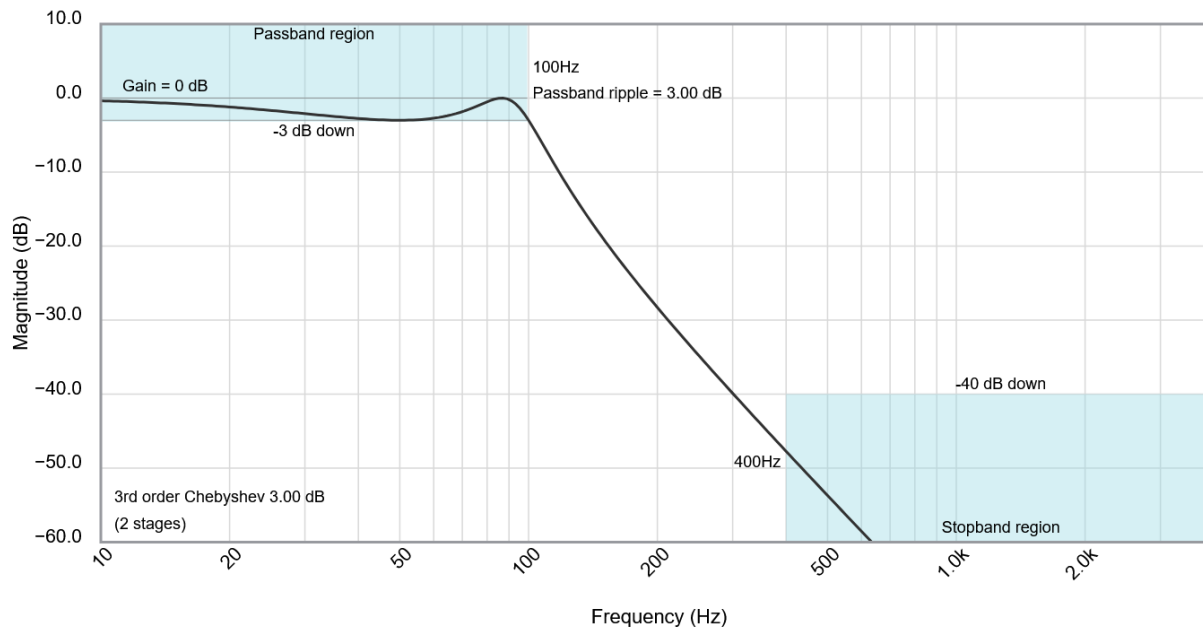
```
dt = 1e-4;  
y = sin(2*pi*10*t)+sin(2*pi*500*t);  
  
w = hann(N);  
  
df = 1/(M*dt)  
f = [0:df:(M-1)*df]';  
  
Y = fft(w.*y,M);
```



# Exercícios

## ■ Ex. 4.5)

- Projeto de filtro analógico: [www.tools.analog.com](http://www.tools.analog.com)
  - Banda de passagem: -3 dB@100 Hz;
  - Banda de rejeição: -40 dB@400 Hz.

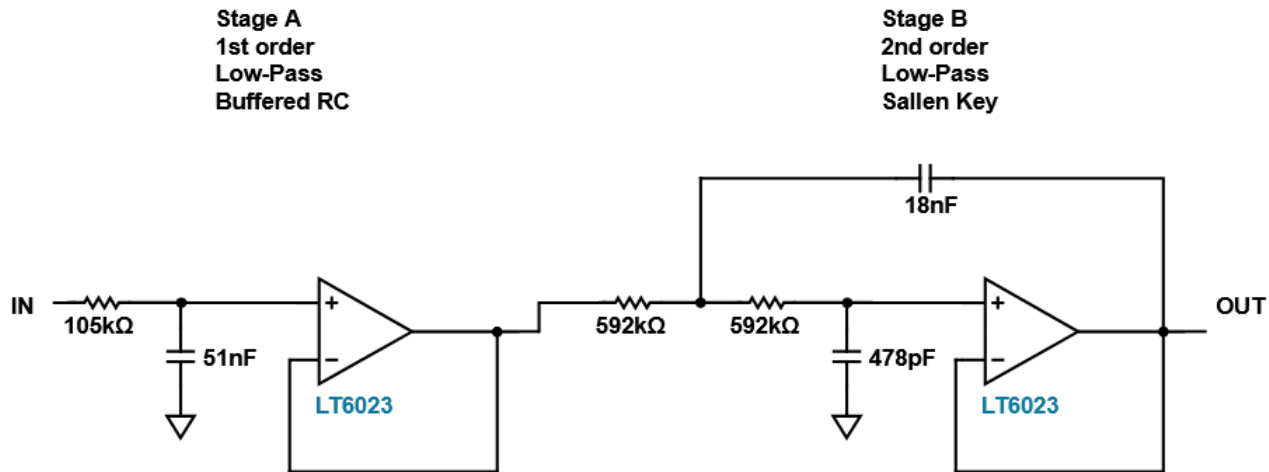


# Exercícios

## ▪ Ex. 4.5)

- Projeto de filtro analógico:
  - Função de transferência (segundo estágio):

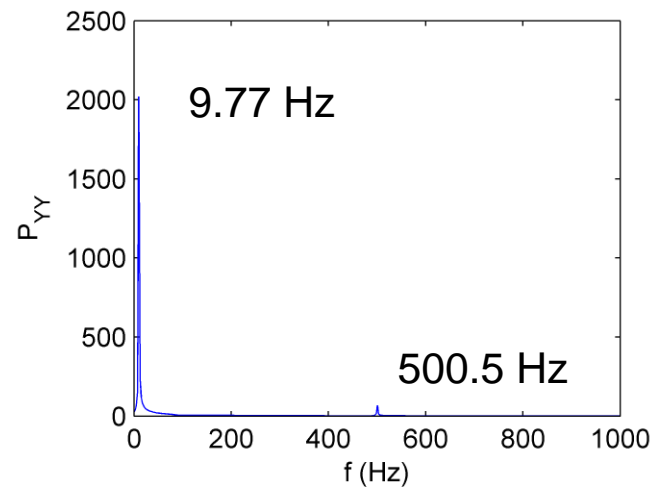
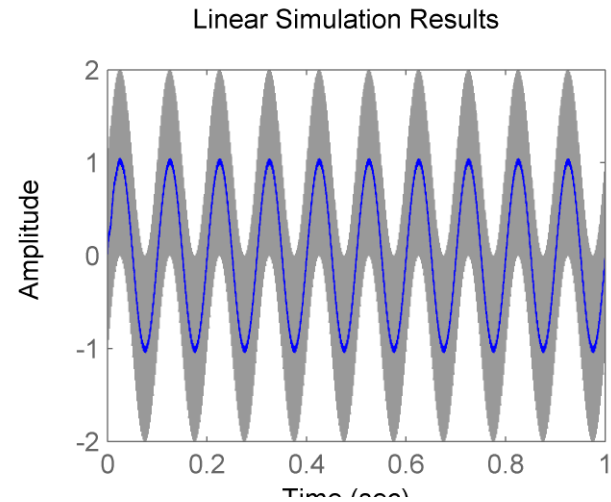
$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2a_0\omega_0 + \omega_0^2} = \frac{3.32 \times 10^5}{s^2 + 187.7s + 3.32 \times 10^5}$$



# Exercícios

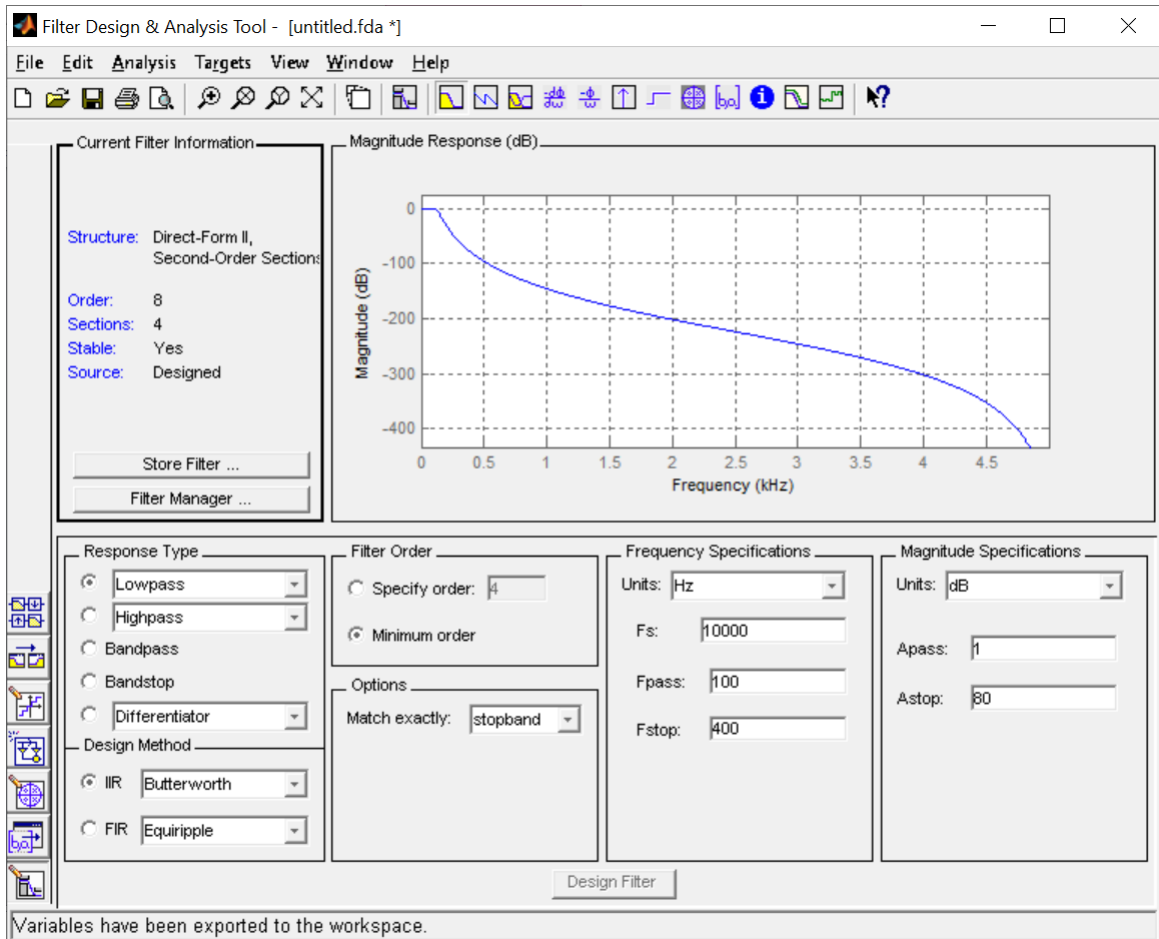
- **Ex. 4.5)**
  - Projeto de filtro analógico: implementação.

```
Hs = w0^2 / (s^2 + 2*a0*s + w0^2);  
h = lsim(Hs, y, t);  
H = fft(h, M);
```



# Exercícios

- **Ex. 4.5)**
  - Projeto de filtro digital: fdatool (MATLAB)





# Exercícios

- **Ex. 4.5)**
  - Projeto de filtro digital:  
implementação.

```
h = filter(Hd,y);  
H = fft(h,M);
```

