

ES704 – Instrumentação Básica

09 – Medições mecânicas

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

Índice

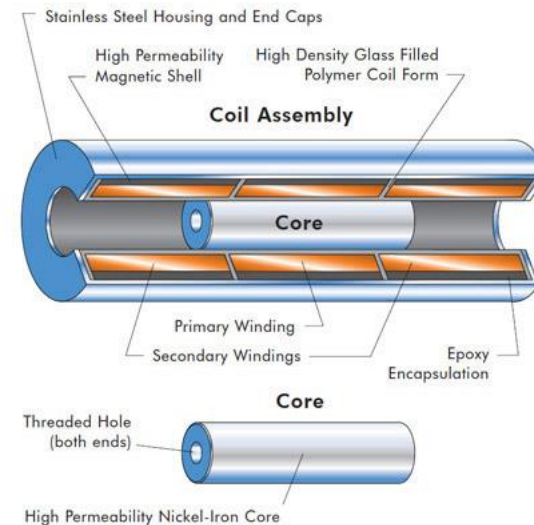
▪ Índice:

- 1) Medição de posição;
- 2) Medição de velocidade;
- 3) Medição de aceleração;
- 4) Medição de força, torque e potência;
- Questionário;
- Referências;
- Exercícios.

1. Medição de posição

■ 1.1. LVDT:

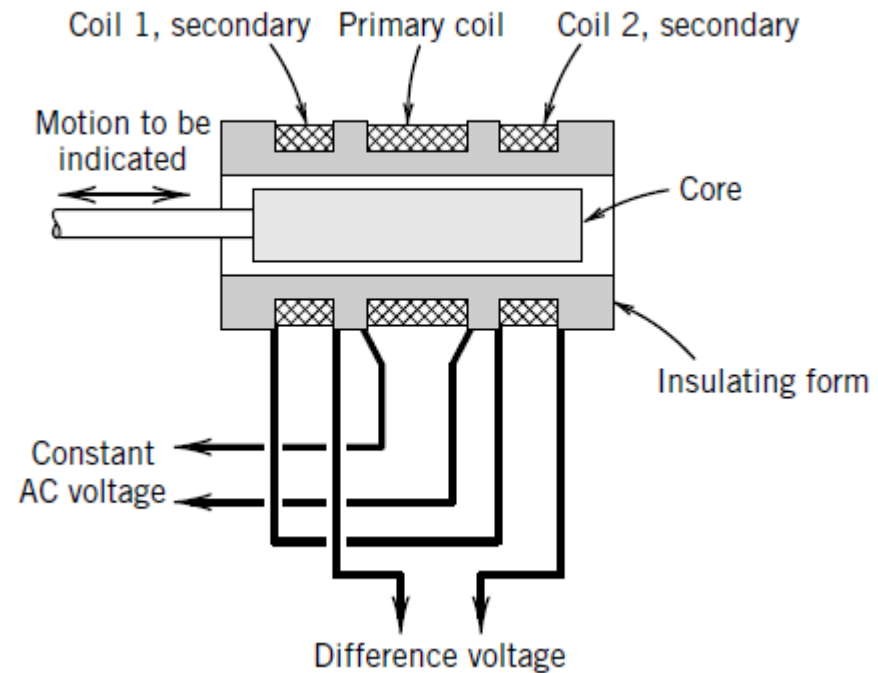
- Transformador diferencial linear variável (Linear variable differential transformer – LVDT);
- Produz uma tensão de saída AC com amplitude proporcional ao deslocamento do núcleo do transformador.



1. Medição de posição

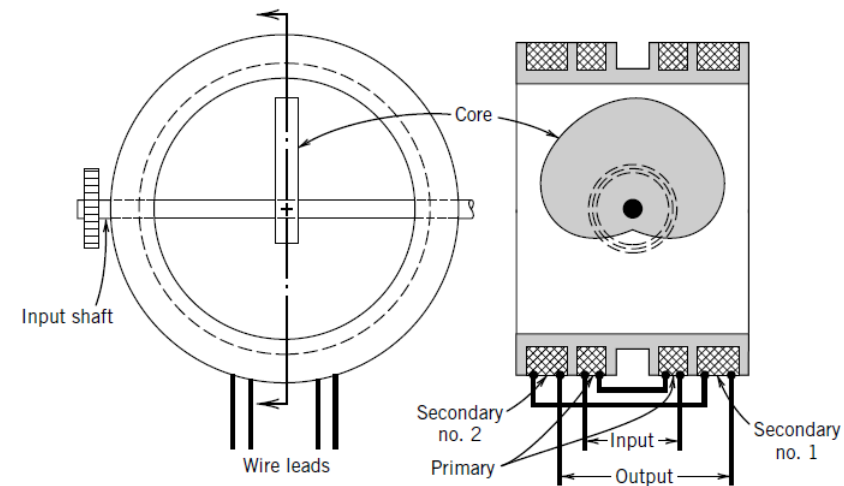
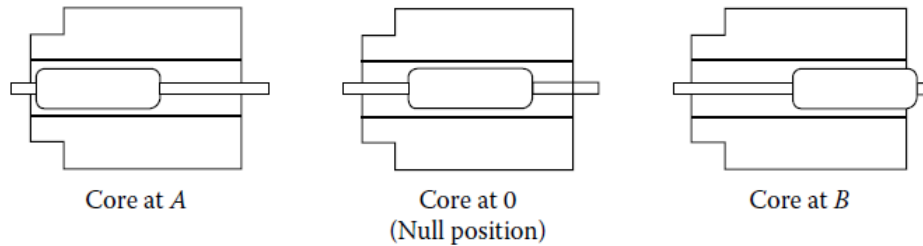
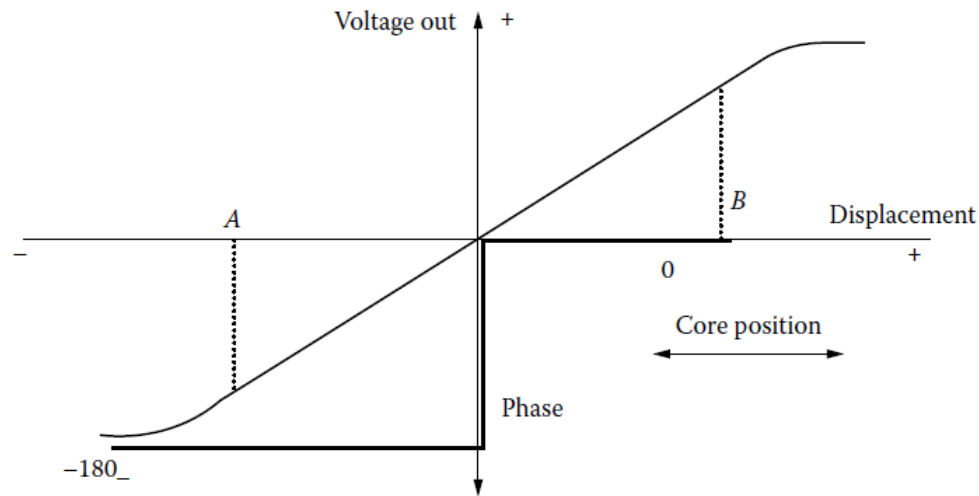
▪ 1.1. LVDT:

- Alimentação AC no primário, secundários conectados em série;
- O deslocamento do núcleo modula a indutância mútua dos enrolamentos, induzindo uma emf nos enrolamentos do secundário
→ magnitude e direção do deslocamento.



1. Medição de posição

1.1. LVDT:

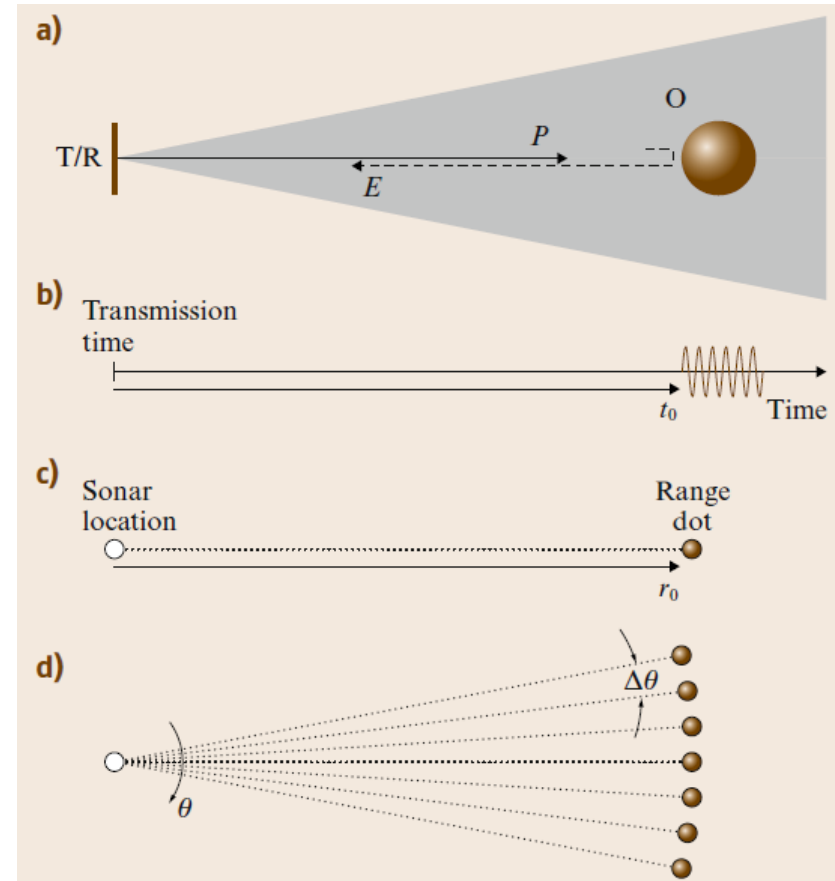


RVDT: deslocamento angular.

1. Medição de posição

▪ 1.2. SONAR:

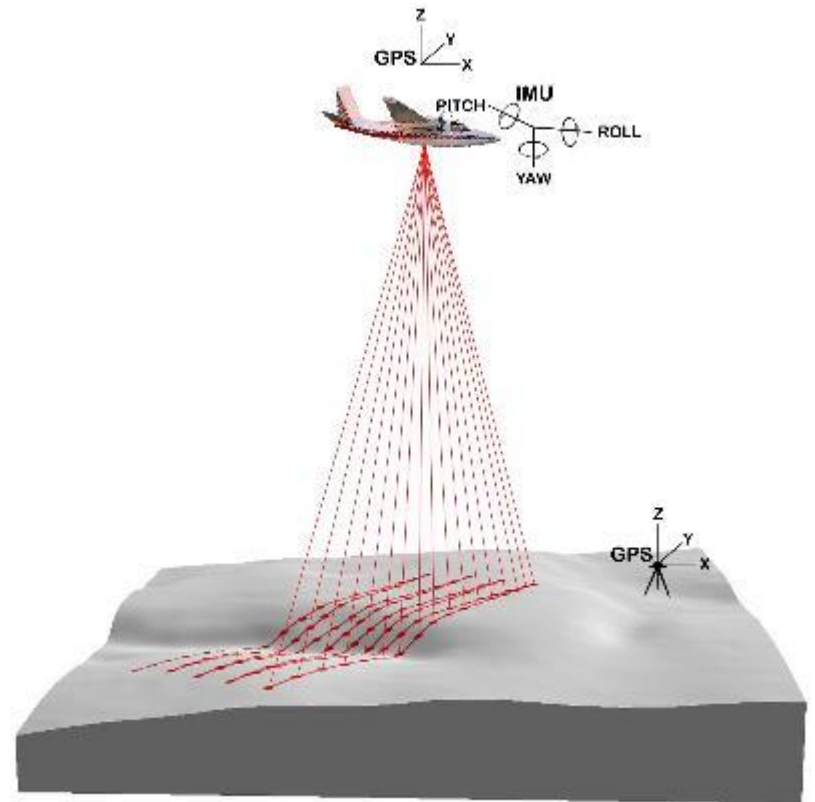
- **Sound Navigation and Ranging;**
- Utiliza pulsos acústicos para determina a distância em relação a um objeto. Se a velocidade do som é conhecida, a distância é proporcional ao tempo de emissão+reflexão das ondas;
- Baixo custo, baixo consumo de energia, rápido tempo de processamento.



1. Medição de posição

▪ 1.3. LIDAR:

- **Light Detection and Ranging;**
- Utiliza a radiação coerente para estimar a distância em relação a um objeto. A análise do feixe refletido permite inferir acerca da distância e da superfície do objeto.
- Medição da distância pelo tempo de voo de um pulso luminoso.



1. Medição de posição

▪ 1.4. GPS:

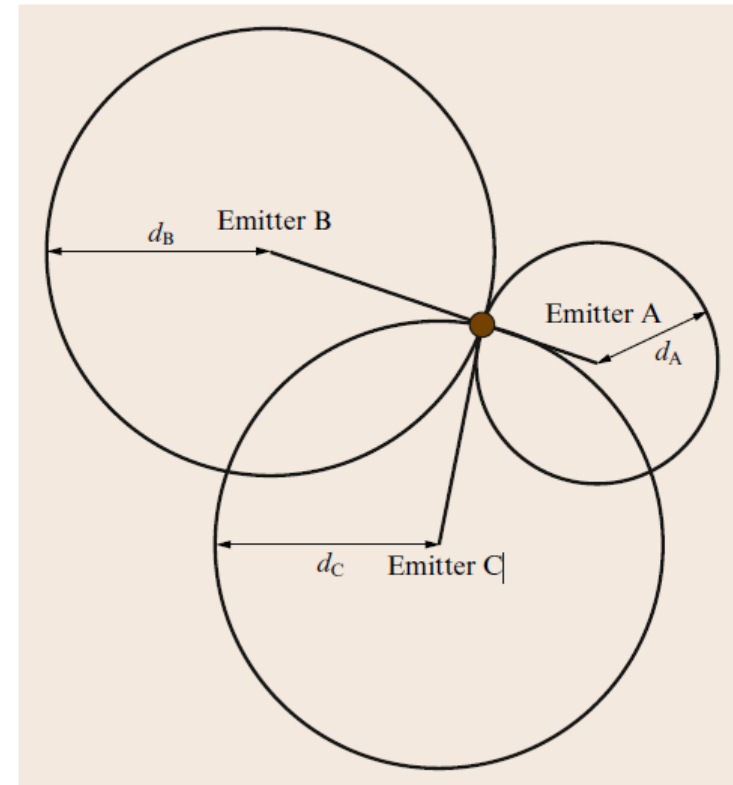
- **Sistema de posicionamento global (GPS);**
- Estimativa da posição 3D em coordenadas absolutas em relação à posição na superfície da Terra;
- Baseado na detecção de sinais de rádio transmitidos por satélites em órbita. As diferenças nos tempos de propagação dos sinais provenientes dos diferentes satélites são comparados, permitindo calcular a posição absoluta do receptor.
- Alguns sistemas de satélite utilizados pelo GPS: **NAVSTAR (US)**, GLONASS (Russia), Galileo (EU), QZSS (Japão), Beidou (China).

1. Medição de posição

▪ 1.4. GPS:

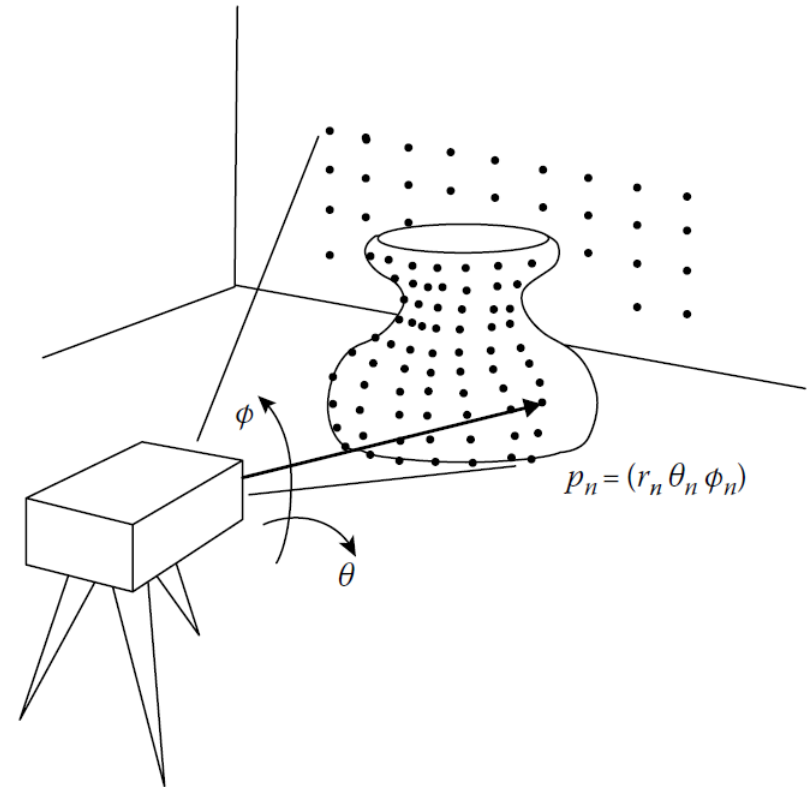
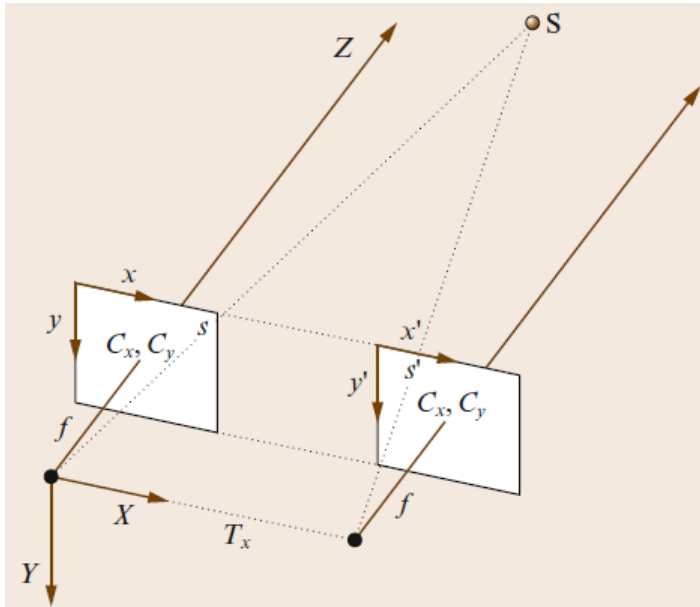
• NAVSTAR:

- Baseado 24 satélites com órbita praticamente circular. As órbitas são ajustadas de forma que pelo menos quatro dos satélites estejam visíveis em qualquer posição da Terra (99,9% de cobertura);
- Cada satélite envia um pacote de dados que é recebido pelo GPS. É possível determinar a posição absoluta do receptor por trilateração, medindo o tempo de trânsito dos sinais.



1. Medição de posição

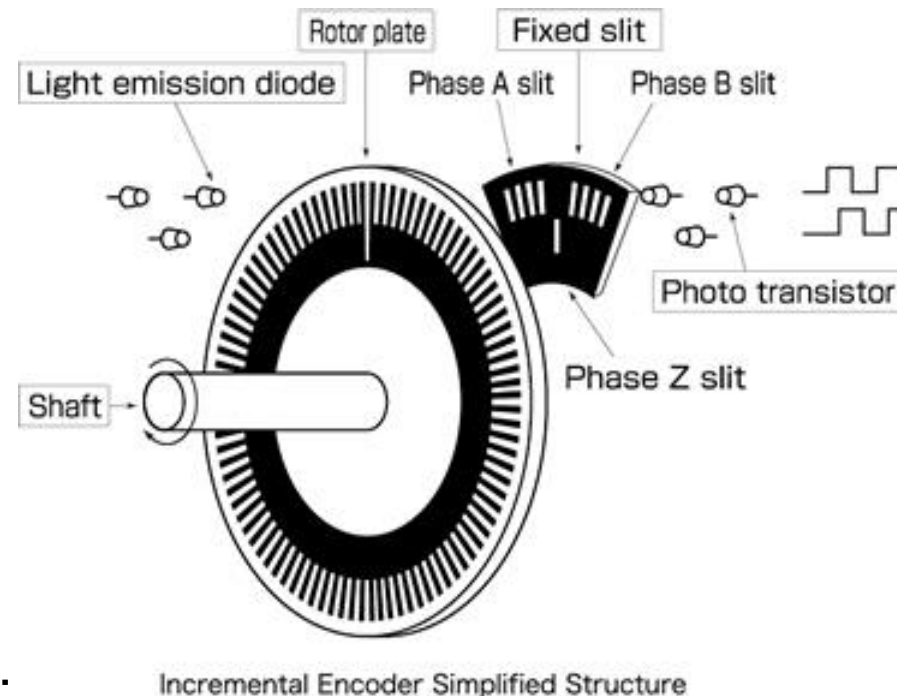
- 1.5. Visão computacional (3D):
 - Câmera estereoscópica;
 - Nuvem de pontos.



1. Medição de posição

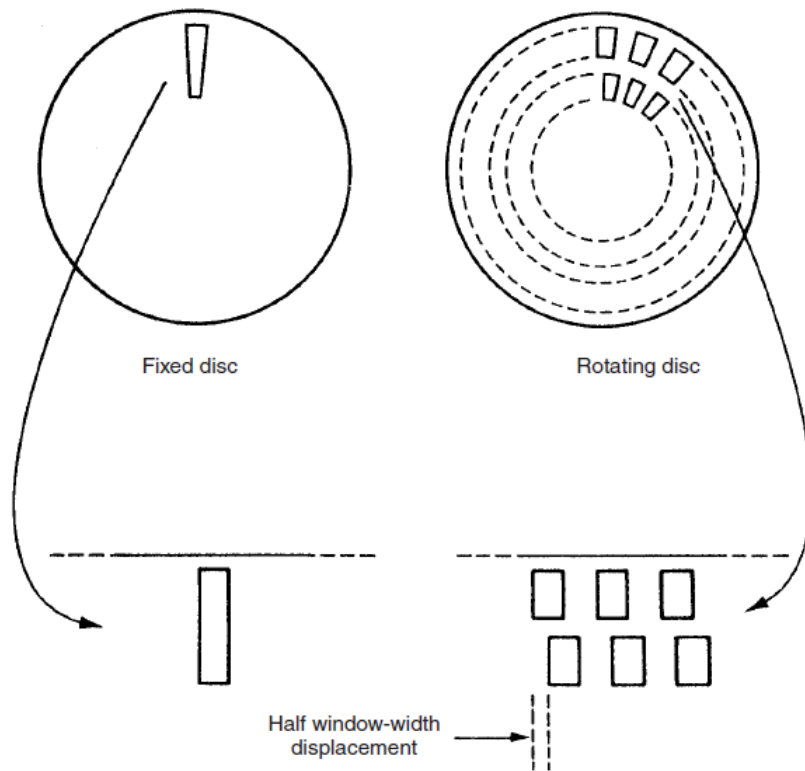
▪ 1.6. Encoder:

- Formado por um par de discos furados, um fixo e o outro conectado ao eixo girante;
- Pulsos luminosos são transmitidos no casamento de furos. Sabendo o número de pulsos e o espaçamento, é possível calcular o deslocamento angular do eixo;
- A posição inicial é determinada por um furo de referência.

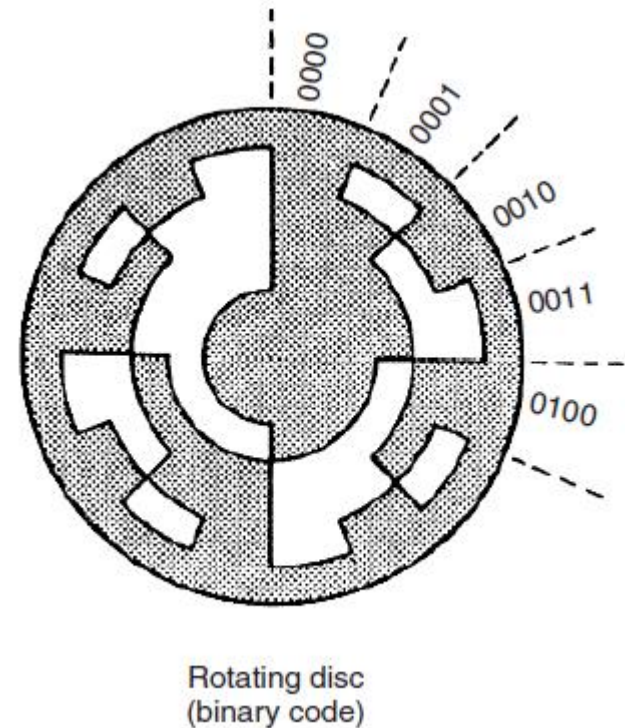


1. Medição de posição

▪ 1.6. Encoder:



Encoder incremental

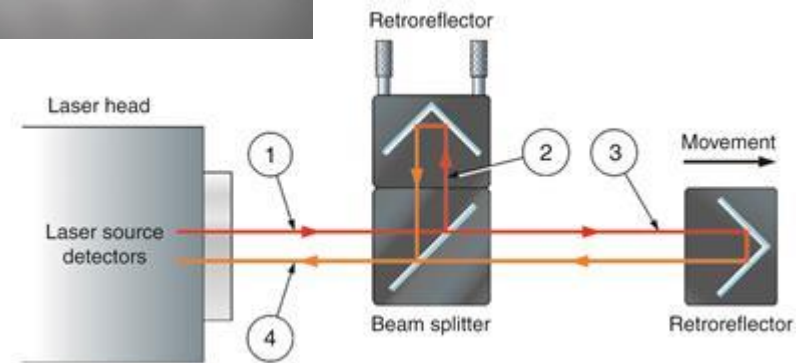


Encoder absoluto

1. Medição de posição

▪ 1.7. Outros métodos:

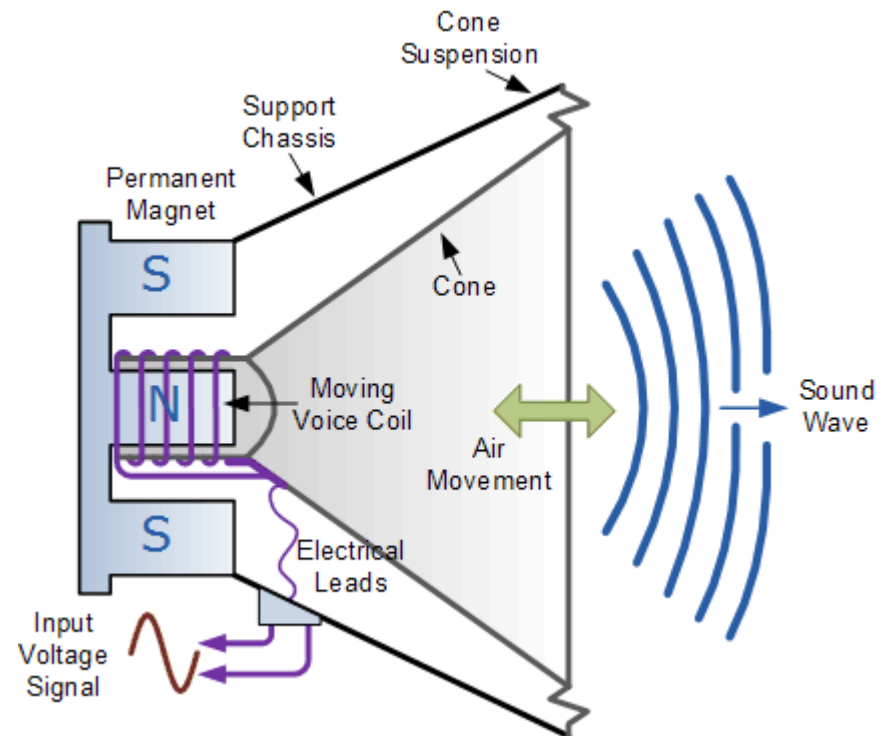
- Potenciômetro (resistivo);
- Sensor capacitivo;
- Sensor de efeito Hall;
- Sensor indutivo;
- Sensor ultrassônico;
- Interferômetro (óptico);
- Sensor de fibra óptica.



2. Medição de velocidade

▪ 2.1. Transdutor de bobina móvel (voice coil):

- Uma emf é induzida em um condutor quando este é movido através de um campo magnético;
- Geralmente utilizado para medir velocidades em vibrações de amplitudes pequenas;
- **Aplicações:** microfones, alto-falantes, motor de Lorentz.



2. Medição de velocidade

▪ 2.2. Tacômetro:

- Utilizado para medir velocidade angular;
- Baseado na emissão/detecção de sinais modulados pelo eixo girante. A velocidade é obtida pela frequência dos sinais detectados.
- **Tipos de tacômetro:**
 - Óptico (laser);
 - Estroboscópico;
 - Eletromagnético (pickup);
 - Efeito Hall.



2. Medição de velocidade

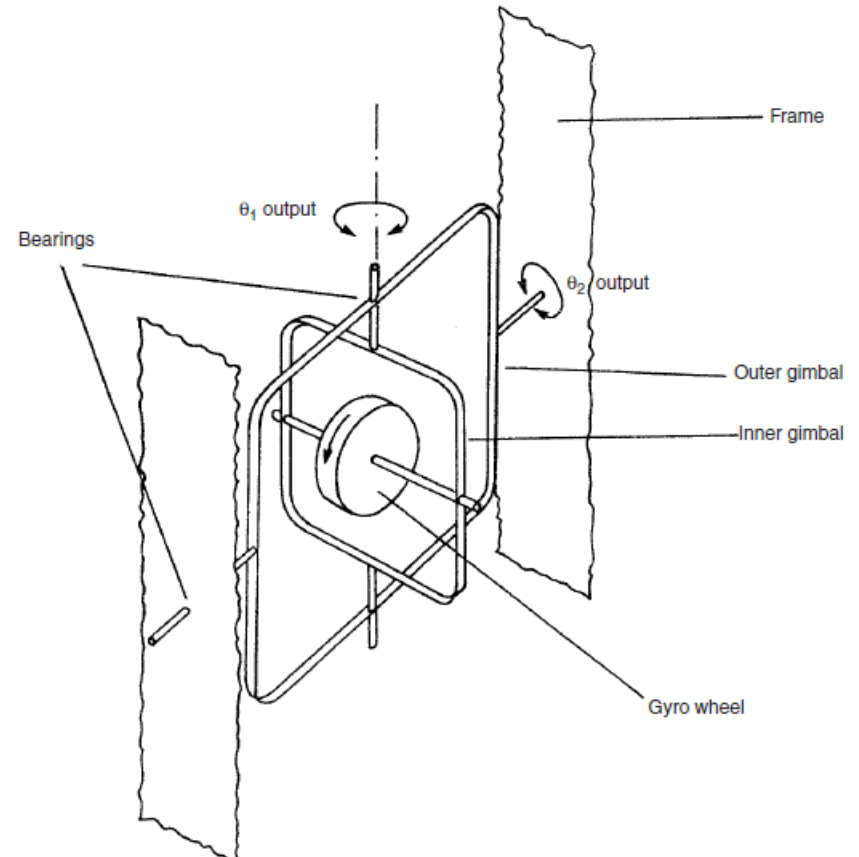
▪ 2.3. Giroscópio:

- Dispositivo que mede a velocidade angular absoluta.
- O giroscópio mecânico é baseado em uma roda suspensa em dois suportes circulares móveis (gimbal);
- o eixo de rotação do disco é fixo e independe da rotação dos suportes externos, permitindo que a sua orientação original seja memorizada;
- Se o disco for perturbado por um torque ortogonal ao eixo de rotação, a velocidade do disco não é alterada, mas a direção do eixo de rotação tende a se alinhar com o torque externo.

2. Medição de velocidade

■ 2.3. Giroscópio:

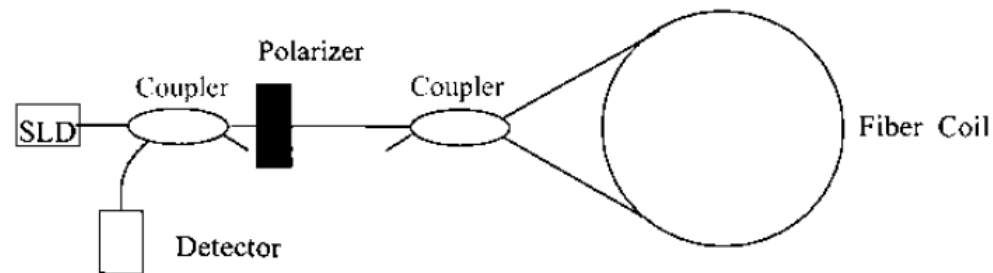
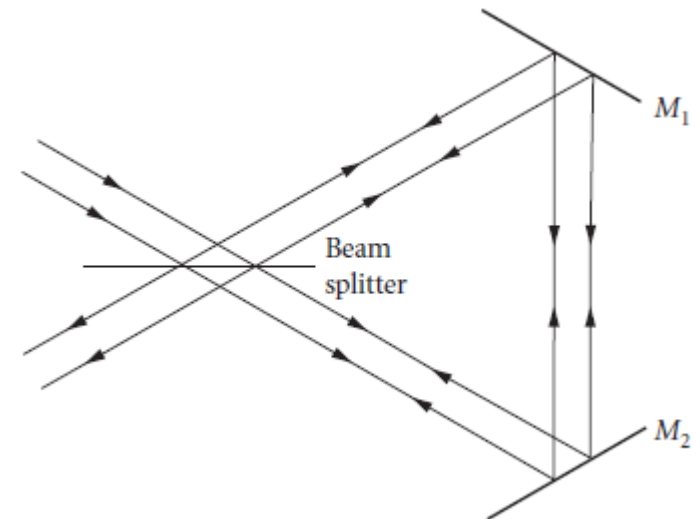
- Baseado na **conservação de momento angular**;
 - Variação no torque altera a velocidade de rotação;
- Se o **torque** é aplicado na **direção ortogonal ao eixo de rotação**, a magnitude da rotação não é alterada, somente a sua direção;
 - O **eixo de rotação** tende a se **alinhar com a direção do torque** aplicado.



2. Medição de velocidade

▪ 2.3. Giroscópio:

- **Giroscópio óptico:** FSO e OFS;
 - A velocidade da luz é absoluta;
 - **Interferômetro de Sagnac:** os feixes coerentes atravessam o mesmo caminho óptico em direções opostas. A rotação do sistema em torno do seu eixo causa diferença no tempo de transmissão dos feixes contra-propagantes.

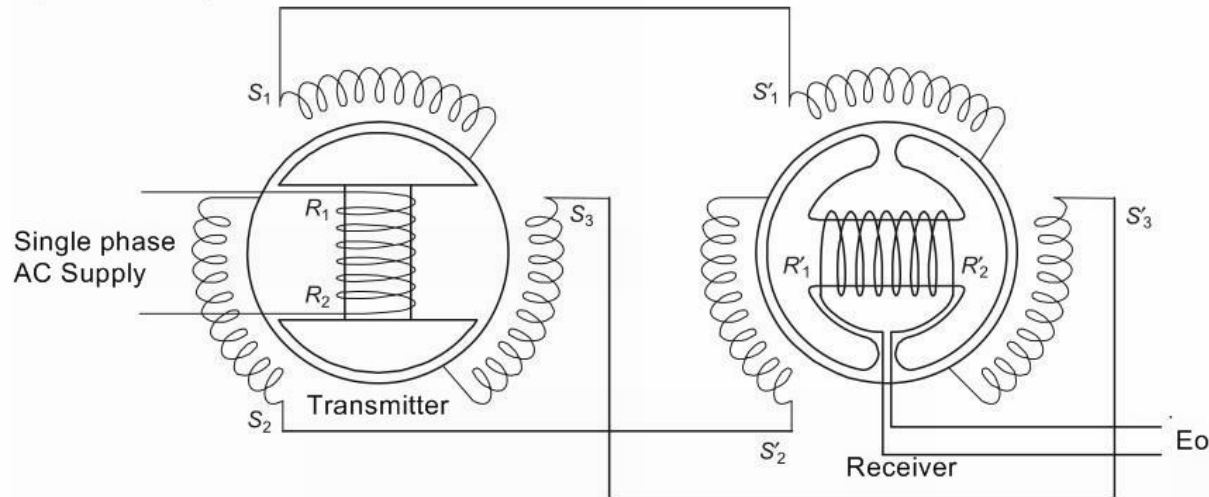


2. Medição de velocidade

▪ 2.4. Outros métodos:

- Tacogerador (motor DC invertido);
- Resolver (motor síncrono invertido);
- Synchro (TX/RX formados por enrolamentos trifásicos).

myclassbook.wordpress.com



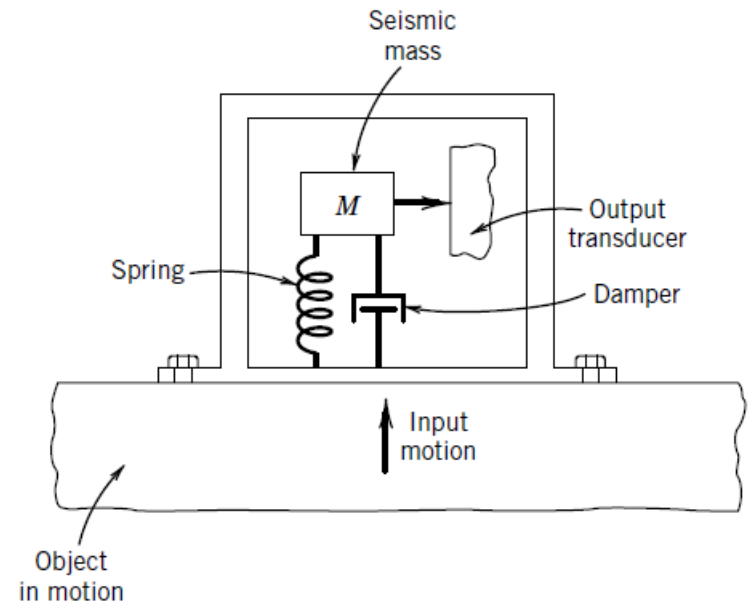
3. Medição de aceleração

▪ 3.1. Medição de aceleração:

- **Medição de vibração:** a excitação de entrada é periódica;
- **Medição de impacto (shock):** a excitação de entrada apresenta curta duração e alta amplitude;

- **Transdutor sísmico:**

- Sistema m-k-c, a saída indica a aceleração do sinal de entrada;
- O transdutor sísmico é acoplado rigidamente à superfície do objeto a ser medido.



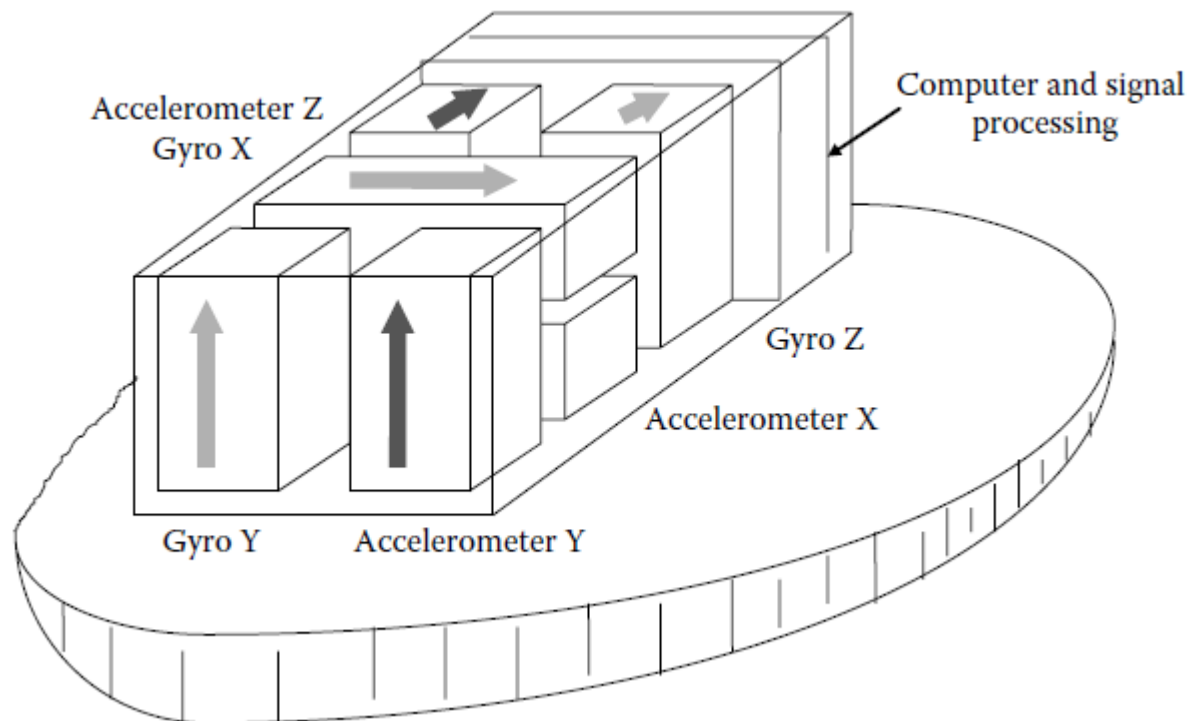
3. Medição de aceleração

▪ 3.1. Medição de aceleração:

- **Unidade de medição inercial (IMU):** Utiliza 3 acelerômetros em direções perpendiculares para medir a aceleração em 3 eixos. Os sinais de aceleração são integrados, resultando na medição do deslocamento em cada eixo;
- Tipos de acelerômetros:
 - **Piezorresistivo:** o deslocamento é medido com strain gauges;
 - **Capacitivo:** baseado na distância relativa entre os eletrodos;
 - **Piezelétrico:** a vibração mecânica produz uma tensão elétrica proporcional;
 - **MEMS:** baseados em micro-capacitores que deformam com a aceleração.

3. Medição de aceleração

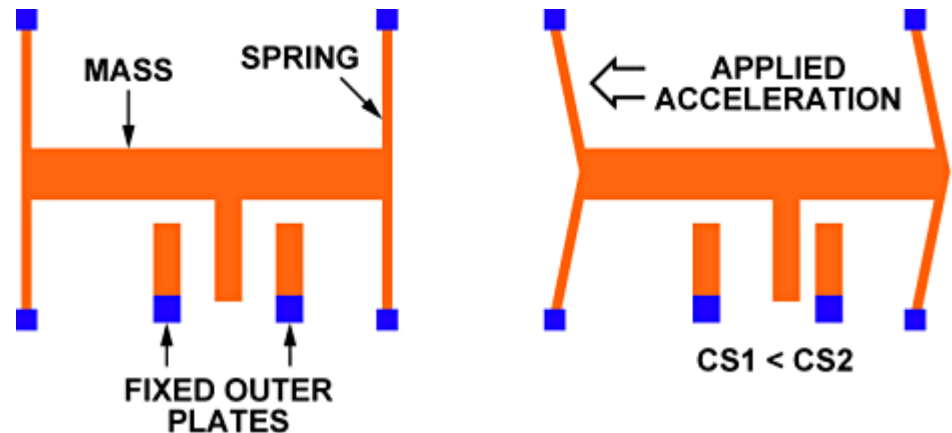
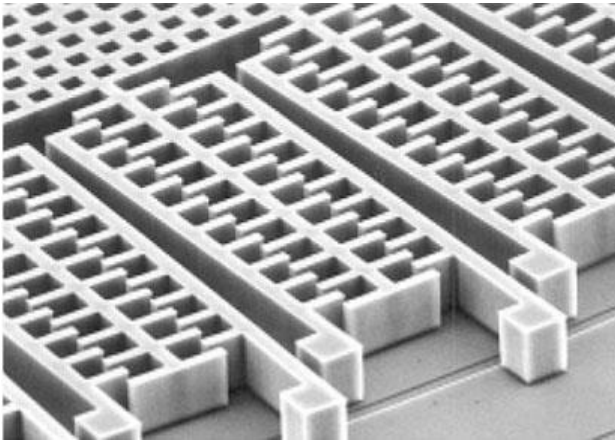
- 3.1. Medição de aceleração:
 - **Unidade de medição inercial (IMU):** 3 acelerações + 3 rotações.



3. Medição de aceleração

▪ 3.2. Acelerômetro MEMS:

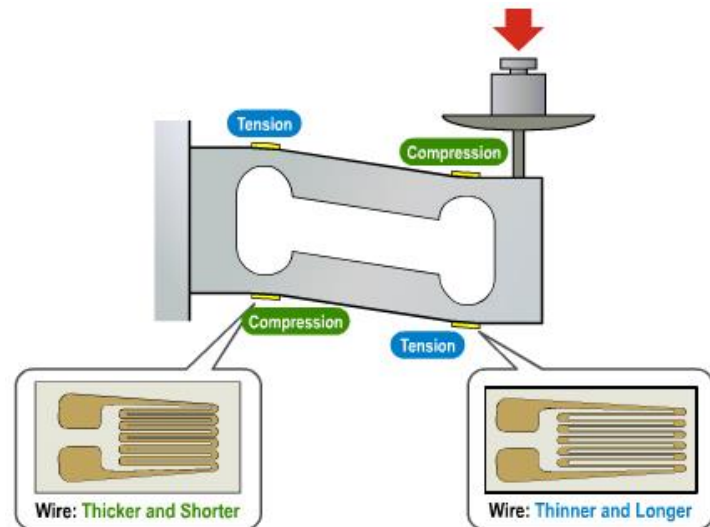
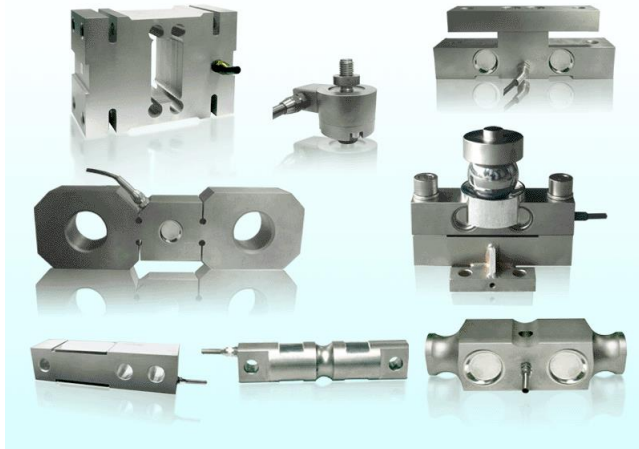
- **MEMS:** sistemas micro-eleto-mecânicos;
- O deslocamento relativo entre placas condutoras fixas (substrato) e móveis (massa sísmica) causa variação na capacitância elétrica.



4. Medição de força, torque e potência

■ 4.1. Célula de carga:

- Gera uma tensão elétrica em resposta à aplicação de força ao longo de uma direção (devido à deformação).
 - Consistem de elemento elástico e um sensor de deflexão (resistivo, capacitivo indutivo ou piezelétrico).



4. Medição de força, torque e potência

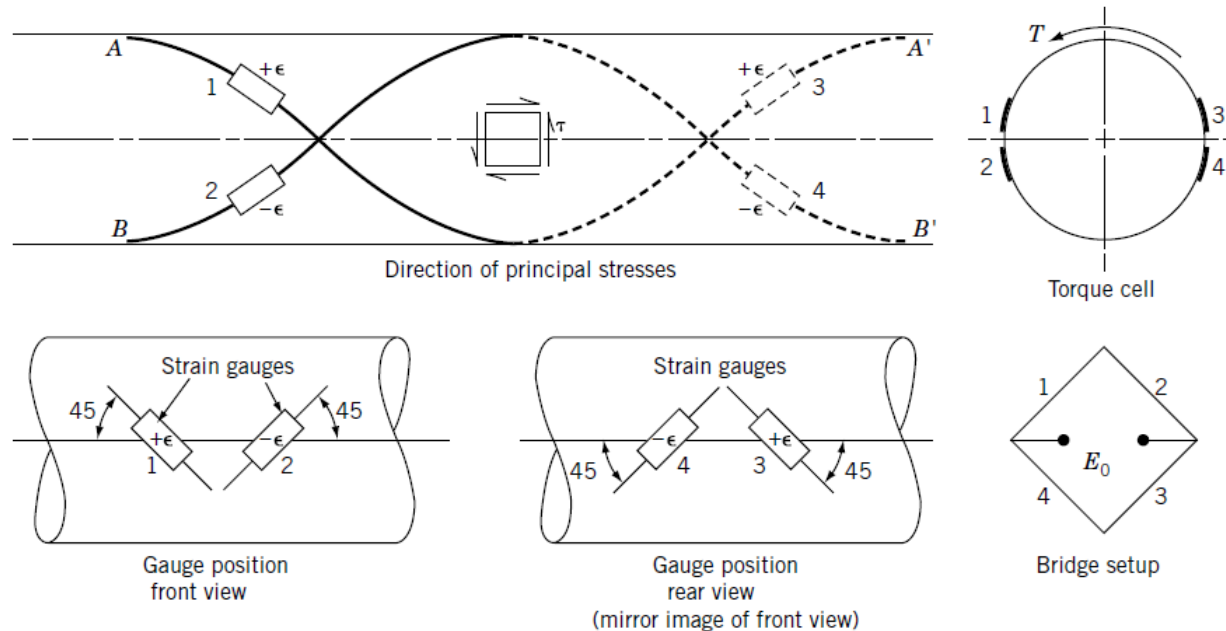
- 4.1. Célula de carga:
 - Geometrias de célula de carga:
 - Viga (flexão ou cisalhamento);
 - Anel;
 - Coluna.



4. Medição de força, torque e potência

■ 4.1. Célula de carga:

- **Célula de torque:** deformação torcional em elemento circular elástico com strain gauges.



4. Medição de força, torque e potência

▪ 4.2. Force-sensing resistor (FSR):

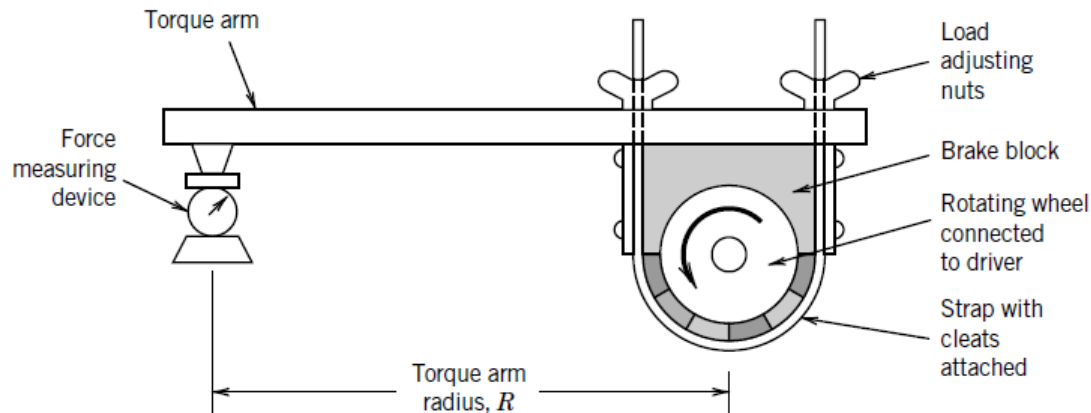
- Elementos flexíveis que apresentam redução na resistência elétrica em virtude da aplicação de uma força;
- Elementos condutores são impressos na forma de estruturas interdigitadas sobre um substrato flexível. A deflexão da estrutura resulta no aumento da condutividade elétrica.



4. Medição de força, torque e potência

■ 4.3. Dinamômetro:

- Mede a velocidade de rotação do eixo e o torque de reação necessário para evitar o movimento das partes estacionárias. O torque é posteriormente transmitido para um transdutor que mede a força de reação proporcional;
- **Freio de Prony:** A **potência** pode ser medida através do **torque** produzido e da **velocidade** de rotação da máquina.



4. Medição de força, torque e potência

■ 4.3. Dinamômetro:

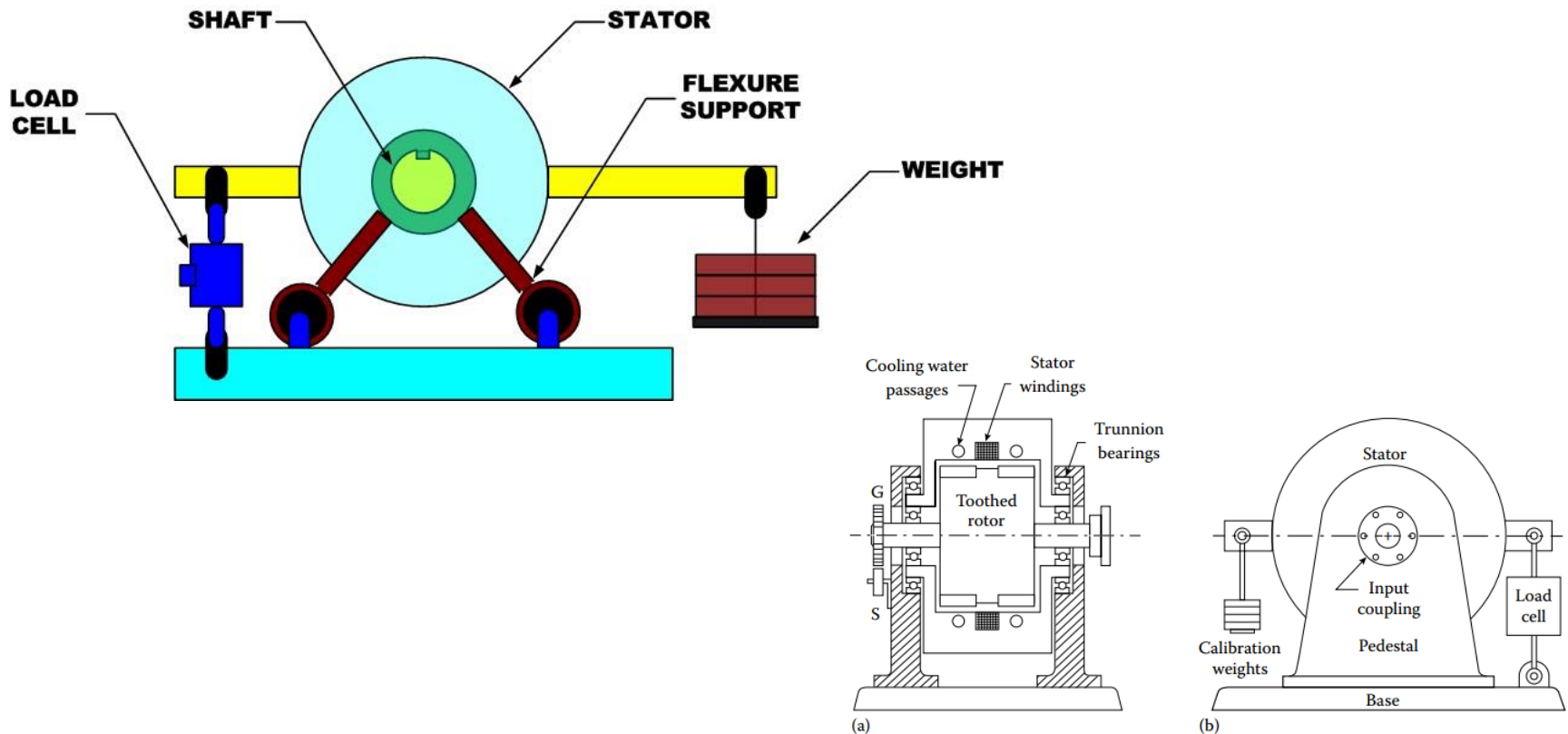


FIGURE 44.8 (a) Cross section and (b) front view of an eddy current dynamometer. G is a gear wheel and S is a speed sensor. Hoses carrying cooling water and cable carrying electric power to the stator are not shown.

Questionário

▪ Questionário:

- 1) Como o encoder é utilizado para medir a magnitude e sentido da velocidade angular?
- 2) Quais são os métodos para medição de distância utilizados em veículos autônomos?
- 3) Qual é o problema de estimar posição linear e angular através da integração da resposta de sensores inerciais (acelerômetro e giroscópio)?
- 4) O que é sensoramento tátil? Quais são as variáveis envolvidas neste tipo de aplicação?

Referências

■ Referências:

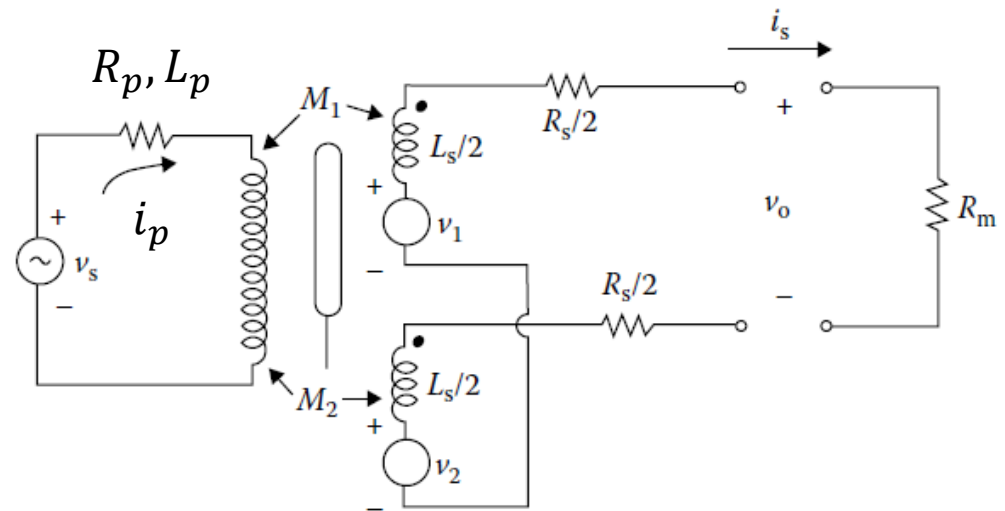
- M. Bass (Ed.), Handbook of Optics, McGraw-Hill, 2010.
- R.S. Figliola, D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- A.S. Morris, Measurement & Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
- B. Siciliano, O. Kathib (Ed.), Springer Handbook of Robotics, Springer, 2008.
- J.G. Webster, H. Eren (Ed.) Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2014.

Exercícios

Exercícios

▪ **Ex. 9.1)** Obtenha o modelo de um LVDT:

- Tensão/corrente no primário: V_s, I_p ;
- Tensão/corrente no secundário: V_1, V_2, I_s ;
- Resistência/indutância dos enrolamentos: R, L ;
- Indutância mútua: M ;
- Tensão de saída: V_o .



Exercícios

▪ Ex. 9.1)

- Circuito do primário:
 - $V_s = (R_p + sL_p)I_p;$
- Tensões no secundário:
 - $V_1 = sM_1I_p;$
 - $V_2 = sM_2I_p;$
- Tensão de saída:
 - $V_o = V_1 + V_2 = s(M_1 + M_2)I_p ;$

Exercícios

▪ Ex. 9.1)

- Função de transferência:

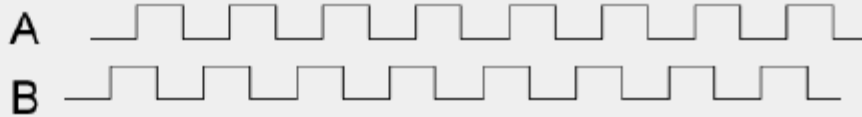
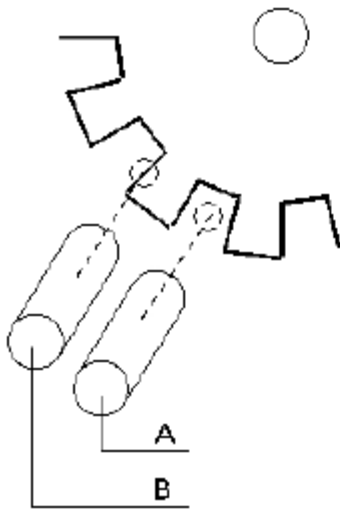
- $V_o = \frac{s(M_1+M_2)}{R_p+sL_p} V_s$.

- Análise:

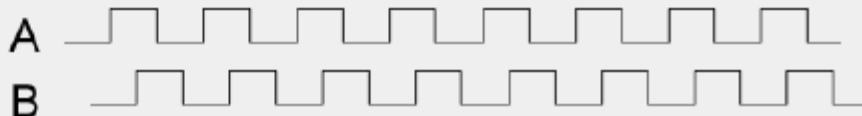
- O LVDT é excitado com tensão AC V_s ;
 - O deslocamento do núcleo modula a relação das indutâncias mútuas M_1 e M_2 (vide modelo do transformador);
 - O zero e o polo da TF causam uma defasagem na tensão de saída V_o em relação à entrada V_s .

Exercícios

- **Ex. 9.2)** Avalie as formas de onda de saída de um encoder incremental de quadratura.



B leads A

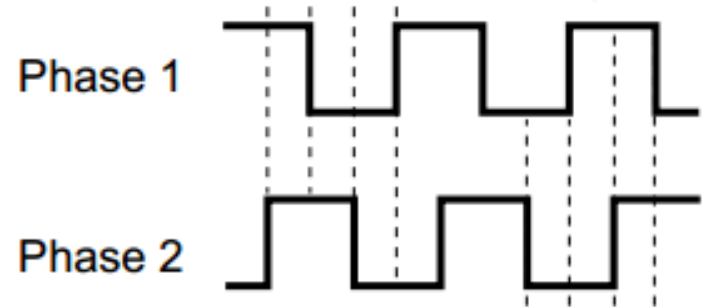


A leads B

Exercícios

Ex. 9.2)

- Os sinais detectados pelo fotodiodo produzem uma saída binária que indica o deslocamento relativo do eixo (número de pulsos) e o sentido de rotação (sequência de bits).



Phase 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0
Phase 2 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1

CW: 10, 11, 01, 00, ...

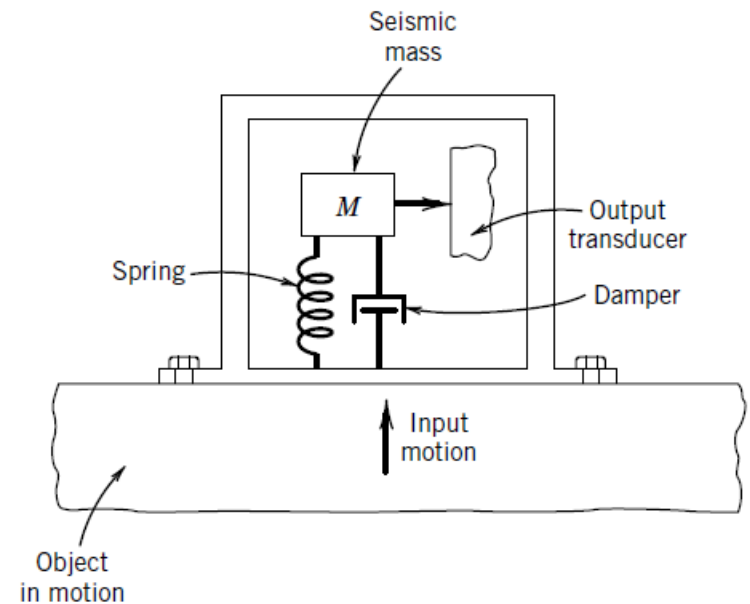
$\phi 1$	1	1	0	0	1	1	0	0
$\phi 2$	0	1	1	0	0	1	1	0
XOR	0	1	0	1	0	1	0	1

CCW: 00, 01, 11, 10, ...

$\phi 1$	0	0	1	1	0	0	1	1
$\phi 2$	0	1	1	0	0	1	1	0
XOR	1	0	1	0	1	0	1	0

Exercícios

- **Ex. 9.3)** Obtenha a função de transferência de um acelerômetro.
 - Elementos mecânicos: m, c, k ;
 - Posição da massa sísmica: y_m ;
 - Posição do conjunto: y_h ;
 - Deslocamento relativo: y_r .



Exercícios

▪ Ex. 9.3)

- Posição relativa:

- $y_r = y_m - y_h;$

- Função de transferência:

- $m\ddot{y}_m + c\dot{y}_r + ky_r = 0;$

- $Y_r(ms^2 + cs + k) + ms^2Y_h = 0;$

- $Y_r = \left(\frac{m}{ms^2 + cs + k}\right)s^2Y_h = \left(\frac{m}{ms^2 + cs + k}\right)A_h.$

Exercícios

▪ Ex. 9.3)

- Discussão:

- $Y_r = \left(\frac{m}{ms^2 + cs + k} \right) s^2 Y_h = \left(\frac{m}{ms^2 + cs + k} \right) A_h.$

- A posição da relativa da massa sísmica é proporcional à aceleração da estrutura $a_h = \ddot{y}_h$, ou seja, o acelerômetro mede aceleração à partir do deslocamento da massa;
 - É possível obter a velocidade $v_h = \int a_h dt$ e a posição da estrutura $y_h = \int v_h dt = \iint a_h dt^2$ integrando os sinais de aceleração e velocidade, respectivamente.