

Sensores indutivos-magnéticos e circuitos

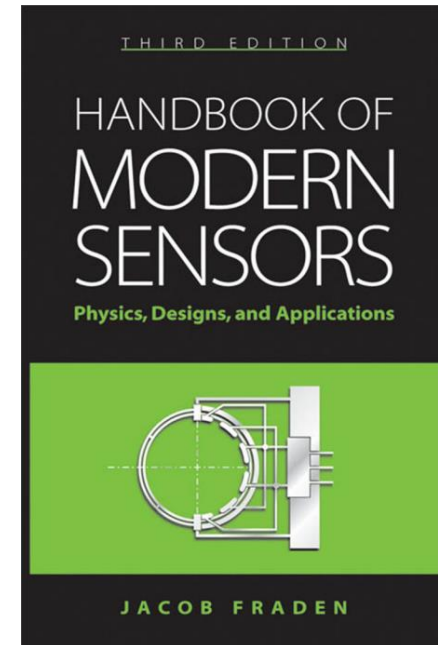
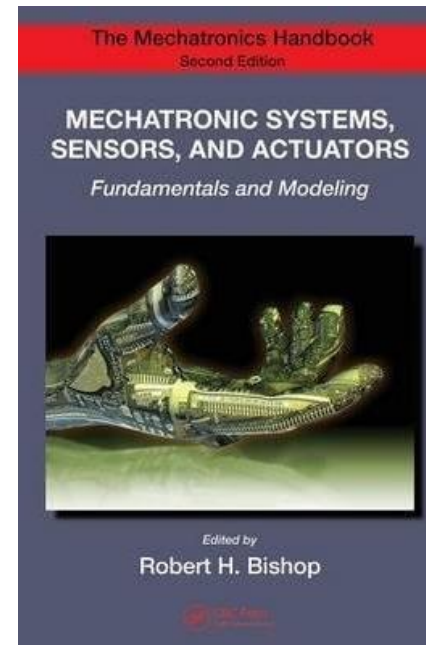
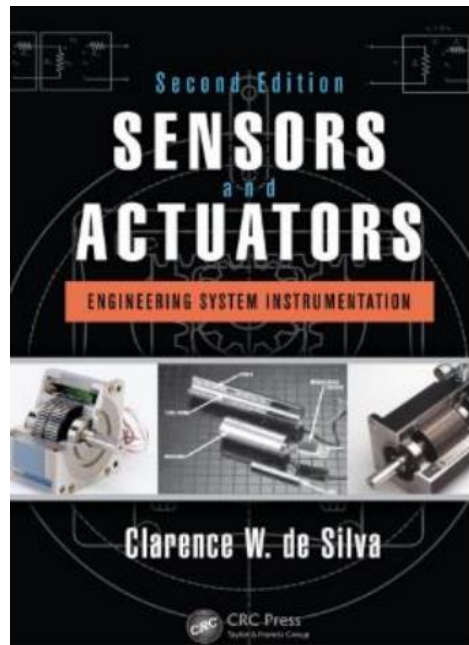
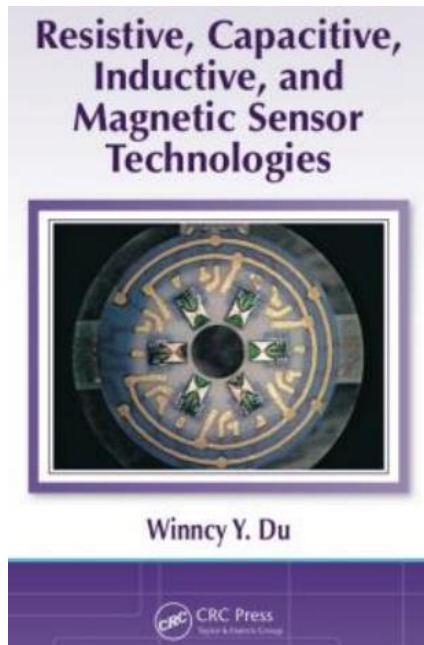
Profa. Dra. Larissa Driemeier

Prof. Dr. Marcilio Alves

Prof. Dr. Rafael Traldi Moura



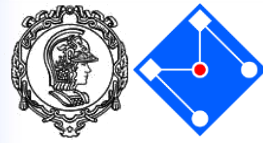
- Os elementos da automação industrial são:
 - **Sensores;**
 - Controladores (comando e regulação);
 - Atuadores (acionamento).
- Esta aula é baseada nos livros:





Outline da aula:

- Introdução;
- Indutor e indutância;
- Fenômenos Físicos;
- Características;
- Comparação com outros sensores;
- Sensor indutivo de núcleo vazio;
- Sensor indutivo de núcleo ferromagnético;
- Sensor indutivo do tipo transformador;



Um **indutor** é um componente eletromagnético que atua na **interação** entre **campos elétricos** e **campos magnéticos**.

Os princípios eletromagnéticos são utilizados no projeto de sensores indutivos, magnéticos e eletromagnéticos. Desta forma, não existe uma definição clara para separar sensores indutivos, magnéticos e eletromagnéticos.

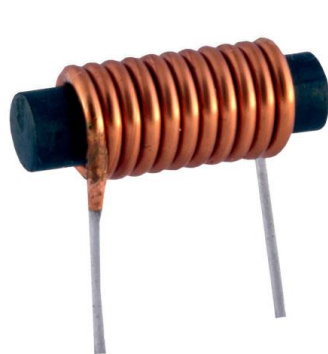
Iremos então usar a seguinte metodologia de separação: **sensores com projeto predominante em espiras serão indutivos**. Todos os outros se classificam como magnéticos e eletromagnéticos.



Vantagens:

- Não requerem contato físico;
 - Alta confiabilidade;
 - Robusteza;
 - Fácil utilização;
- Resolução quase infinita;
- Resposta rápida;
- Operações em largas faixas de temperatura;
- Somente detectam metais, mas reagem diferentemente para cada tipo de metal;

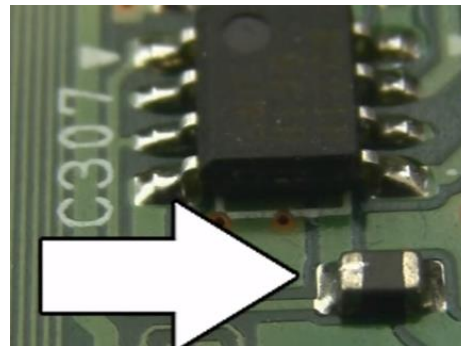
- Componente eletrônico que armazena temporariamente energia na forma de campo magnético.
- Utilizado em motores, transformadores, sensores, etc.
- Podem ser classificados em:



Wire-wound
inductor



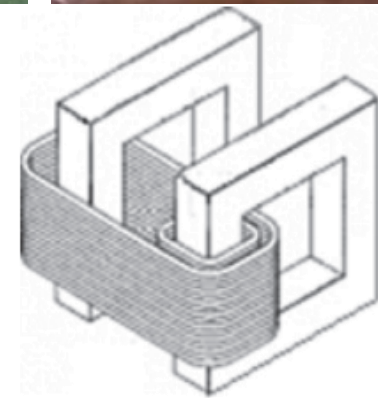
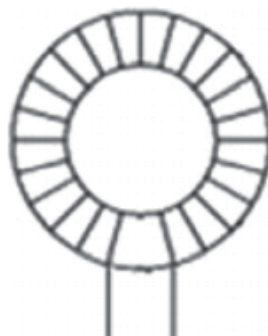
Radial inductor



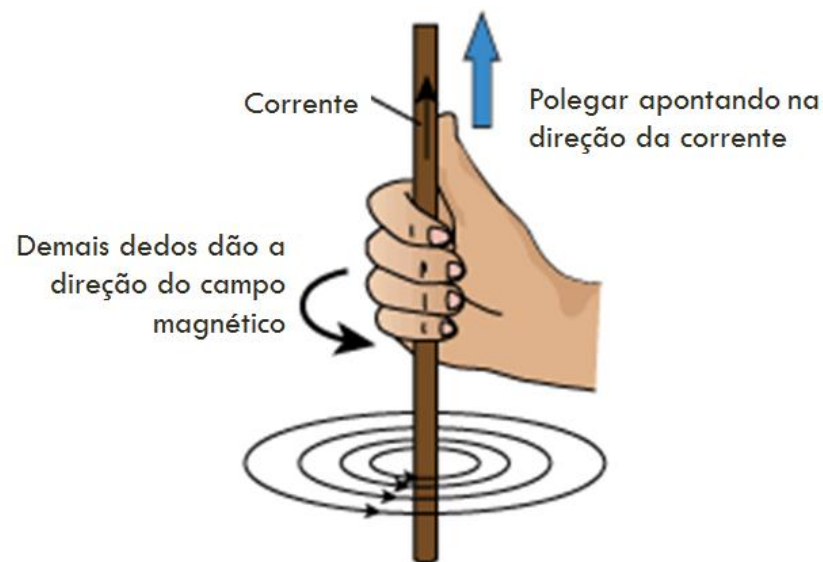
Chip inductor



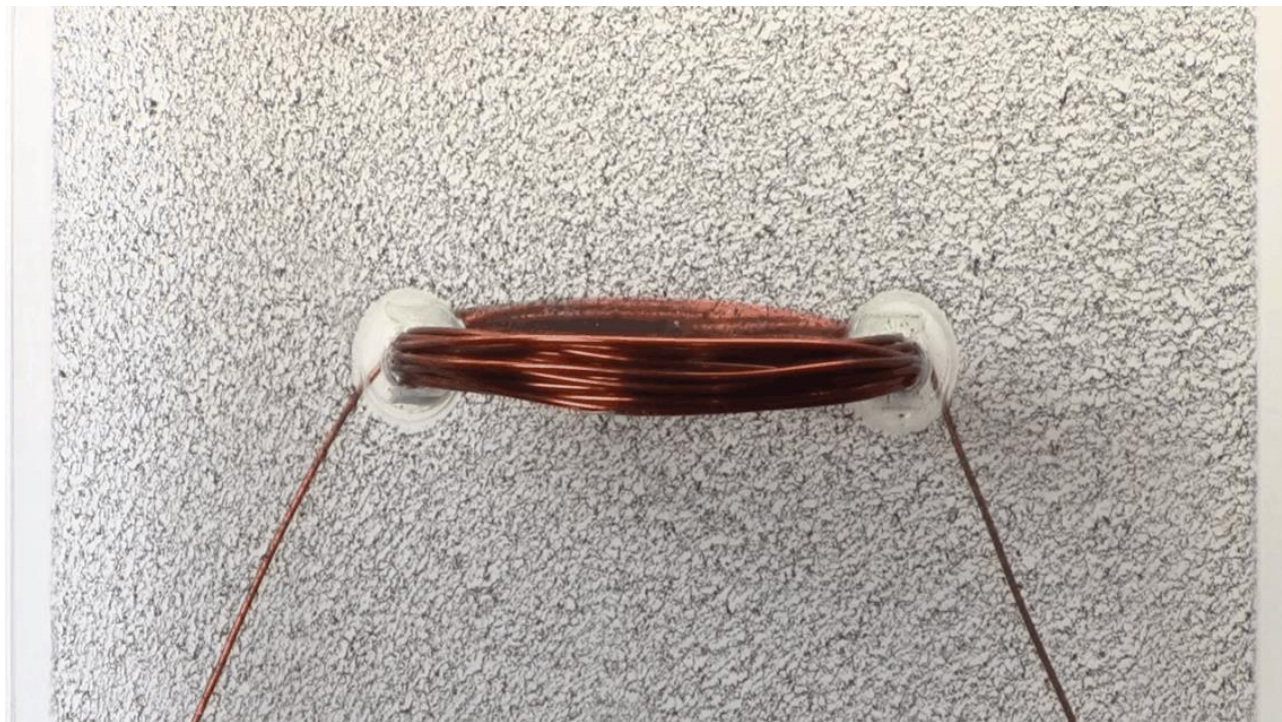
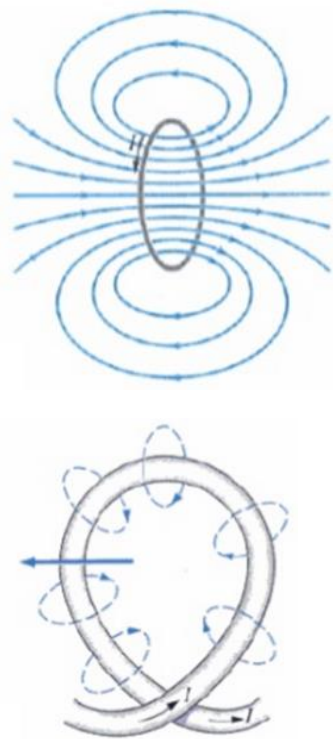
Power inductor



- Quando há corrente fluindo por um fio, esta gera um campo magnético ao seu redor.

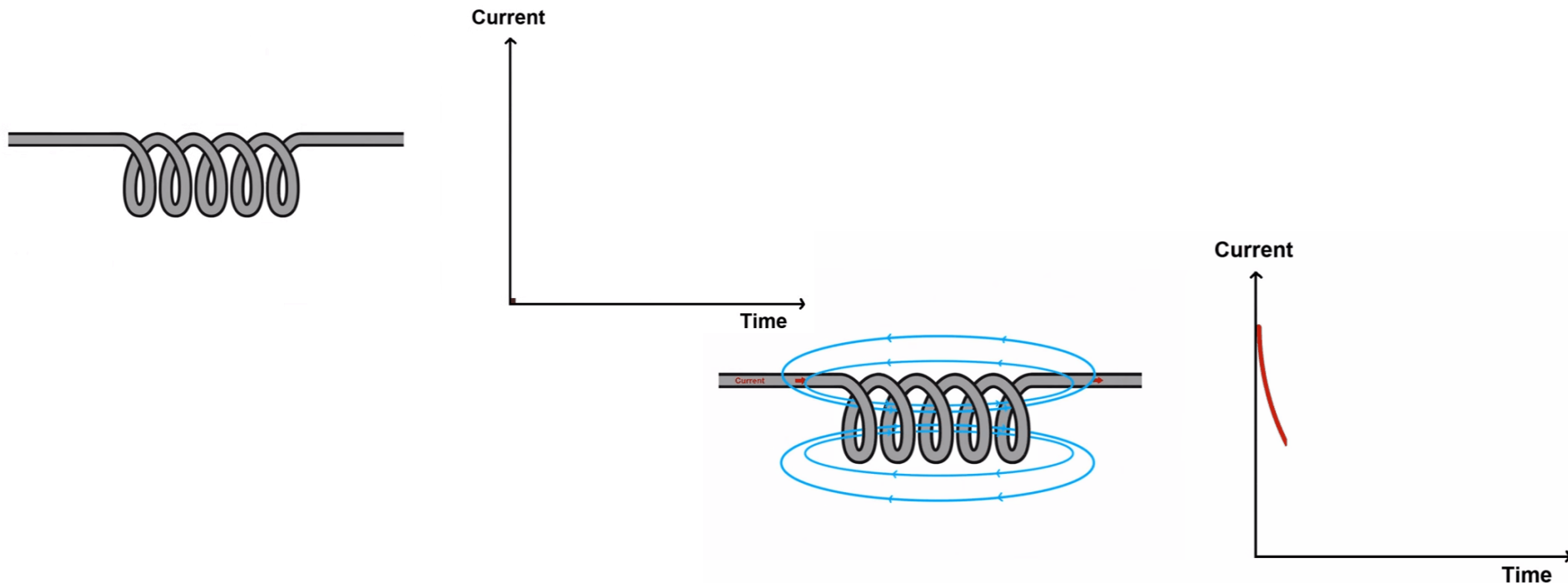


- Um condutor em forma de espira circular quando percorrido por corrente elétrica é capaz de concentrar as linhas de campo magnético no interior da espira. A densidade de campo magnético resultante no interior da espira é maior que a produzida pela mesma corrente no condutor retilíneo.





- Se forem acumuladas espiras, teremos um campo magnetico maior.
- Quando a corrente começa a fluir, o campo magnetico começa a aumentar e estabiliza, armazenando energia.
- Quando a corrente para de fluir, o campo magnetico começa a diminuir, e a energia magnética é convertida em corrente.





A corrente, em um indutor, não pode mudar instantaneamente.

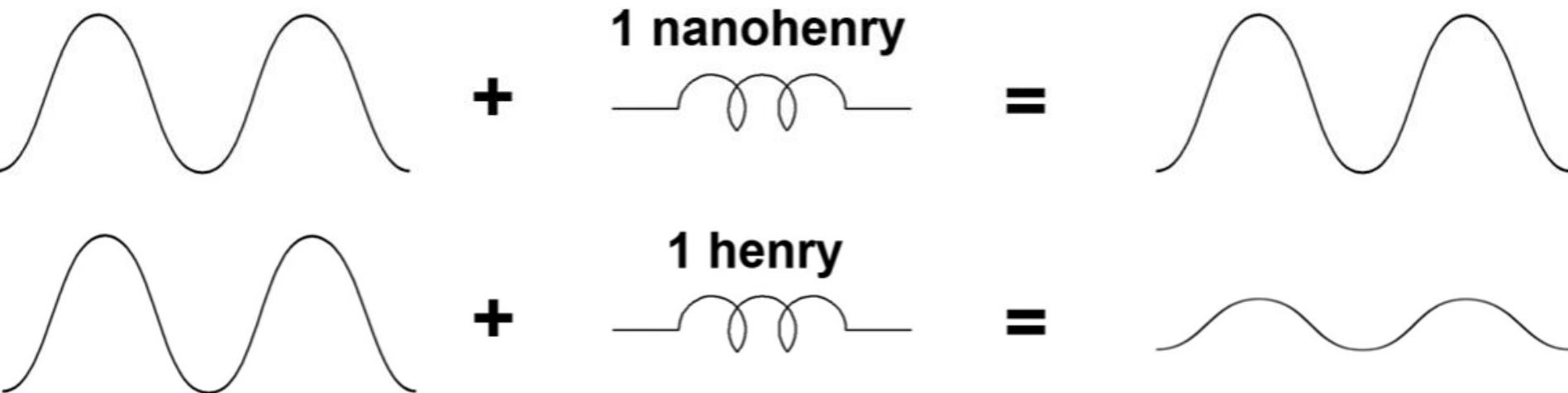


- A relação entre a Voltagem e a corrente no indutor é dada por:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

- Voltagem V , em volts;
- Indutância L , em henrys H ;
- corrente I , em amperes;

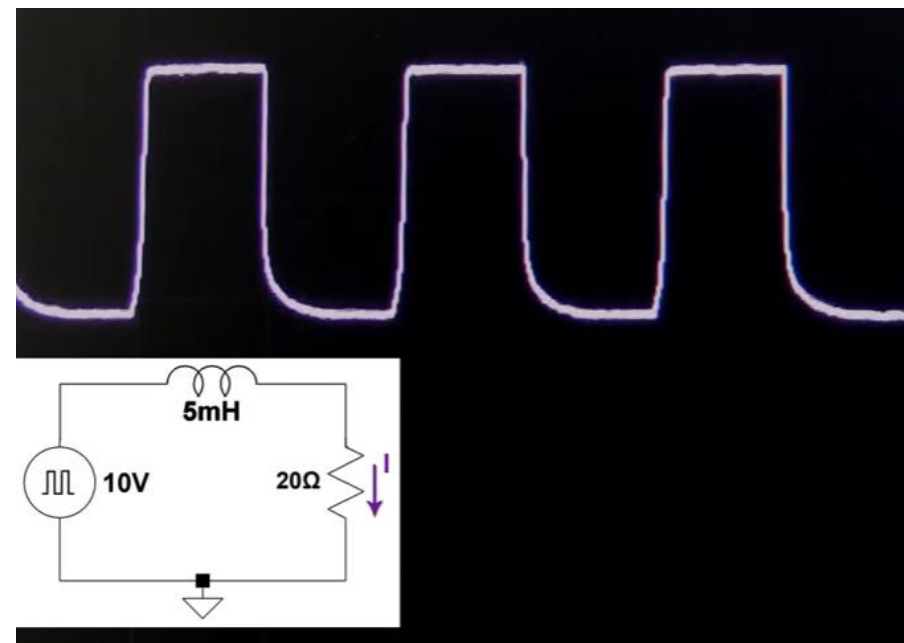
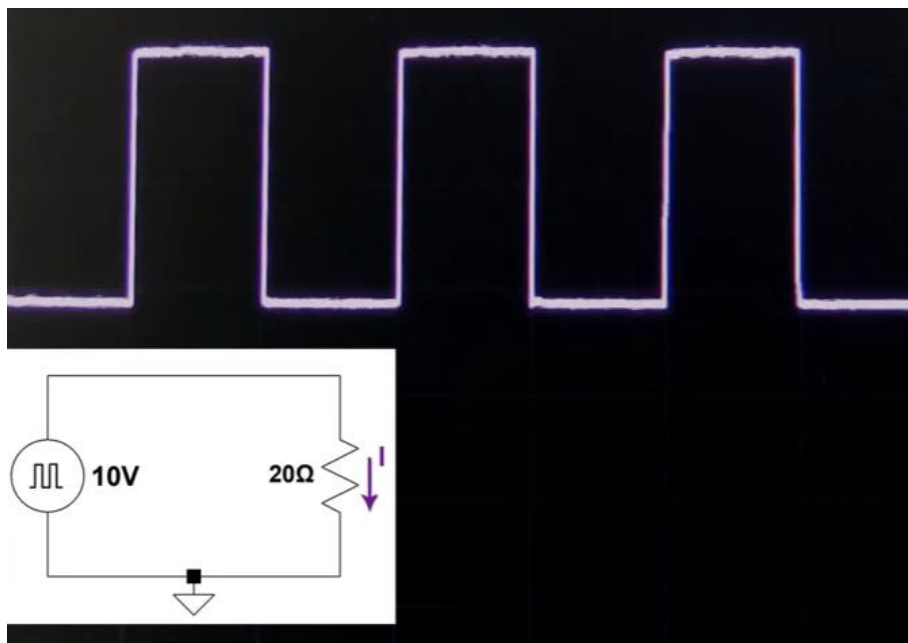
- Quanto maior a indutância, mais o indutor irá resistir a variações abruptas na corrente.



- Combinações em paralelo e em série seguem o mesmo princípios de resistências.

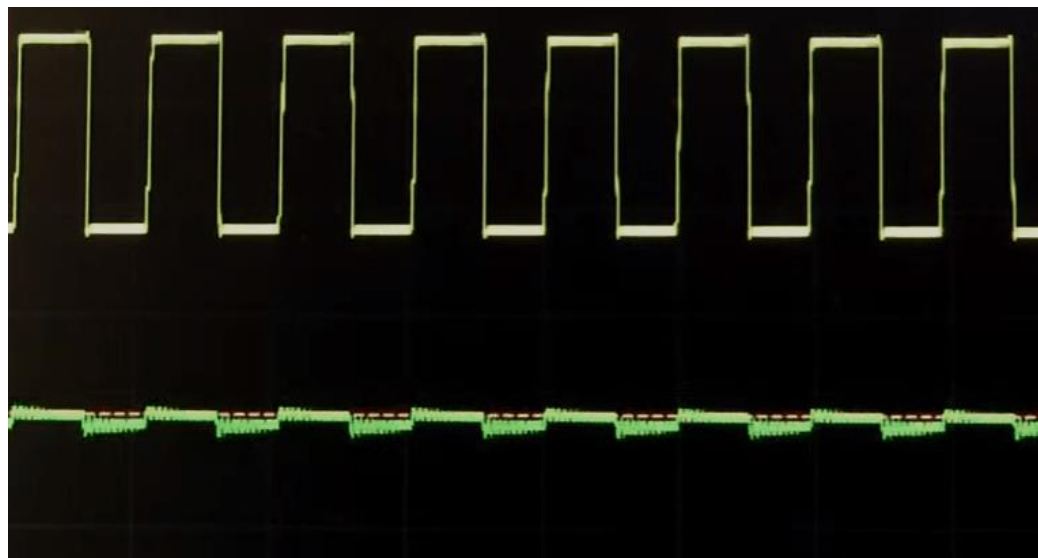
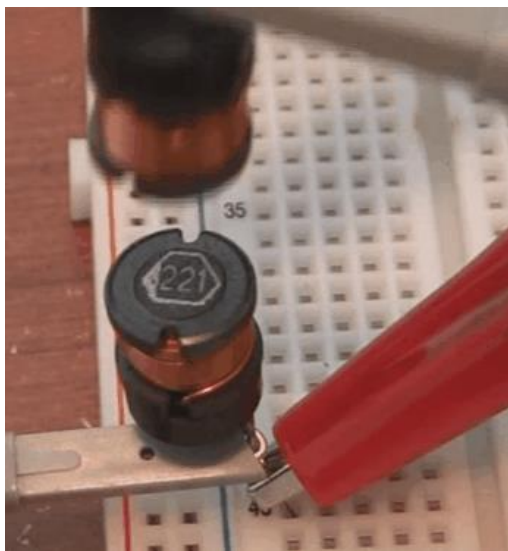


- Desta forma, o indutor cria atrasos por demorar um tempo para carregar e descarregar. Veja o efeito em circuitos elétricos simples:



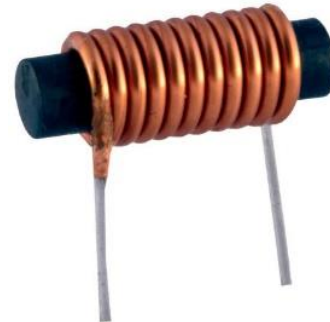


- Desta forma, um indutor pode gerar o campo eletromagnético enquanto um segundo indutor pode “sentir” o campo e variações no mesmo.
- Ao se aproximar o indutor “sensor”, a amplitude do sinal sobre no mesmo, conforme mostrado no osciloscópio.



Ps.: vídeos não sincronizados...

- Mas o que acontece com o indutor ao colocarmos algum material no interior da espira?



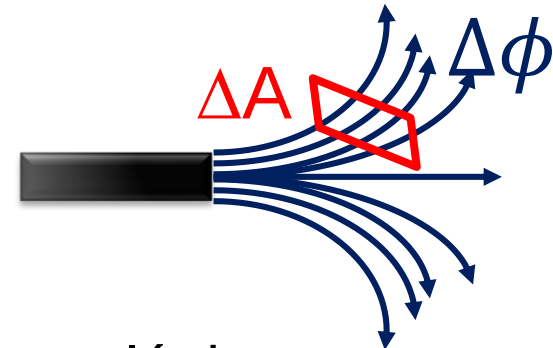
- O primeiro passo para respondermos essa pergunta é entender a relação entre fluxo magnético ϕ (em Weber ou volt-segundo) , a indutância L e a corrente I :

$$L = \frac{\phi}{I}$$



- O fluxo magnético pode ser expresso na forma de densidade de fluxo magnético B (em $T = Wb/m^2$), que é a delimitação do fluxo magnético ϕ por uma unidade de área A :

$$B = \frac{\phi}{A}$$



- O campo magnético induzido pela corrente elétrica de um indutor, H (em Amperes por metro) é definido em função do numero de espiras n , do comprimento do indutor e da corrente I por:

$$H = \frac{nI}{l}$$

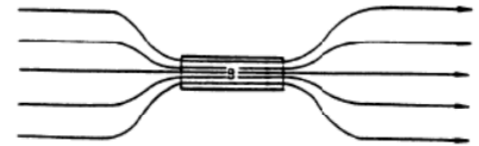
- Assim, a densidade de fluxo magnético B depende do campo magnetico induzido H e do meio no núcleo das espiras pela permeabilidade do material μ :

$$B = \mu H$$



A permeabilidade μ pode ser entendida como a habilidade do material em auxiliar na formação de campo magnético dentro de si mesmo. Esta pode ser expressa por:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$



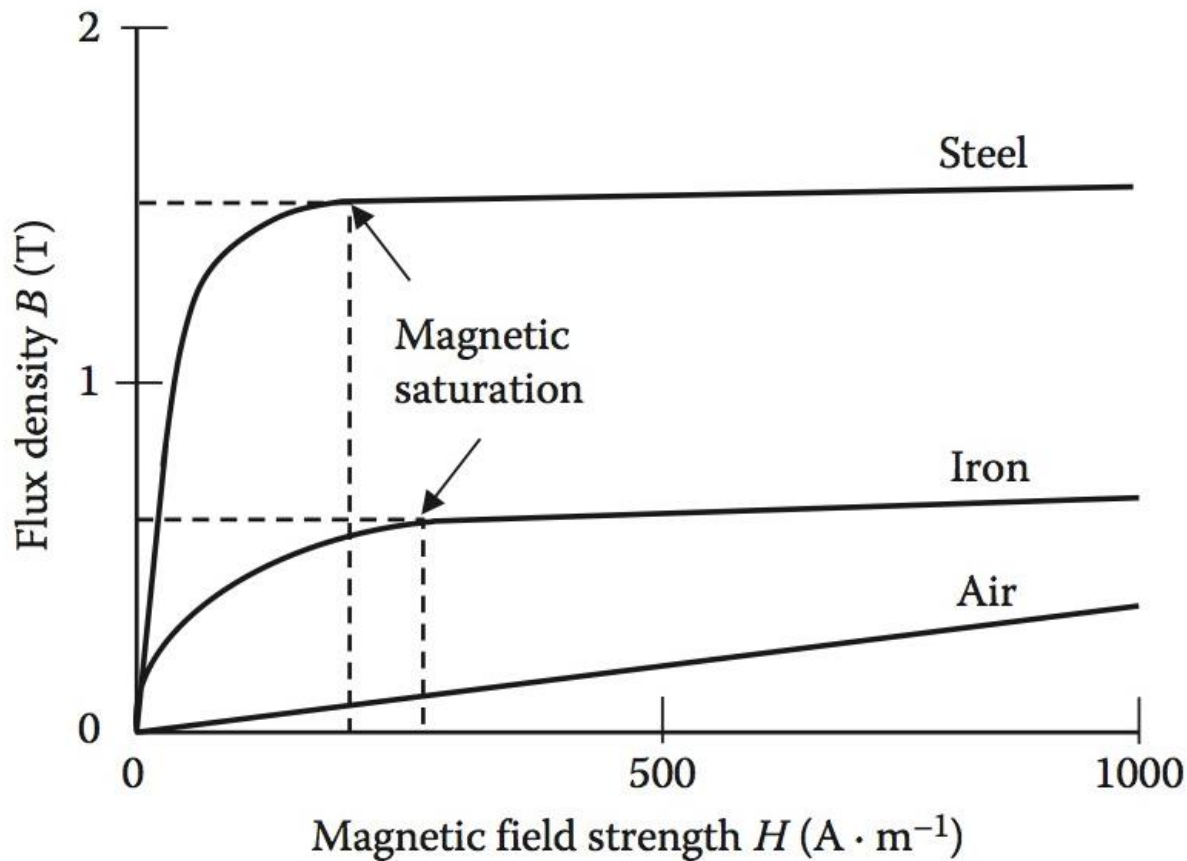
Sendo μ_0 a permeabilidade no vácuo e μ_r a permeabilidade em determinado material.

Material	μ_r
Supercondutores	0
Água, cobre	0,99999
Vácuo, ar, plásticos, madeira	1
Aluminio	1,00002
Platina	1,00027
Cobalto	70 a 250

Material	μ_r
Aço	100
Niquel	100 a 600
Ferrita (níquel zinco)	16 a 640
Ferrita (magnésio zinco)	>640
Permalloy (0.8Ni, .2Fe)	2k5 a 25k
Mu-metal (.77Ni, .16Fe, .05Cu, .02Cr)	20k a 100k



Porém, existe um limite para essa amplificação...

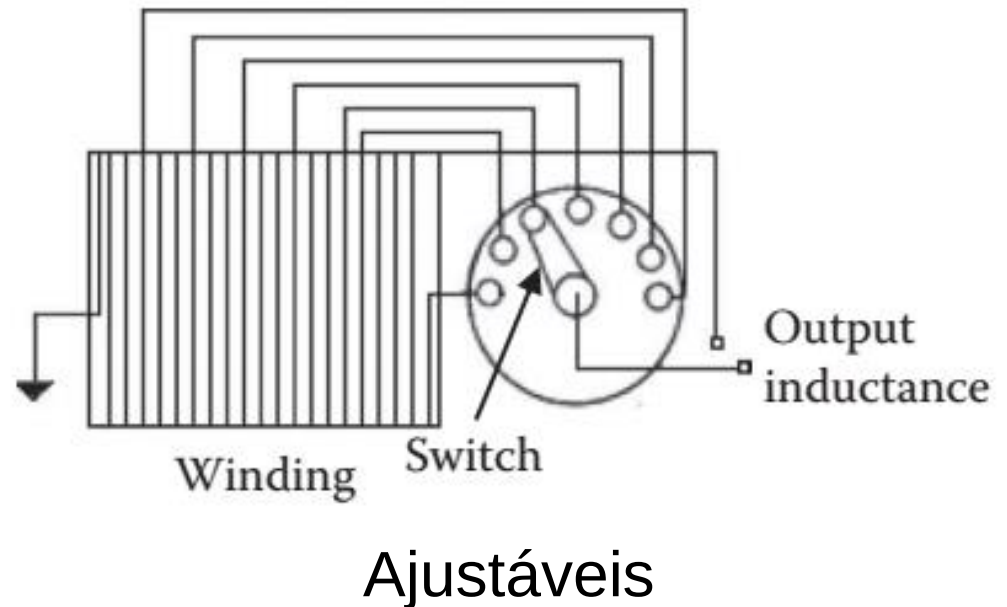
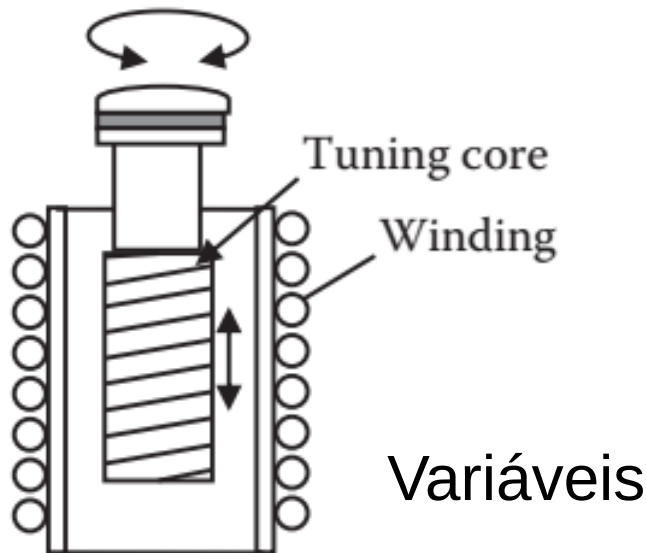




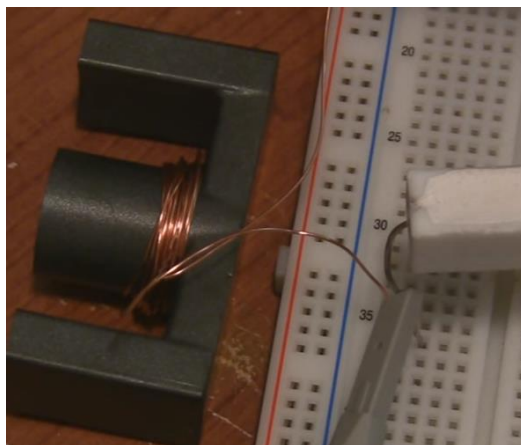
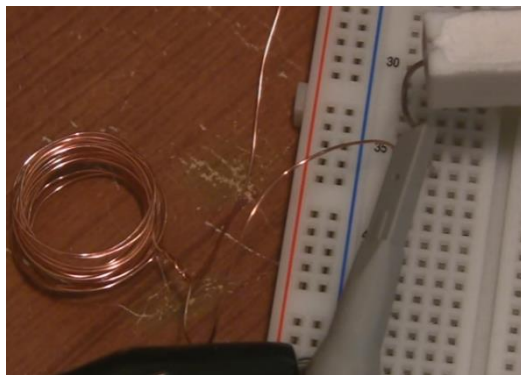
- Desta forma, temos:

$$L = \frac{\phi}{I} = \frac{BA}{I} = \frac{\mu HA}{I} \xrightarrow{H = \frac{nI}{l}} L = \frac{\mu n I n A_n}{l I} = \frac{\mu n^2 A}{l}$$

- Ou seja, também podemos classificar os indutores em:
 - Fixos;
 - Variáveis;
 - Ajustáveis.



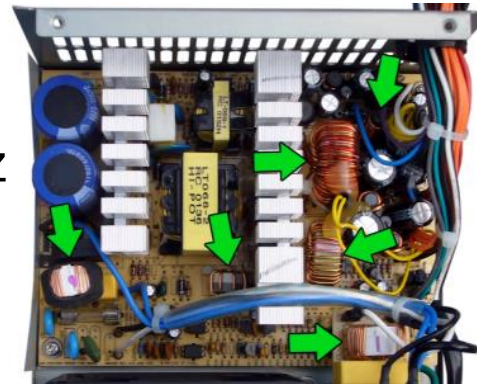
- Concluindo: um material com meio ferromagnético no interior da bobina amplifica a indutância;
- Neste caso, quanto maior a impedância, maior sua resistência a mudar o valor da corrente.



- Nanohenry
 - Filtros de altas frequências (MHz e acima);
 - Usado em rádios.



- Microhenry
 - Filtros entre 50 KHz e alguns MHz
 - Usando em fontes DC;



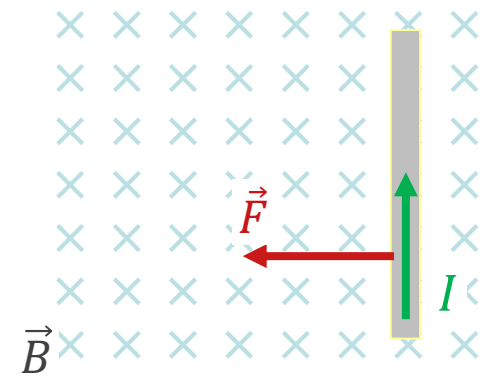
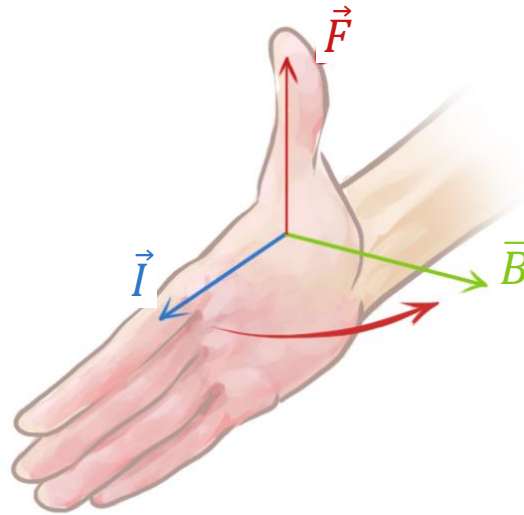
- Milihenry
 - Usado em amplificadores de som para separa agudos e graves;





- Quando um elétron de carga q se move a uma velocidade v (ou há uma corrente elétrica I) através de um campo magnético B , surge uma força F , chamada Força de Lorentz, definida pela equação vetorial:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



- Para um fio conduzindo uma carga através de um campo magnético, temos:

$$\vec{F} = \left(\frac{\vec{I}}{\|I\|} \int dl \right) \times \vec{B}$$

Ou, $I \int dl$ sendo um vetor de tamanho dl e sentido de fluxo da corrente



- A lei de Faraday da indução eletromagnética afirma que quando um **campo magnético**, que está passando através de uma carga em movimento, **varia**, surgirá uma voltagem/corrente no condutor (se este estiver em um loop fechado). Esta voltagem induzida é chamada de força eletromotriz FEM.

$$V_L = - \frac{d\phi}{dt}$$

- Para uma bobina de n espiras:

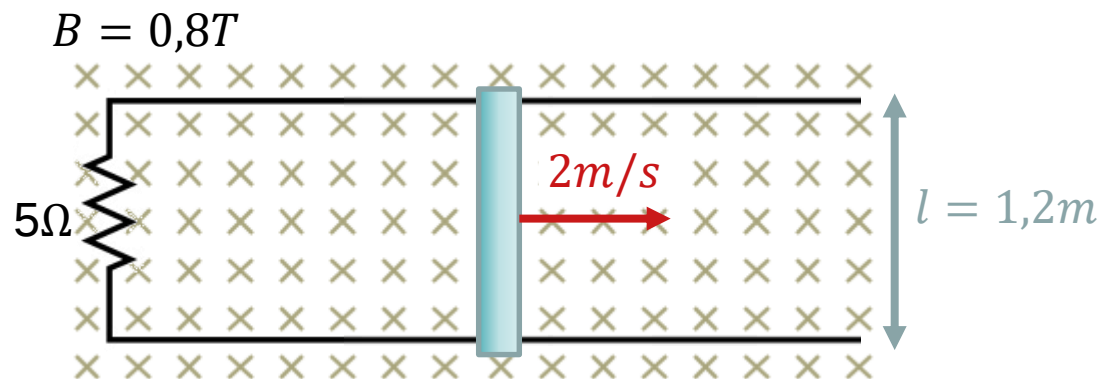
$$V_L = -n \frac{d\phi}{dt} = -nA \frac{dB}{dt} = -\mu nA \frac{dH}{dt}$$

- Para um fio de comprimento l se movendo a uma velocidade v :

$$V_L = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{BdA}{dt} = - \frac{Blvdt}{dt} = -Blv$$



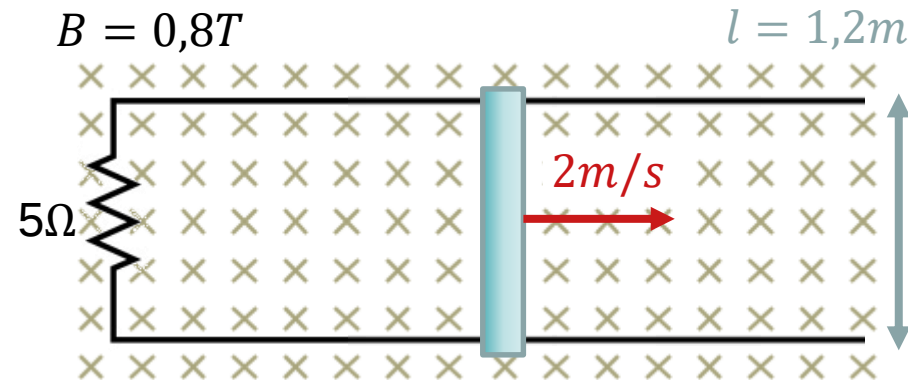
- Considere o circuito abaixo no qual a barra, de comprimento 1,2m, move-se para a direita com velocidade de 2m/s. Sendo o campo magnético de 0,8 T e a resistência de 5Ω , calcule:
 - A força eletromotriz FEM;
 - A corrente induzida e seu sentido;
 - A potência consumida na resistência;
 - A força necessária para mover a barra;
 - A potência necessária para mover a barra;





- A força eletromotriz FEM;

$$\begin{aligned} V_L &= -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{BdA}{dt} = -\frac{Blvdt}{dt} = \\ &= -Blv = -0,8 \cdot 1,2 \cdot 2 = -1,92V \end{aligned}$$



- A corrente induzida e seu sentido;

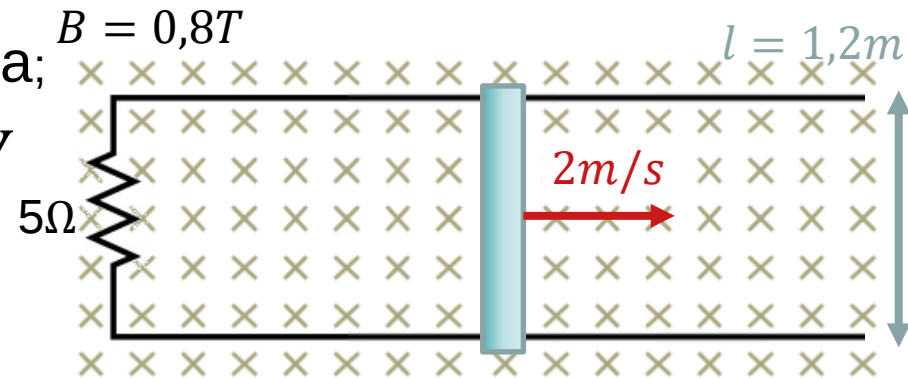
$$V_L = RI \Rightarrow I = -\frac{1,92}{5} = 0,384A$$

- Barra indo para a direita aumenta o fluxo. Este aumento de fluxo gera uma voltagem (FEM) que causará uma corrente elétrica que, por indução, cria um campo magnetico de forma a cancelar a variação de fluxo (sinal de menos da fórmula), ou seja, saindo do slide. Assim a corrente estará no sentido anti-horário



- A potência consumida na resistência;

$$P = RI^2 \Rightarrow P = 5 \cdot 0,384^2 = 0,737W$$



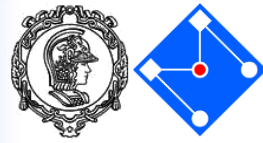
- A força necessária para mover a barra;

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B} \Rightarrow F = IlB = 0,384 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 0,3686N$$

A força de Lorentz será gerada para a esquerda. Desta forma, para que a barra de mova, devemos aplicar uma força para a direita.

- A potência necessária para mover a barra;

$$P = Fv \Rightarrow P = 0,3686 \cdot 2 = 0,737W$$



- Qualquer fenómeno físico que produz fluxo de campo eletromagnético é chamado de força magnetomotriz FMM, sendo análoga a FEM.
- A FMM total ao redor de um caminho fechado englobando uma bobina com n espiras e conduzindo uma corrente I é dada por:

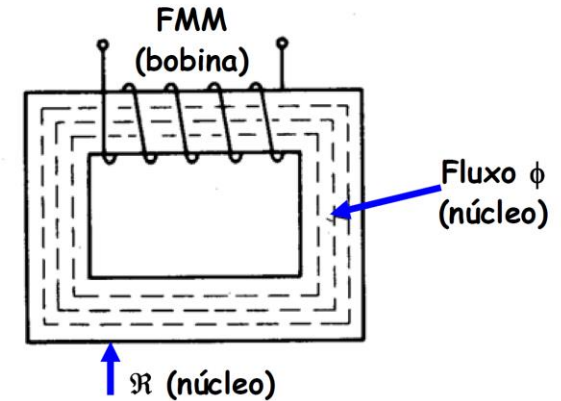
$$FFM = \oint H dl = NI$$

- Qualquer fenômeno físico que produz fluxo de campo eletromagnético é chamado de força magnetomotriz FMM.



- A FMM também pode ser expressa por:

$$FMM = NI = \mathfrak{R}\phi$$



com $\mathfrak{R}$ sendo a relutância magnética (em Ampere por Weber).

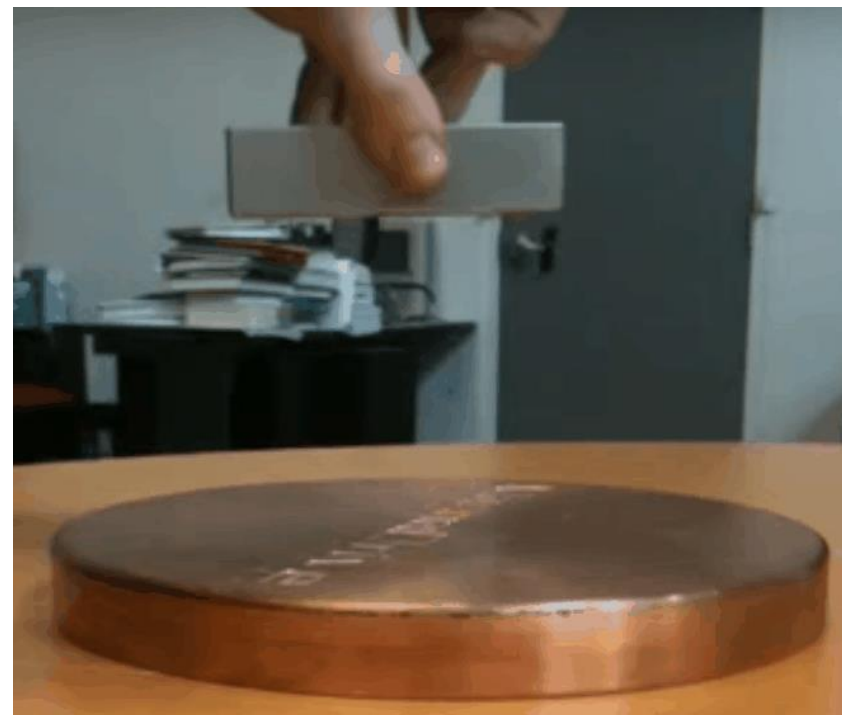
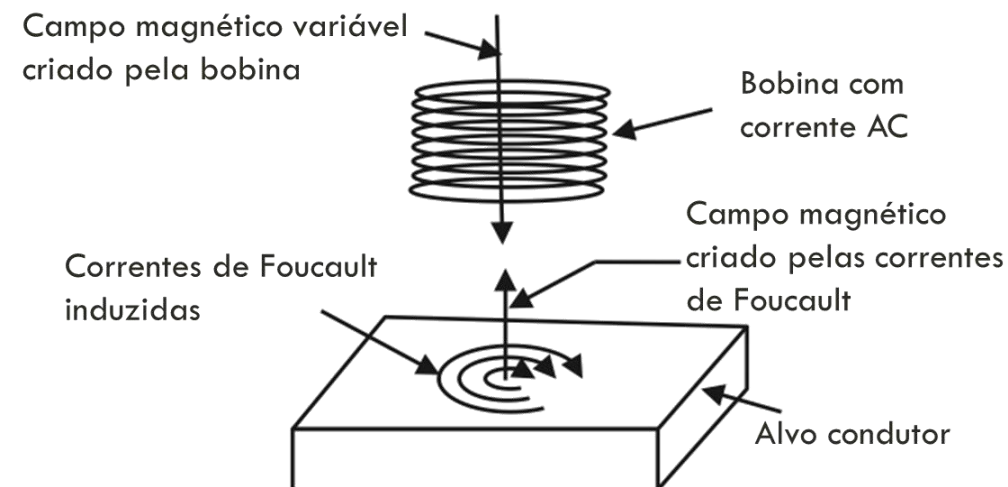
- Assim como a resistência elétrica, :

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{A}$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

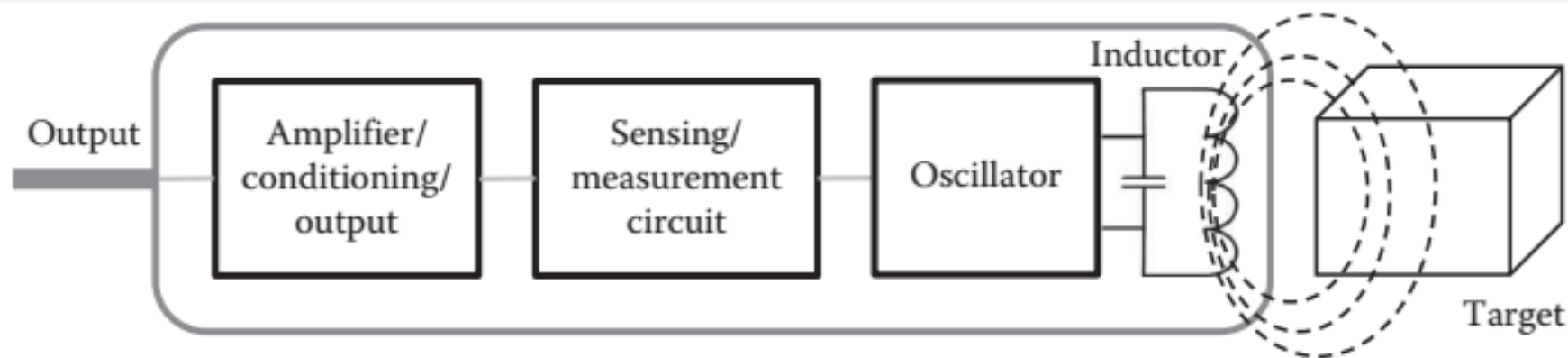


- Quando um condutor é exposto a um campo magnético que varia, é induzida uma corrente circulante de elétrons no condutor.
- A geração destas correntes de Foucault retiram energia da bobina, sendo percebidos como um aumento na resistência elétrica da mesma. As correntes de Foucault geram seu próprio campo magnético, oposto ao da bobina, mudando a reatância indutiva da mesma.





- Apesar de existirem muitas metodologias de projeto diferentes para sensores indutivos, o princípio de operação é o mesmo:
 - uma bobina (indutor) alimentada por corrente alternada cria um campo magnético variante.
 - Campo magnético induzido interage com um segundo campo magnetico;
 - Interação causa uma variação na indutância ou impedância em termos de amplitude ou fase.
- Este segundo campo magnético pode ser:
 - Um ímã permanente anexo ao objeto que se move;
 - Criado por uma corrente de Foucault;
 - Criado por uma corrente em uma bobina secundária induzida pelo indutor;
- A variação na indutância ou impedância pode ser medido por um circuito específico.



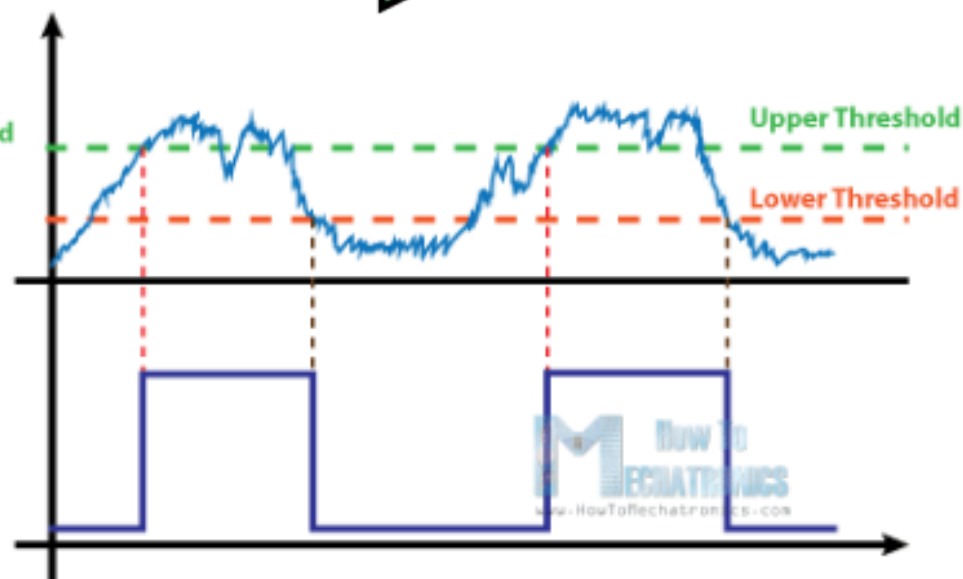
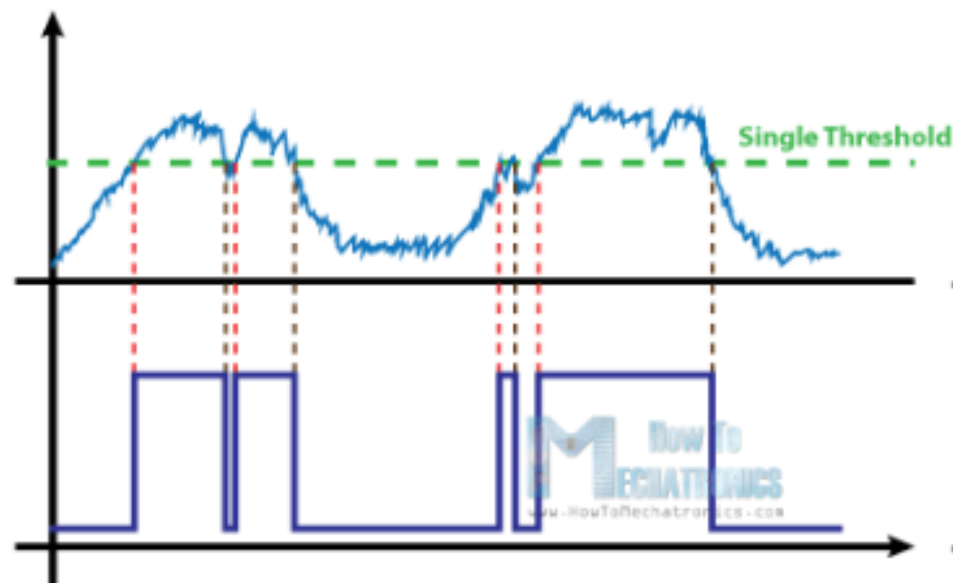
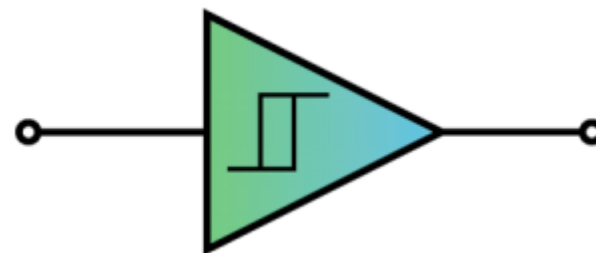
- Para um sensor indutivo funcionar, são necessários:
 1. Um objeto a ser medido condutor elétrico ou magneticamente permeável;
 2. uma bobina (indutor), com ou sem núcleo;
 3. Um oscilador para criar transmitir uma corrente alternada de alta frequência;
 4. Um circuito para perceber/medir capaz de detectar e medir a variação no campo magnético em termos de indutância, relutância, impedância, frequência natural, voltagem, corrente ou campo magnético induzido;
 5. Um circuito de saída para amplificar, condicionar, interpretar ou converter o sinal detectado na saída mais conveniente.



- **Distância sensítiva nominal S_n :** distancia máxima de um sensor que uma placa quadrada padrão de 1mm de espessura de aço carbono FE360 consegue disparar o trigger e mudar a saída do sensor;
- **Repetibilidade (em % de S_n):** variação medida em qualquer distância dentro da faixa de operação em um período de 8 horas com temperatura entre 15°C e 30°C e variação de menos de 5% na voltagem de alimentação;
- **Offset:** distância entre a face do sensor e a posição que começa a medir, indicando o não contato e “forçando” a utilização na região mais linear;

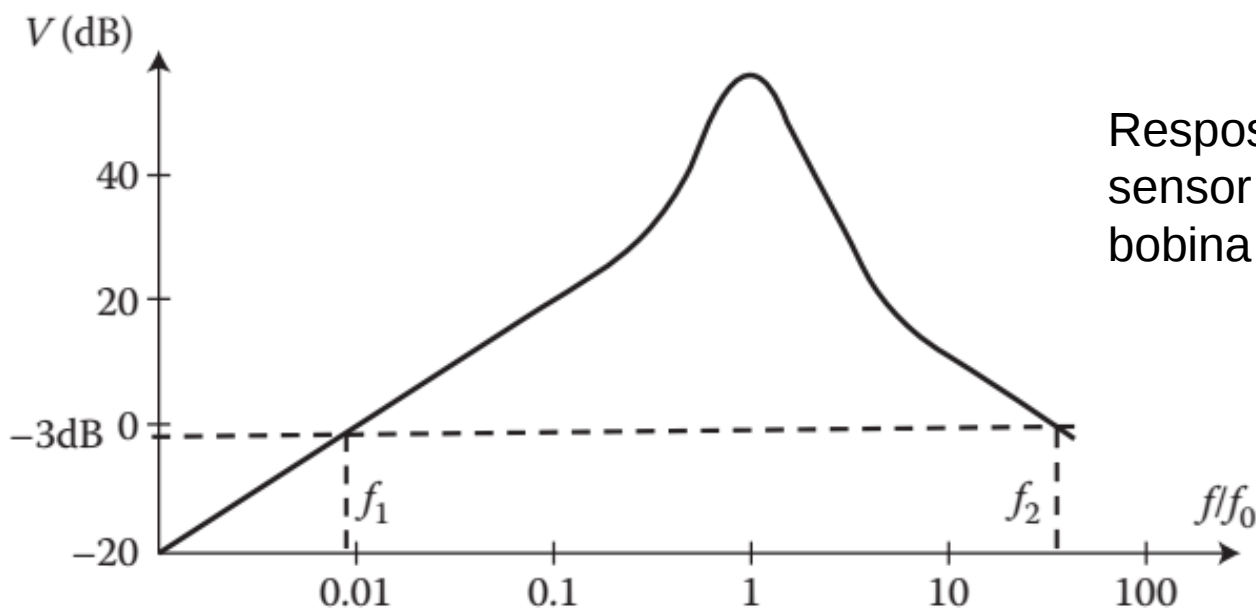


- **Switching Hysteresis (em % de S_n):** distância entre o ponto de switch-on enquanto se aproxima um objeto e switch-off ao se distanciar um objeto;
- No sensor de proximidade, é utilizado um Schmitt trigger





- O sensor indutivo proporciona saída quando há variação de fluxo de entrada. Desta forma são capazes de medir variação dinâmicas de campos magnéticos;
- Quando o campo é constante, a variação de fluxo pode ser obtida com a movimentação da bobina;
- O gráfico abaixo representa um sensor indutivo com bom funcionamento entre 0.01Hz e 60Hz;



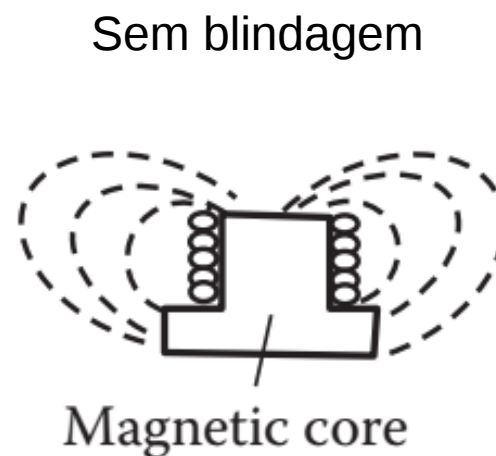
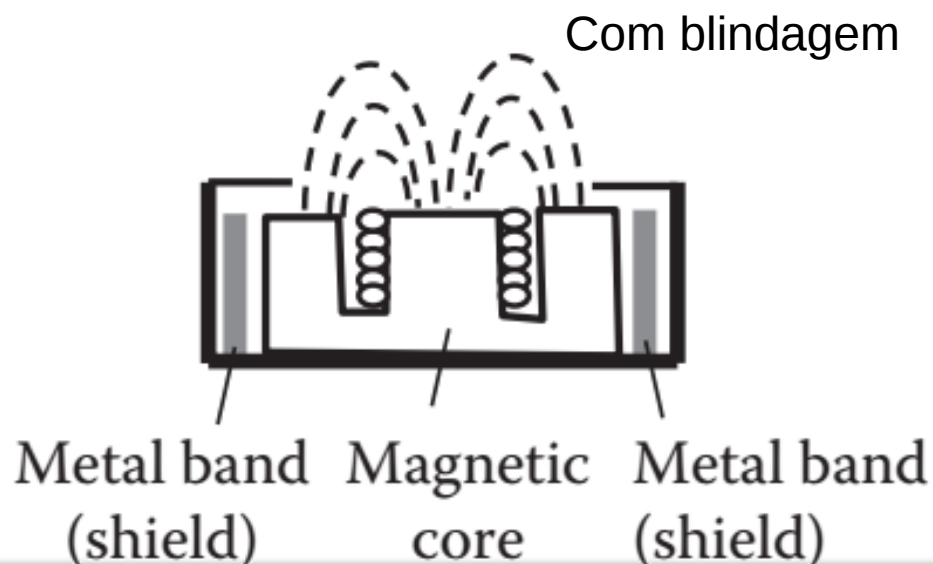
Resposta típica de um sensor de indução de bobina



- **Grau de proteção:** grau de encapsulamento de acordo com a Comissão internacional eletrotécnica. IP65: resistente a poeira e a jatos da água, IP67: proteção a poeira e a imersão na água;
- **Corrente máxima de operação:** corrente máxima que o sensor resiste em uso contínuo;
- **Corrente mínima de operação:** corrente mínima que deve circular no sensor para garantir seu funcionamento correto;
- **Corrente de pico máxima:** corrente máxima suportada pelo sensor em curtos períodos de tempo;
- **Corrente residual:** corrente que circula pelo sensor em seu estado aberto;
- **Corrente de operação:** corrente necessária para o funcionamento do sensor;
- **Queda de voltagem:** queda de voltagem em um sensor quando em carga máxima;
- **Frequência de operação:** máximo número de ciclos on/off que um sensor opera em um segundo;



- Por grandeza medida: de distância, de vibração, detector de metais, de nível líquido, de velocidade, de campo magnético ou de corrente.
- Por aplicação: transformadores, detector de falha, fratura, falha de solda, sensor de proximidade, switch sem contato, etc;
- Por forma e geometria: cilíndrica, retangular, esférica, plana, miniatura, etc;
- Também há divisões por blindagem, por montagem, por estrutura (com núcleo, sem, 1 bobina, 2 bobinas), número de voltas e saída, etc;





Iremos dividir em:

- **Sensor indutivo de núcleo vazio:** Não tem núcleo nenhum ou o núcleo não é magnético (feito de madeira ou plástico);
- **Sensor indutivo com núcleo ferromagnético:** Possui núcleo ferromagnético, que pode ou não se mover com relação à bobina. A maioria dos sensores indutivos de deslocamento ou de corrente de Foucault pertencem a esta categoria;
- **Sensor indutivo do tipo transformador:** Este sensor possui 2 (primária e secundária) ou mais bobinas e pelo menos 1 núcleo. LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ou RVTD, etc...pertencem a esta categoria.



- Não possui partes móveis, não ocorrendo fadiga mecânica e assim possuindo vida útil prolongada;
- São bem vedados, podendo funcionar em ambientes com poeira e até em contato com líquidos;
- Possuem excelente precisão e repetibilidade ao medirem proximidade;
- Ao contrario dos capacitivos, a resposta do sensor independe do material entre o sensor e o objeto medido (desde que não metálico);



- Também chamada de search coil, pickup coil, magnetic antenna e magnético loop sensor;
- **Normalmente são de cobre**, mas também é utilizado alumínio se o peso for um parâmetro de grande importância no projeto;
- **Estáveis**, robustas e fáceis de lidar;
- Possuem **sensitividade limitada**, sendo sensíveis somente ao fluxo perpendicular ao eixo principal;
- Parâmetros de projeto são: diâmetro da bobina, interferência eletromagnética.



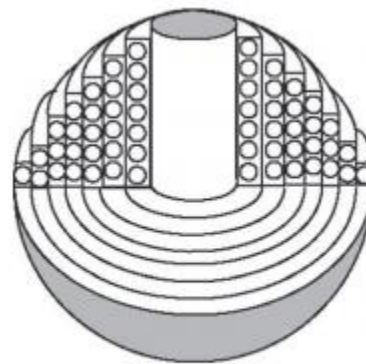
(a) Single magnetic loop antenna



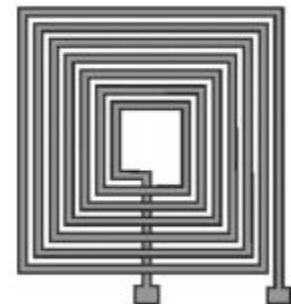
(b) Single-coil sensor



(c) Three mutually perpendicular coils



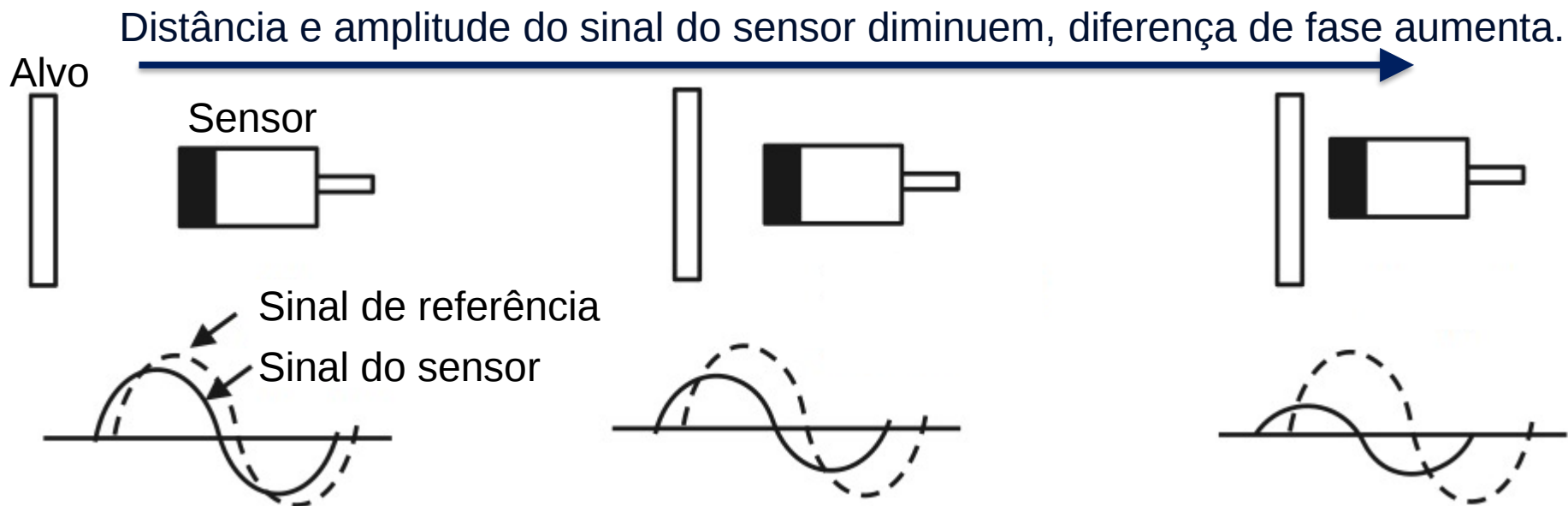
(d) Spherical coil



(e) Planar thin-film coil



- Um sensor indutivo gera um campo magnético na sua superfície ativa, que induz correntes de Foucault no alvo condutivo. A medida que o alvo se aproxima, as correntes aumentam, aumenta a impedância do sensor e a amplitude de oscilação do sinal do sensor diminui. Quanto menor o alvo, mais próximo este deve estar do sensor para ter o mesmo efeito.



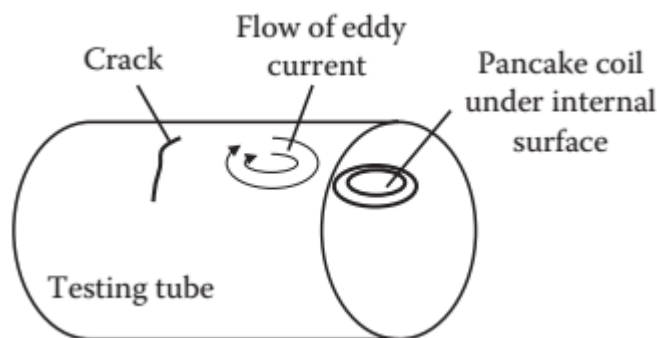
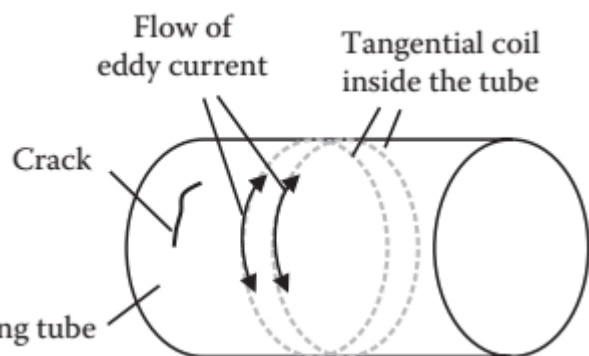


- O núcleo magnético é um pedaço de material ferromagnético com alto μ usado para confinar, guiar e concentrar fluxos magnéticos;
- O uso do núcleo ferromagnético proporciona uma maior sensibilidade, porém apresenta maiores perdas de energia e é não linear.
- Utilizados para aplicações que requerem maior sensibilidade ou com restrições de tamanho do sensor;
- O mais importante sensor indutivo é o baseado na corrente de Foucault. Sobre estes sensores
 - Oferecem as seguintes características: detecção não destrutiva, capacidade de detectar falha muito pequenas, alta e constante sensibilidade em uma grande faixa de frequências, penetrar materiais não magnéticos sem perda de acurácia.
 - Não devem ser utilizados: quando é necessária uma alta resolução (usar sensor capacitivo), é necessário espaço grande entre sensor e alvo (usar óptico).

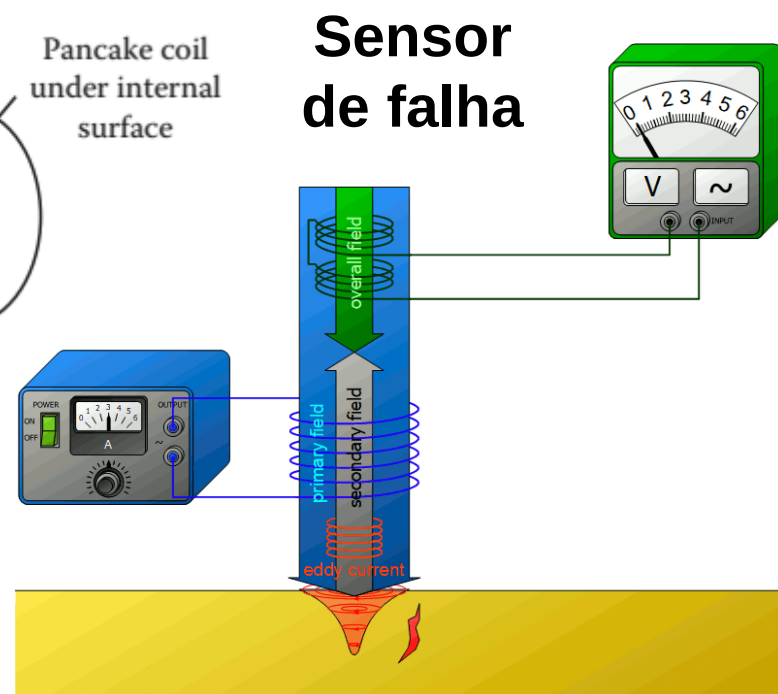


Podem ser divididos em:

- Absoluto: uma única bobina, usada para induzir correntes de Foucault e perceber mudanças no campo, dá uma leitura absoluta. Bastante utilizados para detectar falhas e medir espessura.
- Diferencial: duas bobinas funcionam como sensores, enroladas em direções opostas e mede-se a diferença entre elas.



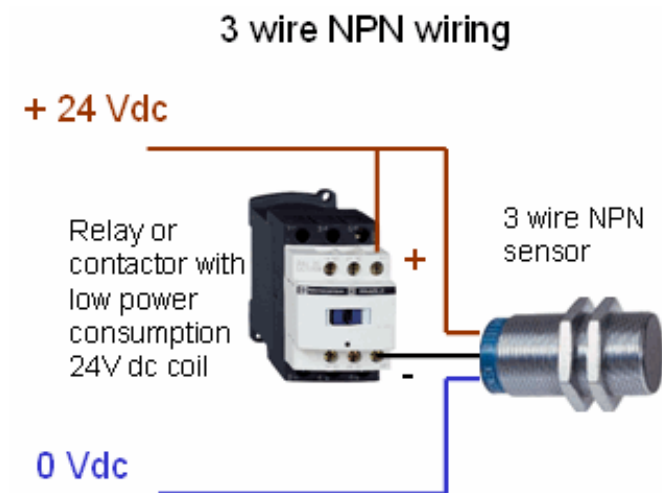
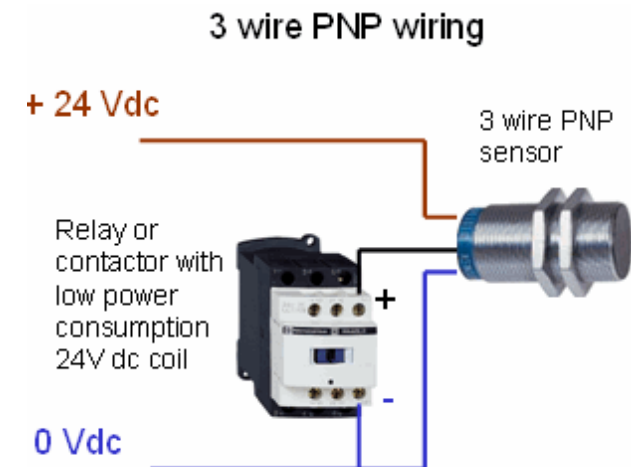
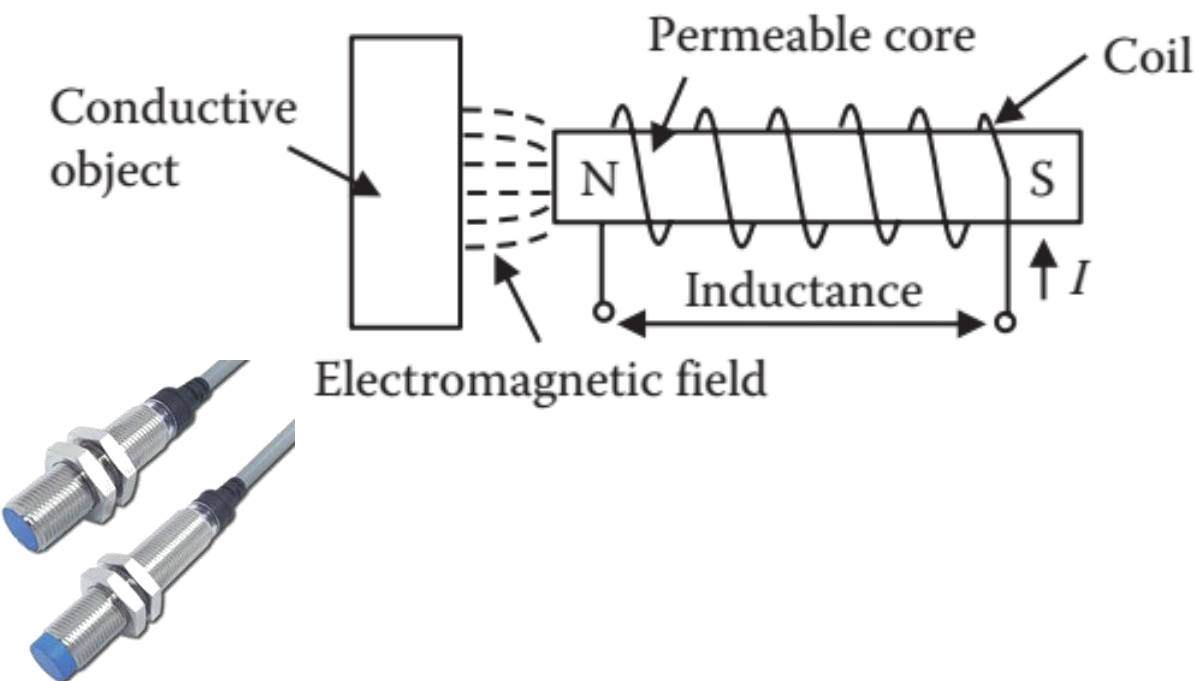
- Reflexivo: duas bobinas, uma usada para gerar correntes de Foucault e outra como sensor.
- Híbrido;





Sensor de proximidade

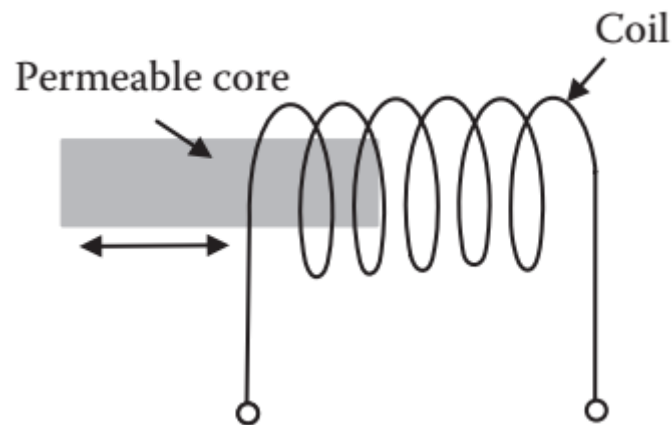
- Podem ser de 3 fios NA ou NF ou de 4 fios;
- Os de 3 fios podem ser PNP ou NPN (quase inexistente atualmente);





Sensor de distância

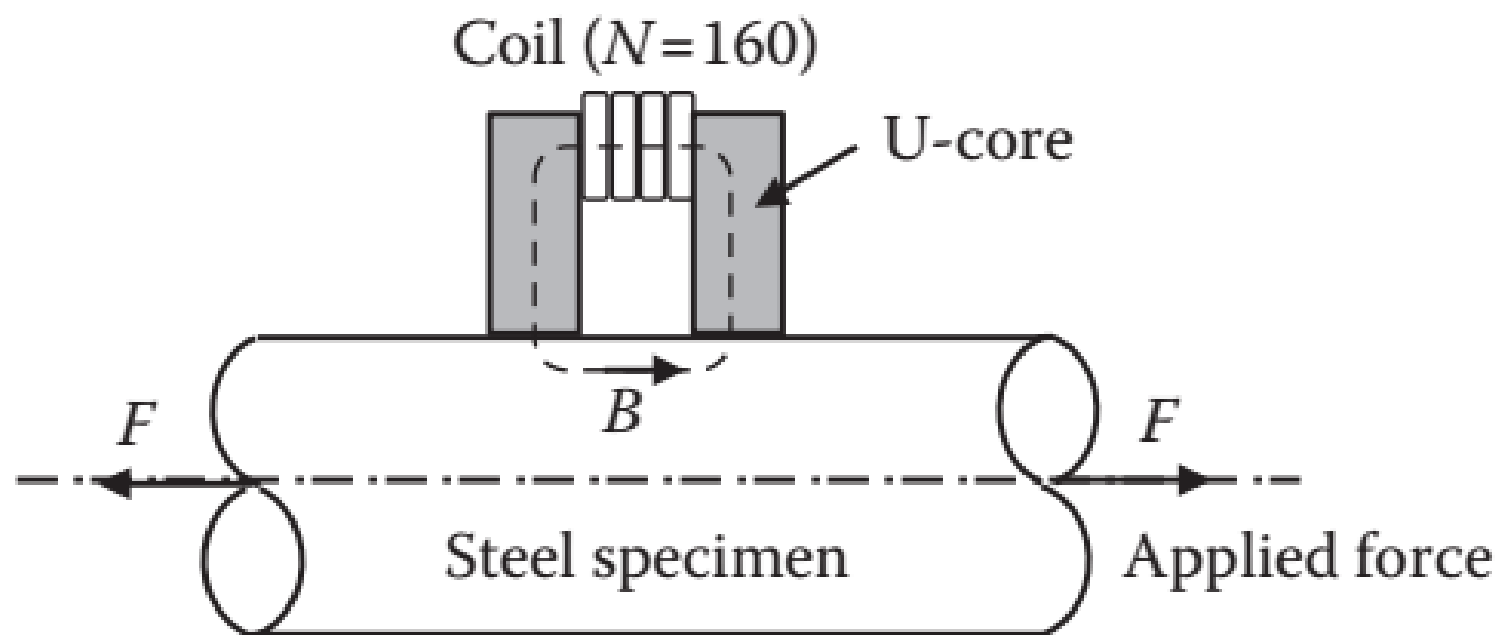
- Quando um núcleo ferromagnético é inserido dentro da bobina, esta aumenta a indutância. Este é um indutor variável,
- Se o núcleo móvel está anexo a um objeto, o sensor é capaz de medir a posição do objeto.





Sensor de força

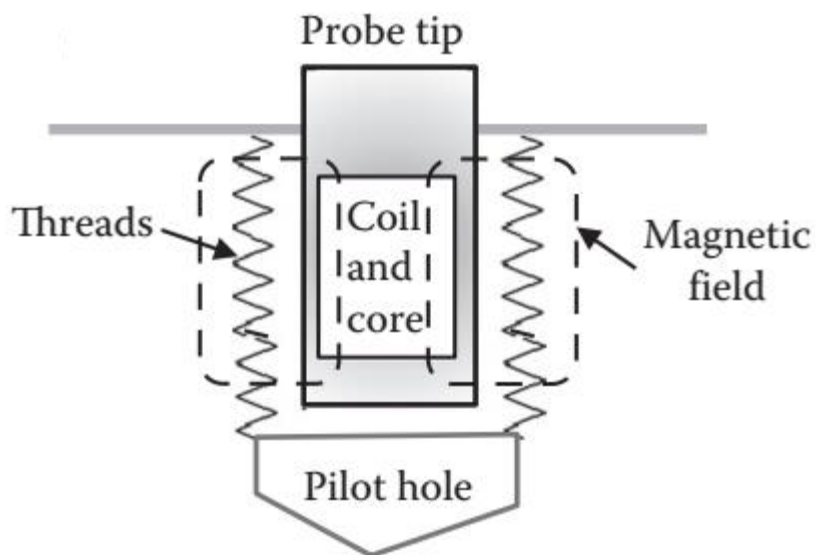
- Quando uma força é aplicada, a permeabilidade do material muda, mudando a impedância e, por consequência, a voltagem.
- Usado na medição de tensões para monitoramento de pontes metálicas.





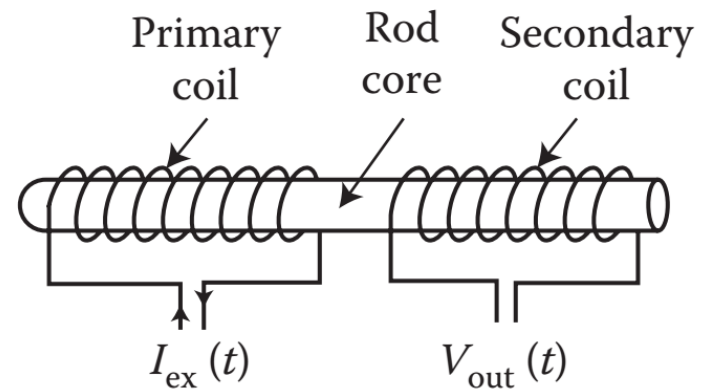
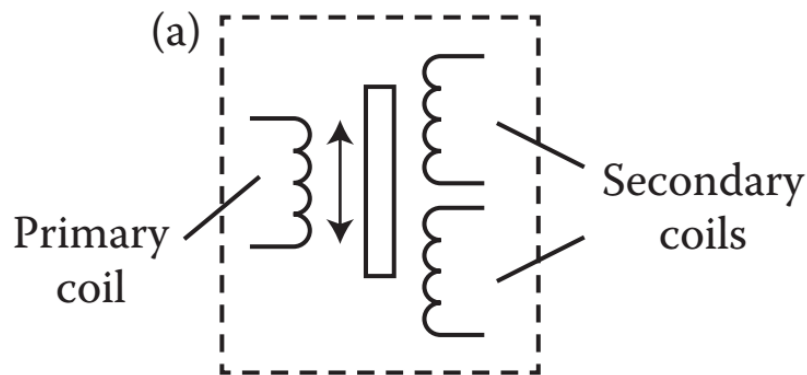
Sensor de rosca

- Detecta se há rosca e qual o estado/qualidade da mesma.





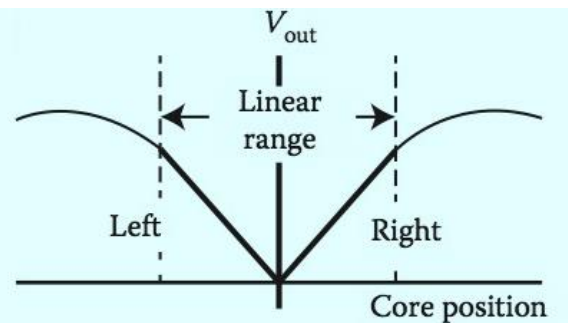
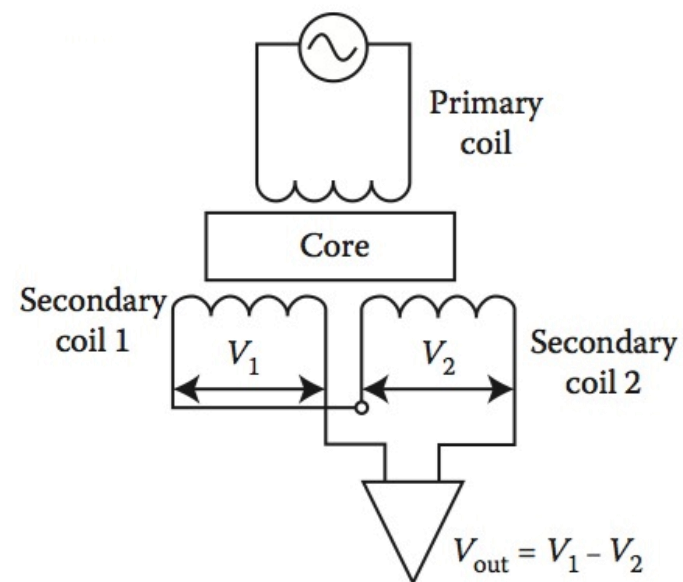
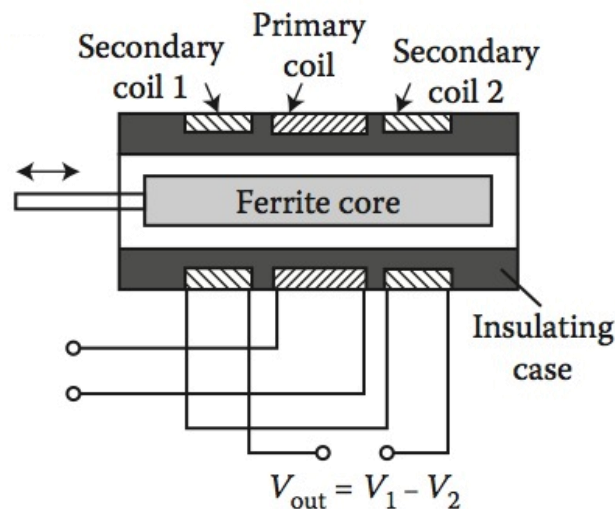
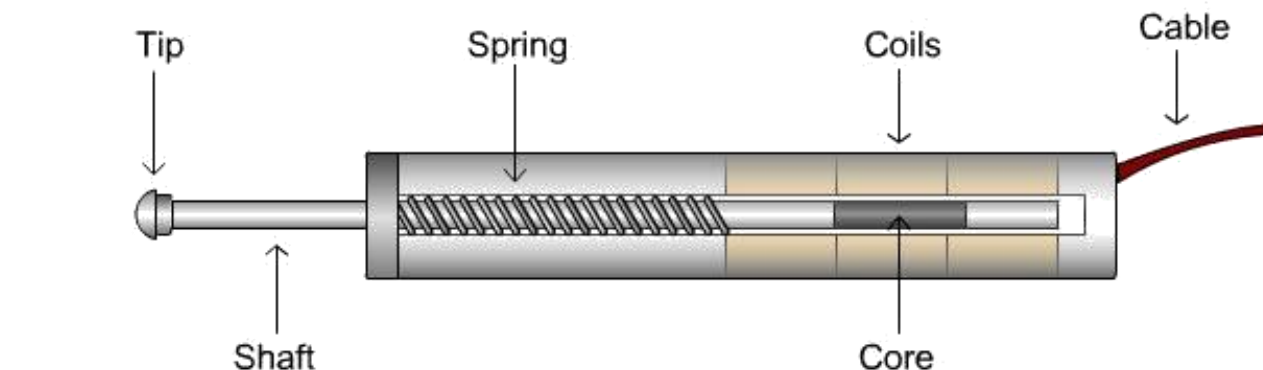
- Um núcleo transformador transfere energia pelo acoplamento entre enrolamentos primário e secundário. O primário é excitado por uma corrente AC, que cria um campo magnético variável. Esse campo induz corrente no secundário, que pode ser medida ou enviada a um circuito de saída.
- Exemplos:
 - LVDT (Linear Variable Differential Transformer): possui enrolamento primário, secundário (1 ou mais) e um núcleo móvel. Mede deslocamento, força, aceleração, pressão;
 - Sensor Fluxgate: usa um núcleo ferro magnético de alta permeabilidade e opera em seu estado de saturação.





LVDT – Linear variable differential transformer

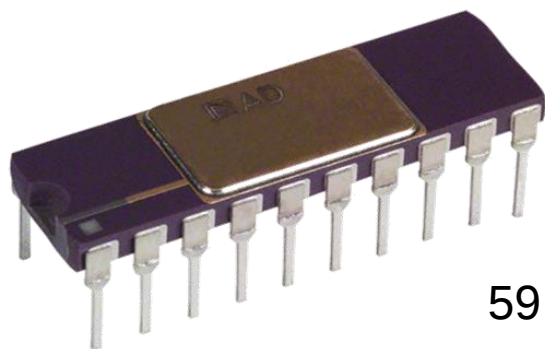
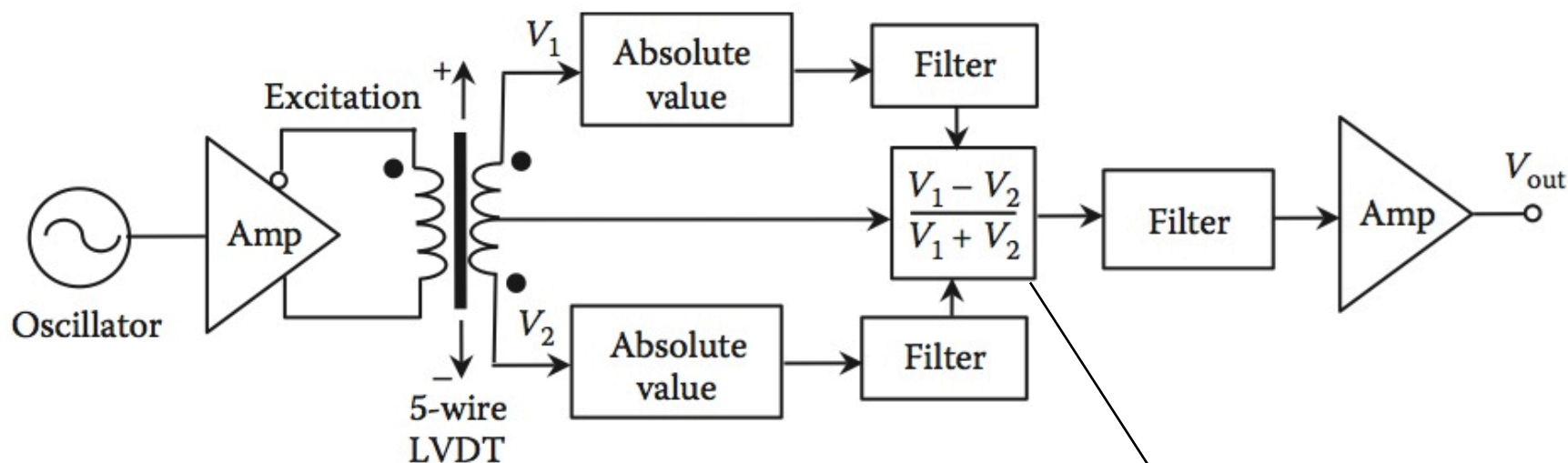
- Aspectos construtivos;





LVDT – Linear variable differential transofmer

- AD598 – condicionador de sinal LVDT para dispositivos analógicos analog devices;



59 dólares

Relação é independente da voltagem de excitação da bobina primária, assumindo-se que a soma das amplitudes de voltagem de saída é constante.



Magnetômetro Fluxgate

