

# Sensores Capacitivos e circuitos

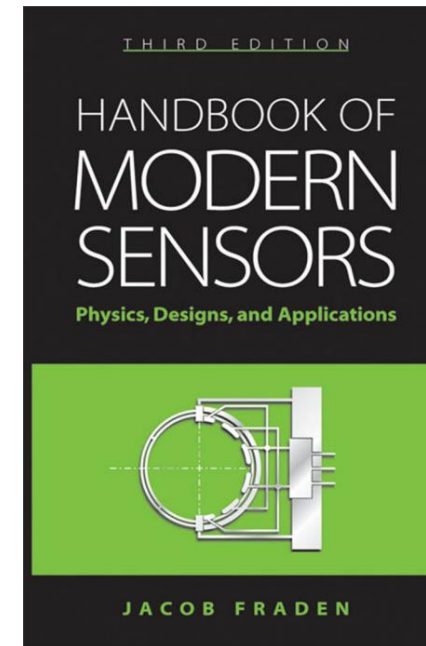
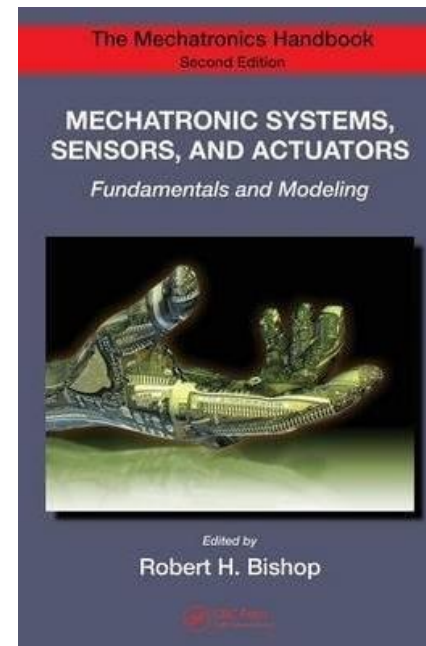
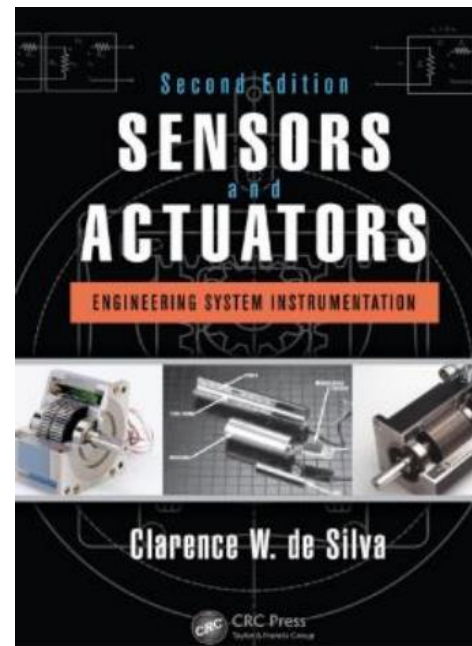
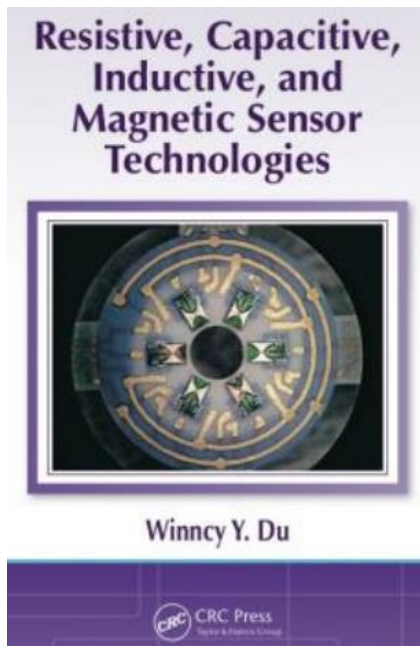
*Profa. Dra. Larissa Driemeier*

*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:



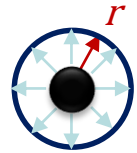


## Trabalho

- O grupo deve montar e apresentar uma apresentação explicando o tema;
- A apresentação deve conter ao menos um vídeo explicativo, um livros base e um artigo. Todos os componentes devem explicar ao menos 1 slide;
- Cada grupo deve propor um **experimento didático** para a melhor assimilação da teoria e da aplicação da mesma pela sala. Este deve conter todo o detalhamento do projeto (peças, circuitos, preços, etc) além do guia de laboratório;
- Se o grupo apresentar o experimento “ao vivo” em sala de aula, ganhará **+0,1** na nota da prova. Se apresentar um vídeo do experimento funcionando, ganhará **+0,05**;
- Se mais de 2 grupos apresentarem ao vivo os experimentos, haverá uma votação na sala e o campeão ganhará **+0,15** na nota da prova;
  - **Temas:**
    1. Sensor Hall;
    2. Sensor magnetoresistivo;
    3. Sensor Magnetoelástico;
    4. Sensor NMR (Nuclear magnetic resonance) /MRI(Magnetic Resonance Imaging);
    5. Sensor Barkhausen;
    6. Sensor Wiegand.



**Campo elétrico** é o campo de força provocado pela ação de cargas elétricas, ou por um sistemas delas.



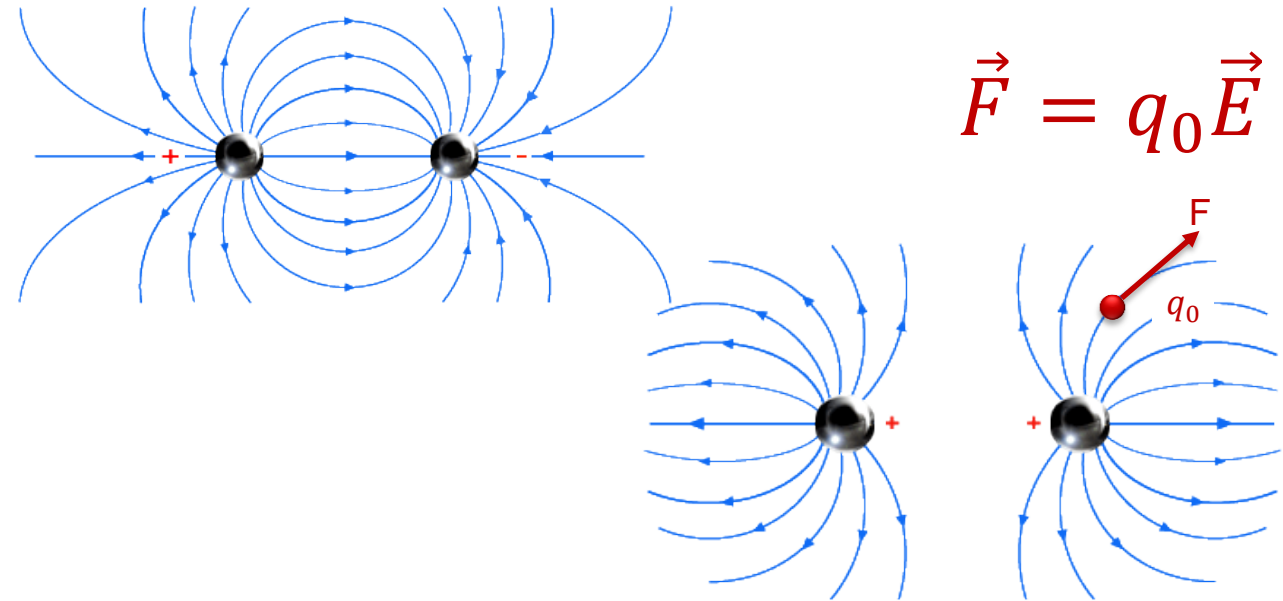
$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{k|Q|}{d^2} \hat{r} \text{ em N/C}$$

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q||q|}{r^2} \hat{r}$$

$$1/4\pi\epsilon_0 \cong k$$

- Q:** carga que gera o campo elétrico [C];
- q:** carga de prova [C];
- d:** distância entre as cargas [m];
- k:** a constante elétrica do meio [ $9.0e9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ];
- $\hat{r}$ :** vetor que indica a direção em que aponta a força elétrica;
- $\epsilon_0$ :** a permissividade do espaço livre ( $8.854e-12 \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$ ).

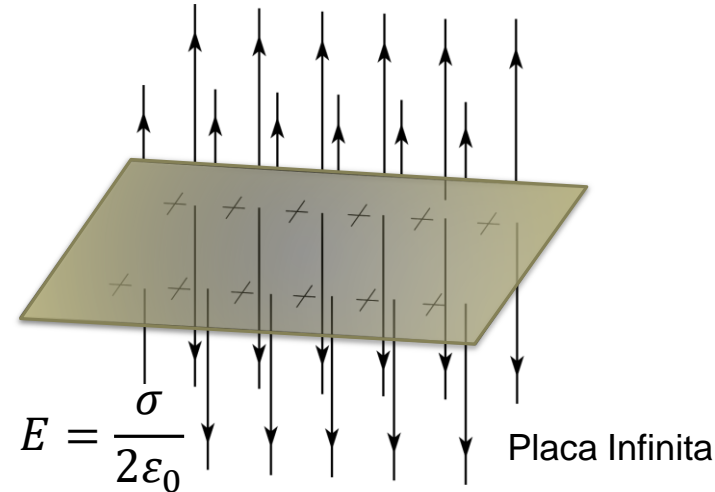
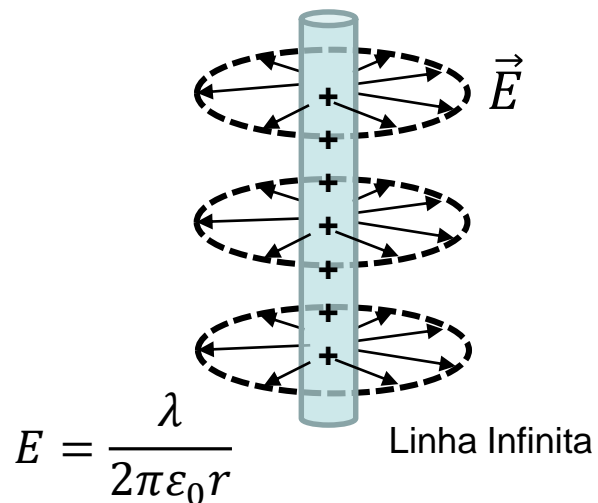


$$\vec{F} = q_0 \vec{E}$$

Um campo elétrico só pode ser detectado a partir da interação do mesmo com uma carga de prova. Se não existir interação com a carga, significa que o campo não existe naquele local.



**Campo elétrico** se comporta diferentemente dependendo da geometria do condutor carregado eletricamente.



O Campo elétrico é mais intenso em geometrias de menor curvatura

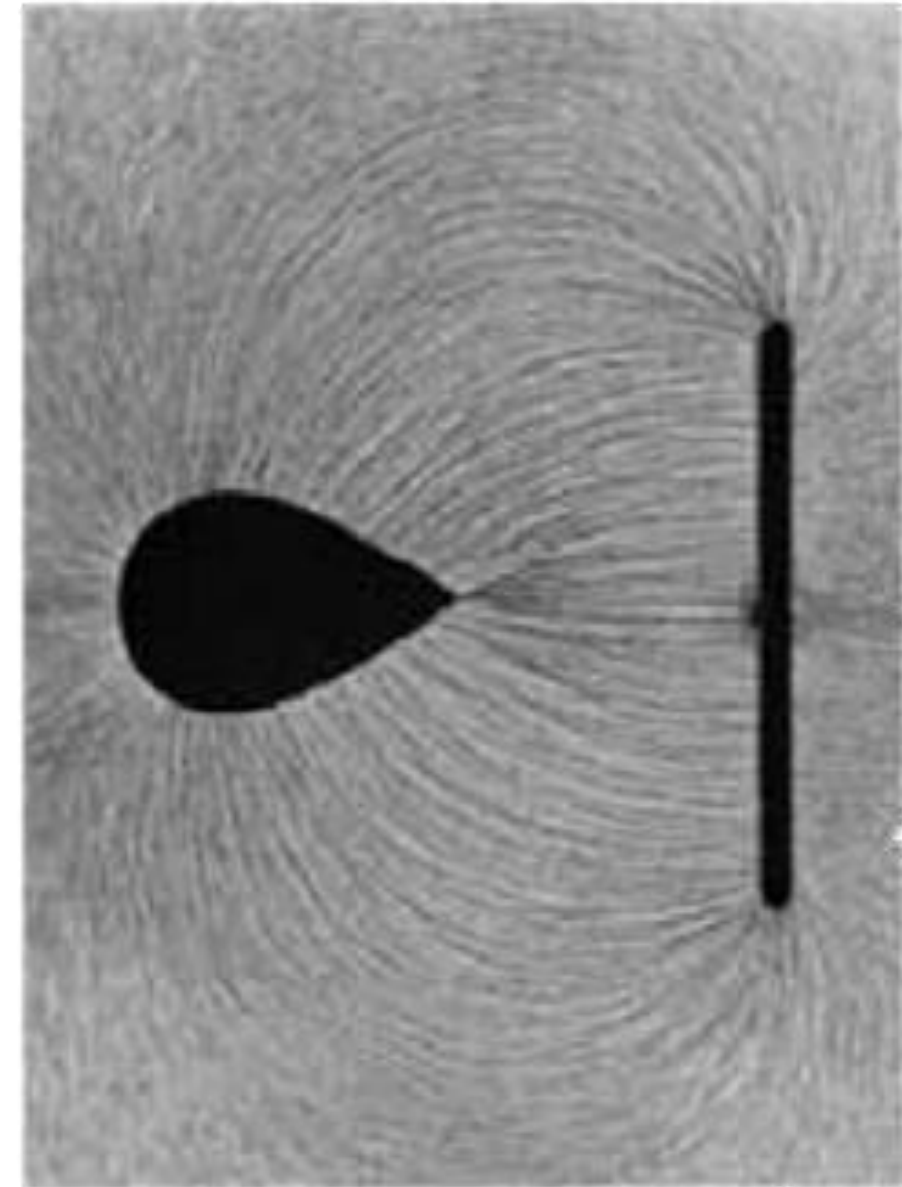
$\sigma$ : carga por unidade de área [ $\text{C}/\text{m}^2$ ]

$\lambda$ : carga por unidade de comprimento [ $\text{C}/\text{m}$ ]



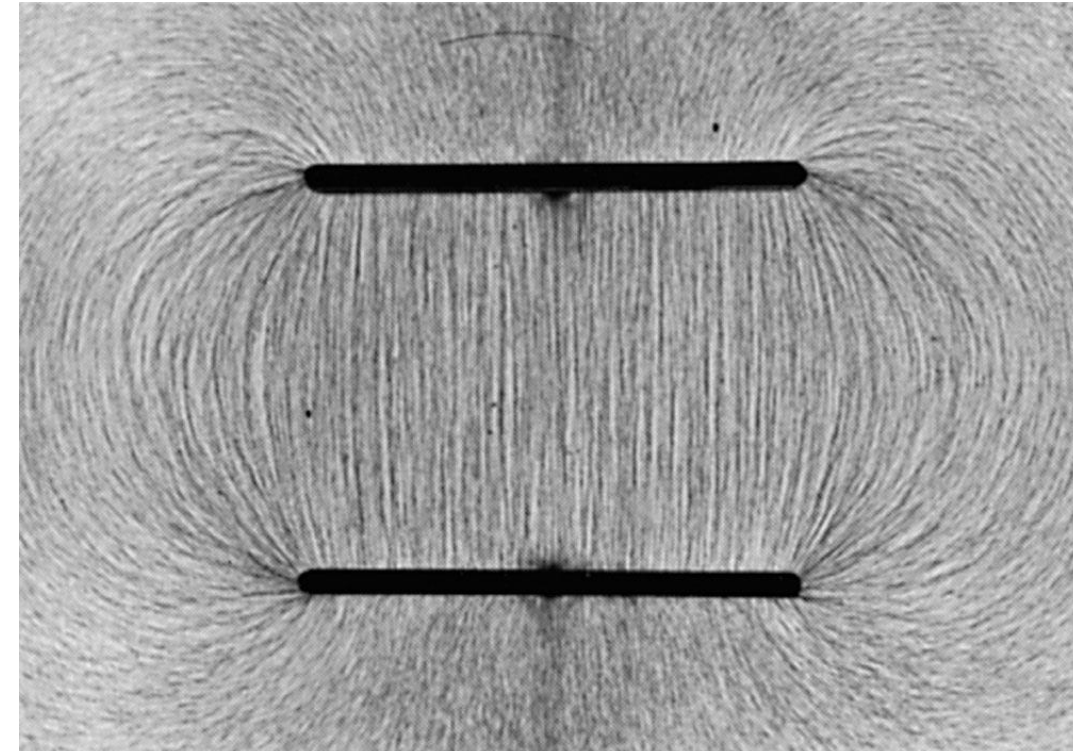
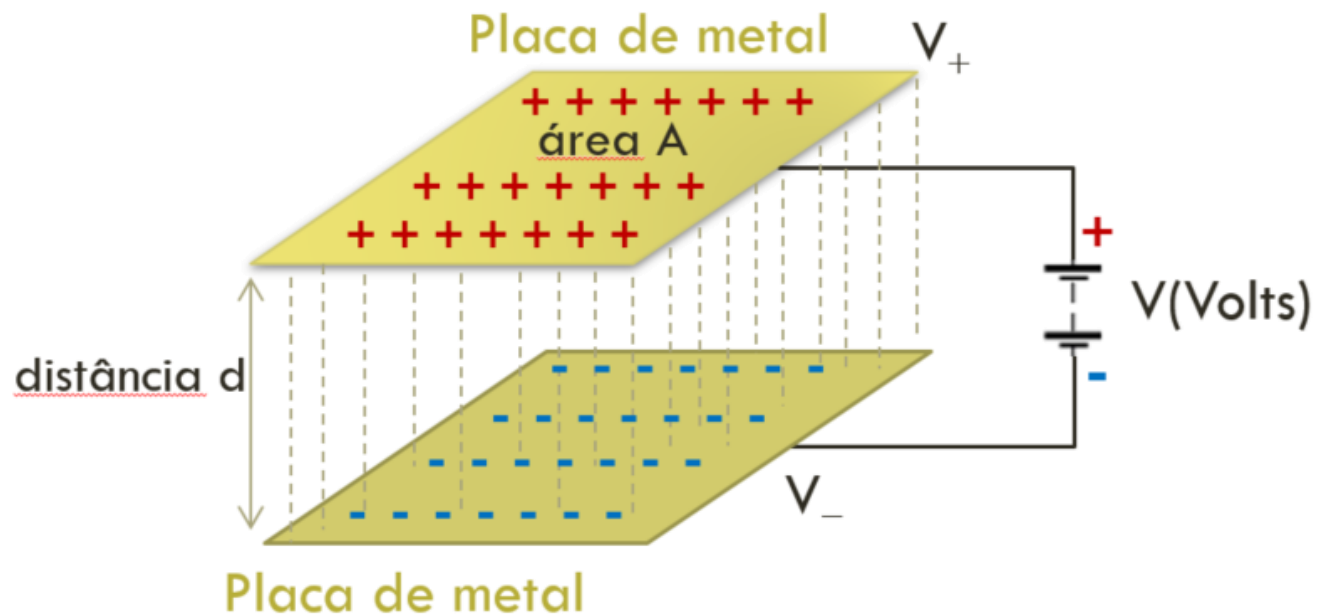
A figura mostra o padrão do campo elétrico de um placa plana colocada próxima a um condutor no formato de gota com carga oposta. As limalhas de ferro suspensas em óleo se alinham com o campo elétrico.

Pode-se notar uma maior intensidade na parte de menor curvatura do condutor em formato de gota.





No caso de placas paralelas, o campo elétrico é constante e paralelo, sendo fácil de calcular. Além disso, a geometria é simples, apenas a área e distância que separa as placas são importantes.



© 2004 Thomson - Brooks/Cole



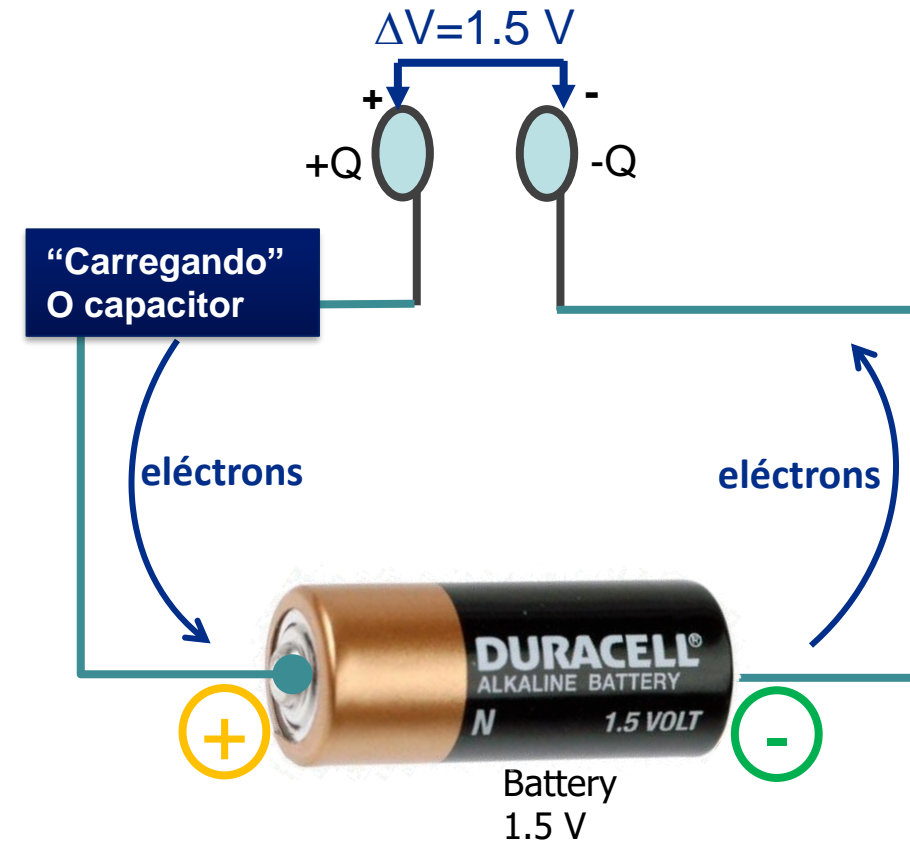
Um capacitor é um sistema constituído por dois condutores separados (armaduras). Inicialmente os condutores estão descarregados.

Os condutores são ligados a uma bateria, que estabelece um campo eléctrico no fio. O condutor que se liga ao terminal positivo perde elétrons para a bateria. Quando elétrons são transferidos de um condutor para outro, dizemos que o capacitor está sendo carregado.

Como o capacitor não permite condução, as cargas ficam armazenadas nas placas, e um campo eléctrico surge entre elas. Como resultado, há um aumento da energia potencial eléctrica do circuito, que se originou a partir da energia química na bateria.

Quando o equilíbrio é alcançado,

- Os condutores possuem cargas iguais de sinais opostos;
- carga líquida no capacitor permanece nula;
- a diferença de potencial,  $V$ , é fixa entre os condutores e igual à voltagem da bateria.







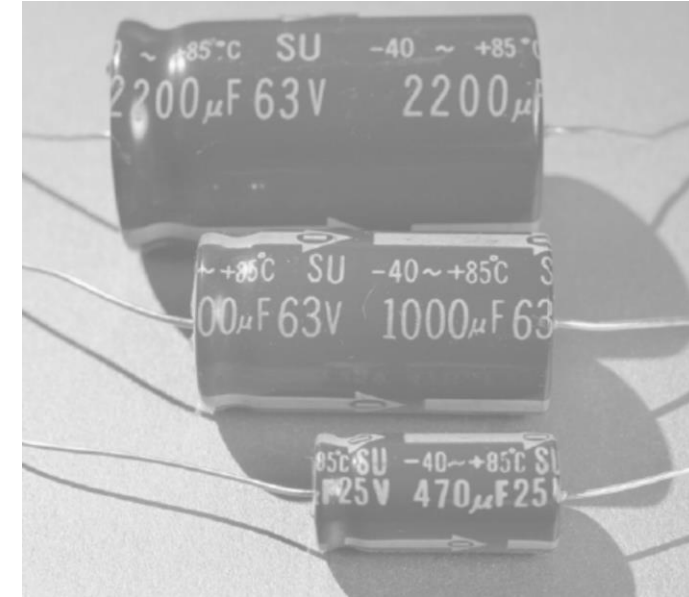
O capacitor é um componente eletrônico passivo que armazena energia na forma de campo elétrico. A Capacitância, tipicamente definida num arranjo de placas paralelas, é definida em função da carga armazenada por

$$C = \frac{Q}{V}$$

No qual  $C$  é a capacitância (em Farads, F),  $Q$  é a carga (em Coulomb, C) e  $V$  é a diferença de voltagem entre as duas placas (em volts, V).  $V$  pode ser expresso em função do trabalho realizado por uma carga de teste positiva  $Q$ . Quando essa se move da placa positiva para a placa negativa por:

$$V = \frac{\text{trabalho}}{\text{carga}} = \frac{Fd}{Q} = Ed$$

No qual  $E$  é o campo elétrico (em volts por metro,  $V \cdot m^{-1}$  ou newton por coulomb,  $N \cdot C^{-1}$ ) entre as duas placas paralelas,  $F$  é a força (em newton, N), e  $d$  é a distância entre as duas placas.



**A capacitância é, portanto, a medida da capacidade de armazenar energia de um dado capacitor para uma dada ddp aplicada.**



A capacitância é dada em Coulomb por volt,

$$1F = \frac{1C}{1V}$$

Essa unidade é o Farad (F), em homenagem ao físico inglês **Michael Faraday** (1791 – 1867).

Entretanto, 1 Farad é um valor muito alto de capacitância. Tipicamente, a capacitância é dada em  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6}$  F), nF ( $10^{-9}$  F), ou pF ( $10^{-12}$  F).





Considere o circuito com fonte e capacitor ao lado.

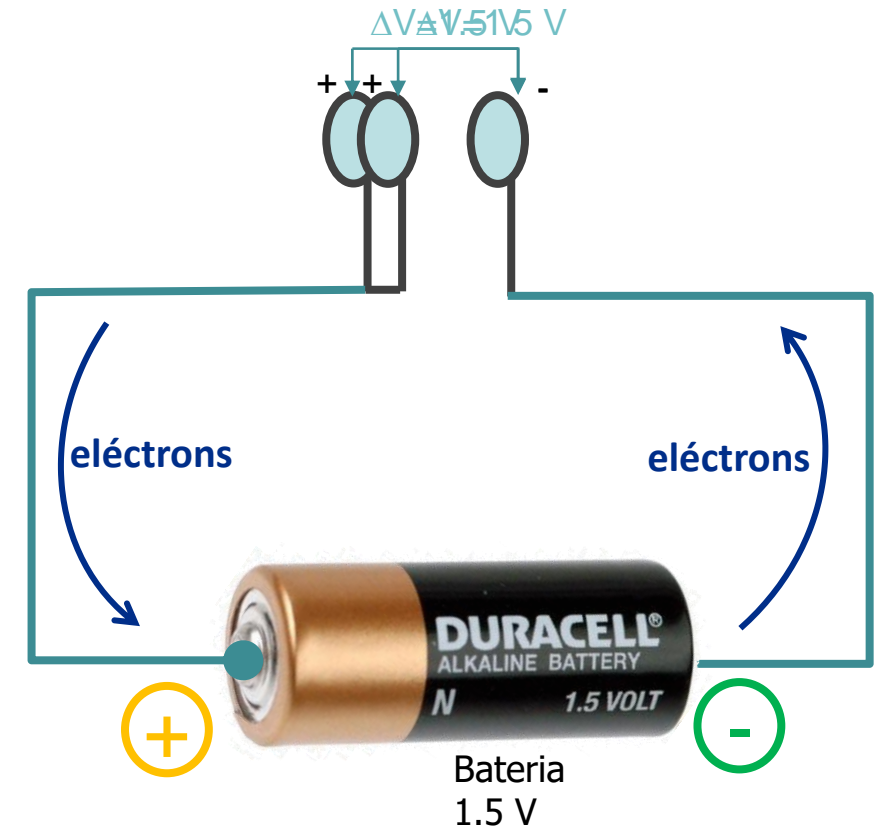
O que acontece quando os dois condutores são aproximados?

Eles ainda estão ligados à bateria, de modo que a diferença de potencial não pode mudar.

$$V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Uma vez que a distância entre eles diminui, o campo  $E$  tem a aumentar.

Conclui-se que estes dois condutores devem armazenar mais carga. Isto é, a capacitância aumenta.



$$C = \frac{Q}{V}$$

Diagram illustrating the relationship between capacitance (C), charge (Q), and voltage (V). The equation  $C = \frac{Q}{V}$  is shown in a yellow box. Arrows indicate that as Q increases (labeled 'aumenta'), C increases, and as V increases (labeled 'constante'), C decreases.

# Capacitância para placas paralelas

O campo elétrico pode ser definido por:

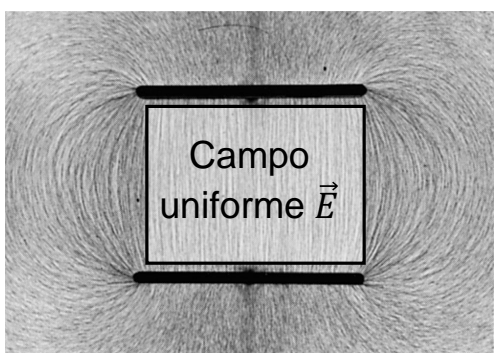
lei de Gauss  $\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q$  de modo  $q = \epsilon_0 EA$

$\vec{E}$  e  $d\vec{A}$  paralelos

Se você integrar o campo elétrico ao longo da distância  $d$ , você encontra a diferença de potencial

$$V = V_+ - V_- = - \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Para um campo elétrico uniforme,  $V = Ed$



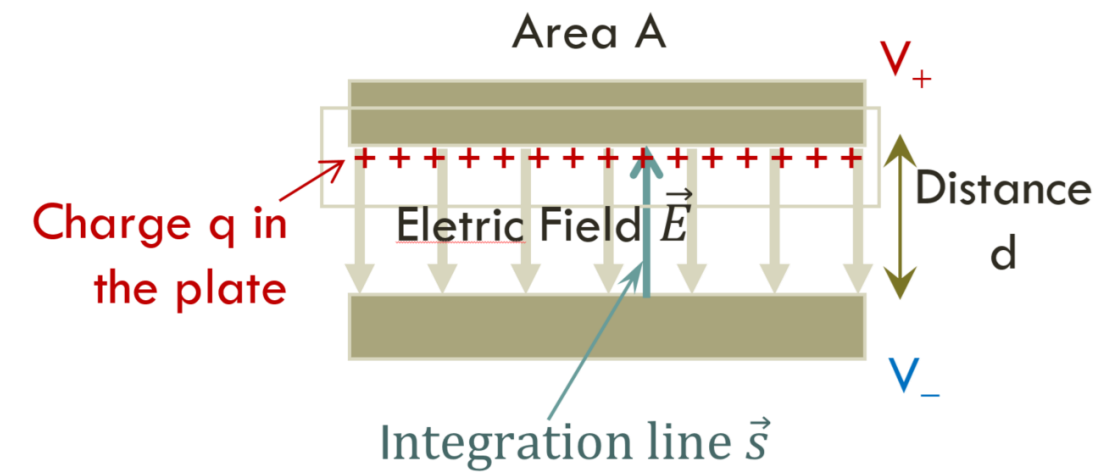
Dado que  $C = \frac{q}{V}$

$q = \epsilon_0 EA$

$V = Ed$

$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

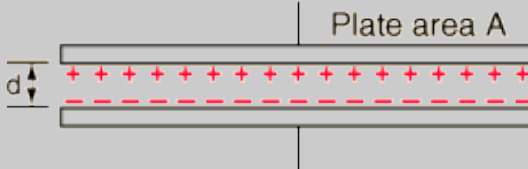
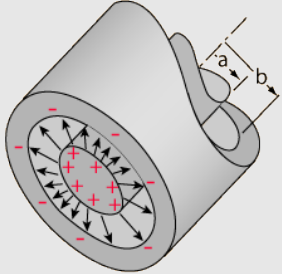
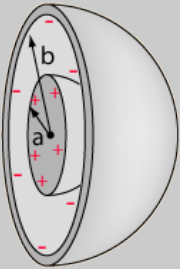
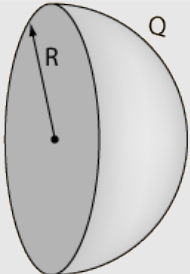
As cargas irão de acumular nas superfícies internas das placas do capacitor ( $\pm\sigma = \pm\frac{q}{A}$ ).



Para ter uma capacitância grande, torne a área  $A$  grande e a distância  $d$  pequena. Nota-se que a capacitância só depende de *fatores geométricos* do capacitor.

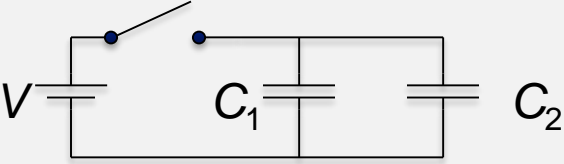
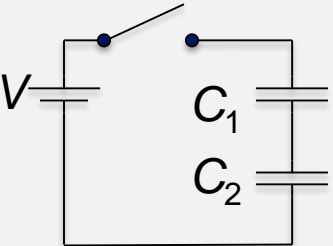
$[\epsilon_0 = 8,85410^{-12} C^2/Nm^2 = 8,854 pF/m]$  permissividade do vácuo



Modelo capacitor	Capacitância	Geometria
Placas paralelas	$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$	
Cilindro com cilindro interno	$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}$	
Esférico com esfera interna	$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a}$	
Esfera isolada	$C = 4\pi\epsilon_0 R$	

$$\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$$



<b>PARALELO</b>		O que caracteriza esse tipo de associação é a igualdade de potencial entre as placas dos capacitores. Portanto, $Q_1 = C_1V$ $Q_2 = C_2V$	$C_P = C_1 + C_2$
<b>SÉRIE</b>		Na associação em série o módulo das cargas acumuladas nas placas de todos os capacitores são iguais. Portanto, $Q_1 = Q_2 = Q = C_1V_1 = C_2V_2$	$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

# Mas e se colocarmos ao entre os condutores do capacitor?



O que acontece se substituirmos as pequenas esferas condutoras por grandes placas condutoras?

Para placas pequenas, a capacidade é pequena. Mas placas grandes poderão armazenar muito mais carga, de modo a aumentar a capacitância!!

E o material entre as placas...?!?



# O que devo colocar entre as placas de um capacitor ???



É difícil colocar duas placas próximas - a menos que coloquemos algo entre elas!

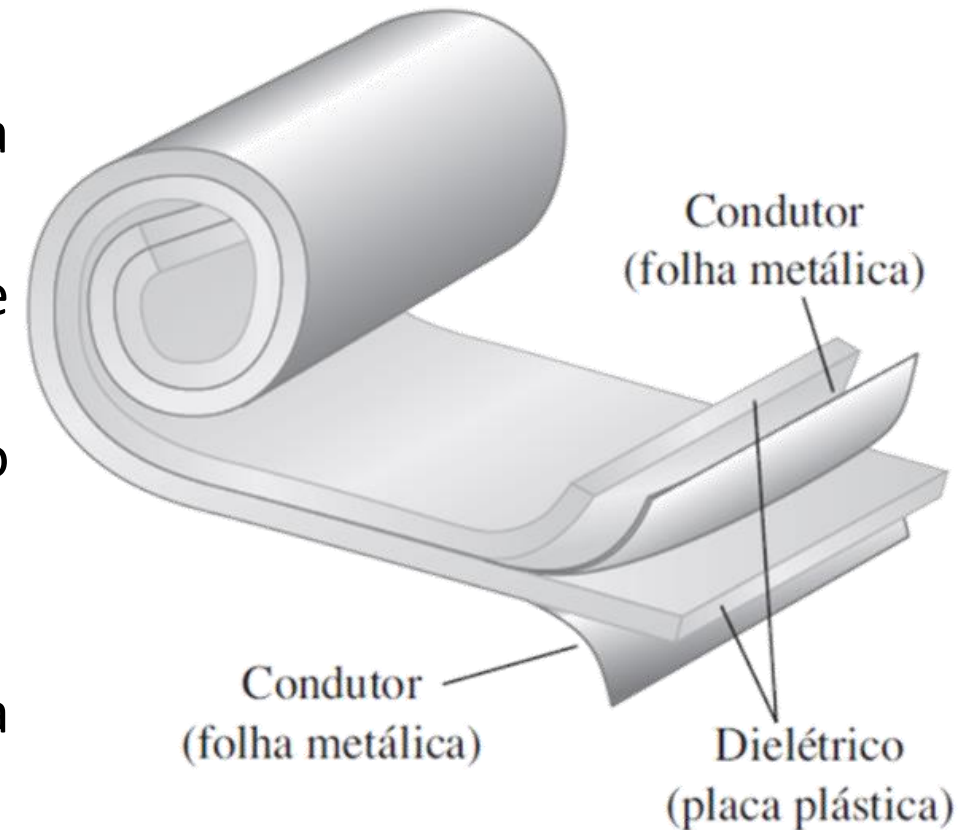
Quando elas se carregam, apresentam também uma força de atração grande.

Colocar um material isolante - um **dielétrico** - permite que você coloque-as muito próximas uma da outra.

Quanto mais próximas, maior o campo elétrico e então maiores serão as cargas...

**$C=Q/V$ , então  $C$  fica maior!**

Ou seja, quanto mais perto estiverem as placas, maior a capacitância.





# Materiais dielétricos

$\epsilon_0$  é permissividade do vácuo (com índice zero).

Outros materiais (água, papel, plástico, mesmo ar) têm diferentes permissividades  $\epsilon_r = \kappa\epsilon_0$ . O  $\kappa$  é a **constante dielétrica**, e é um número sem unidade. Para ar,  $\kappa=1,00054$  (portanto, consideramos ar o mesmo que para o *vácuo*.)

Em todas as equações o  $\epsilon_0$  pode ser substituído por  $\kappa\epsilon_0$ , ao considerar outros materiais (chamados dielétricos).

O bom nisso tudo é que podemos aumentar a capacitância de um capacitor de placas paralelas, preenchendo o espaço com um dielétrico:

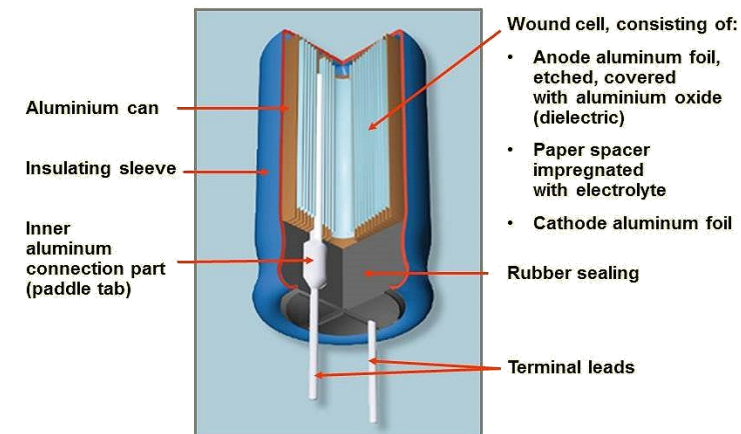
$$C' = \frac{\kappa\epsilon_0 A}{d} = \kappa C$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$$

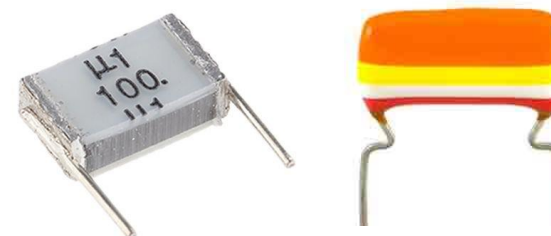
## cerâmicos



## eletrolítico



## polyester



## mica

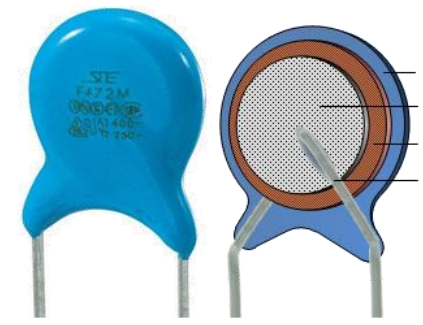


# Materiais dielétricos

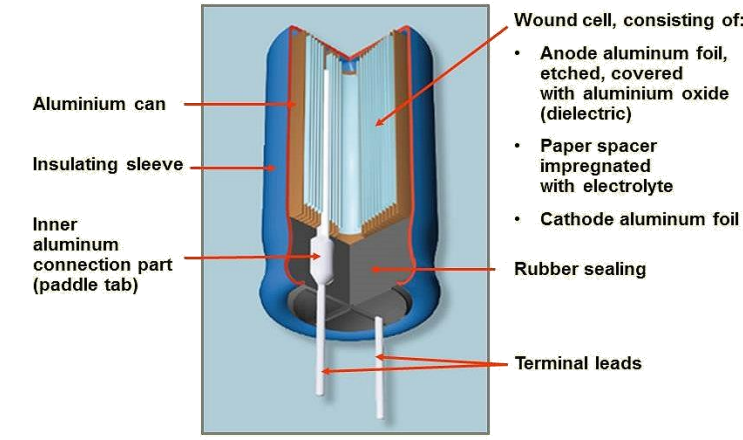
$$\epsilon_r = \kappa \epsilon_0 \quad \epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$$

Material	Constante dielétrica $\kappa$
Vácuo	1
Ar (1 atm)	1,00054 $\approx$ 1,0
Poliestireno	2,6
Papel	3,5
Óleo de Transformador	4,5
Pirex	4,7
Mica	5,4
Porcelana	6,5
Silício	12
Germânio	16
Etanol	25
Água a 20º C	80,4
Água a 25º C	78,5
Cerâmica	130

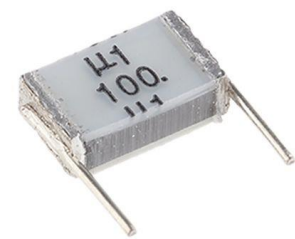
## cerâmicos



## eletrolítico



## polyester



## mica





Outro efeito do dielétrico é limitar a diferença de potencial que pode ser aplicada entre as placas de um capacitor a certo valor  $V_{\text{máx}}$ . Se este valor for ultrapassado substancialmente, o material dielétrico se romperá originando um caminho condutor entre as placas.

Rigidez dielétrica: é a intensidade máxima do campo elétrico que um dielétrico pode suportar sem tornar-se um condutor de eletricidade (“ruptura dielétrica”).

<b>Material</b>	<b>Rigidez dielétrica (kV/mm)</b>
Ar (1 atm)	3
Poliestireno	24
Papel	16
Pirex	14
Titanato de Estrôncio	8



A energia armazenada em um capacitor pode ser medida como o trabalho necessário para carregá-lo com uma carga  $Q$  enquanto aplica-se uma diferença de potencial  $V$  entre as placas. Da definição de potencial elétrico, a energia por unidade de carga é dada por:

$$V = \frac{U}{q} \text{ (J/C)}$$

Portanto, para adicionar uma quantidade infinitesimal de carga  $dq$ , o trabalho necessário será igual à variação na energia potencial elétrica

$$dU = dW = dqV = dq \frac{q}{C}$$

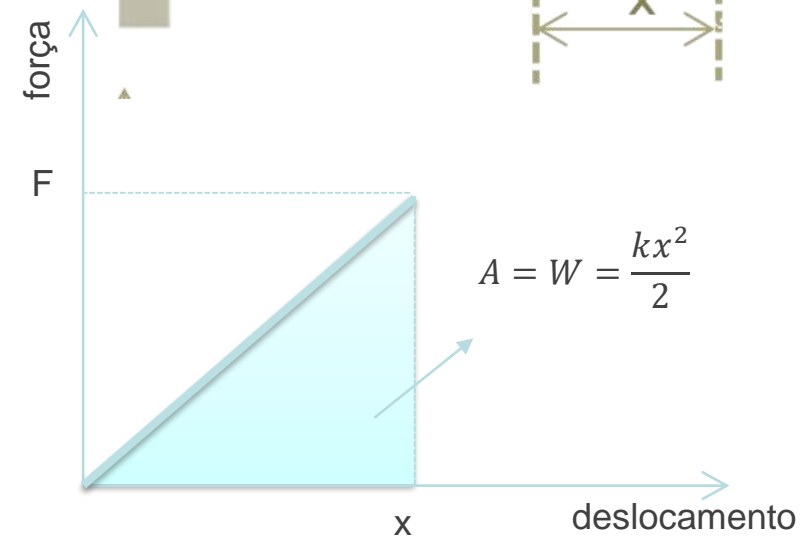
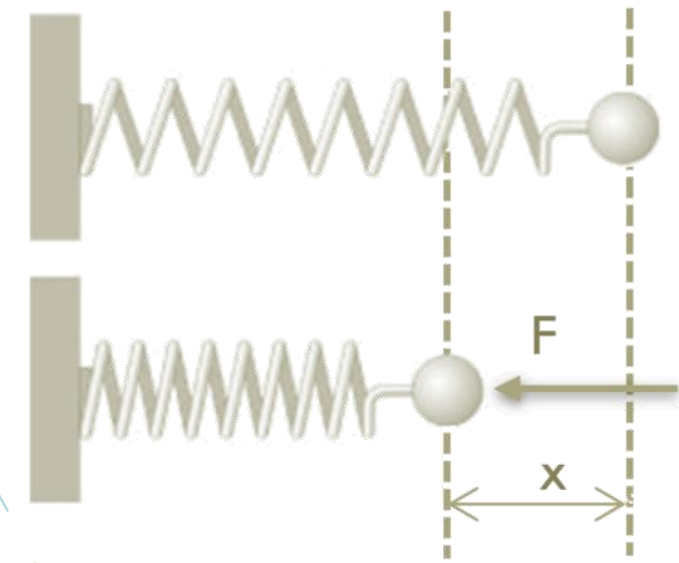
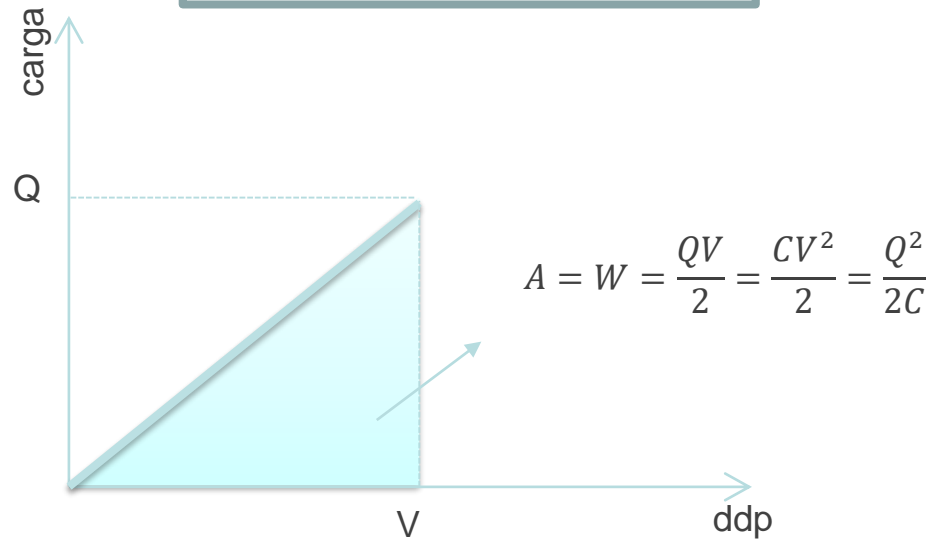
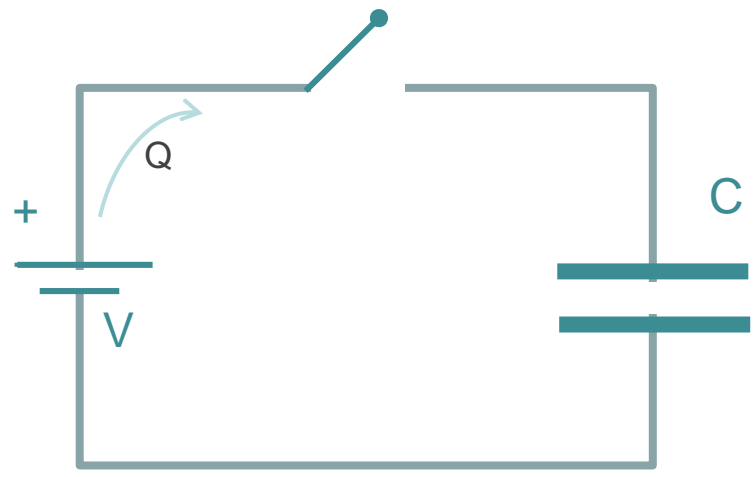
O trabalho total para carregar o capacitor com carga  $Q$  será então

$$U = \frac{1}{C} \int_0^Q q \, dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2$$



# Energia armazenada no capacitor

A energia potencial elétrica fornecida a um capacitor quando ele é carregado é análoga à energia potencial elástica fornecida a uma mola quando ela é deformada.





Como visto anteriormente, a energia armazenada em um capacitor pode ser calculada por

$$U = 1/2 CV^2$$

Ou seja, a energia total armazenada em um capacitor de placas paralelas é dada por

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{\epsilon_0 A}{2d} V^2$$

Se o volume entre as placas, no qual o campo elétrico está concentrado, pode ser calculado por  $v = Ad$ , a densidade de energia  $u$  pode ser expressa por

$$u = \frac{U}{v} = \frac{\epsilon_0 A}{2dAd} V^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{V}{d}\right)^2$$

Entretanto, como  $V = \int \vec{E} \cdot d\vec{s} = Ed$  para um capacitor de placas paralelas, a energia armazenada no campo elétrico pode ser calculada por

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$



Como o trabalho feito para colocar uma carga positiva a mais na placa carregada positivamente vai contra o campo elétrico entre as placas, podemos dizer que a energia fica armazenada nesse campo elétrico.

O campo elétrico ocupa certo volume no espaço (dependendo da geometria do capacitor), então podemos concluir que deve haver uma densidade de energia por unidade de volume no espaço entre as placas do capacitor.

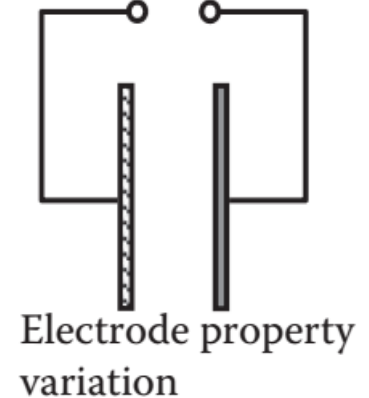
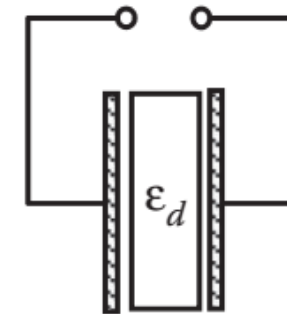
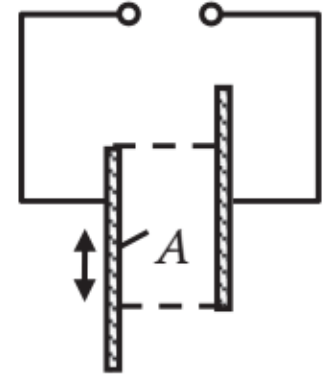
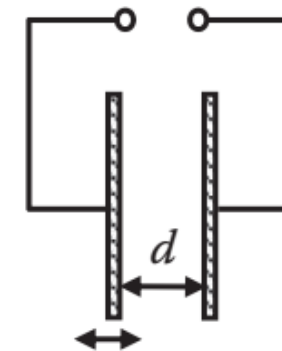


Pode-se, portanto, alterar a capacitância a partir das 3 principais propriedades do capacitor:

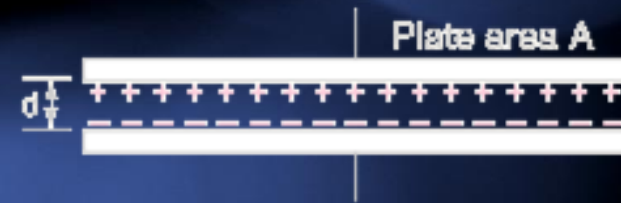
1. Espaço entre os condutores – utilizados quando o deslocamento é do tamanho ou menor que o eletrodo;
2. Tamanho (área) dos condutores – utilizados quando o deslocamento é maior que o tamanho do eletrodo;
3. Material entre os condutores.

Um quarto modo, menos comum, é variar as propriedades de uma das placas.

Com base na geometria e materiais, portanto, alguns capacitores são melhores em armazenamento de energia do que outros.







$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Sensores Capacitivos – variação da distância  $d$

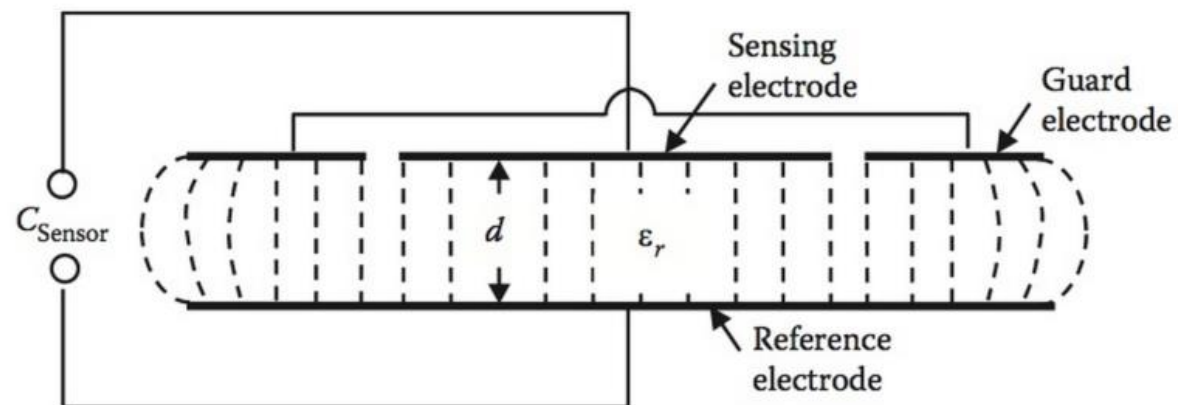
# Eletrodo de guarda e sensibilidade

O **eletrodo de guarda**, também conhecido como **anel de guarda**, delimita a área de medição do sensor ativo de um sensor de deslocamento capacitivo.

O eletrodo de guarda garante um campo elétrico homogêneo até a borda da área de medição ativa do sensor, sendo um pré-requisito para o deslocamento como princípio de medição. Além disso, o eletrodo de guarda lida com a capacitância parasita e evita a interferência de outros circuitos.

Quando distância de separação das placas é pequena em comparação com a área da placa, a dispersão do campo elétrico nas extremidades é desprezível.

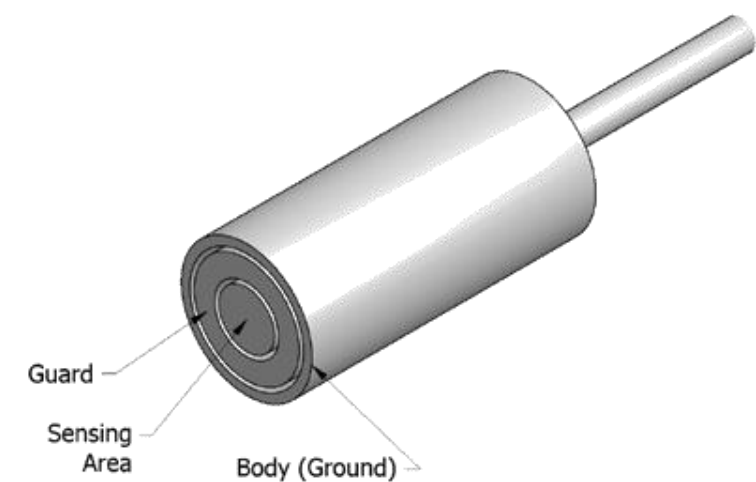
A porcentagem de mudança da capacitância é proporcional à porcentagem de mudança da distância.



$$C = \frac{\epsilon_r A}{x}$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{\epsilon_r A}{x^2}$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dx}{x}$$



$$\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$$

# Tipos de sensores de 1 placa e propriedades

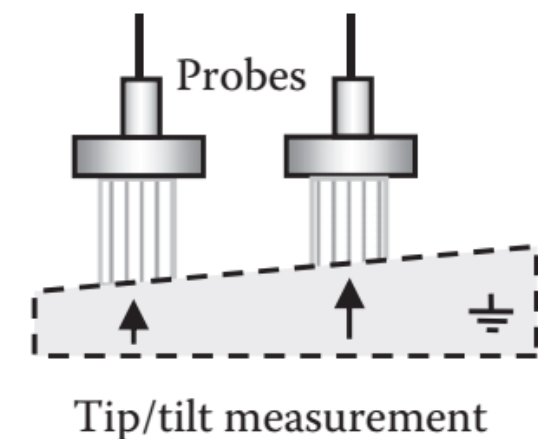
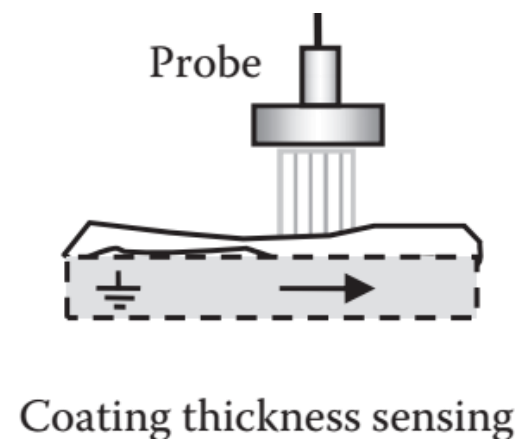
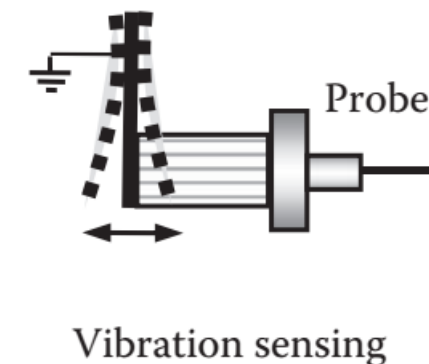
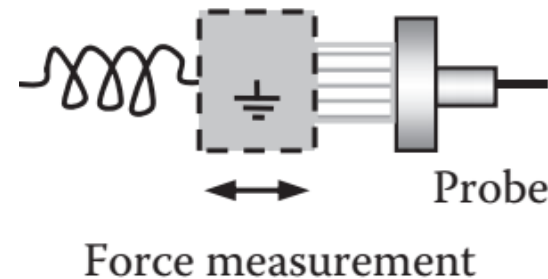
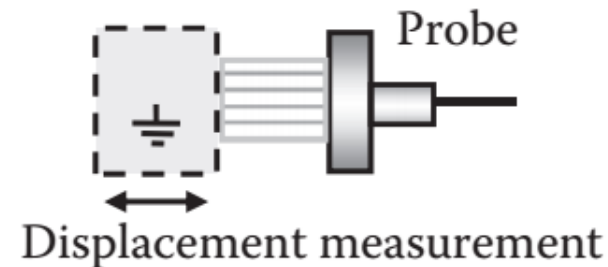
Nos sensores de uma placa, o alvo deve ser de material condutor (resistência inferior a  $100\text{ k}\Omega$ ) e fará a função de segunda placa.

O alvo deve estar aterrado para evitar ruídos.

Este tipo de sensor capacitivo possui **alta resolução** e **alta acurácia** (melhor que  $1\text{ nm}$ ) em larguras de banda entre  $1$  e  $100\text{ kHz}$ .

Apesar da performance do sensor depender do seu tamanho – quanto maior o sensor, maior o fundo de escala – deve-se notar que sensores maiores implicam em mais ruído e aumentam a faixa de não linearidade.

Geralmente são cilíndricos. Como *thumbrule*, o diâmetro do sensor deve ser pelo menos 4x menor que a faixa de detecção, além de estar entre  $0,5$  e  $10\text{ mm}$ .

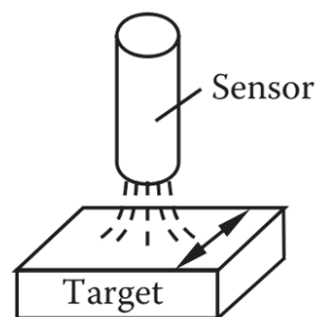


# Escolha do tamanho dos sensores de 1 placa

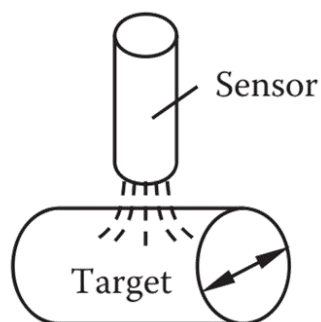
Suponha que se deseja medir a superfície irregular de uma placa. Os sensores capacitivos irão fazer uma média da distância ao alvo.

Desta forma, sensores de diâmetro menor possuem maior capacidade de distinguir pequenas variações de geometria.

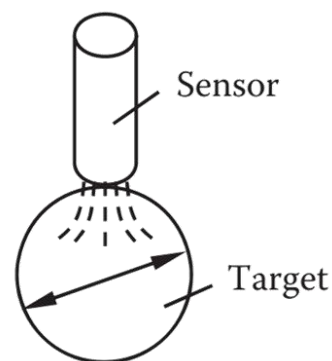
A figura abaixo trás dicas de como escolher seu sensor baseado no alvo a ser medido.



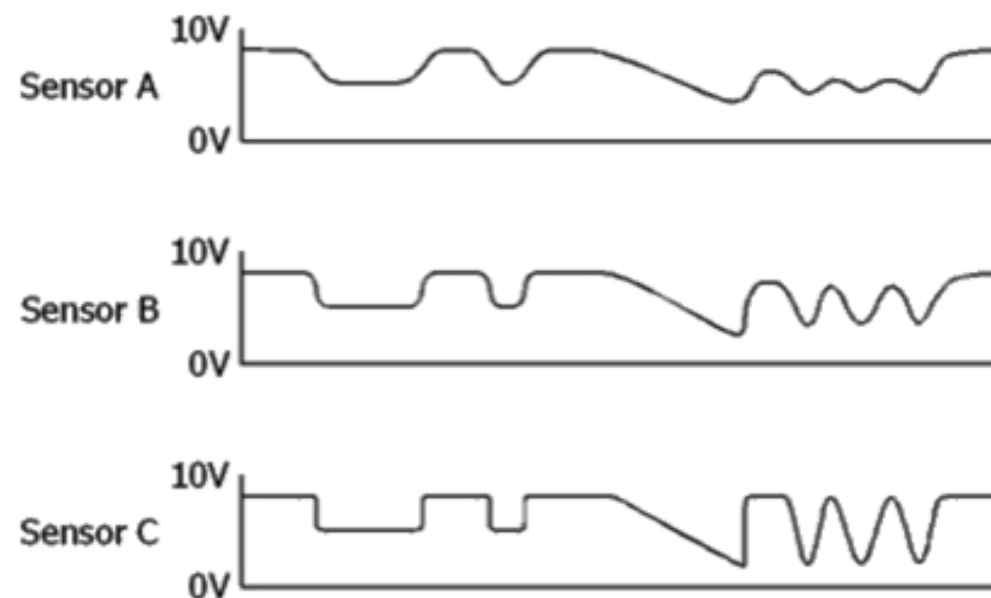
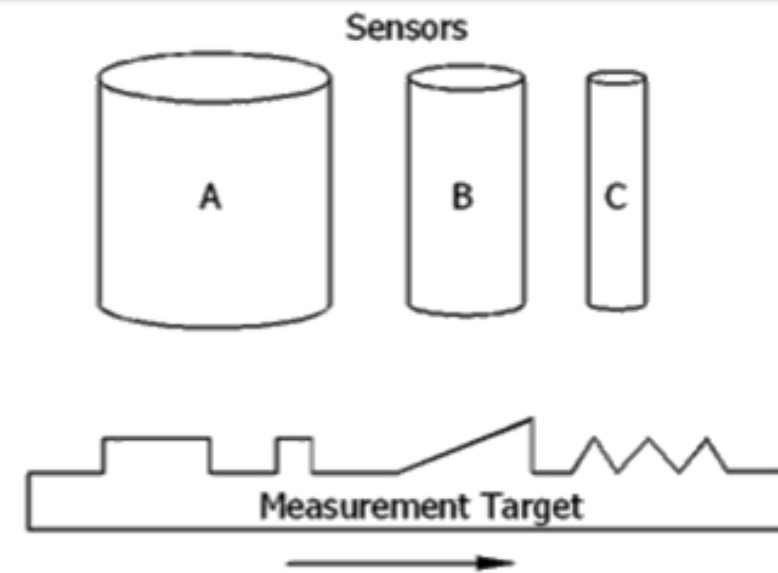
Flat surface:  
Maximum sensor diameter =  $0.6 \times$  Minimum target detecting surface dimension



Cylindrical surface:  
Maximum sensor diameter =  $0.25 \times$  Minimum target dimension



Spherical surface:  
Maximum sensor diameter =  $0.2 \times$  Minimum target dimension





# Resposta em altas frequências de sensores de 1 placa

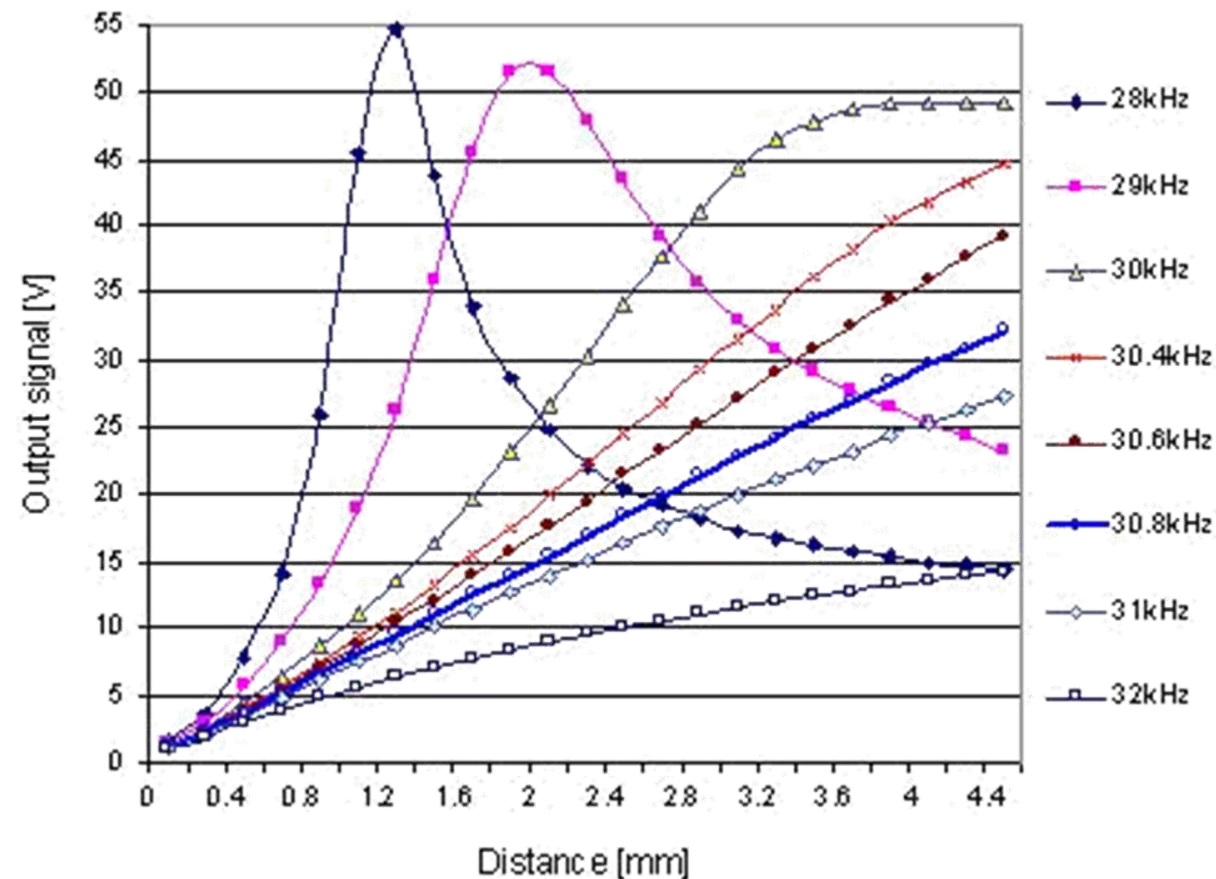
O desempenho do sensor capacitivo está relacionado com a alteração na capacitância/impedância do sensor ao longo do intervalo calibrado de movimento de alvo. A faixa de medição aumenta com a frequência de excitação, enquanto que a sensibilidade do sensor diminui com a frequência de excitação.

Veja que o sensor opera na faixa de 1mm para 28kHz, mas a faixa se altera para 4mm na frequência de ressonância 30,4kHz.

Porém, a sensibilidade do sensor é, aprox. 10,5 V/mm na frequência de ressonância, enquanto que cai para 3,41V/mm a 32kHz

Portanto, os sensores capacitivos tem uma sensibilidade muito elevada. Uma resolução de 0,5nm para detecção de movimento é possível usando uma frequência de excitação perto da frequência de ressonância.

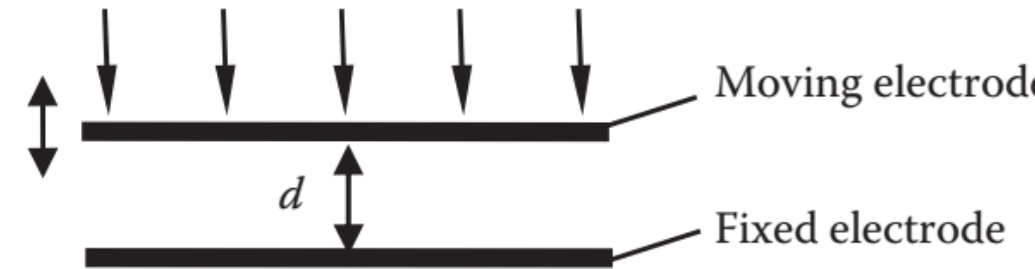
Exemplo de sensor de deslocamento capacitivo





Os sensores capacitivos no qual a distância  $d$  varia pode ser composto de duas placas, no qual a placa móvel “sofre” forças, pressões, vibração ou movimento e conseqüente variação de capacitância.

Entretanto, uma variação de temperatura pode causar uma variação da distância  $d$  indesejada. Essa fonte de erros pode ser compensada usando uma configuração que mede capacitância diferencial a partir de três placas, com saídas possíveis de  $C_1 - C_2$ ,  $C_1/C_2$  ou  $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ .

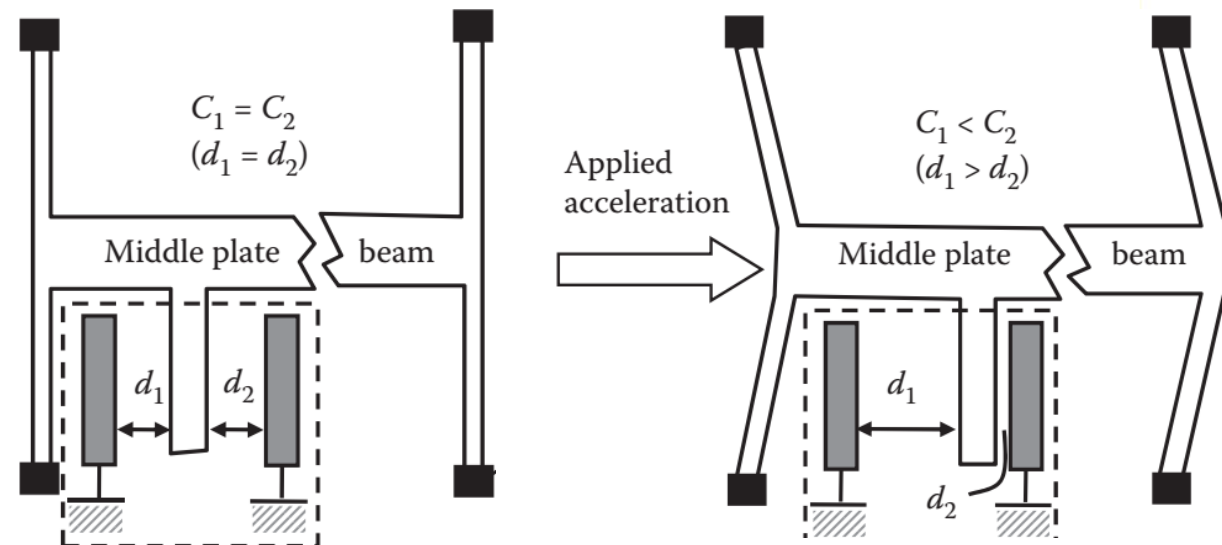
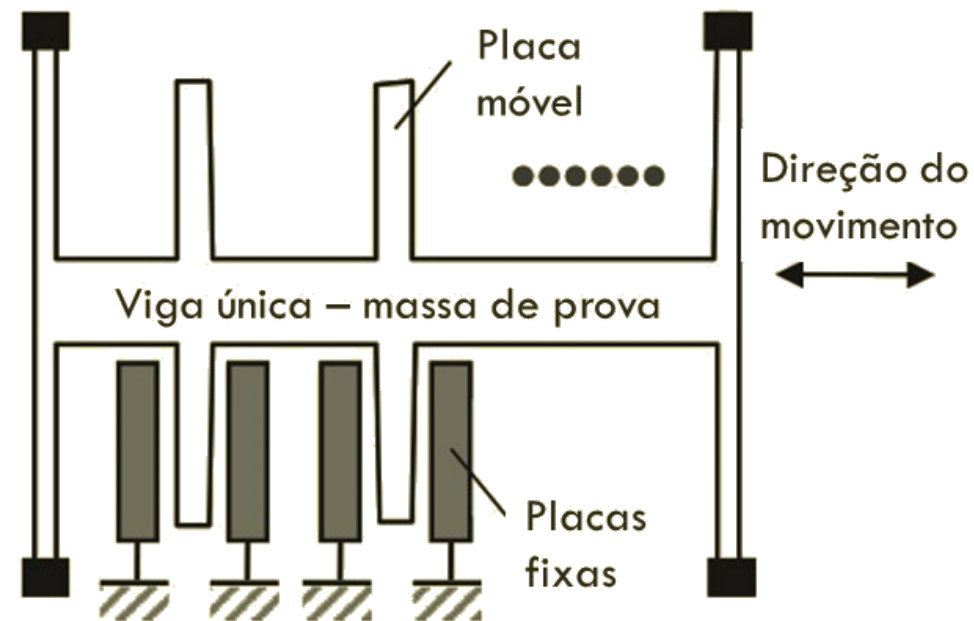


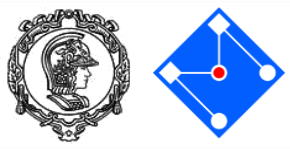
# Sensores de múltiplas placas e propriedades

O arranjo de placas múltiplas ao lado é bastante utilizado para medir aceleração, vibração e deslocamento.

Tem-se melhora significativa de:

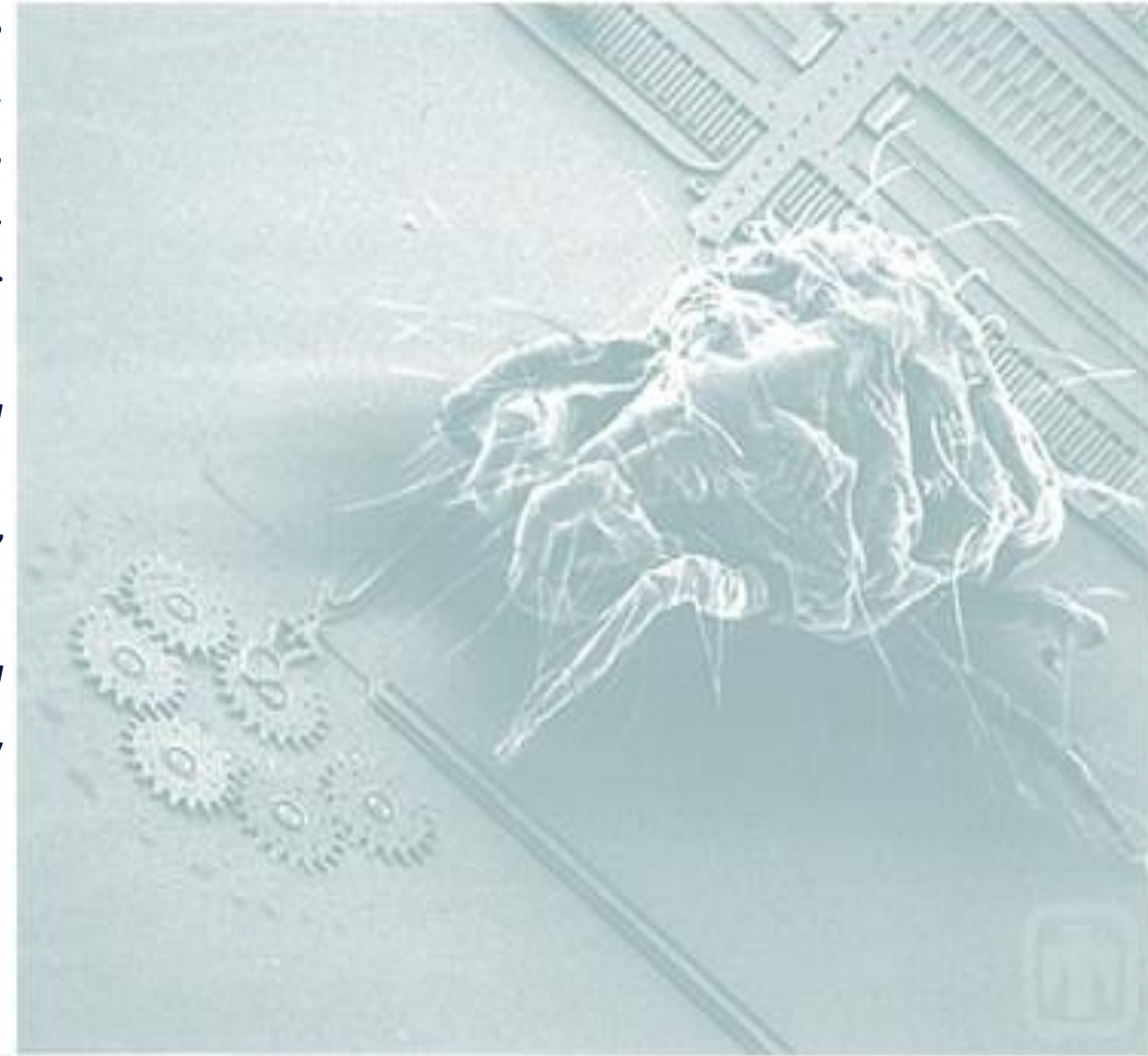
- Faixa de utilização;
- Acurácia;
- Sensibilidade;
- Estabilidade;
- Relação sinal-ruído.





*Despite the fact that **MEMS accelerometers** have been built into automotive **airbags** since the mid-90s, few people were aware of their existence until 2006 when the **Nintendo Wii** game consoles started taking over their living rooms. MEMS motion sensors are now widely used in automotive electronics, medical equipment, hard disk drives, and portable consumer electronics. Today a smart phone can hardly be called 'smart' if it doesn't include a MEMS accelerometer, gyroscope and possibly a compass, too. A small niche product five years ago, MEMS sensors now constitute a **multi-billion dollar** industry.*

**By John Donovan, Low-Power Design**  
**MEMS Motion Sensors: The Technology Behind the Technology**



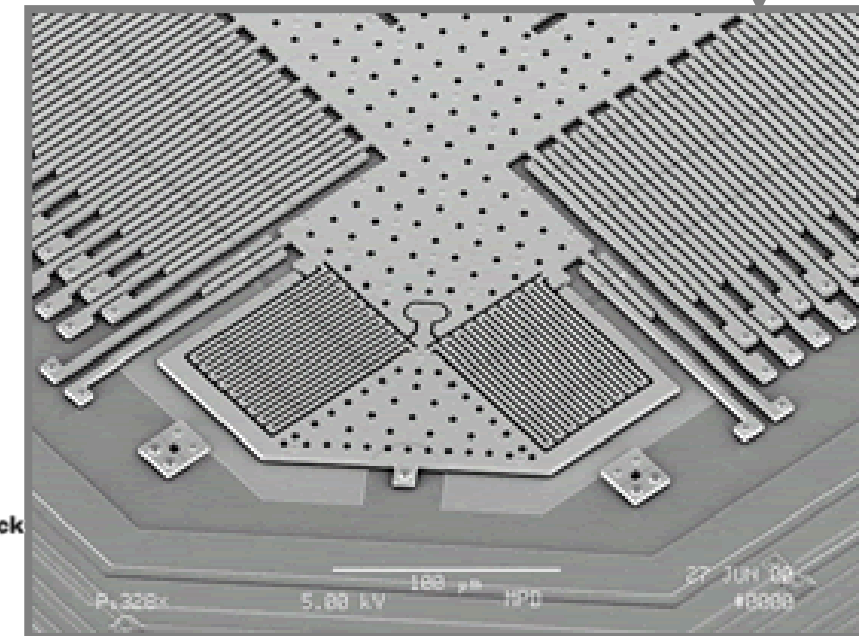
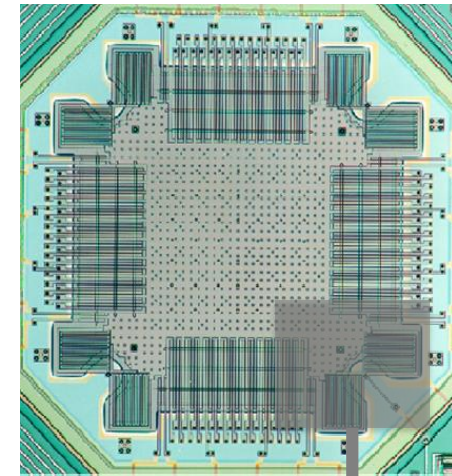
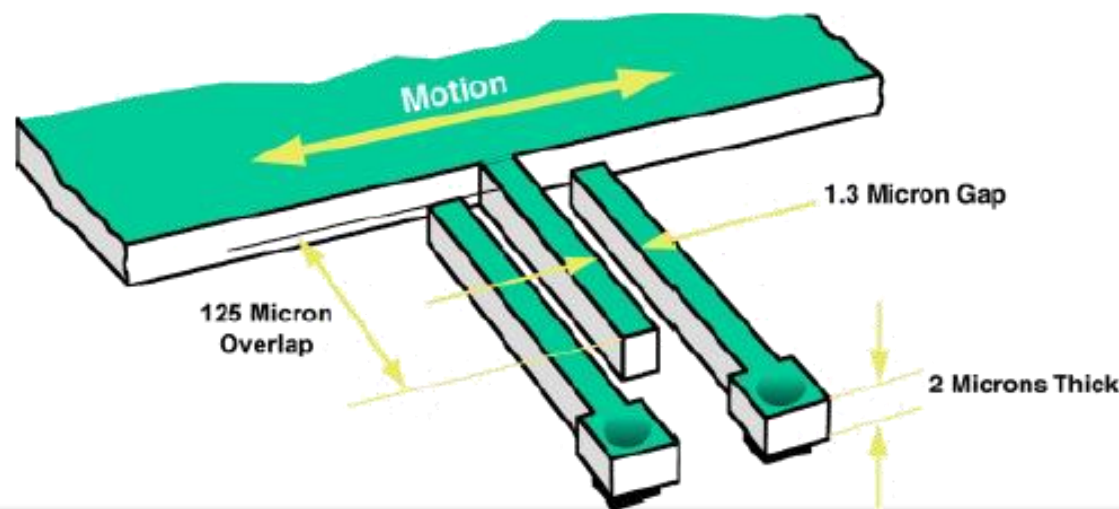


# Sensor capacitivo - acelerômetro MEMS



Acelerômetro de dois eixos com sinal de saída de tensão condicionado, tudo em um único CI monolítico. Possuem:

- Sensibilidade de 20 a 1000 mV/g;
- Alta precisão;
- Estabilidade em altas temperaturas;
- Baixa potência (inferior a 700  $\mu$ A);
- 5 mm x 5 mm x 2 mm;
- Baixo custo (~US\$5 – \$14).





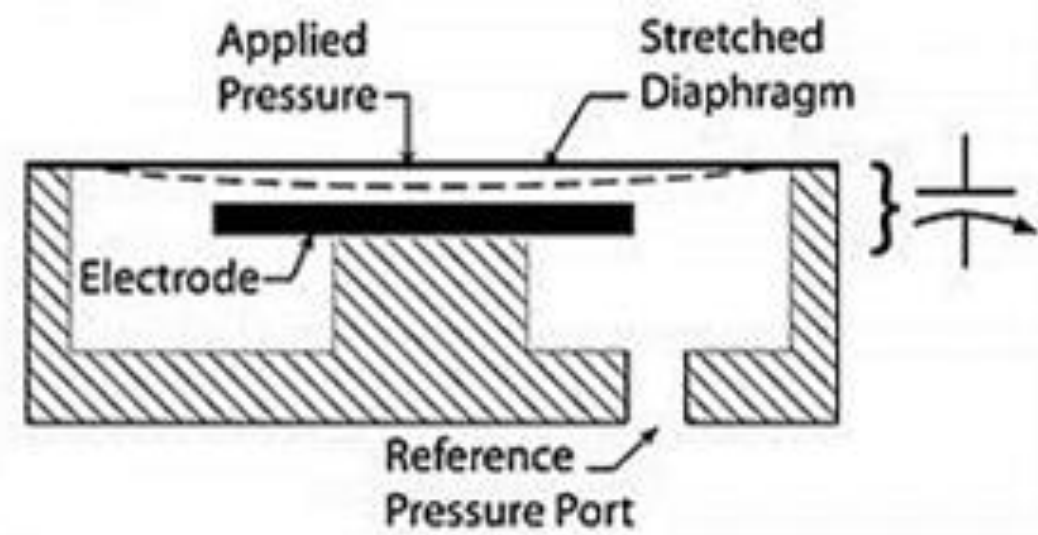
Desde 2014 todos os automóveis novos no Brasil devem ter airbag e freios ABS. Devem sair de fábrica com airbag duplo frontal (um para o motorista e outro para o ocupante do banco da frente).

Sensor de pressão e acelerômetro capacitivo são usados para proteção dos passageiros com airbag!



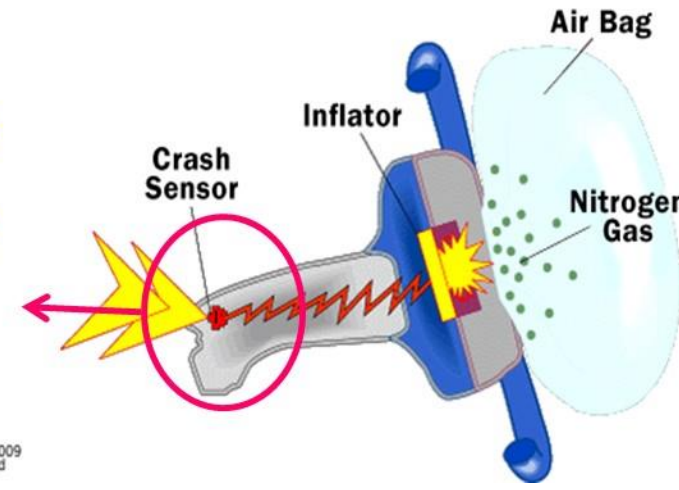
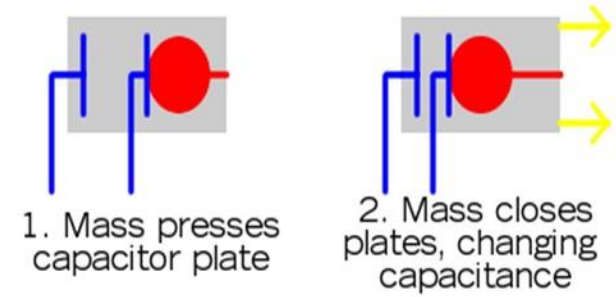
# Sensor capacitivo - AIRBAGS

Para sentir se há ou não passageiro sentado no veículo, é utilizado um sensor capacitivo de pressão com um diafragma fino. A pressão é detectada com base na alteração da capacitância entre o diafragma e o eletrodo. Este tipo de sensor pode medir pressões de 0,1 a 350 bar.



Já para sentir quando ocorre um acidente, é utilizado um Sensor Capacitivo de aceleração – MEMS, no qual a mudança na capacitância elétrica em relação à aceleração dispara o a reação química que infla o aribag.

CAPACITIVE ACCELEROMETER



© explainthatstuff.com 2009  
Some rights reserved

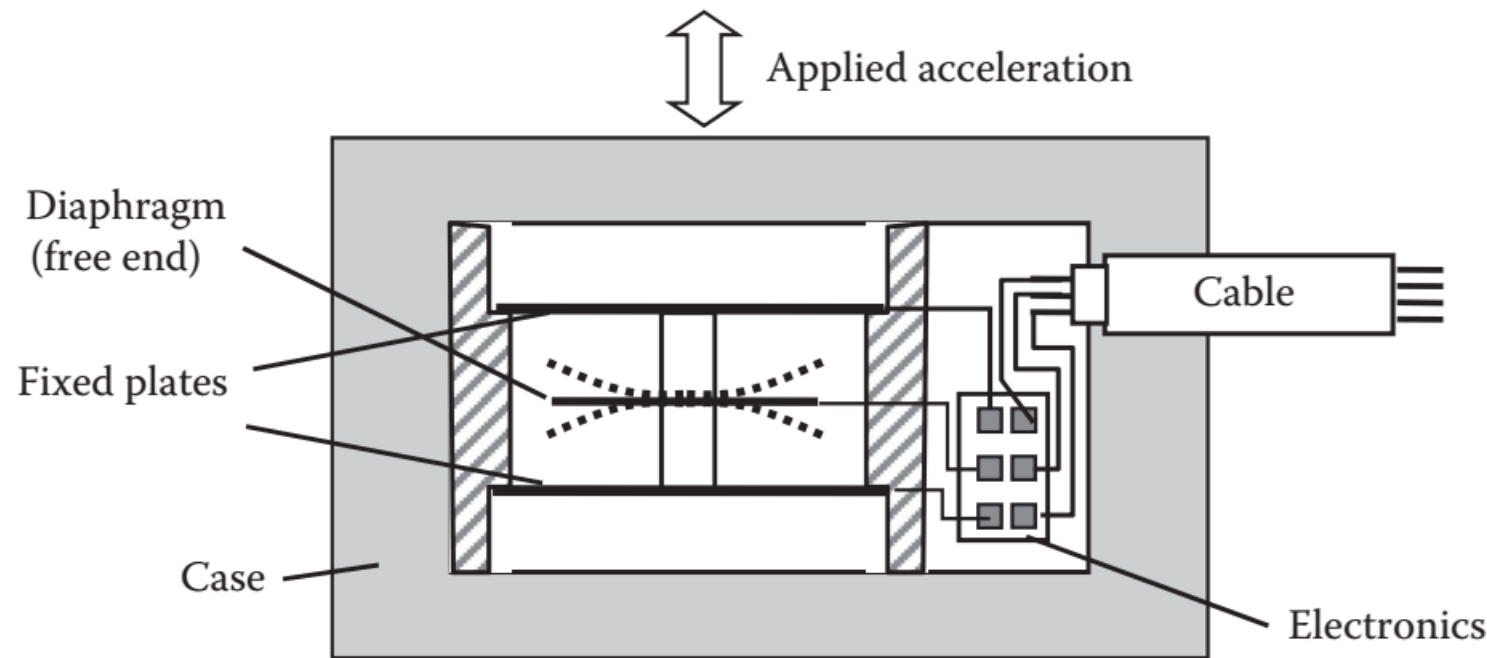


No acelerômetro capacitivo ao lado, um diafragma funciona como uma massa e sofre deflexão durante uma aceleração.

As duas placas “sanduicham” diafragma, criando dois capacitores com o diafragma sendo a placa comum.

A deflexão causa uma variação de capacitância.

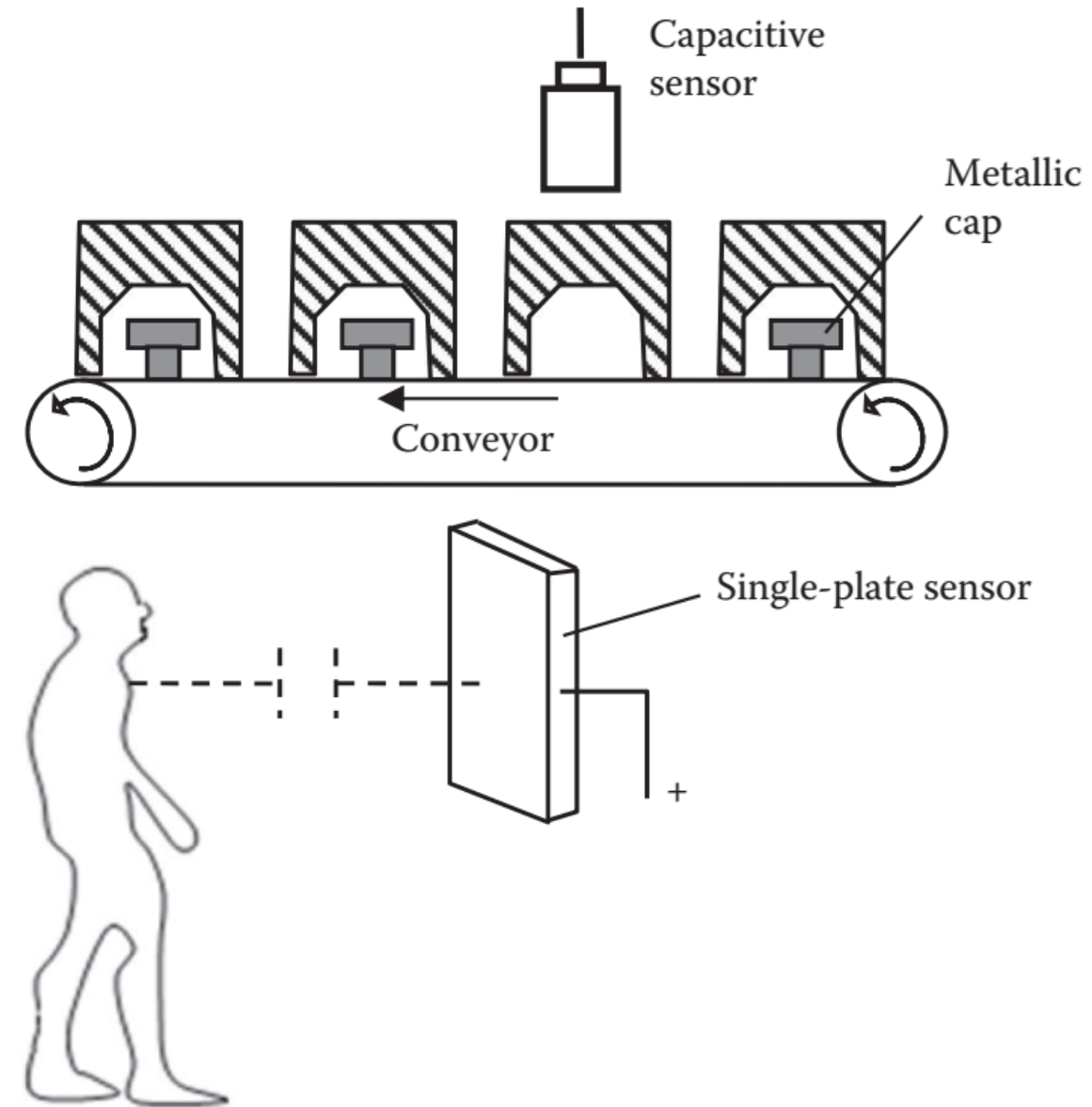
Acelerômetros capacitivos apresentam uma maior sensibilidade quando comparados com os piezoelétricos.





Devido a alta sensibilidade, pode ser utilizado para medir a presença de peças metálicas após montagem de um produto.

Além disso, pode ser utilizada com o alvo sendo um ser humano. Nessa configuração pode atuar tanto como sensor de distância quanto de presença. A capacitância aumenta na medida que o ser humano se aproxima da placa. Pode-se considerar o ser humano como “aterrado”, já que é capaz de fornecer uma quantidade elevada de cargas, quase tanta quanto a terra forneceria.





PRÁTICA !!!





Carregue o programa entregue pelo professor no Arduino, conecte o fio vermelho no 5V e o outro fio na porta digital indicada pelo código do Arduino.

Abra o serial monitor e investigue a variação do número na saída em relação a distância da sua mão a placa. Encoste na placa e veja a variação do número.

Faça:

- 1) Adquira pontos em diversas alturas e faça uma função de transferência no qual a entrada é o número fornecido pelo programa e a saída é a distância da mão a placa. Mostre esta distância no Serial Monitor;
- 2) Modifique seu programa, ADICIONANDO a funcionalidade de aparecer o texto “não encoste no sensor” no OLED no momento em que o sensor captar um toque.

Refleta: Como funciona o programa? Verifique as funções e linha que não conhecer no conteúdo disponibilizado pelo Arduino e em foruns.



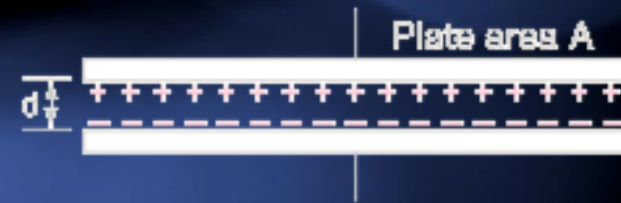


Utilizando papelão, papel alumínio, resistores e fios, desenvolva um Sistema de interface de pessoas mudas, utilizando os princípios aprendidos como entrada e uma palavra ou frase como saída (esta pode estar apenas escrita na tela do pc ou pode ser lida).

O mesmo deverá ser apresentado em sala de aula dia 9 ou 12 de Setembro e um relatório deve ser entregue. Nele devem constar uma análise teórica do funcionamento do sensor, explicação do fluxograma do programa e um pequeno manual do usuário.

Uma sugestão é utilizar o programa Processing. Entretanto é apenas uma sugestão.

Exercite sua criatividade.



$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Sensores Capacitivos – variação da área  $A$



Enquanto uma placa desliza transversalmente a outra, a área sobreposta muda, variando linearmente a capacitância. Essa mudança geralmente é convertida em variação de voltagem.

Sensores capacitivos baseados em mudança de área são utilizados para medições sem contato de movimento, deslocamento, pressão e campo elétrico.

Podem ser projetados em um ou multi pares de placas para captar movimentos lineares ou rotativos. Uma estrutura com múltiplas placas aumenta a acurácia e sensibilidade, mas também incorre em um maior custo.

Os desafios são:

- Evitar inclinação em qualquer eixo de uma placa, em especial quando a área  $A$  é grande.
- Manter a distancia  $d$  entre placas pequena e constante para minimizar a variação do espaço e da capacitância.
- Eliminar o acoplamento da parte de trás da placa.

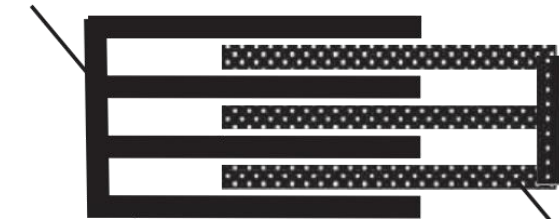
Fixed plate



Moving plate



Fixed plates



Moving plates

Fixed plates

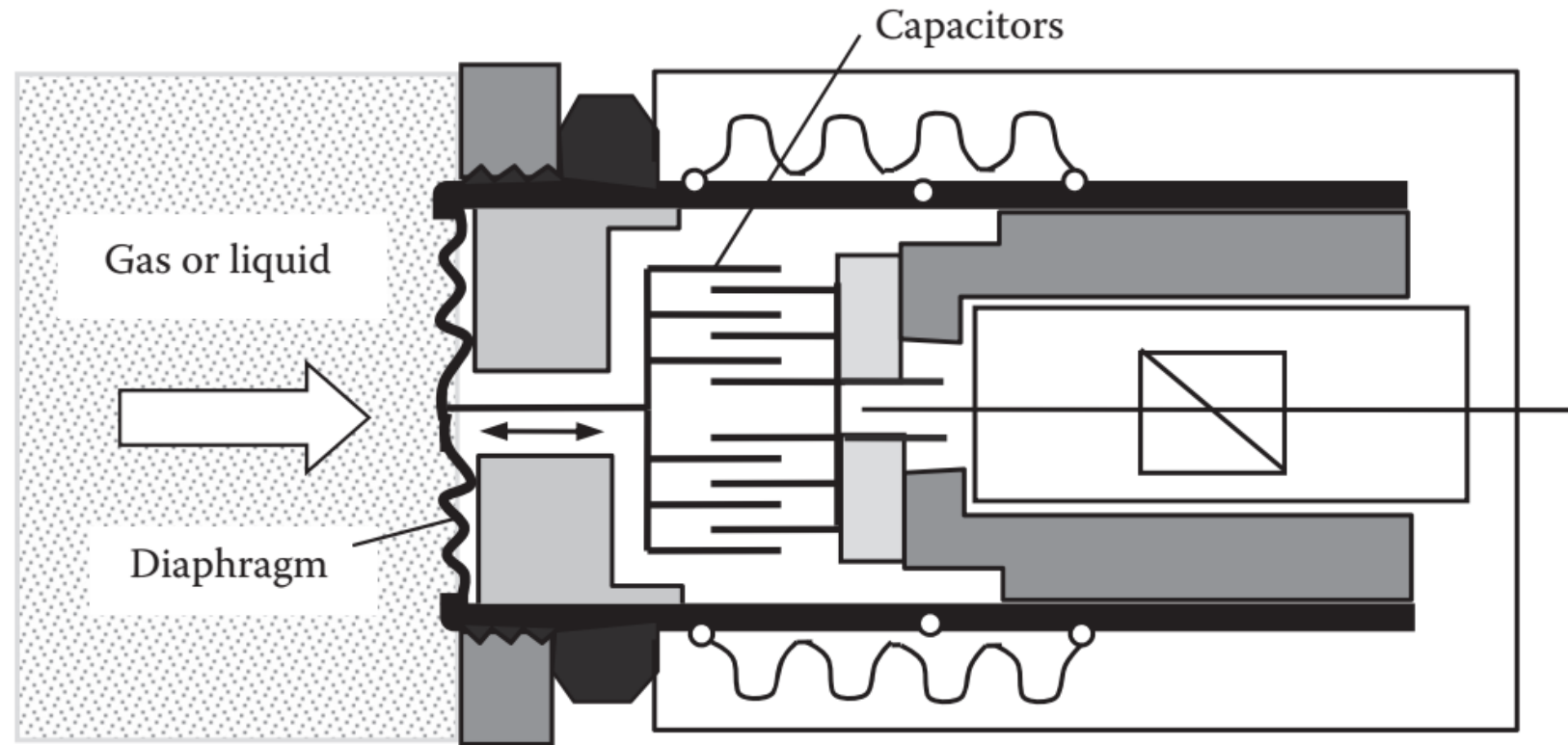


Rotary plate



Grupo de eletrodos é conectado ao diafragma, cuja deformação é proporcional à pressão. O movimento dos eletrodos muda a sobreposição de área e, conseqüentemente, a capacitância.

Múltiplas placas aumentam a sensibilidade.

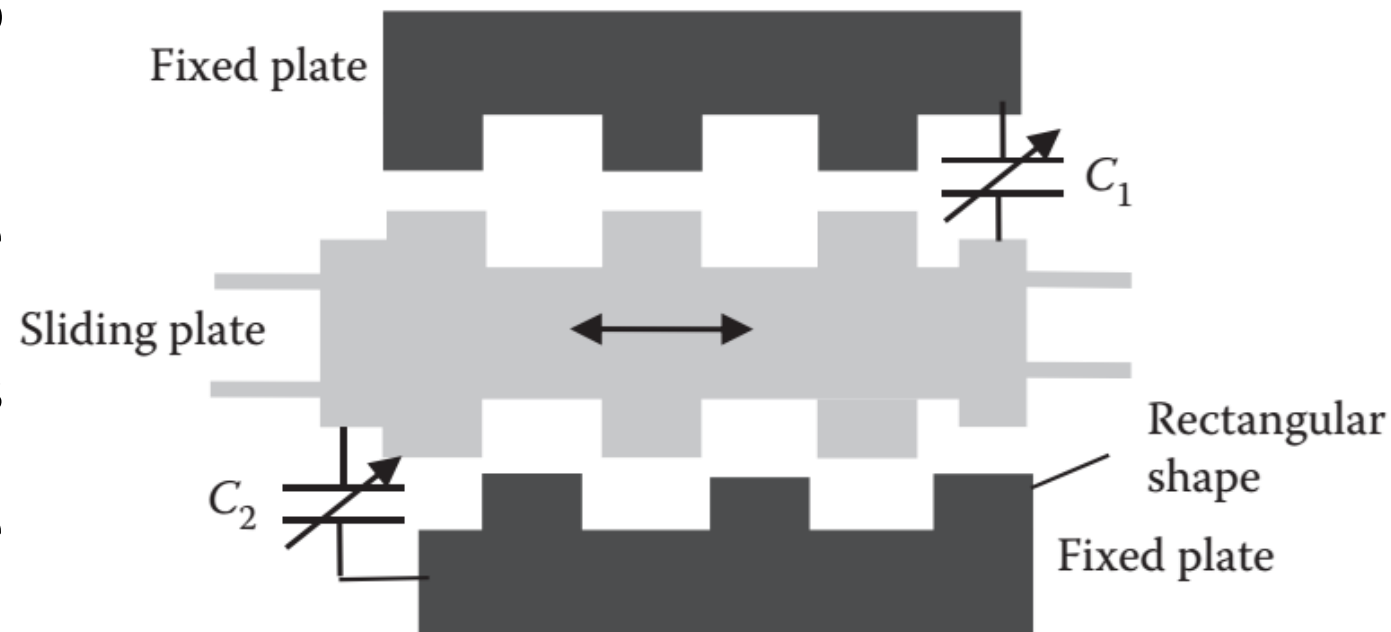




É constituído de duas placas fixas paralelas e uma placa intermediária de deslizamento. Todas as placas têm geometrias periódicas. A repetição periódica de um padrão permite:

- que o sensor cubra uma grande faixa de medição, aumentando o número de períodos;
- forneça medidas muito mais refinadas e mais precisas avaliando cada capacitor individualmente (dentro de um período).

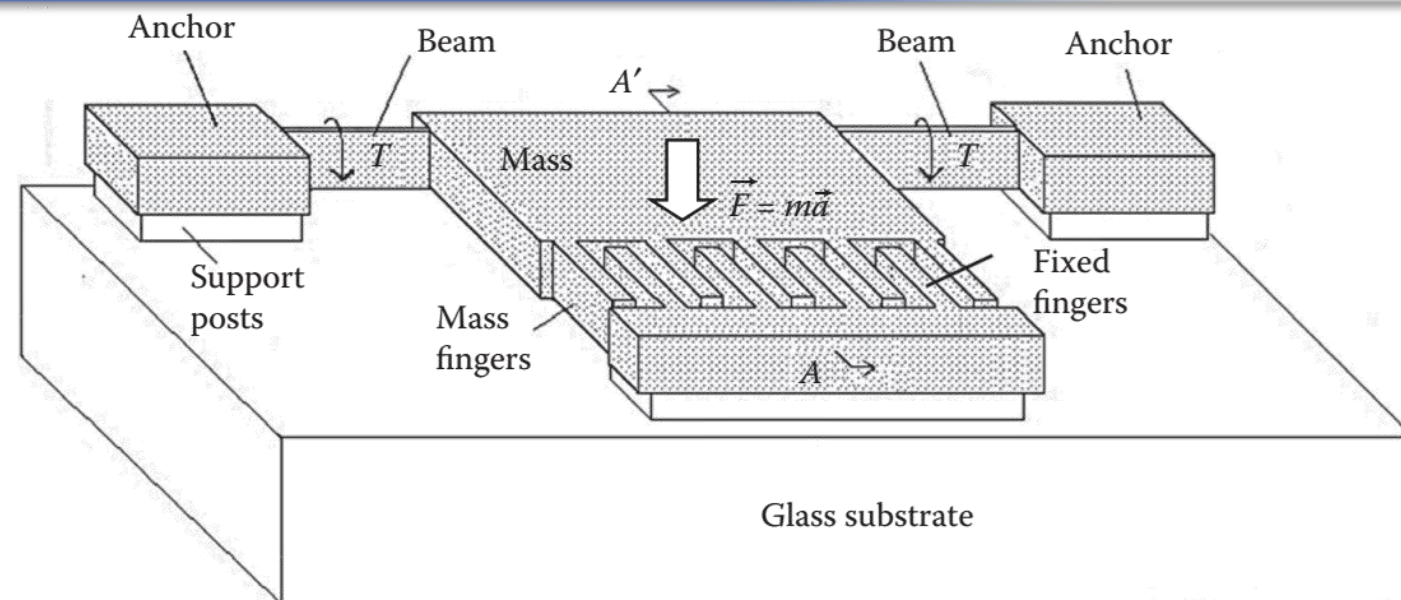
É capaz de fornecer acurácia de nanômetros ao longo de todo o deslocamento.



# Sensor capacitivo



A massa inercial é suspensa  $7,5 \mu\text{m}$  acima do substrato de vidro por duas vigas de torção, também ancoradas ao substrato. As placas móveis da massa e as placas fixas ao substrato formam um grupo de capacitores paralelos. Quando a massa experimenta uma aceleração, um binário  $T$  é produzido sobre as vigas de suspensão, fazendo as placas móveis girarem um ângulo  $\theta$ . Como resultado, a área de sobreposição dos capacitores é reduzida, provocando redução da capacitância.



Mass length  $l_m$ :  $1000 \mu\text{m}$

Mass width  $w_m$ :  $750 \mu\text{m}$

Mass thickness  $t_m$ :  $12 \mu\text{m}$

Total moving mass  $M$ :  $2.446 \times 10^{-3} \text{g}$

Etch pit depth  $d'$ :  $15 \mu\text{m}$

Beam length  $l_b$ :  $150 \mu\text{m}$

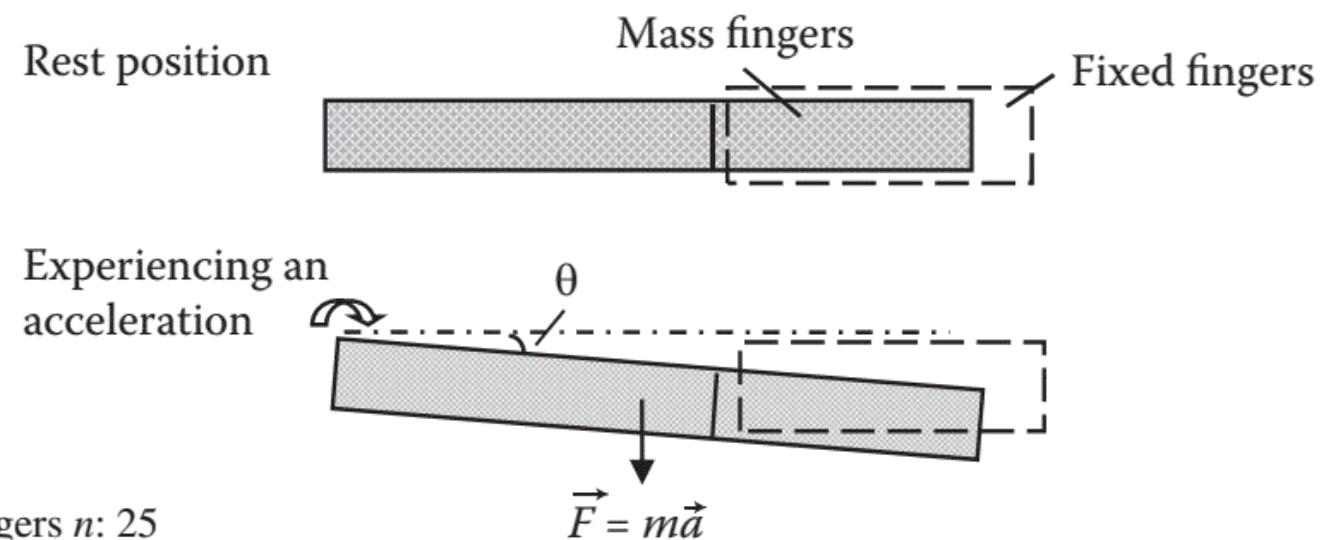
Beam width  $w_m$ :  $5 \mu\text{m}$

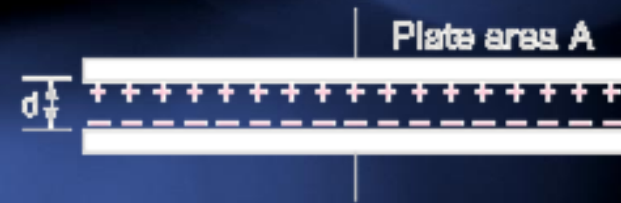
Finger length  $l_f$ :  $500 \mu\text{m}$

Finger width  $w_m$ :  $10 \mu\text{m}$

Inter finger gap  $d_f$ :  $5 \mu\text{m}$

Total number of moving fingers  $n$ : 25





$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Sensores Capacitivos – variação da constante dielétrica  $\epsilon$

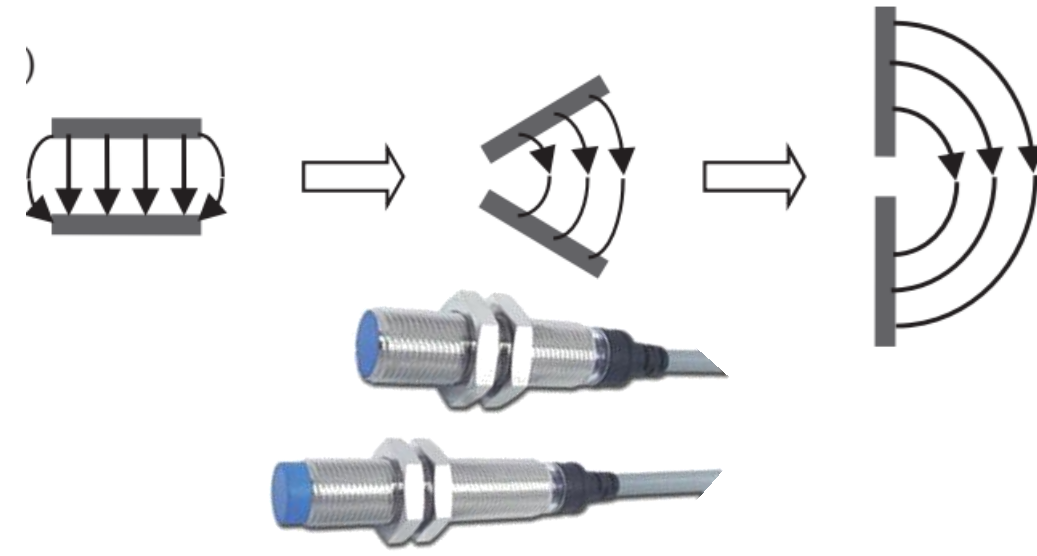
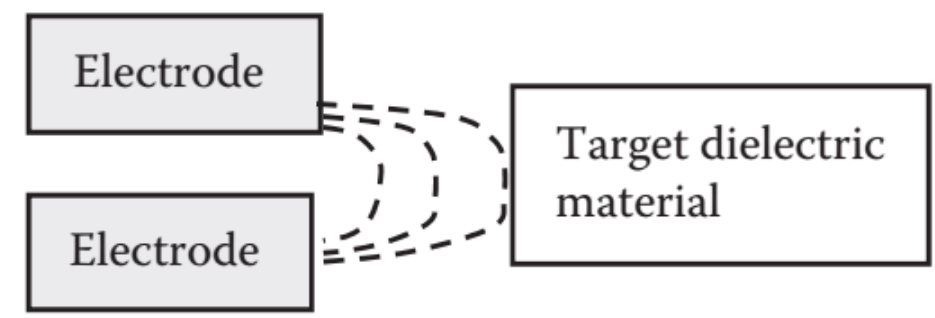
# Tipos e propriedades

Normalmente a constante dielétrica pode variar devido a:

- variação da densidade do material dielétrico devido a forças ou pressões externas;
- absorção de humidade;
- material dielétrico reage com o alvo.

Possuem dois projetos básicos.

- Dois eletrodos e um material dielétrico dentro do sensor. Esse tipo geralmente é utilizado em sensores capacitivos de força, pressão, químico e de humidade;
- Dois eletrodos mas sem material dielétrico no sensor, usando o alvo como material dielétrico. Os eletrodos ficam em uma geometria aberta. Esse tipo é utilizado como sensor de movimento e proximidade de materiais não condutivos.





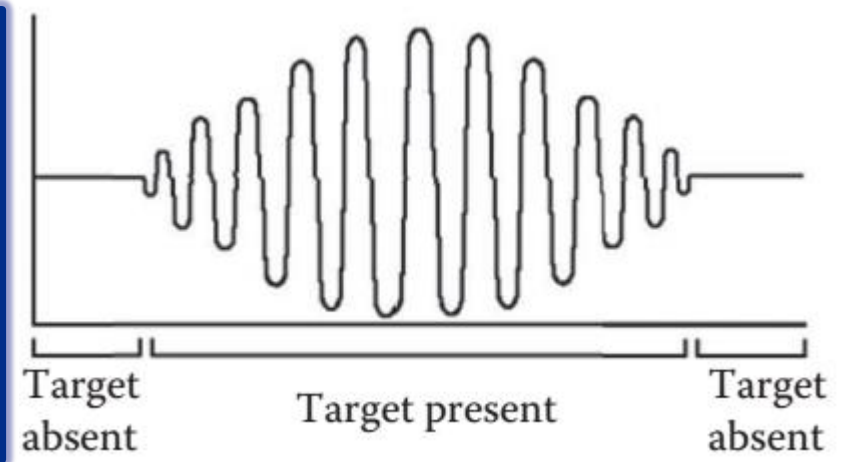
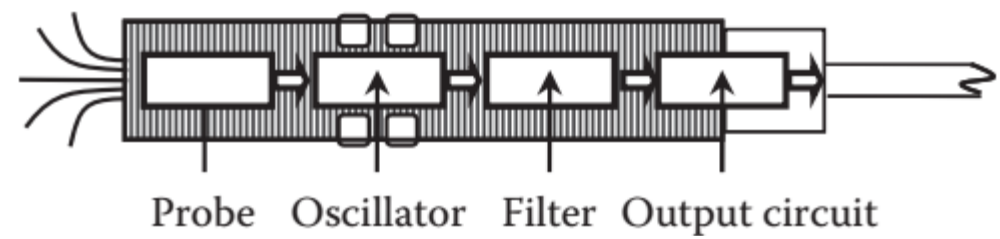
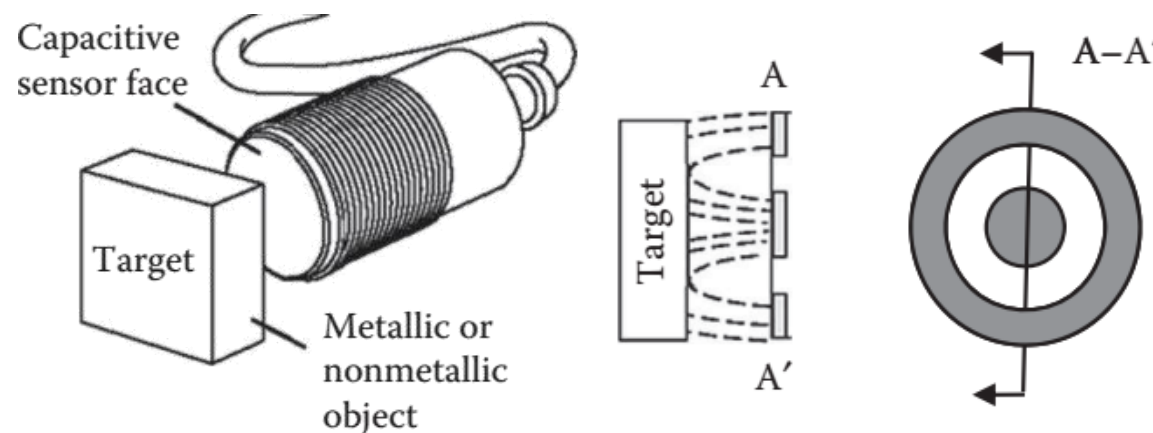
# Sensor de proximidade

A maioria dos sensores são do tipo sonda com os componentes internos conforme mostrados ao lado: sonda, oscilador, filtro e circuito de saída.

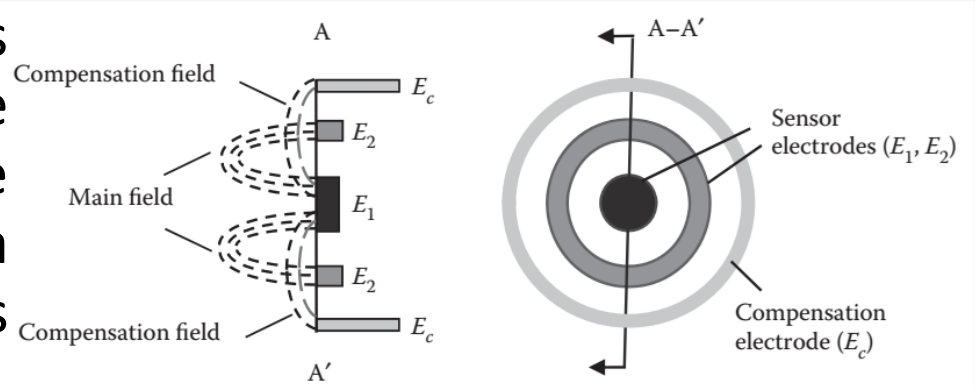
A superfície sensorial geralmente é formada de dois eletrodos anelares concêntricos.

Quando um objeto entra no campo eletrostático dos eletrodos, altera a intensidade do fluxo elétrico e gera um aumento na capacitância.

Conforme o alvo se afasta, o sensor volta ao seu estado original.



Como são sensíveis a humidade, usa-se um eletrodo de compensação para evitar falsos positivos.





Este tipo de sensor capacitivo explora a relação direta entre a constante dielétrica e a capacitância.

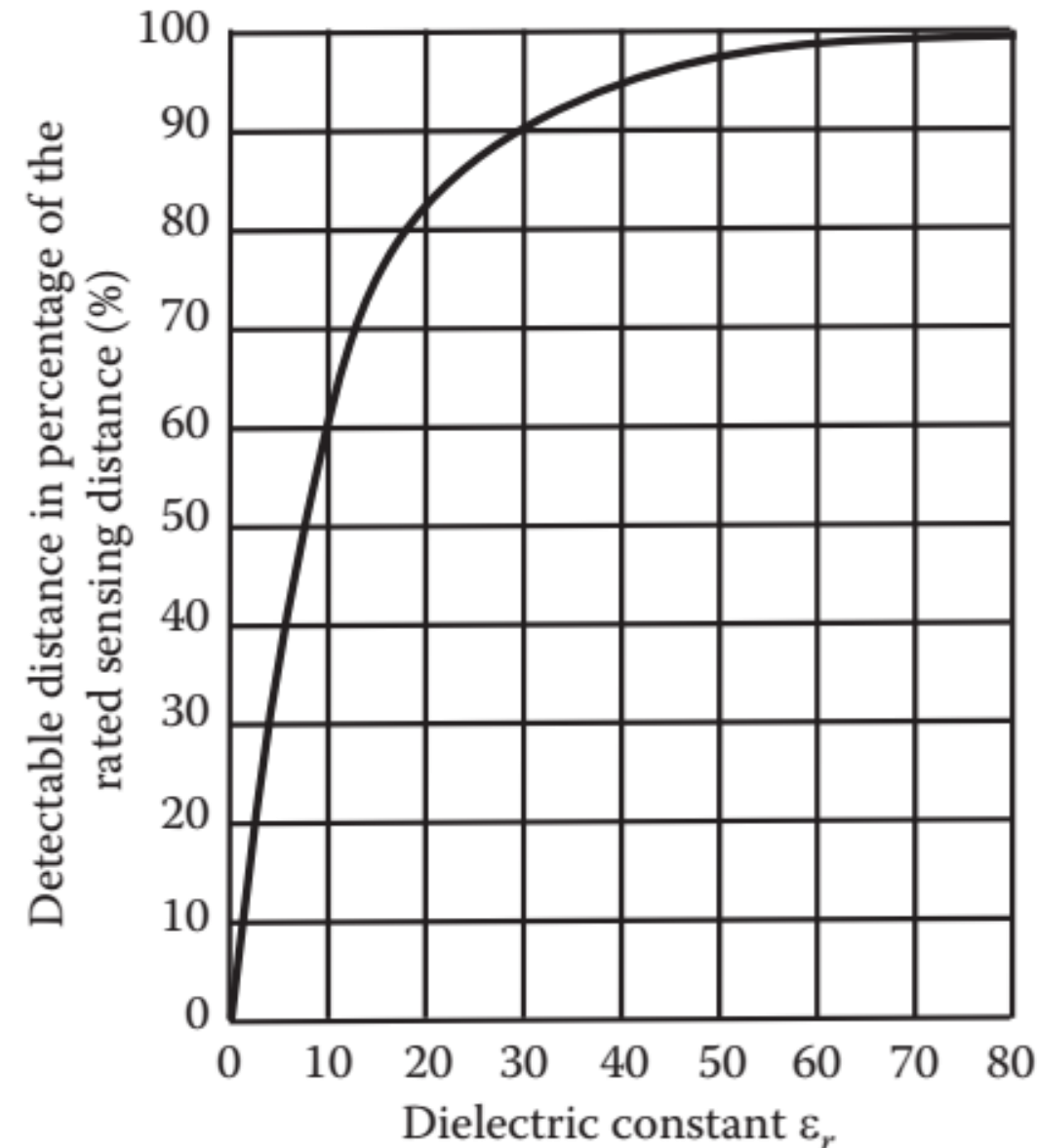
Em alguns sensores, a capacitância muda devido a mudança da constante dielétrica do sensor. Em outros, devido a mudança da constante dielétrica do alvo.

Quanto maior a constante dielétrica do alvo, mais fácil para o sensor é percebê-lo.

Um exemplo é o sensor Siemens com distância sensitiva nominal de 9mm e o gráfico ao lado.

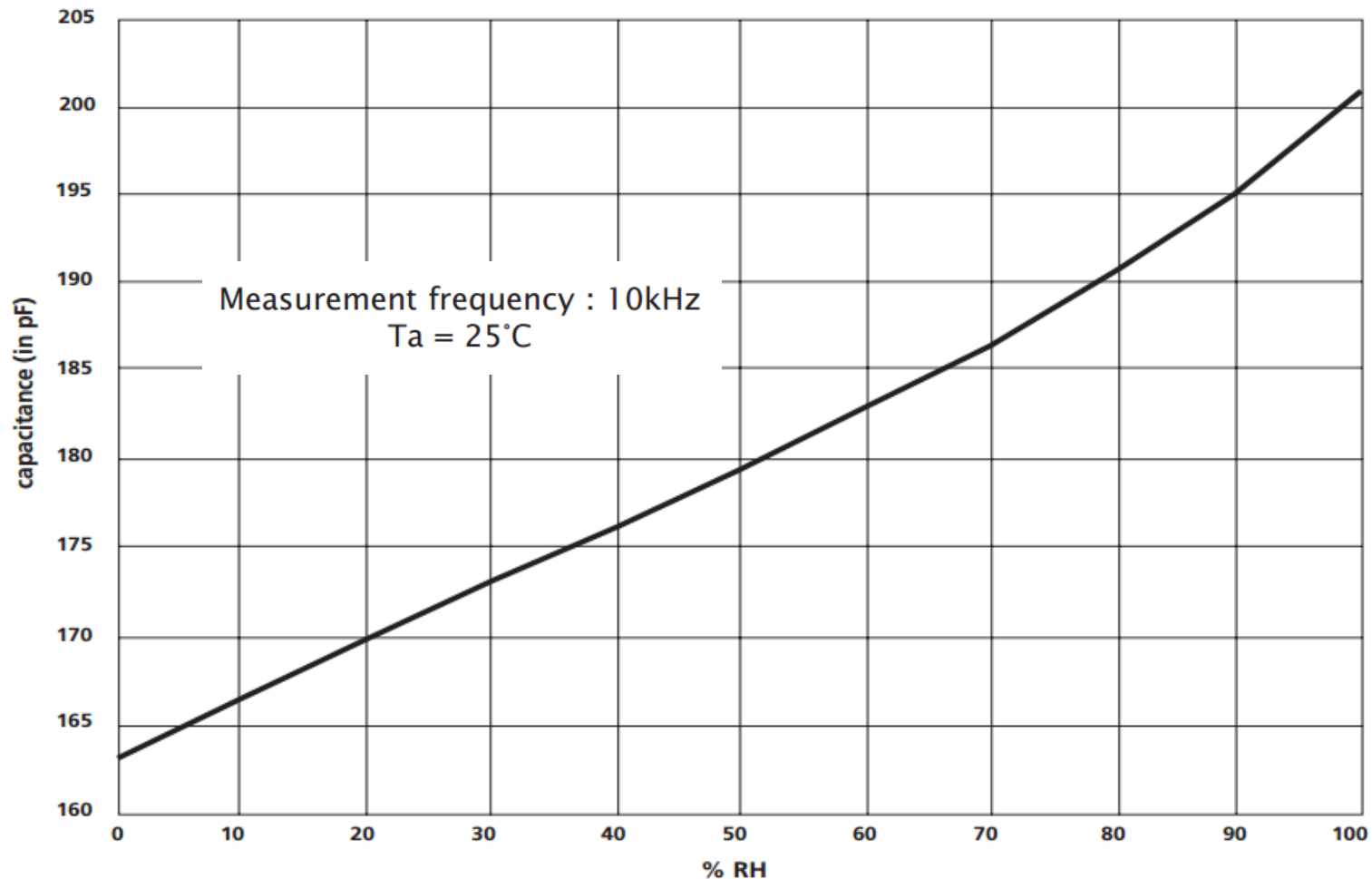
Neste caso, se o material a ser detectado fosse mármore (constante dielétrica de 8), a distância sensitiva nominal seria de  $9 \cdot 50\% = 4,5\text{mm}$ .

**Exercício:** Se a distancia sensitiva nominal for de 20mm, o sensor consegue perceber a presença amônia ( $\epsilon_r=20$ ) atrás de um painel de vidro ( $\epsilon_r=10$ ) de 5mm de espessura?





## Typical response curve of HS 1100/HS 1101 in humidity



Aprox. R\$7,00



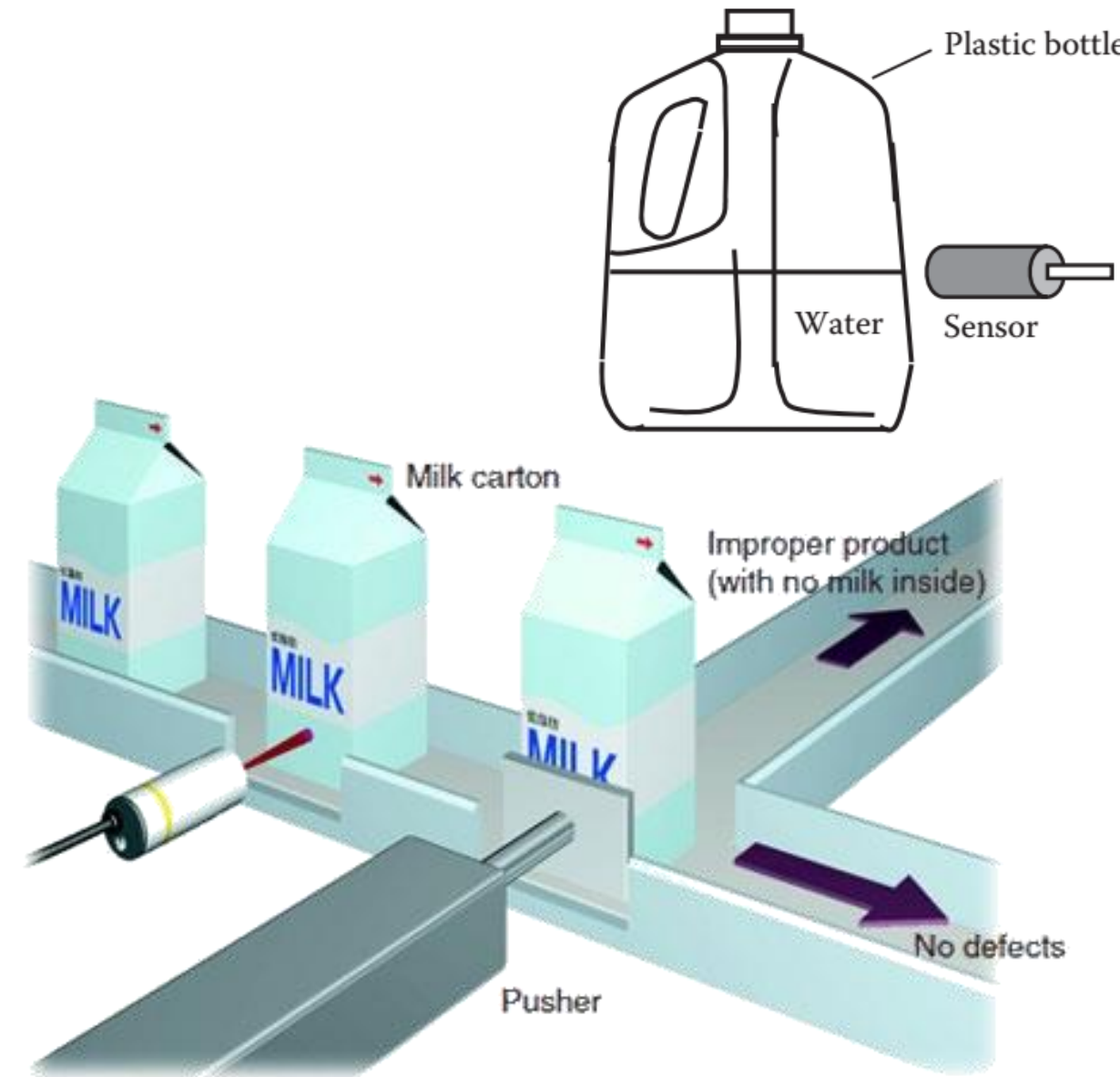
### Key Specifications

- Power requirements: 5 to 10 VDC
- Communication: Analog output of varying capacitance in response to change in relative humidity
- Humidity Measuring Range: 1 to 99% RH
- Operating temperature: -40 to 212 °F (-40 to 100 °C)



Uma aplicação de sensores baseados em variação da constante dielétrica são os de detectores de nível de água.

Por exemplo, considere que a água está em um reservatório polimérico. Como a constante dielétrica da água é muito maior que a do plástico, o sensor consegue “ver através” dele e detectar o nível de água.

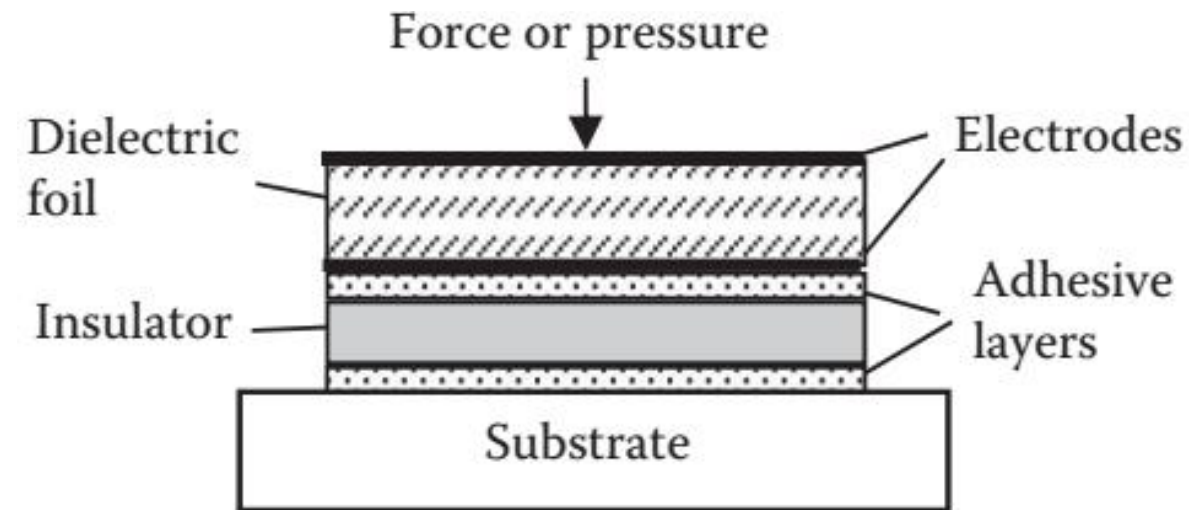




O sensor de pressão ao lado é um sensor de película ( $80\mu m$  de espessura) projetado pela ONERA French Aerospace Lab.

Este sensor pode detectar a variação da constante dielétrica entre dois eletrodos quando ha uma força ou pressão externa atuando de forma dinâmica.

Apesar de ser capaz de detectar micro pressões e ter uma boa largura de banda (50 a 200 kHz), é muito sensível a temperatura.





Sensor composto de dois eletrodos separados por um polímero quimicamente sensível, que pode absorver produtos químicos específicos. Após a absorção, o polímero incha e aumenta a distância entre os dois eletrodos e além de também modificar sua constante dielétrica do polímero. Ambas modificações alteraram a capacitância do sensor, que pode ser eletricamente detectada e medida.

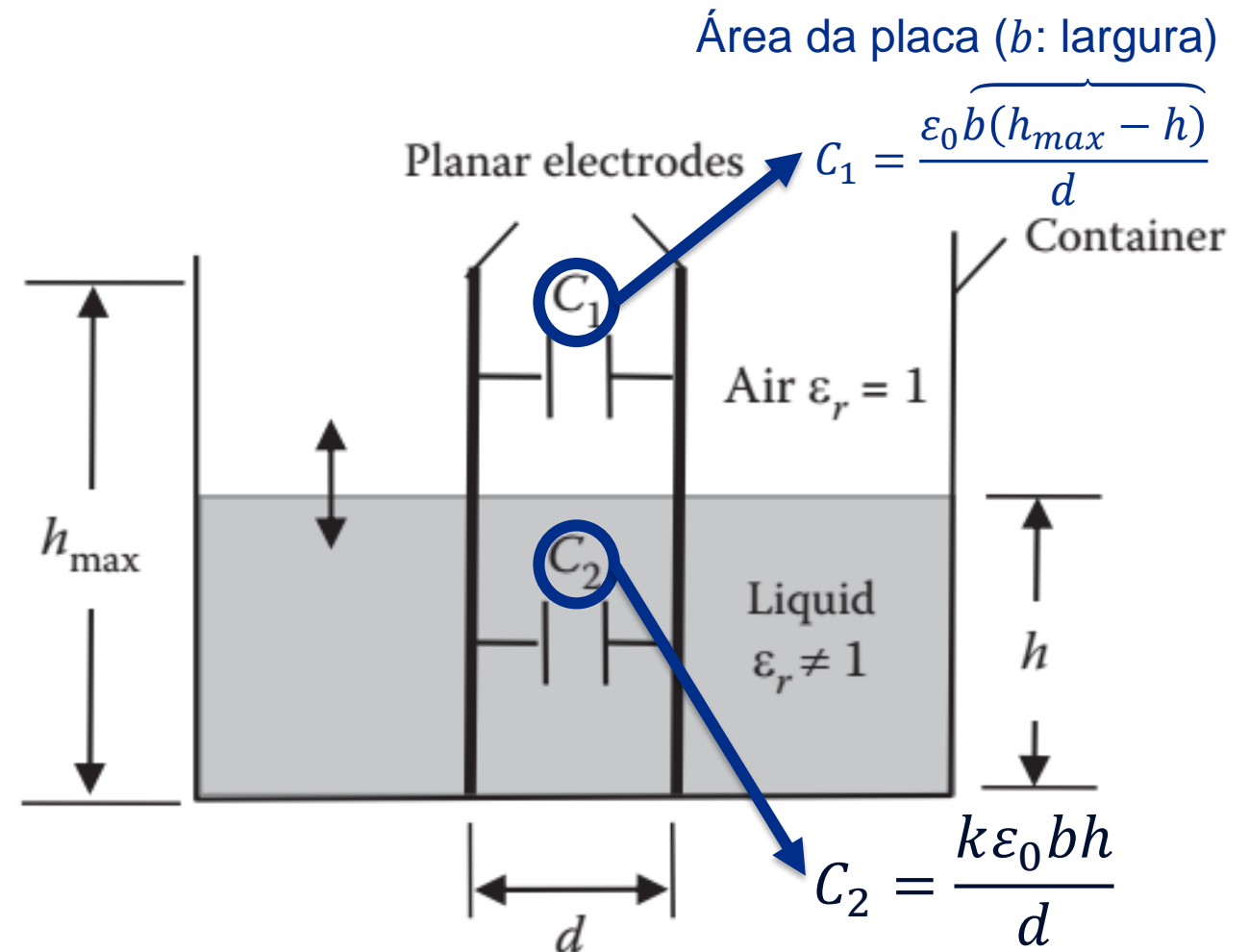




A mudança de capacitância ( $C - C_0$ ) pelo preenchimento do espaço entre os dois eletrodos planos, com um líquido  $\epsilon_r = k\epsilon_0 > 1$ .

Com  $\Delta C = C - C_0$ ,  $C = C_1 + C_2$  e  $C_0 = \frac{\epsilon_0 b h_{max}}{d}$  podemos chegar em:

$$h = \frac{\Delta C d}{\epsilon_0 (k - 1) b}$$

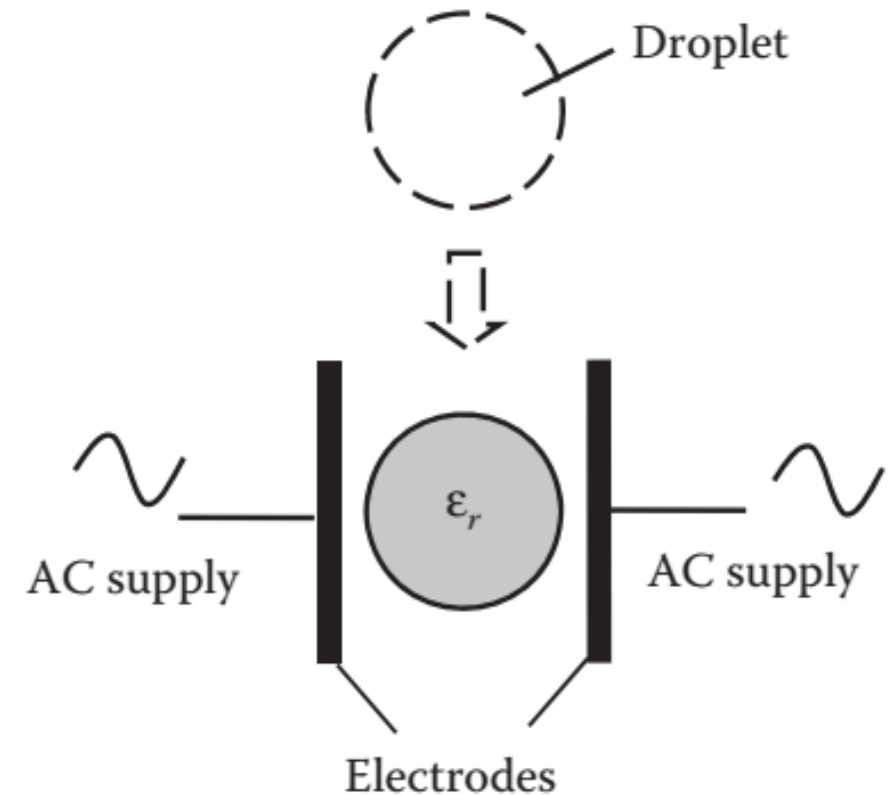




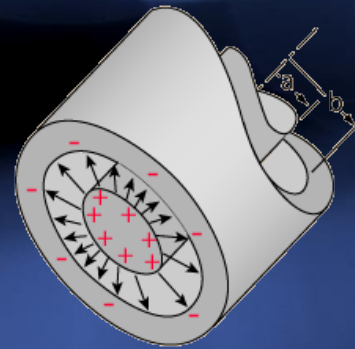
A mudança da capacitância devido à mudança da constante dielétrica entre capacitores permite medir o volume da gota.

Faixa de atuação entre 20-65 nL, resolução < 2nL.

Sensor de precisão!!!







$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}$$

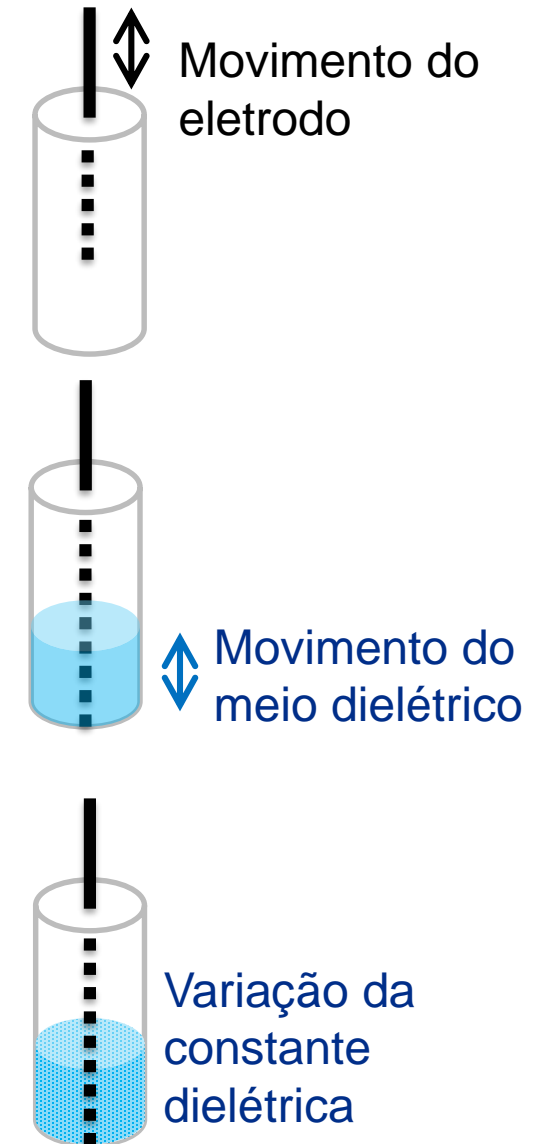
Sensores Capacitivos Cilíndricos



A configuração cilíndrica ou coaxial é um outro projeto popular de sensores capacitivos.

Um dos primeiros capacitores, a garrafa de Leyden, tinha uma forma cilíndrica.

Sensores capacitivos cilíndricos (SCCs) são amplamente utilizados na detecção de proximidade, medição do nível de fluido, medição de deslocamento/temperatura/ umidade e detecção de substância química.

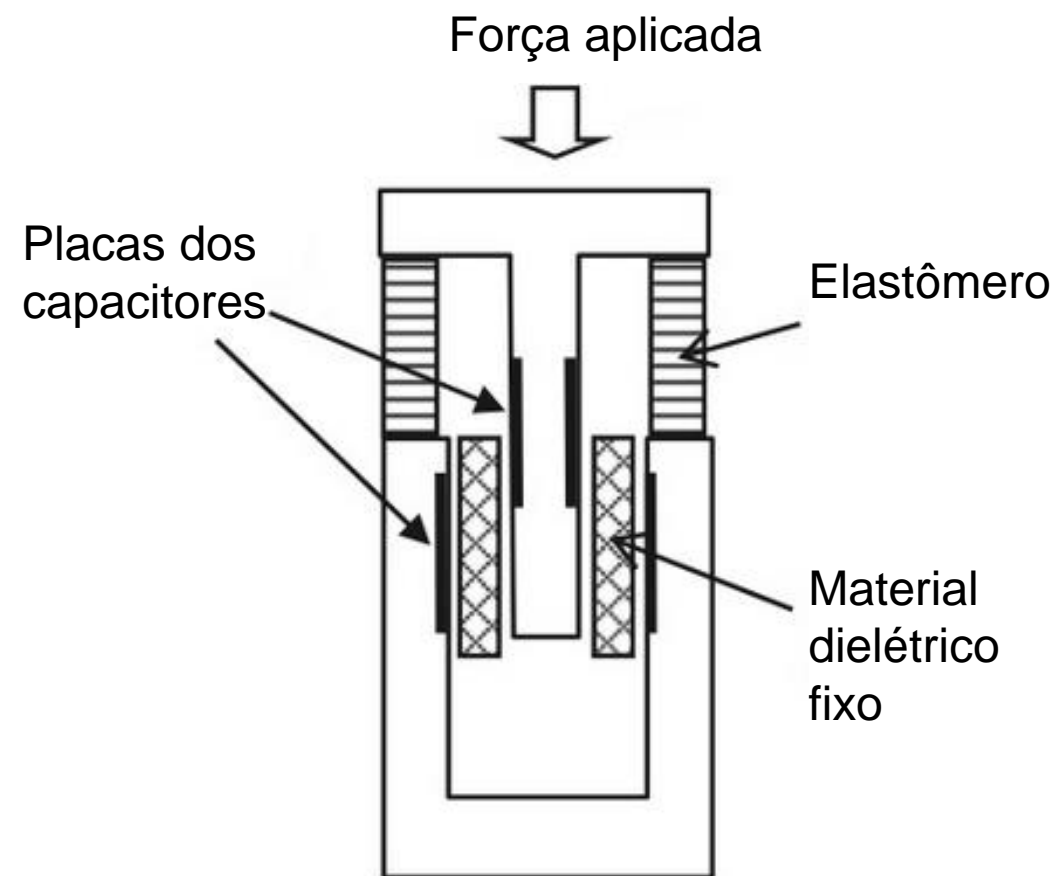




Este sensor foi utilizado uma estrutura de capacitor coaxial e um polímero de elevada constante dielétrica (PVDF) para maximizar a alteração de capacitância movimento do eletrodo interno, quando uma força é aplicada.

O movimento do eletrodo interno resulta na mudança de área e conseqüentemente na variação da capacitância.

Fluoreto de polivinilideno (PVDF) é um material cristalino, de notável resistência química, boa impermeabilidade a líquidos e gases, inerte ao ataque dos raios ultravioleta, além de ótimas características mecânicas e excelente estabilidade dimensional.

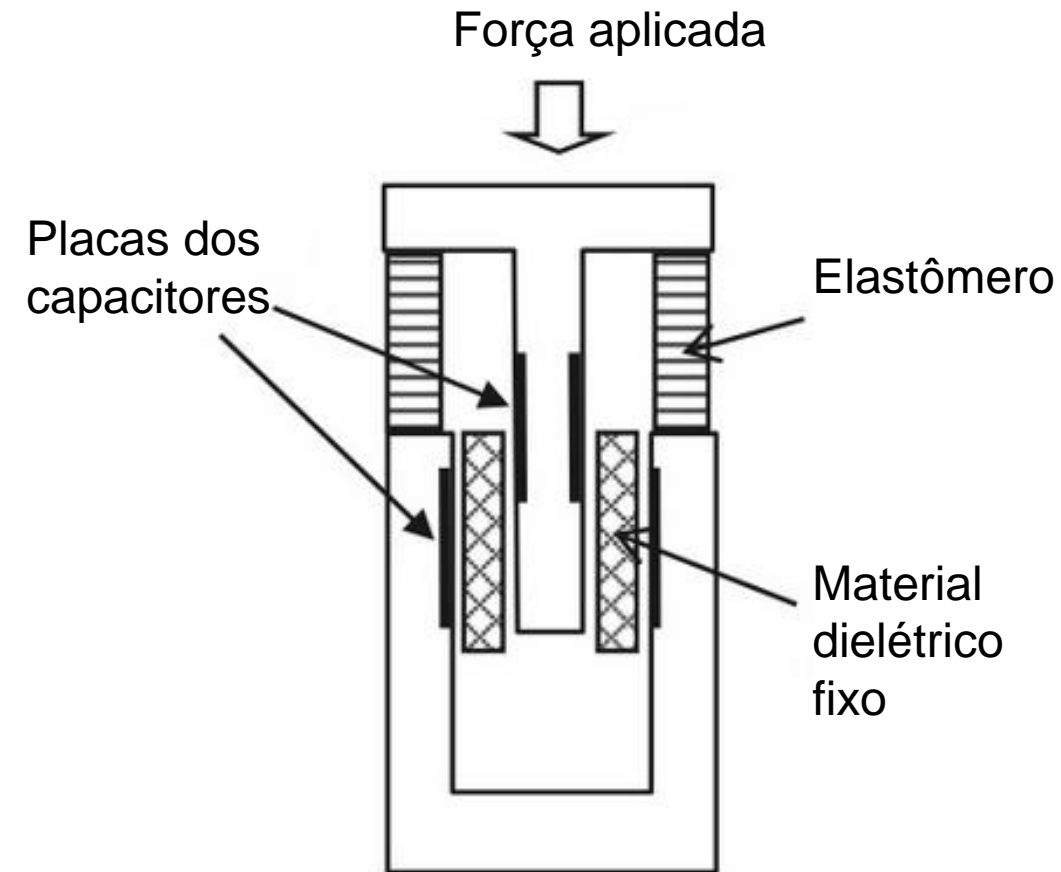


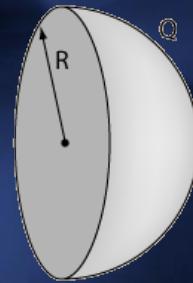


Este sensor foi utilizado uma estrutura de capacitor coaxial e um polímero de elevada constante dielétrica (PVDF) para maximizar a alteração de capacitância movimento do eletrodo interno, quando uma força é aplicada.

O movimento do eletrodo interno resulta na mudança de área e conseqüentemente na variação da capacitância.

Fluoreto de polivinilideno (PVDF) é um material cristalino, de notável resistência química, boa impermeabilidade a líquidos e gases, inerte ao ataque dos raios ultravioleta, além de ótimas características mecânicas e excelente estabilidade dimensional.





$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

Sensores Capacitivos Esféricos



Um sistema de sondagem 3D sem contato utilizando uma placa esférica pode trazer alta precisão em medições de perfil de pequenas estruturas, com resoluções de nanômetros.

O sensor capacitivo esférico leva a um sensoriamento idêntico em qualquer direção espacial arbitrária e converte o micro espaço entre o sensor e o alvo a ser medido em uma capacitância.

Essa estrutura também permite que mais fluxo elétrico se concentre dentro de uma pequena região entre o sensor e o alvo, ideal para sondagem 3D sem contato, com medição quase pontual.

