



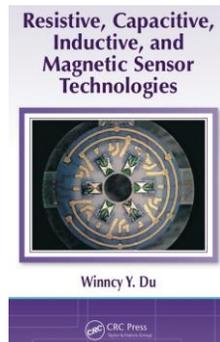
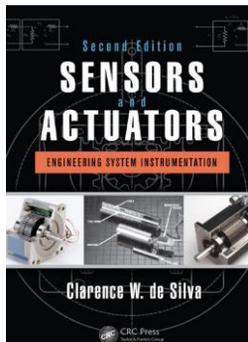
# CAPACITÂNCIA

Larissa Driemeier  
Marcilio Alves  
Rafael Moura  
Tarcisio Coelho

## LIVRO TEXTO



Essa aula é baseada nos livros:



## UM POUCO SOBRE CAPACITÂNCIA

### CAPACITOR

Um capacitor é um sistema constituído por dois condutores separados (armaduras).

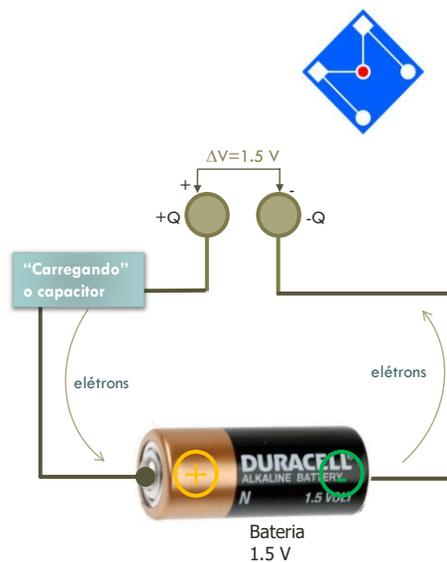
Inicialmente os condutores estão descarregados.

Os condutores são ligados a uma bateria, que estabelece um campo elétrico 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 elétrico surge entre elas. Como resultado, há um aumento da energia potencial elétrica do circuito, que se originou a partir da energia química na bateria.

No equilíbrio,

- 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.



# CAPACITÂNCIA



A capacitância  $C$  de um condutor é definida como a razão entre a carga  $Q$  no condutor e o potencial  $V$  produzido.

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

Definição de capacitância



Quanto maior a capacitância  $C$  maior o módulo de  $Q$  para uma dada diferença de potencial  $V$ ; portanto, maior energia armazenada.

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

# UNIDADE DE CAPACITÂNCIA



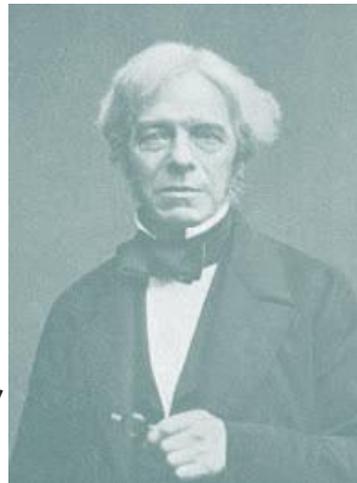
A capacitância é dada em Coulomb por volt,

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

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

1 Farad é um valor muito alto de capacitância,

Tipicamente, lida-se com  $\mu F$  ( $10^{-6}$  F), nF ( $10^{-9}$  F), ou pF ( $10^{-12}$  F)



# CAPACITORES ARMAZENAM ENERGIA



A energia armazenada num capacitor é igual ao trabalho necessário para carregá-lo com carga  $Q$ , estabelecendo uma diferença de potencial  $V$  entre as placas (dada por  $Q/C$ ). Ou seja, **a energia armazenada num capacitor é a energia potencial elétrica, fornecida pela bateria, associada ao trabalho para carregá-lo.**

Da definição de Potencial elétrico... Energia por unidade de carga:

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

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

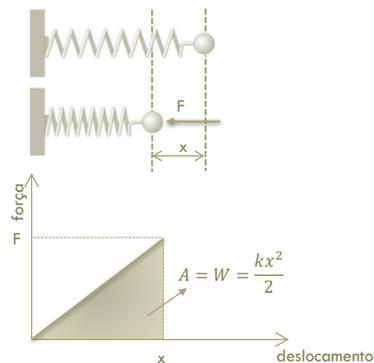
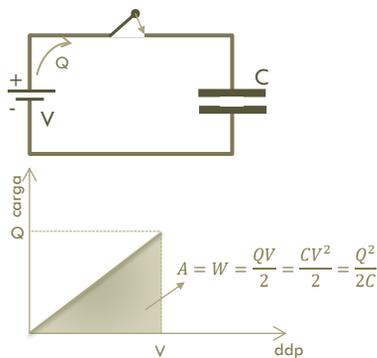
$$dE_p = dW = dqV = dq \frac{q}{C}$$

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

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



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.



## ENERGIA POR UNIDADE DE VOLUME

SE UM CAPACITOR ARMAZENA ENERGIA, ONDE ESTÁ ESSA ENERGIA?



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.

## CAPACITÂNCIA DEPENDE DA GEOMETRIA

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.

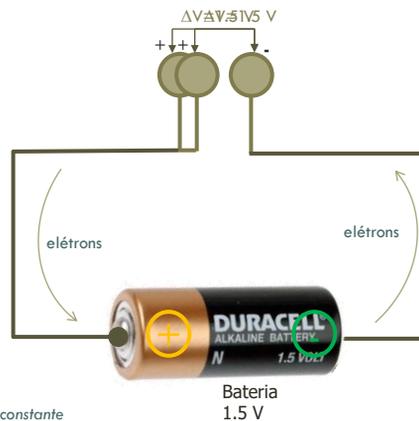
$$V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

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.

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

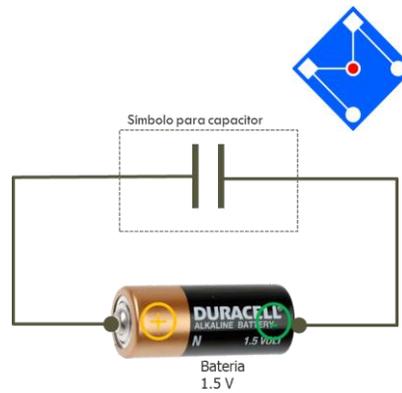
Diagrama da equação  $C = \frac{Q}{V}$  com setas indicando: 'aumenta' apontando para o numerador  $Q$ , 'constante' apontando para o denominador  $V$ , e 'aumenta' apontando para o resultado  $C$ .



## CONT...

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...?!?

## ENFIM...

Capacitância de um capacitor é um pouco como o tamanho de um balde: quanto maior o balde, mais água ele pode armazenar; quanto maior a capacitância, mais eletricidade um capacitor pode armazenar. Existem três maneiras de aumentar a capacidade:

- aumentar o tamanho das armaduras;
- Diminuir a distância entre as armaduras;
- fazer o dielétrico o mais isolante possível.

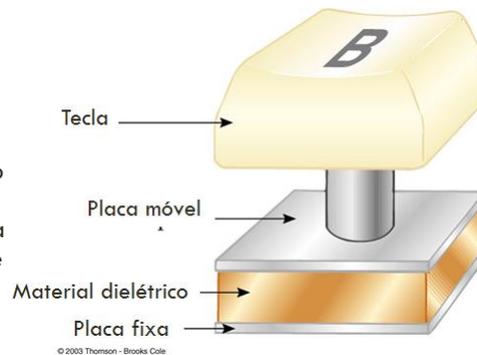
Com base na geometria e materiais, portanto, alguns capacitores são melhores em armazenamento de energia do que outros.

## APLICAÇÃO SIMPLES DE CAPACITOR



Os computadores usam capacitores de muitas maneiras

- Alguns teclados utilizam capacitores na base das teclas;
- Quando a tecla é pressionada, o espaçamento entre as placas do capacitor e diminui e, portanto, a capacitância muda (veremos que aumenta...);
- A tecla pressionada é reconhecida pela mudança na capacitância.

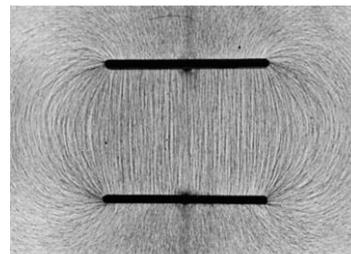
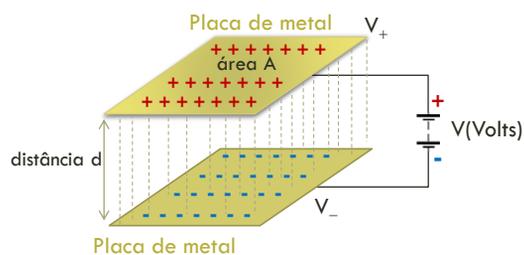


© 2003 Thomson - Brooks Cole

## CAPACITÂNCIA PARA PLACAS PARALELAS



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



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

# CAPACITÂNCIA PARA DIFERENTES GEOMETRIAS



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	$C = 4\pi\epsilon_0 R$	

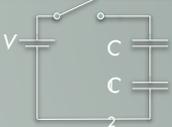
Para ter uma capacitância grande, torne a área A grande e a distância d pequena

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

Nota-se que a capacitância só depende de **fatores geométricos** do capacitor.

# CAPACITORES EM SÉRIE/PARALELO



PARALELO		O que caracteriza esse tipo de associação é a igualdade de potencial entre as placas dos capacitores. Portanto, $Q_1 = C_1 V$ $Q_2 = C_2 V$	$C_P = C_1 + C_2$
SÉRIE		Na associação em série o módulo das cargas acumuladas nas placas de todos os capacitores são iguais. Portanto, $Q_1 = Q_2 = Q = C_1 V_1 = C_2 V_2$	$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

## O QUE DEVO COLOCAR ENTRE AS PLACAS DE UM CAPACITOR????



Quanto mais perto estiverem as placas, maior a capacitância.

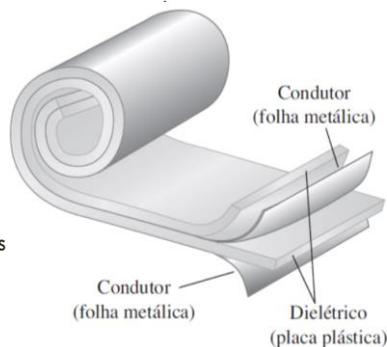
É difícil colocar duas placas próximas - a menos que coloquemos algo entre elas!

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.

Pequeno campo significa diferença de potencial menor...

**$C=Q/V$ , então  $C$  fica maior!**



## 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:

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

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

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
Pírex	4,7
Mica	5,4
Porcelana	6,5
Silício	12
Germânio	16
Etanol	25
Água a 20° C	80,4
Água a 25° C	78,5
Cerâmica	130



## RIGIDEZ DIELÉTRICA



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”).

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

# COMO ESCOLHER UM DIELETRICO



- Tenha uma alta constante dielétrica  $\kappa$   
A combinação  $\kappa\epsilon_0$  também é chamada permissividade  $\epsilon$
- Deve ser um bom isolante  
Caso contrário carga irá *sangrar* lentamente
- Tenha uma alta rigidez dielétrica  
O campo elétrico máximo em que o isolador de repente (e catastroficamente) se torna condutor

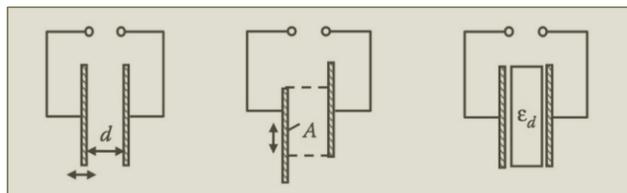
$$C = \frac{\kappa\epsilon_0 A}{d}$$



# SENSORES CAPACITIVOS DE PLACAS PARALELAS



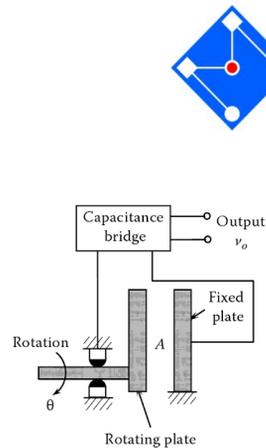
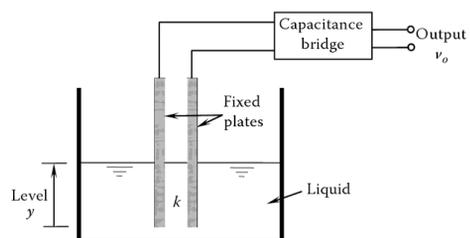
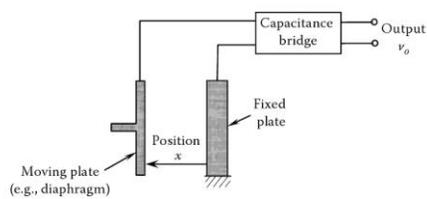
A configuração mais simples de um sensor de posição capacitivo é composta de duas placas paralelas de área  $A$  cada uma, espaçadas de uma pequena distância  $d$ . A capacitância do sensor é proporcional à área dos eletrodos e à constante dielétrica  $\epsilon_d$ , e inversamente relacionada com a distância entre elas.



Variação no espaço  $d$  entre as placas.

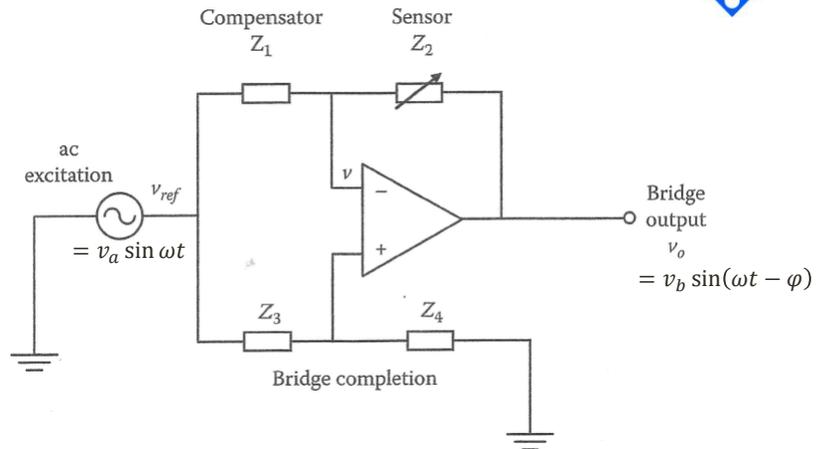
Variação da área  $A$  das placas.

Variação da constante dielétrica  $\epsilon_d$



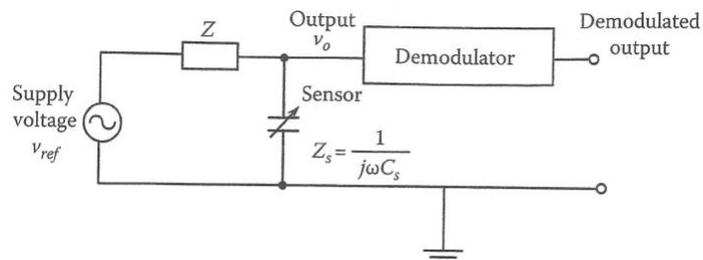
Figuras extraídas do Livro texto 1

## PONTE CAPACITIVA



$$v_0(\omega) = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} v_{ref}(\omega) \longrightarrow \delta v_0(\omega) = \frac{\delta Z}{Z_1(1 + Z_4/Z_3)} v_{ref}(\omega)$$

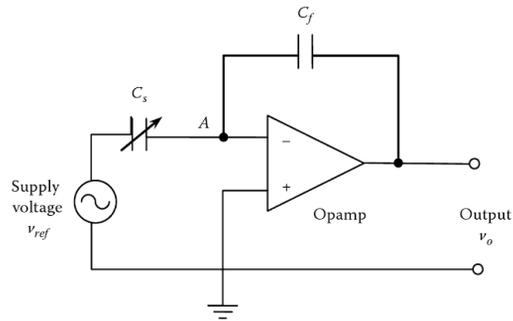
## CIRCUITO POTENCIOMÉTRICO



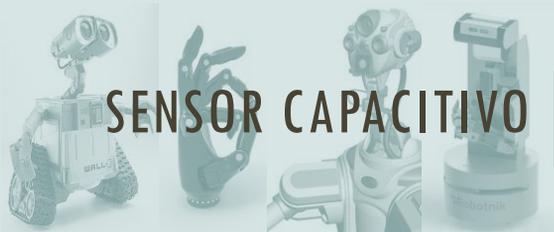
$$v_0(\omega) = \frac{Z_s}{Z + Z_s} v_{ref}(\omega)$$

# CIRCUITO AMPLIFICADOR

## PONTE DE AUTO-EQUILÍBRIO



$$v_0(\omega) = -\frac{C_s}{C_f} v_{ref}(\omega)$$

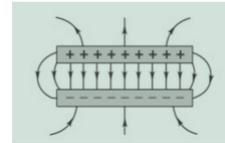
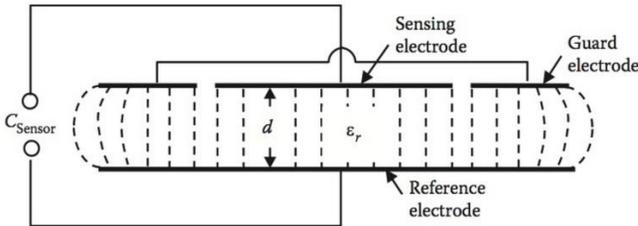


## SENSOR CAPACITIVO

Mudança de distância  $d$

# VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO D

Sensores de 1, 2 ou múltiplas placas

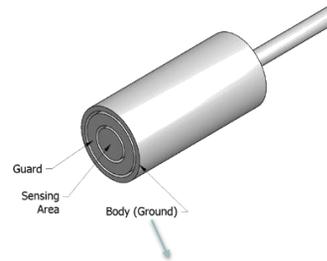


$$C = \frac{\epsilon_r A}{x}$$

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

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

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

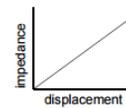
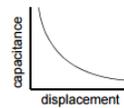


## CONT...



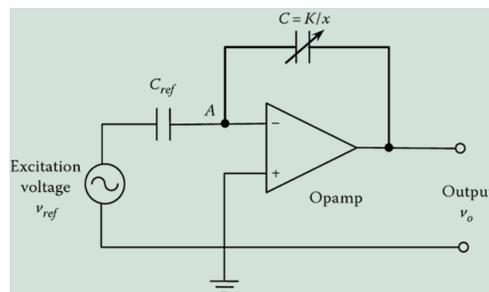
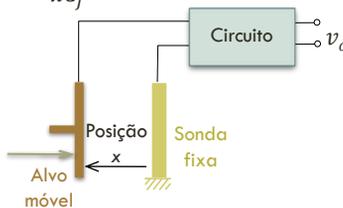
$$C = \frac{\epsilon_r A}{x}$$

**Impedância linear** – problema da não linearidade pode ser resolvido lendo a impedância ao invés da capacitância.



Utiliza-se um amplificador,

$$v_o = \frac{\epsilon_r A}{x C_f} v_s$$

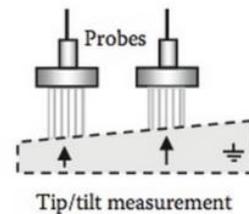
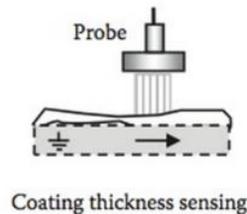
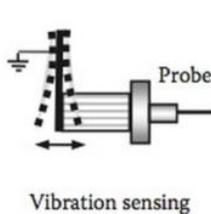
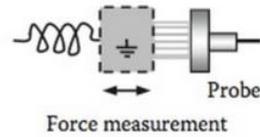
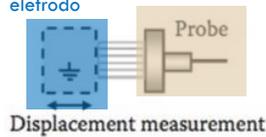


## SENSORES DE UMA ÚNICA PLACA



Alvo: de material condutivo, funciona como o segundo eletrodo

Placa de detecção (sonda): funciona como um eletrodo

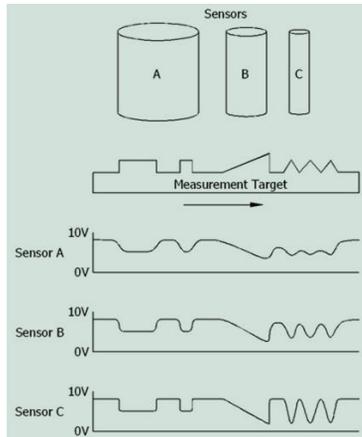


## ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DE PROJETO

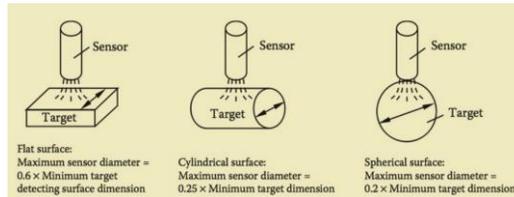


- Geralmente, a sonda é carregada e o alvo aterrado (quanto pior for esse aterramento, mais suscetível a ruído será a medição);
- Sensores de deslocamento de alto desempenho geralmente usam superfícies de sensoriamento pequenas e estão posicionados perto dos alvos (0,25 ~ 2 mm).
- Alta resolução e precisão na faixa entre 1-100kHz;
- Quanto maior o sensor, maior a faixa de operação, porém, aumentam o nível RMS de ruído e a não linearidade; e a resolução diminui.
- Comumente, os sensores são circulares. Como regra geral, o seu diâmetro deve ser 4x menor que a faixa total de atuação. Entre 0,5-10mm.

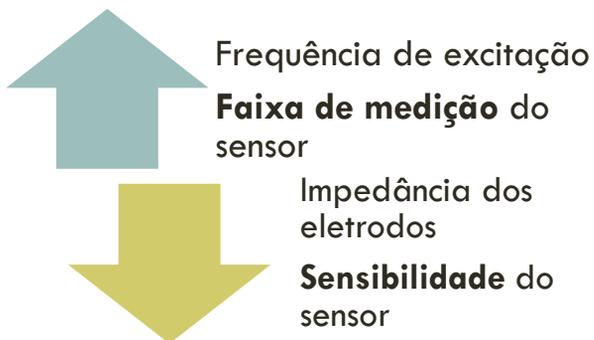
CONT...



Quanto menor o sensor, maior sua habilidade em distinguir pequenas características do alvo.



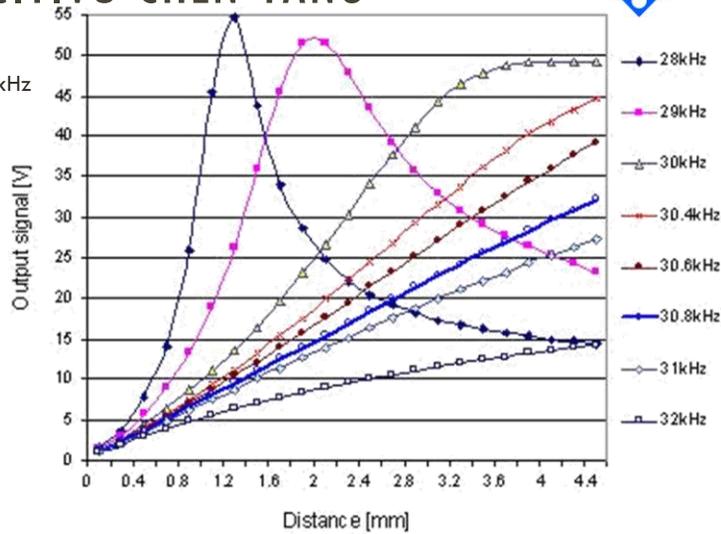
## EFEITO DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO



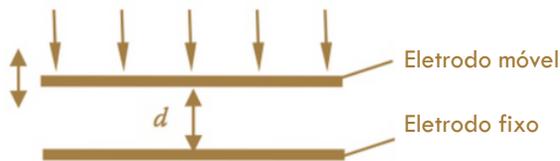
# SENSOR DE DESLOCAMENTO CAPACITIVO CHEN-YANG



Frequência de ressonância: 30,4 kHz



# SENSOR CAPACITIVO DE DUAS E TRÊS PLACAS



Mudança de temperatura, que afeta  $d$  pela expansão das placas ou pela mudança do dielétrico pode ser compensada pelo uso de 3 placas.



## EXERCÍCIO 1



Compare os seguintes valores de capacitância:

1. Capacitor de duas placas com espaçamento  $d$ ;
2. Capacitor de 3 placas em série, com espaçamento  $d/2$  entre placas adjacentes;
3. Capacitor de 3 placas em paralelo, com espaçamento  $d/2$  entre placas adjacentes.

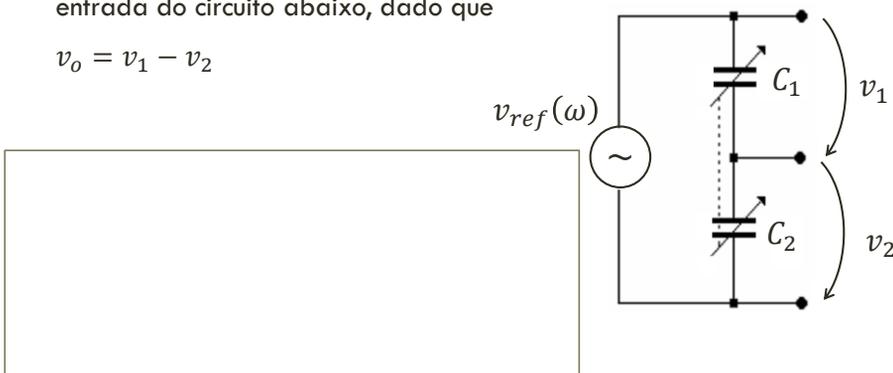
Para todos, área  $A$  e constante dielétrica  $\epsilon_r$  são constantes.

## EXERCÍCIO 2 – FAÇA EM CASA



Dado  $C = \epsilon \frac{A}{d}$ , qual seria a relação entre voltagem de saída e entrada do circuito abaixo, dado que

$$v_o = v_1 - v_2$$



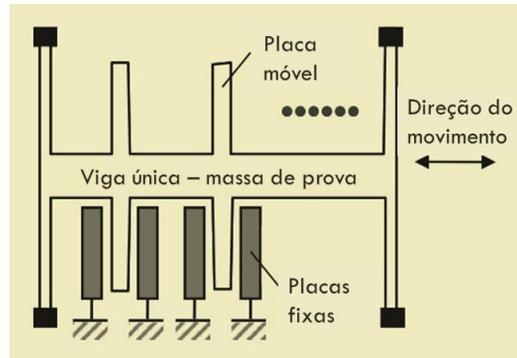
## SENSOR CAPACITIVO DE MÚLTIPLAS PLACAS



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

Tem-se melhora significativa de:

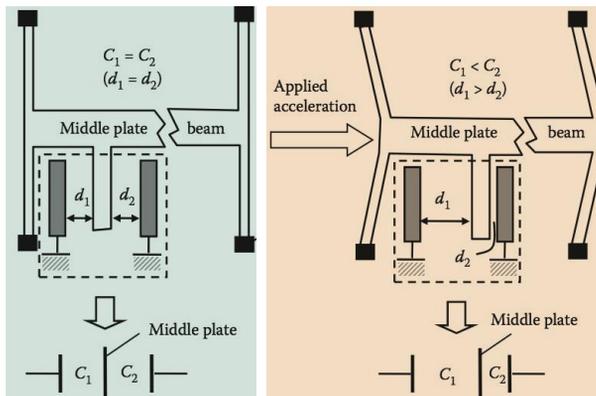
- Faixa de utilização;
- Acurácia;
- Sensibilidade;
- Estabilidade;
- Relação sinal-ruído.



## CONT...



As figuras mostram a versão simplificada de um acelerômetro capacitivo, respectivamente, **em repouso** e **submetido a aceleração**.



Os capacitores individuais em cada grupo,  $C_1$  e  $C_2$ , estão ligados em série. Se ausência de aceleração,  $C_1 = C_2$ ; se uma aceleração é aplicada,  $C_1 \neq C_2$ .

## EXERCÍCIO 3



Um sensor de múltiplas placas consiste de 42 células de silício (placas fixas) e uma massa de prova (placa em movimento), formando 42 grupos paralelos de dois capacitores gêmeos em série. Assuma-se que o sensor está sob uma aceleração que resulta em  $C_1 = 0,004 \text{ pF}$  e  $C_2 = 0,006 \text{ pF}$  para cada grupo de capacitores gêmeos. Qual a capacitância total de todo o sensor?

## MEMS

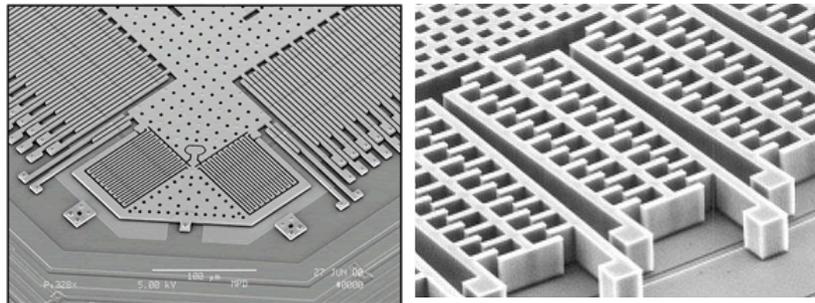
*Despite the fact that MEMS accelerometers have been built into automotive airbags since the mid-90s, few people were aware of their existence until 2006 when the Nintendo Wii game consoles started taking over their living rooms. MEMS motion sensors are now widely used in automotive electronics, medical 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**

# MEMS — ACELERÔMETRO CAPACITIVO



Os acelerômetros são um exemplo de sensores de MEMS bem sucedidos comercialmente. Por exemplo, a Analog Devices, líder em sensores MEMS, distribuiu mais de 200 milhões de sensores inerciais MEMS em Abril de 2005.



## CONT...



Capacitivo acelerômetro MEMS

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

Sensibilidade de 20 a 1000 mV/g

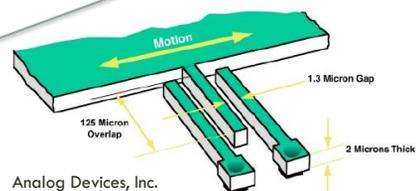
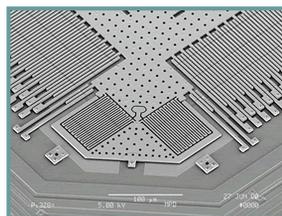
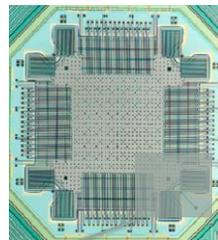
Alta precisão

Estabilidade em altas temperaturas

Baixa potência (inferior a 700  $\mu$ A)

5 mm x 5 mm x 2 mm

Baixo custo (~US\$5 – \$14)



Analog Devices, Inc.

## AIRBAGS



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!

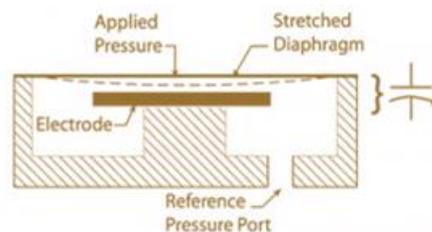


## SISTEMA DE AIRBAG

### Sentir o passageiro

#### Sensor Capacitivo de Pressão – Diafragma Fino

A pressão é detectada com base na alteração da capacitância entre o diafragma e o eletrodo



### Sentir o acidente

#### Sensor Capacitivo de aceleração – MEMS

A mudança na capacitância elétrica em relação à aceleração

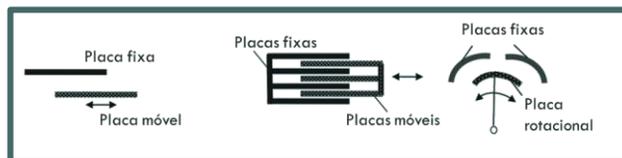




## MUDANÇA DE ÁREA



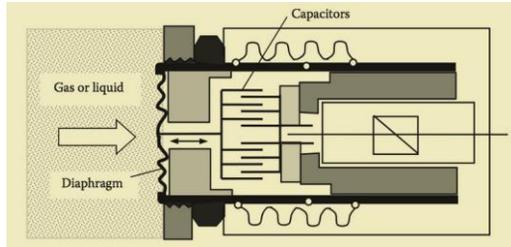
Quando uma das placas desliza transversalmente, há mudança de área sobreposta, fazendo com que a capacitância mude linearmente. Esta mudança é geralmente convertida em uma mudança de voltagem.



Desafios de projeto:

- (1) evitar a inclinação em qualquer eixo de uma placa, em especial quando a área  $A$  é grande, a fim de conseguir uma capacitância alta;
- (2) manter a distância  $d$  entre as placas pequena e constante para minimizar o efeito da variação no espaçamento e maximizar a capacitância;
- (3) eliminar o acoplamento da parte de trás da placa, especialmente em sensores compactos de múltiplas placas.

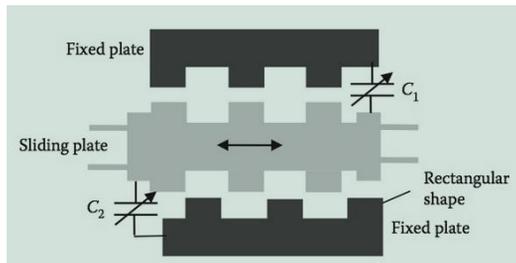
## SENSOR DE PRESSÃO



Sensor projetado pela Veja Technique, França.

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.

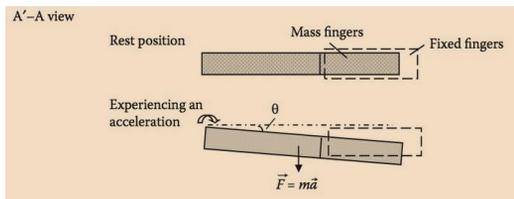
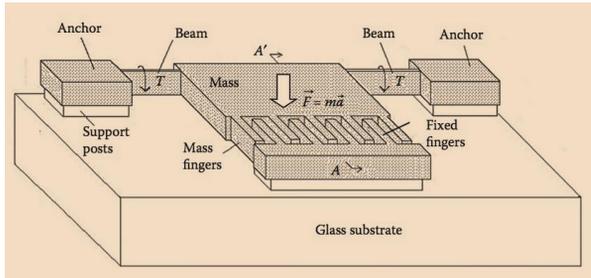
## SENSOR DE POSIÇÃO



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

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

# ACELERÔMETRO DE TORÇÃO



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.

# VALORES CARACTERÍSTICOS



## Geometry Parameters of a Torsional Accelerometer

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  $M$ :  $2.446 \times 10^{-3}$  g  
 Etch pit depth  $d'$ : 15  $\mu\text{m}$

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

Beam width  $w_b$ : 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

$$\Delta C \approx \frac{n\epsilon_0\epsilon_r l_f}{d_f} (2l_m + l_f)\theta$$

Questão: Qual a variação de capacitância  $\Delta C$  para  $\theta = 1,6^\circ$  e  $\epsilon_r = 1$ ?



## A CONSTANTE DIELÉTRICA MUDA QUANDO...



Quando o material dielétrico absorve umidade;

Quando uma força ou pressão é aplicada e altera densidade do material dielétrico



**Sensor de força, pressão, químico e de umidade.**

**Sensor de movimento ou de proximidade de materiais não condutores.**

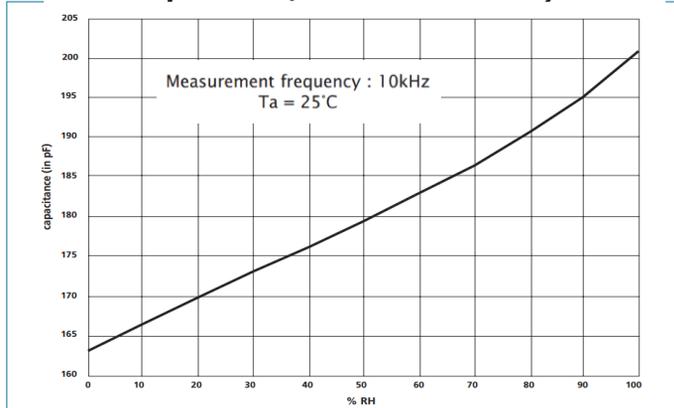
Quando o meio dielétrico reage com material alvo.



Sensor depende do material do alvo para interferir com o campo elétrico do sensor para mudar sua capacitância

# HS1101 RELATIVE HUMIDITY SENSOR

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

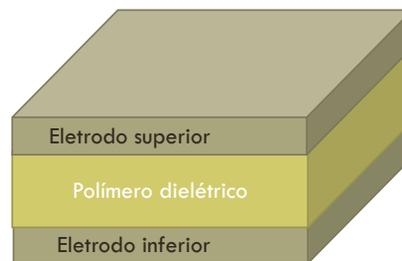


Aprox. R\$7,00

#### Key Specifications

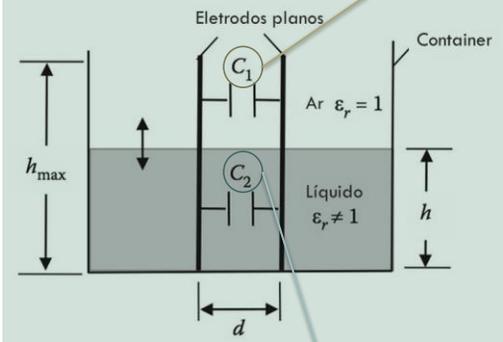
- Power requirements: 5 to 10 VDC
- Communication: Analog output of varying capacitance in response to change in relative humidity
- Humidity Measuring Range: 1 to 99% RH
- Operating temperature: -40 to 212 °F (-40 to 100 °C)

# SENSOR QUÍMICO



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 elétrodos e também modifica a permissividade dielétrica do polímero. Ambas modificações alteraram a capacitância do sensor, que pode ser eletricamente detectada e medida.

## MEDIÇÃO DE NÍVEL



Área da placa  
( $b$ : largura)

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 b (h_{max} - h)}{d}$$

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

$$\Delta C = C - C_0 \approx kh$$

Capacitores em paralelo:  
 $C = C_1 + C_2$

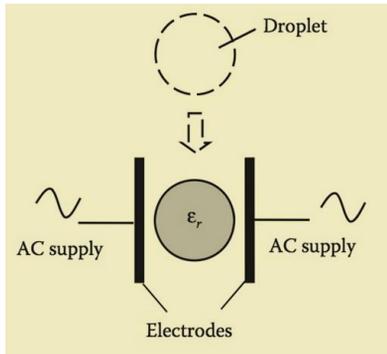
$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 b h_{max}}{d}$$

$$C_2 = \frac{k \varepsilon_0 \varepsilon_r b h}{d}$$

## EXERCÍCIO

O sensor capacitivo mostrado na página anterior é utilizado para medir o nível de água que pode atingir até 30mm de altura. Se a capacitância lida é 503,4 pF, qual o nível da água? A largura entre os eletrodos planos é 20mm e a distância entre eles é de 1mm.

# DETECTOR DE GOTA



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

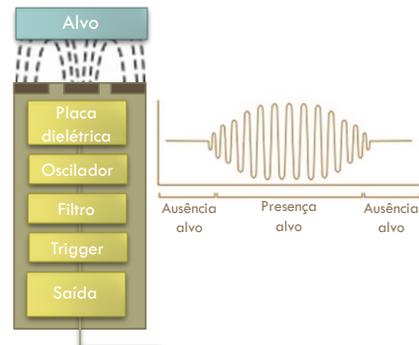
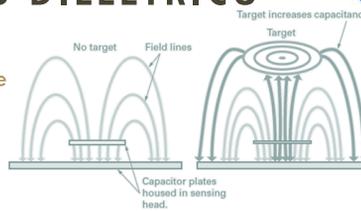
Faixa de atuação entre 20-65 nL, resolução < 2nL.

Sensor de precisão!

# ALVO COMO MEIO DIELÉTRICO



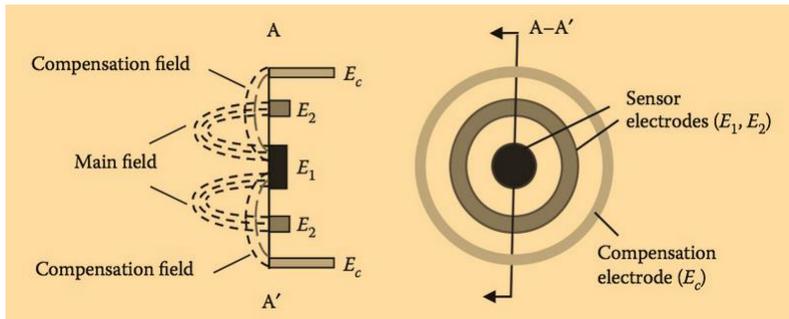
A maioria dos sensores de proximidade capacitivos são tipos de sonda com um layout interno típico. A superfície de detecção é muitas vezes formada por dois eletrodos anulares concêntricos.



## COMPENSAÇÃO



Quando os contaminantes estão na face sensível do sensor, eles afetam tanto o campo principal do sensor quanto o campo de compensação. Um circuito pode, em seguida, detectar o aumento em ambos os campos, e filtrar os efeitos dos contaminantes. Quando o alvo se aproxima do sensor, o circuito de sensor pode distinguir as diferentes respostas entre estes dois campos e gerar uma saída.



## DISTÂNCIA DE SENSORIAMENTO



A distância de detecção nominal e distância de detecção efetiva devem ser avaliadas no uso de um sensor.



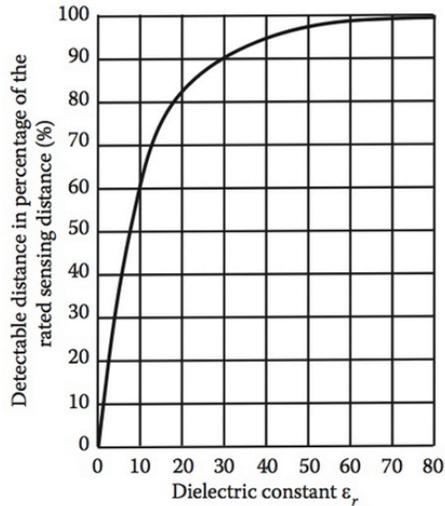
### **Distância Nominal de sensoriamento ( $S_N$ )**

é a distância nominal de funcionamento, para as quais um sensor é projetado, obtida usando critérios padronizados, em condições controladas.

### **Distância Efetiva de sensoriamento ( $S_R$ )**

é a real distância de detecção alcançado de um sensor instalado. Esta distância está em algum lugar entre a distância de detecção nominal ideal e o pior caso de detecção à distância.

# CONSTANTE DIELÉTRICA DO ALVO



Material	$\epsilon_r$	Material	$\epsilon_r$
Vácuo e Ar	1	Araldite	3,6
Argila	1,8-2,8	Dióxido de Silício	3,9
Teflon	2	Nylon	4-5
Óleo de trafo	2,2	Porcelana	4,4
Polipropileno	2,3	Vidro	10
Polietileno	2,3	Diamante	5,5-10
Madeira	2,7	Mica	7
Borracha de silicone	2,8	Borracha	7
PVC	2,9	Mármore	8
Celulóide	3	Silicone	11-12
Polistirol	3	Álcool	16-31
Gelo	3-4	Amônia	20
Papel	3,5	Água	80
Baquelite	3,6	Água do mar	81-88

## EXEMPLO



Um sensor capacitivo da Siemens tem uma distância nominal de sensoriamento  $S_N = 9\text{mm}$  e o material alvo é o mármore. Qual a distância efetiva de sensoriamento?

Resposta:

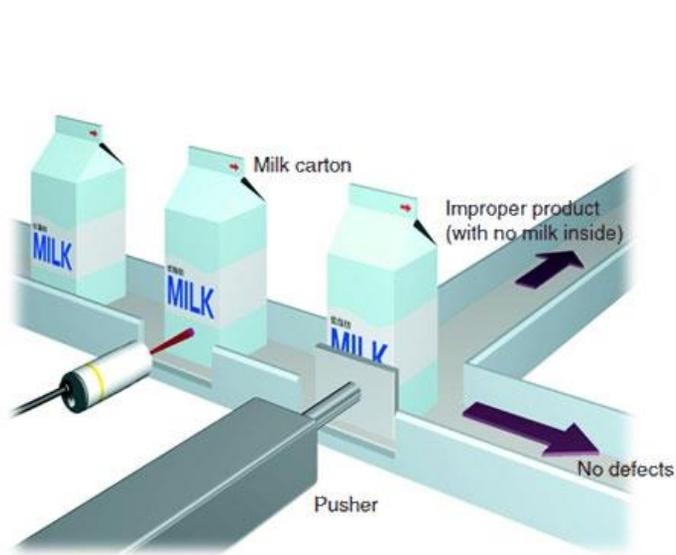
Mármore tem constante dielétrica de 8, que corresponde a, aproximadamente, 50% da distância nominal efetiva (ver gráfico). Portanto,  $S_R = 0,5 * 9.0\text{ mm} = 4.5\text{ mm}$

## DETECTOR DE NÍVEL DE ÁGUA



Uma aplicação importante destes sensores é a detecção de água através de uma barreira. Como a água tem uma constante dielétrica bem alta, o sensor tem a habilidade de “enxergar” através da maioria dos materiais e detectar nível de água.





## EXERCÍCIO

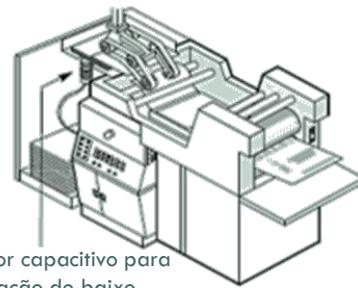
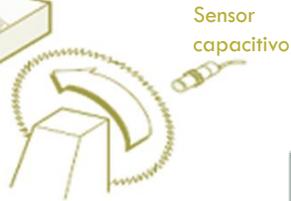


Um sensor capacitivo da Siemens tem uma distância nominal de sensoriamento  $S_N = 20mm$ . Esse sensor pode ser usado para detectar a presença de amônia atrás de um painel de vidro de 3mm?

## OUTRAS APLICAÇÕES



Lâmina vai e volta na madeira.



Sensor capacitivo para indicação de baixo nível de papel

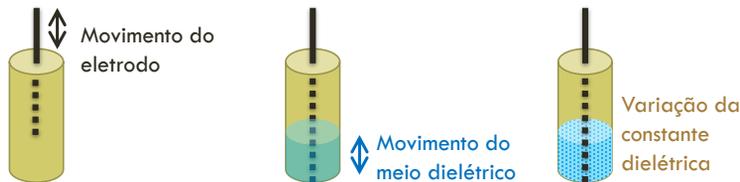


SENSORES CAPACITIVOS  
CILÍNDRICOS

## SENSORES CAPACITIVOS CILÍNDRICOS (SCCs)



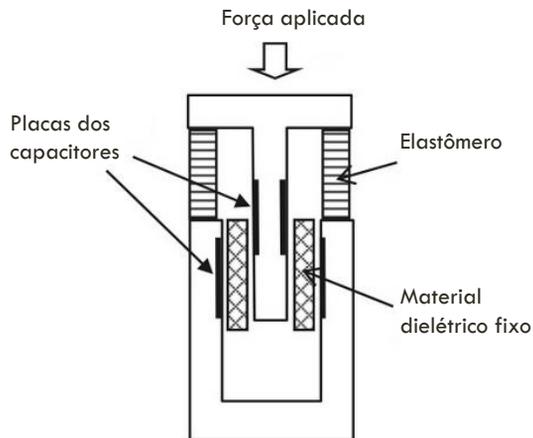
A configuração cilíndrica ou coaxial é um outro projeto popular de sensores capacitivos. Um dos primeiros capacitores, a garrafa de Leyden, tinha uma forma cilíndrica. Sensores capacitivos cilíndricos (SCCs) são amplamente utilizados na detecção de proximidade, medição do nível de fluido, medição de deslocamento/temperatura/umidade e detecção de substância química.



## SENSOR DE TOQUE COAXIAL

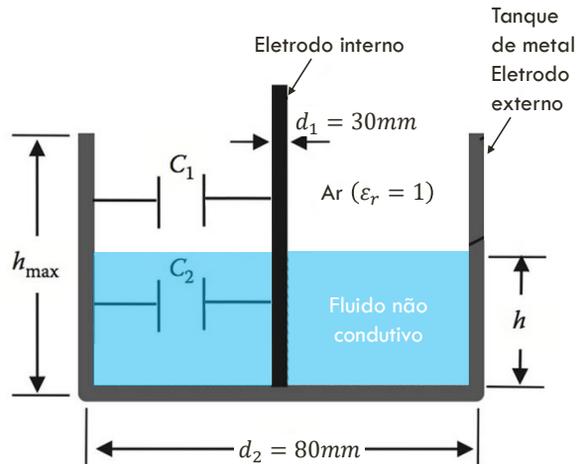


Este sensor utiliza uma estrutura de capacitor coaxial e um polímero de elevada constante dielétrica (PVDF) para maximizar a alteração de capacitância movimento do eletrodo interno, quando é



## EXERCÍCIO

O sensor capacitivo mostrado é utilizado para medir o nível de um líquido. Se  $h_{max} = 125\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = 80$ , e a alteração da capacitância medida é  $279,3 \text{ pF}$ , qual é o nível de líquido?



$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(h_{max} - h)}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_2/r_1)} [h_{max} + (\epsilon_r - 1)h]$$

$$C = C_0 + 2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)\frac{h}{\ln(r_2/r_1)}$$

**Tanque vazio:**

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 h_{max} / \ln(r_2/r_1)$$

**Variação de capacitância para líquido a uma altura  $h$ :**

$$C - C_0 = \Delta C = 2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)h / \ln(r_2/r_1)$$

O nível  $h$  do material dielétrico pode ser encontrado:

$$h = \frac{\Delta C \ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)}$$

Portanto:

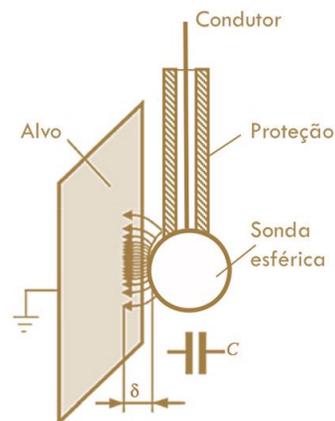
$$h = \frac{\Delta C \ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)} = \frac{(279.3 \times 10^{-12} \text{ F}) \ln(37.5/15)}{2(3.14)(8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1})(80 - 1)} = 58.29 \text{ mm}$$



## SONDA ESFÉRICA DE ALTA PRECISÃO



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





# PARA CASA...

Sensores em Malha  
Exercícios



# SENSORES CAPACITIVOS EM MALHA

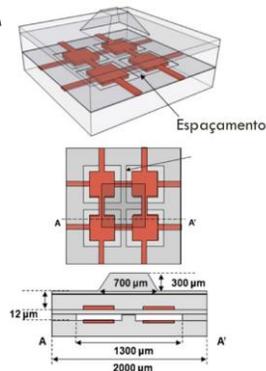
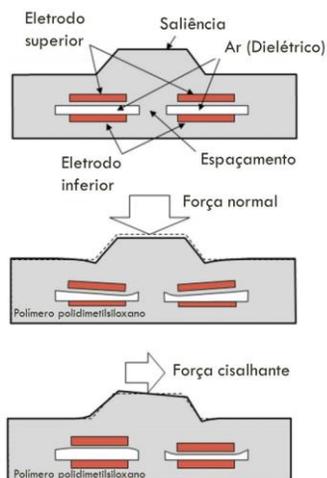
## SENSORES CAPACITIVOS EM MALHA



Os sensores capacitivos também podem ser dispostos em malha, para sensoriamentos mais sofisticados. Recentes avanços em circuitos integrados e impressos, materiais, MEMS e nanotecnologia têm miniaturizado mais sensores capacitivos. Isto tem ajudado a expandir o seu uso em ambientes severos (alta temperatura, fortes campos magnéticos e radiação maciça), assim como em aplicações sem contato e não-invasivos. Programas de pesquisa e desenvolvimento em todo o mundo continuam a conduzir o projeto e implementação de sensores capacitivos.



## MEDIDOR DE FORÇA



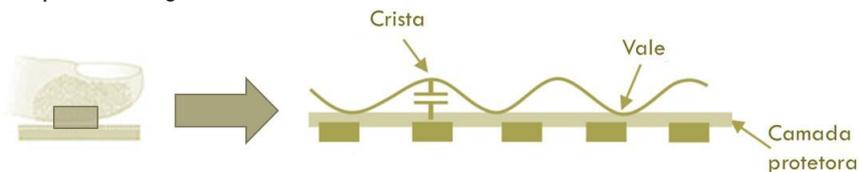
Quando o cisalhamento é aplicado, a saliência se deforma, e a força gera um binário nas camadas superiores de eletrodos. Como um resultado, o espaço do dielétrico se modifica.

H.-K. Lee, J. Chung, S. Chang, E. Yoon, Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor, *J. Micromech. Microeng.*, 21, 2011.

## SENSOR DE IMPRESSÃO DIGITAL



O sensor de impressão digital contém dezenas de milhares de minúsculas placas capacitivas (que funcionam como pixels), cada uma com o seu próprio circuito elétrico embutido no chip. Quando um dedo é colocado sobre o sensor, cargas elétricas são criadas e o sensor mede a capacitância padrão em toda a superfície. Onde há uma crista ou vale, a distância acima das placas varia, assim como a capacitância, construindo a impressão digital do dedo.

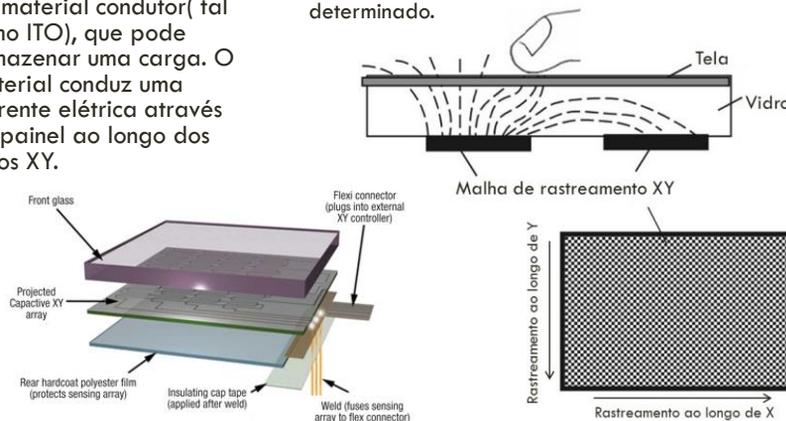


## TOUCH SCREEN CAPACITIVA



Uma tela sensível ao toque capacitiva utiliza uma superfície revestida com um material condutor (tal como ITO), que pode armazenar uma carga. O material conduz uma corrente elétrica através do painel ao longo dos eixos XY.

Quando tocado por algo condutor, como um dedo, o campo elétrico é alterado e o ponto de contato na coordenada XY pode ser determinado.





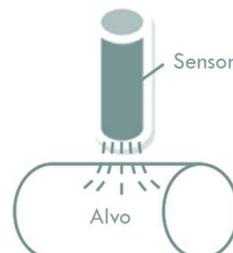
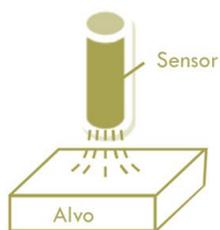
## EXERCÍCIO 1



Um sensor de proximidade capacitivo é escolhido para detectar:

- (1) uma placa (comprimento: 30 mm, largura: 20 mm, espessura: 5 mm)
- (2) um cilindro (comprimento: 25 mm, diâmetro: 30 mm).

Encontrar o tamanho máximo permitido do diâmetro do sensor para manter a resolução espacial adequada para cada caso.

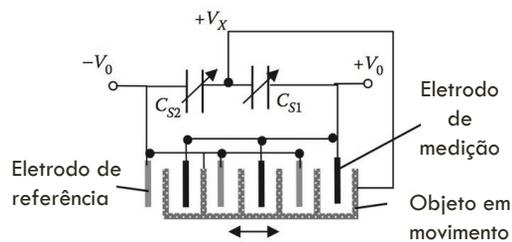


## EXERCÍCIO 2



Um sensor capacitivo de múltiplo tem um diagrama do circuito mostrado na Figura. Se o objeto se move para a direita, qual das seguintes opções melhor descreve a capacitância  $C_{S1}$  resultante (onde  $C_0$  é a capacitância  $C_{S1}$  quando o objeto estiver na posição central)?

- A.  $C_{S1} = C_0 + \Delta C$  e  $\Delta C > 0$
- B.  $C_{S1} = C_0 - \Delta C$  e  $\Delta C > 0$
- C.  $C_{S1} = C_0 + \Delta C$  e  $\Delta C < 0$
- D.  $C_{S1} = C_0 - \Delta C$  e  $\Delta C < 0$



## EXERCÍCIO 3



A quantidade de líquido disponível em um tanque de armazenamento é muitas vezes monitorada por um sensor capacitivo cilíndrico. Ao ligar o sensor de medição, a fração  $F_{liq}$  do reservatório cheio pelo líquido em termos da capacitância  $C$  do sensor pode ser determinada. O sensor tem raios  $r_1$  interior e exterior condutor e  $r_2$ , e a altura  $h_{max}$  que se estende por toda a altura do tanque. O dielétrico na região superior e inferior entre os condutores cilíndricos são, respectivamente, do líquido  $\epsilon_{liq}$  e seu vapor  $\epsilon_{vap}$ . O líquido não condutor enche o tanque a uma altura  $h$  (inferior ou igual a  $h_{max}$ ) a partir do fundo do tanque.

(1) Derive uma fórmula para o  $F_{liq}$ .

(2) se  $r_1 = 4,5mm$ ,  $r_2 = 5mm$ ,  $h_{max} = 2m$ ,  $\epsilon_{liq} = 1,4$ ,  $\epsilon_{vap} = 1,0$ , que os valores de  $C$  corresponderão ao tanque completamente cheio e completamente vazio?