



Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção – SE/2
Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Instrumentação, Aquisição e Processamento de Sinais para Medições de Engenharia

Prof. Luiz Cyrillo Aquino Campos

Unidade V:

*Acelerometria I: Sistemas dinâmicos,
acelerômetros force-balance
(servo) e FBG (fibra ótica).*

*Acelerometria II: acelerômetros capacitivo,
piezoresistivo, piezoelétrico
e MEMS.*

Outubro 2013



Acelerometria

- Referências -

Human Response to Vibration, 2004, Mansfield, N.J., CRC Press

The Principles of Acceleration, Shock, and Vibration Sensors

<http://archives.sensorsmag.com/articles/0505/14/main.shtml>

Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.

http://www.new.mmf.de/sensor_selection.htm

Engenharia de Controle Moderno, 2003, Ogata K., Pearson Prentice Hall

Vibrações Mecânicas, 2008, Rao, S., Pearson Prentice Hall



Acelerometria

- Referências -

Instrumentação e Fundamentos de Medidas, 2011, Balbinot, A.;
Brusamarello, V.J., LTC

How a Smartphone Knows Up from Down(accelerometer),
www.youtube.com/watch?v=KZVgKu6v808

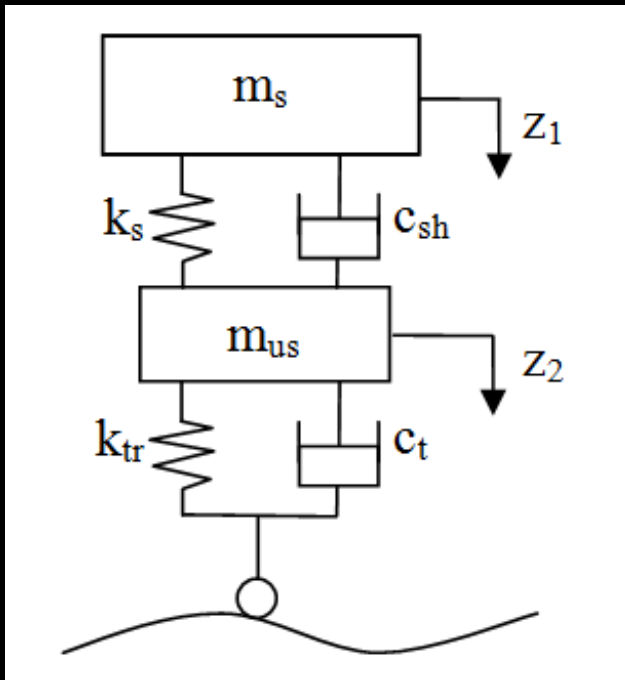
Variable Capacitance Accelerometers:Design and Applications,
Connolly, T.; Endevco Corp.



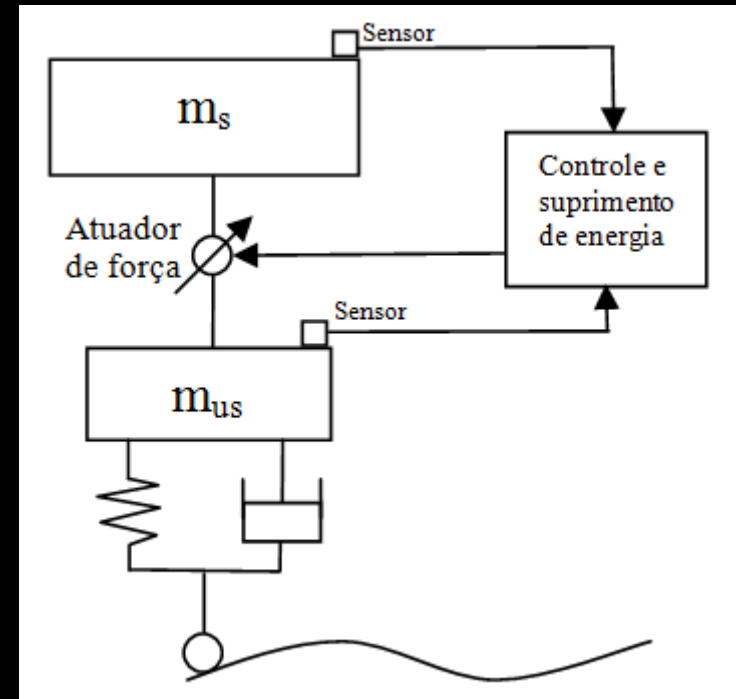
Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Sistemas em malha aberta: o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema.



Sistemas em malha fechada: o sinal de erro atuante realimenta o sistema de modo a minimizar o erro e corrigir a saída.





Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Sistemas com 1 GL:

Equação de movimento:

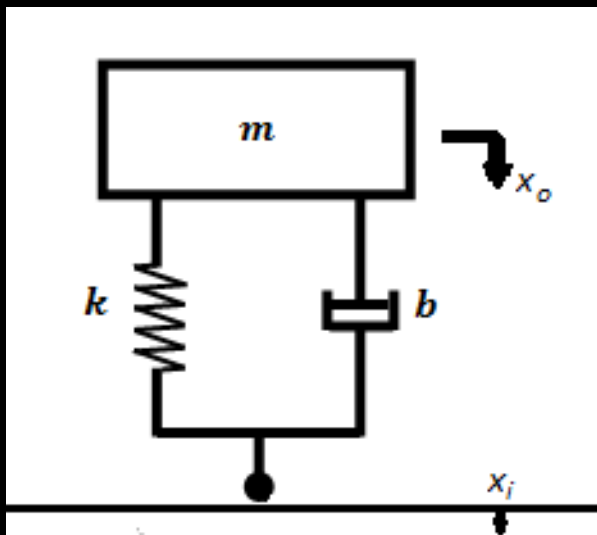
$$m\ddot{x}_o + b(\dot{x}_o - \dot{x}_i) + k(x_o - x_i) = 0$$

$$m\ddot{x}_o + b\dot{x}_o + kx_o = b\dot{x}_i + kx_i$$

Para condições iniciais nulas e utilizando Laplace:

$$(ms^2 + bs + k)X_o(s) = (bs + k)X_i(s)$$

$$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{(bs + k)}{(ms^2 + bs + k)}$$

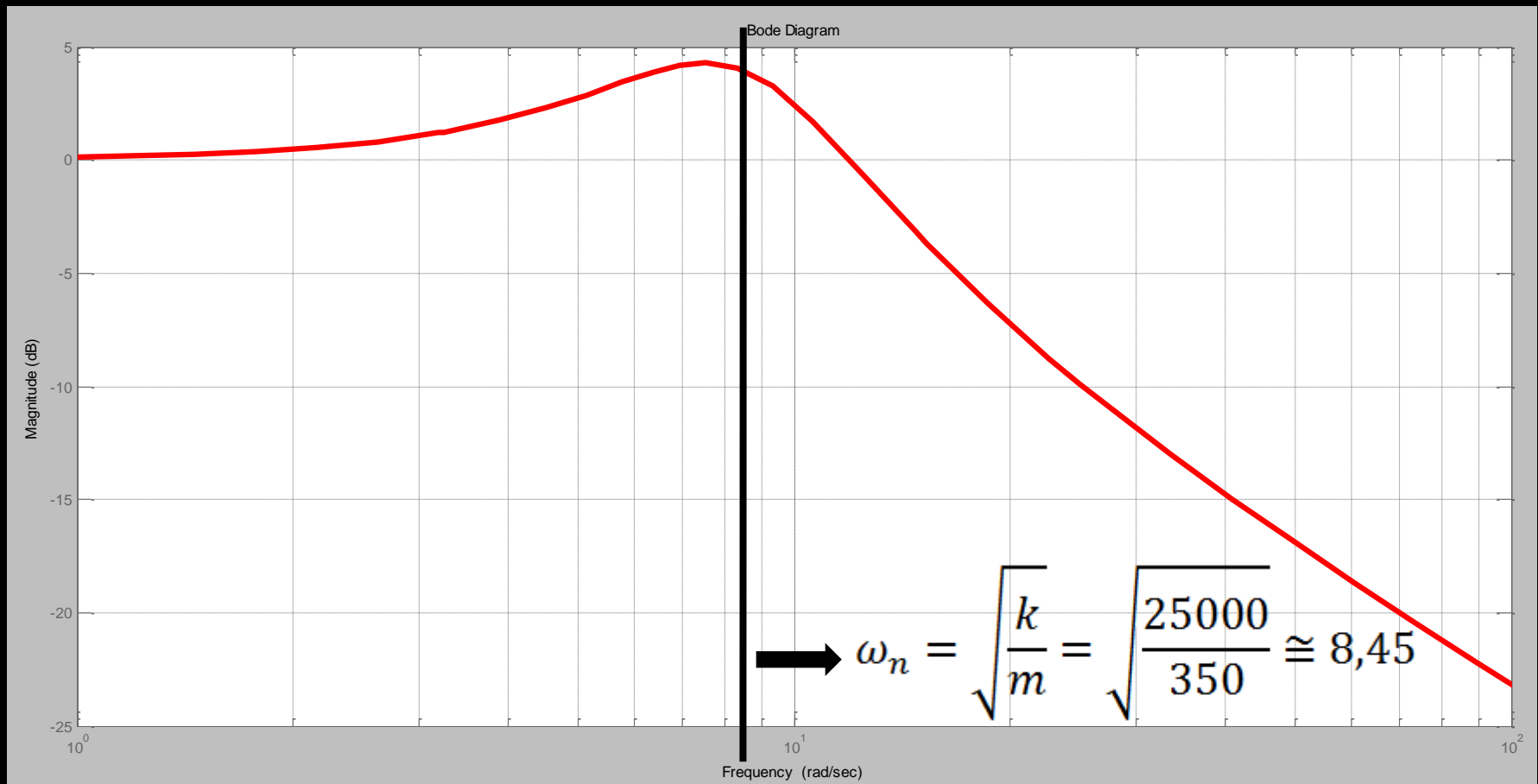




Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Resposta em frequência: $m=350\text{kg}$, $b=2400\text{Ns/m}$, $k=25\text{kN/m}$

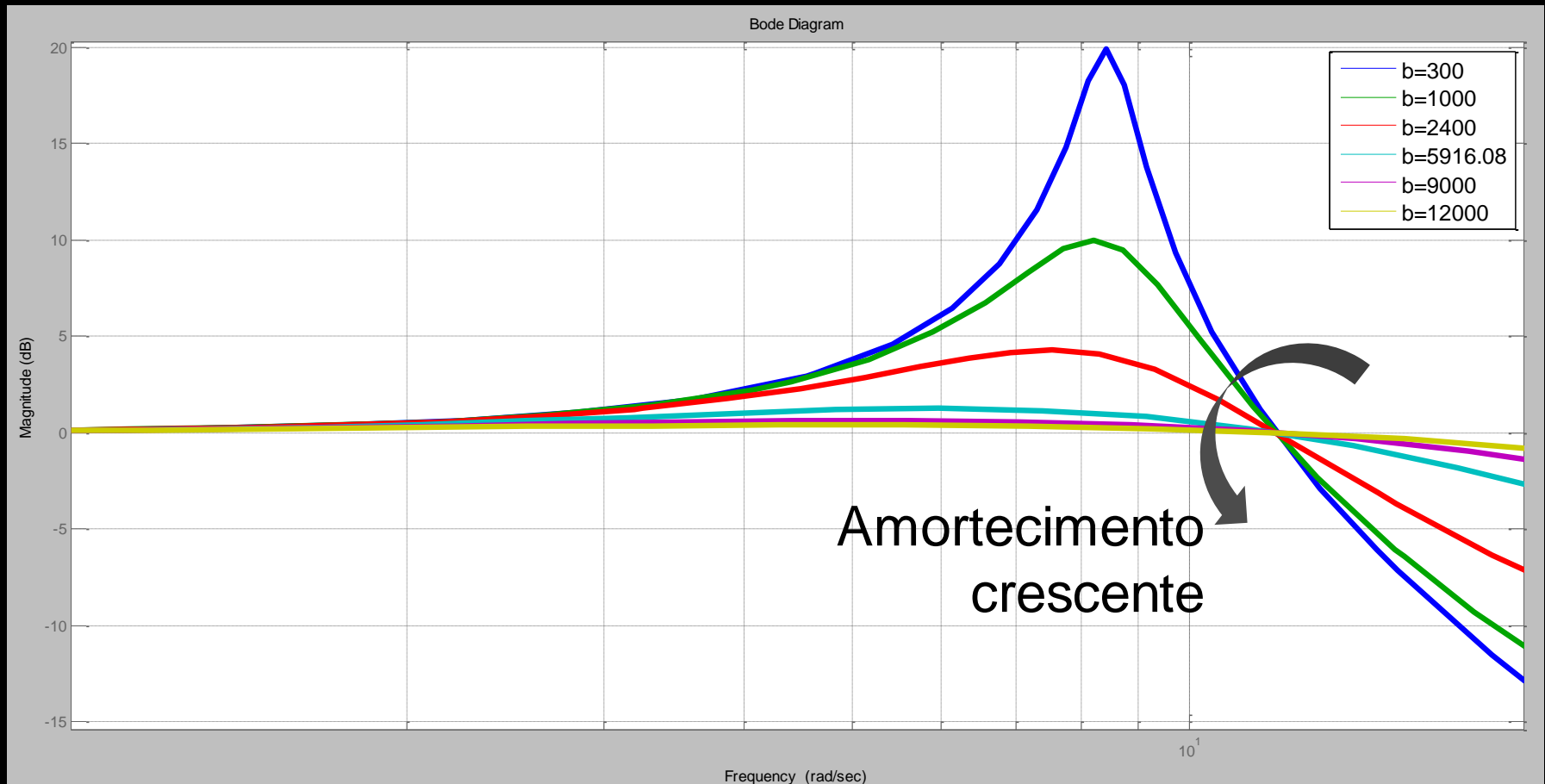




Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Variando-se o amortecimento

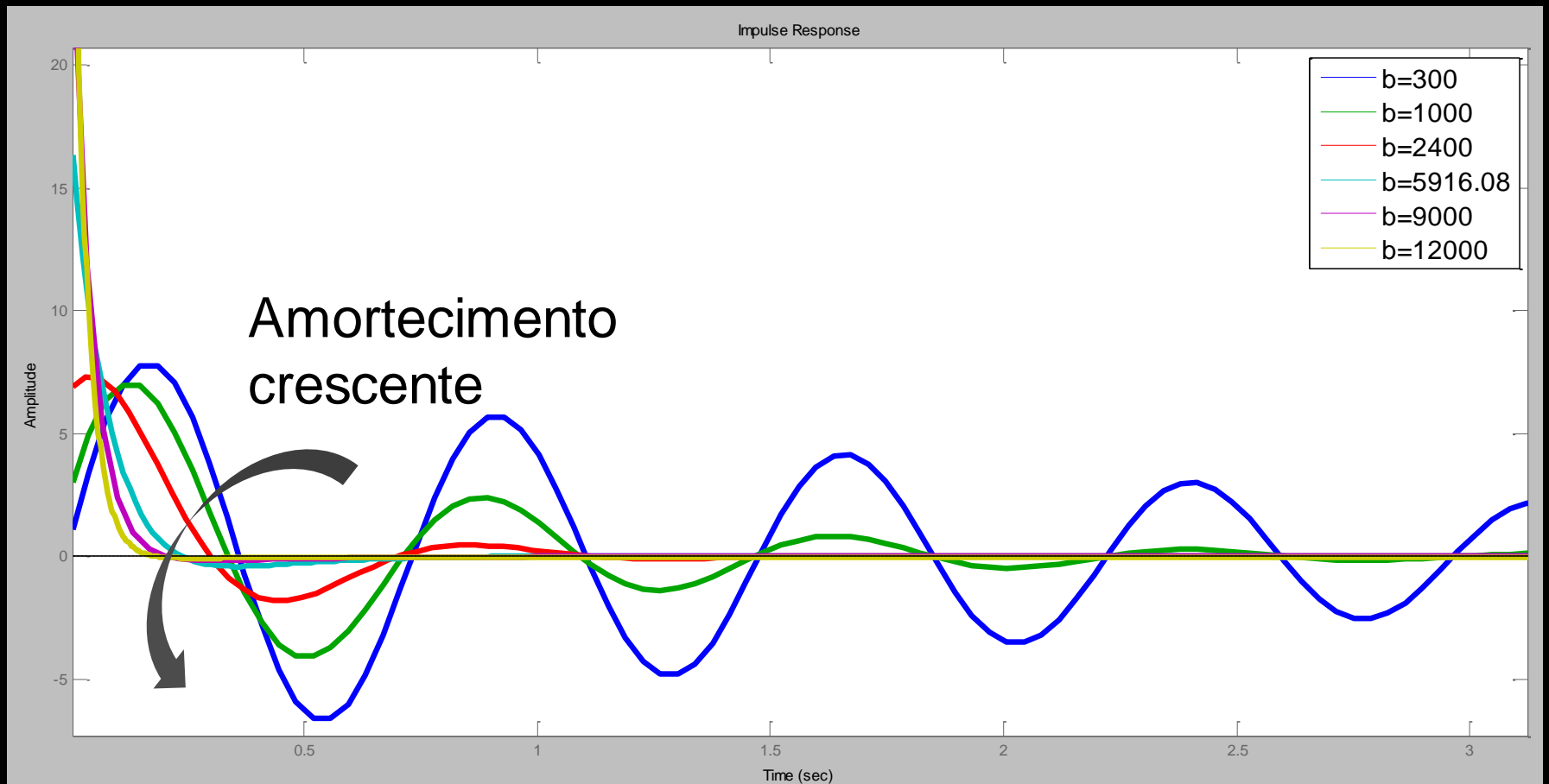




Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Resposta ao impulso (temporal)

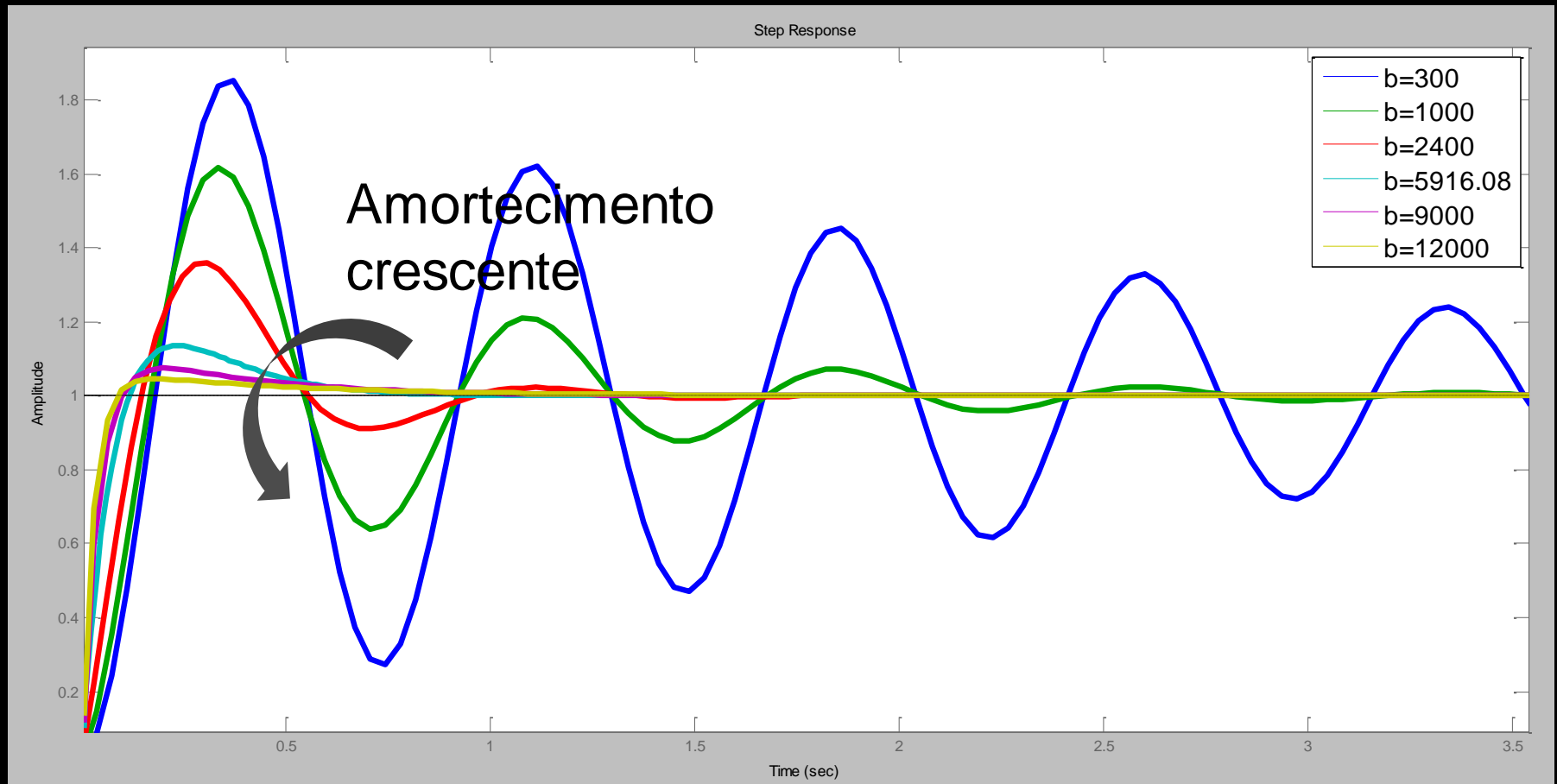




Acelerometria

- Sistemas Dinâmicos -

Resposta ao degrau (temporal)





Acelerometria

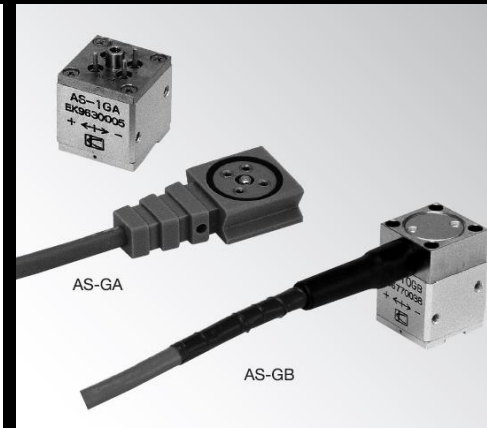
- Acelerometria I -

Acelerômetros: usados para medição de aceleração

Princípios de funcionamento: force balance, fiber Bragg grating, capacitivos, piezoresistivos, piezoelétricos e MEMS.



os7100 - Single Axis Accelerometer





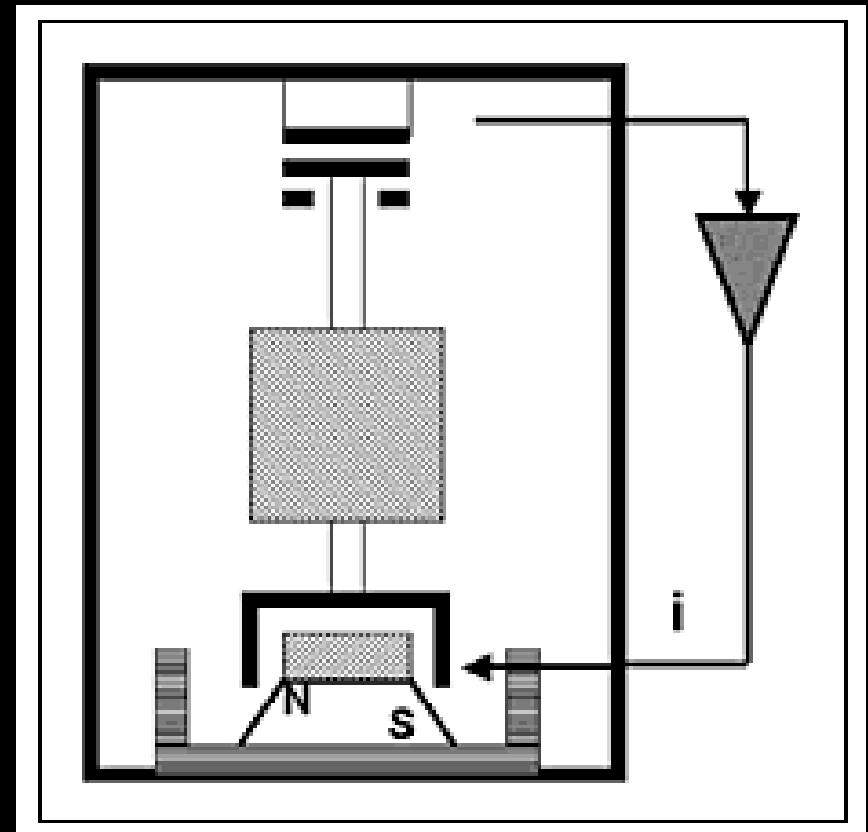
Acelerometria I

- Acelerômetros Force Balance -

Acelerômetros Force Balance (Servo):

Princípio de funcionamento:

consiste de uma massa sísmica em um levitador magnético. A força eletromagnética necessária para manter a massa na posição nula é proporcional à aceleração. São também chamados acelerômetros de malha fechada.





Acelerometria I

- Acelerômetros Force Balance -

Aplicações, Vantagens e Desvantagens:

- Elevada sensibilidade;
- utilizados em sistemas de navegação inercial (elevada precisão) em arranjos triaxiais e em combinação com girômetros triaxiais;
- para medidas de acelerações normalmente $< 50g$;
- capazes de medir baixíssimas frequências (DC, 0 Hz);
- faixa de frequência útil de 0 a 100 Hz (normalmente);
- Custos mais elevados que os de malha aberta (cerca de 10x);.

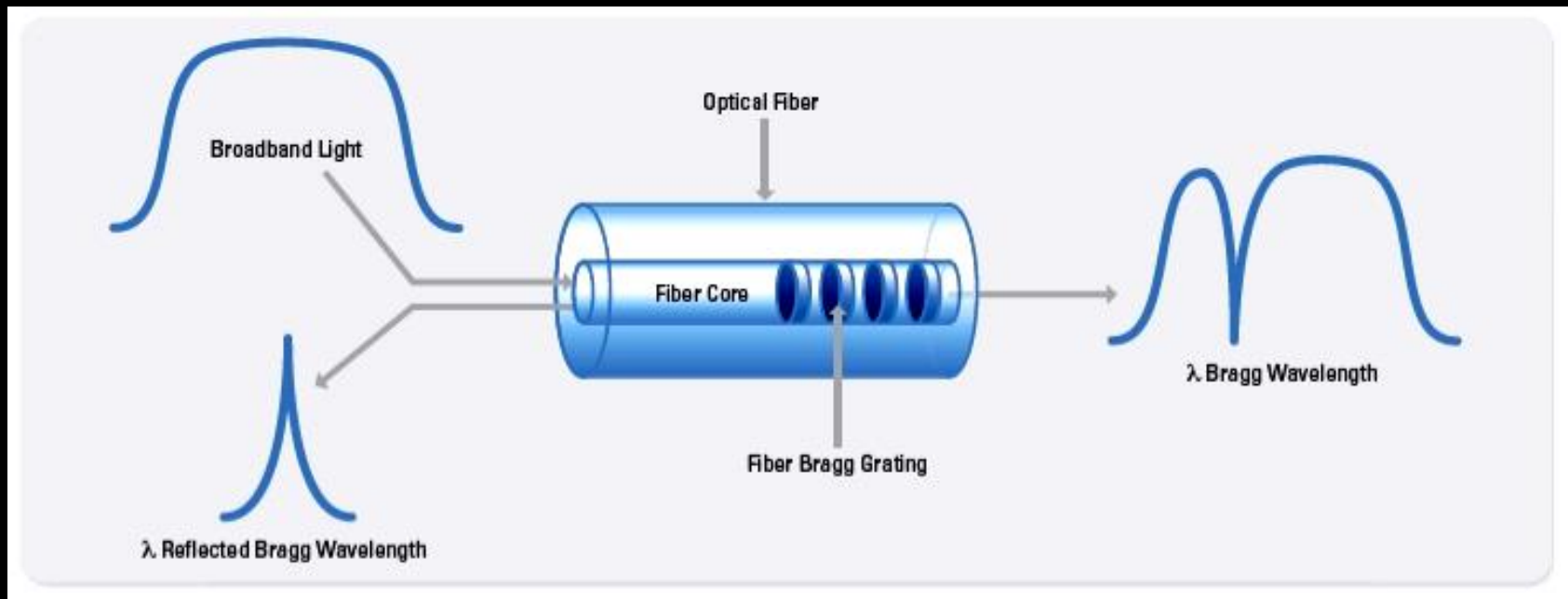


Acelerometria I

- Acelerômetros FBG -

Acelerômetros FBG:

Princípio de funcionamento: medição da aceleração baseada na deformação de uma fibra ótica dotada de anéis de Bragg (fiber Bragg grating).



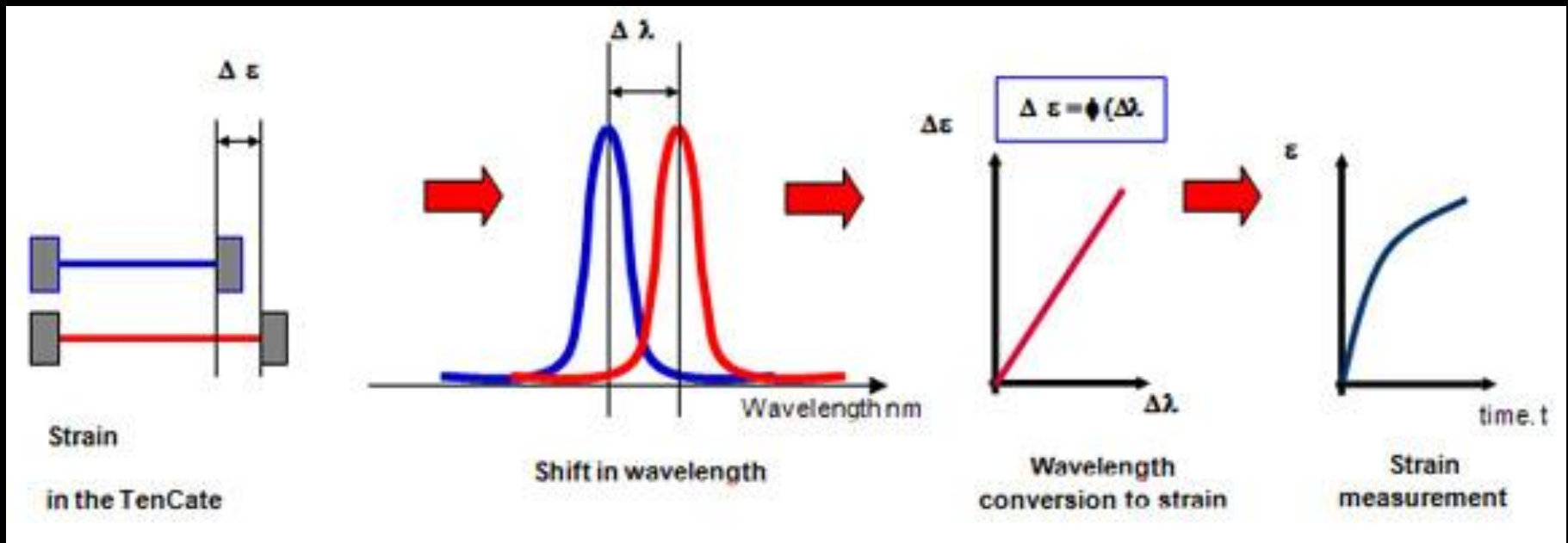


Acelerometria I

- Acelerômetros FBG -

Acelerômetros FBG:

Princípio de funcionamento: Com a deformação da fibra o comprimento de onda refletido varia. Essa variação é proporcional à deformação, à tensão na fibra, e à aceleração impressa ao sistema.





Acelerometria I

- Acelerômetros FBG -

Aplicações, Vantagens e Desvantagens:

- Monitoramento de edificações e estruturas complexas;
- Faixa de frequência útil de DC a algumas centenas de Hz;
- Indiferente a interferências eletromagnéticas;
- Possibilidade de ser utilizado como sensor remoto apresentando baixa perda de sinal;
- Sensibilidade térmica e a deformações transversais;
- Número limitado de fornecedores.



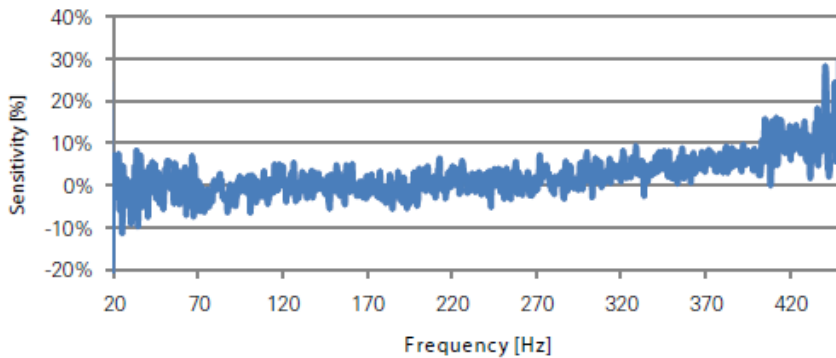


Acelerometria I

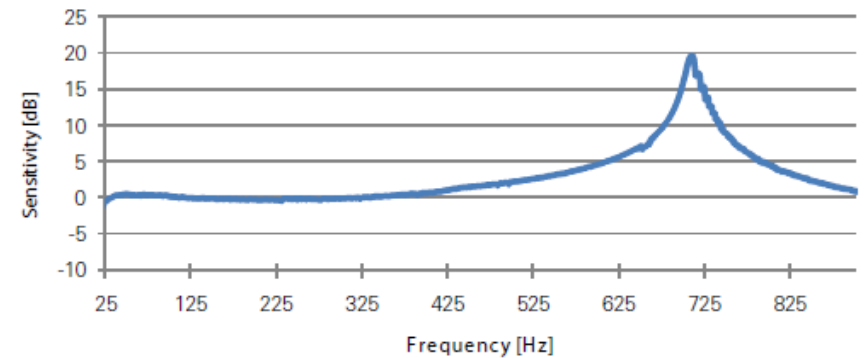
- Acelerômetros FBG -

Resposta em Frequência Típica:

Frequency Response



Typical High Frequency Response



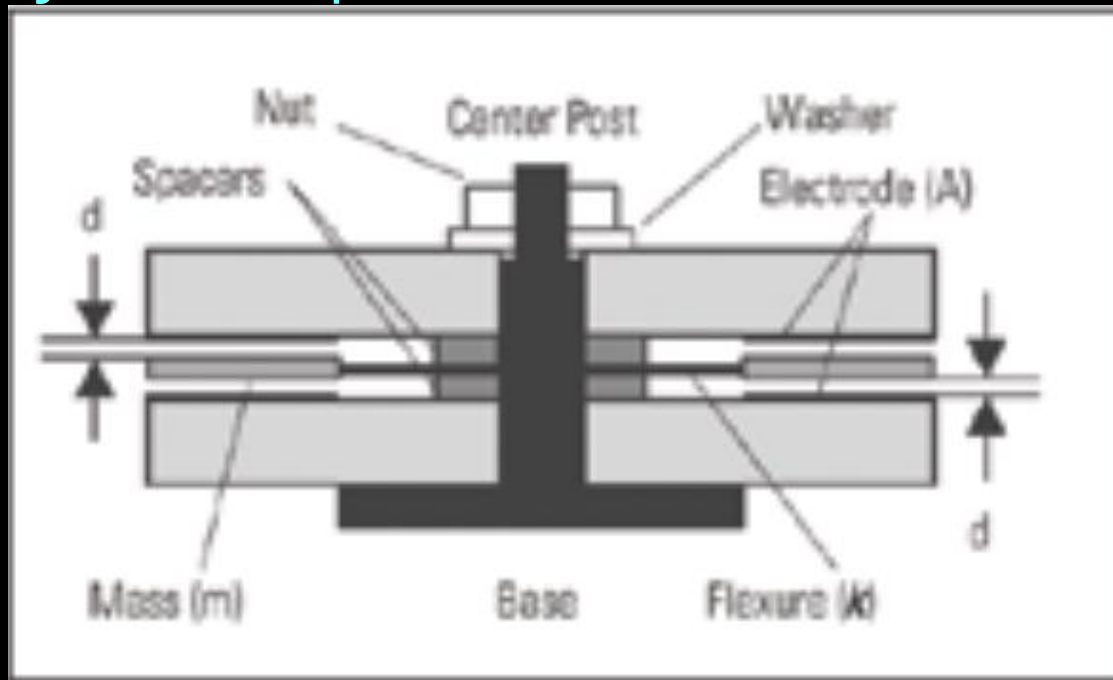


Acelerometria II

- Acelerômetros Capacitivos -

Acelerômetros Capacitivos:

Princípio de funcionamento: consiste de uma massa sísmica se desloca por atuação da aceleração fazendo variar a capacitância em um ou um conjunto de capacitores.





Acelerometria II

- Acelerômetros Capacitivos -

Aplicações, Vantagens e Desvantagens:

- Resposta em frequência estável em função da temperatura;
- Inerentemente não lineares;
- Sujeito a efeitos parasitas e interferências eletromagnéticas que dificultam a medição de pequenas capacitâncias.

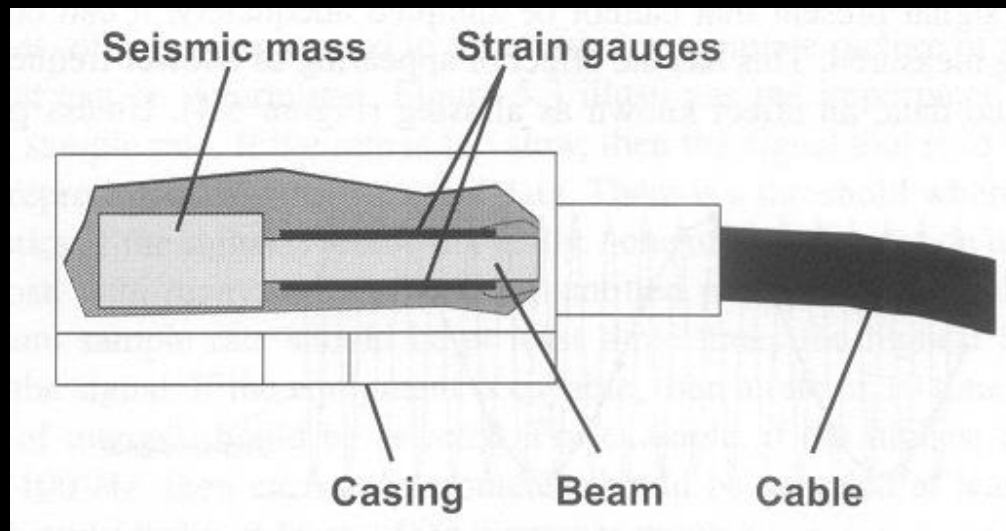


Acelerometria II

- Acelerômetros Piezoresistivos -

Acelerômetros Piezoresistivos:

Princípio de funcionamento: consiste de uma massa sísmica em uma viga em balanço instrumentada com strain gauges. A variação na resistência elétrica dos strain gauges é proporcional à tensão mecânica aplicada, que por sua vez é proporcional à aceleração.



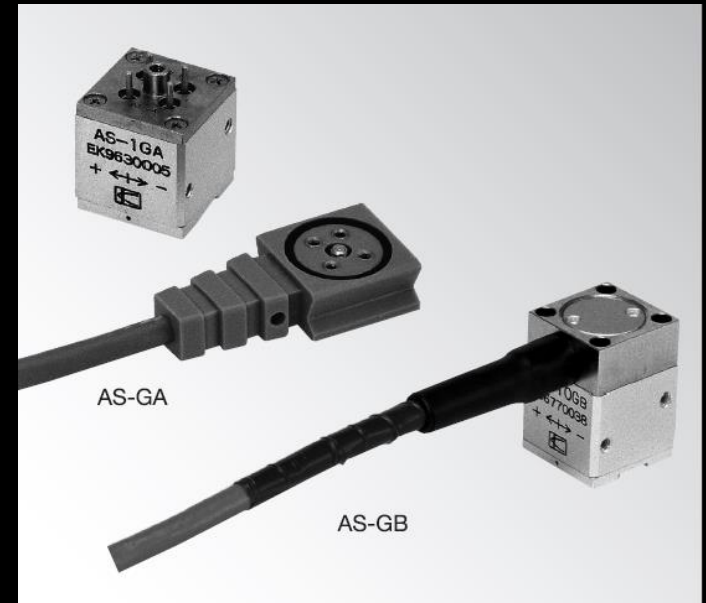


Acelerometria II

- Acelerômetros Piezoresistivos -

Aplicações e Vantagens:

- Medição de vibração de baixa frequência;
- medição de choques mecânicos (crash tests);
- medição de transientes de longa duração;
- alta sensibilidade (sinal de saída não precisa de amplificação);
- baixo amortecimento (fase zero em baixas frequências).





Acelerometria II

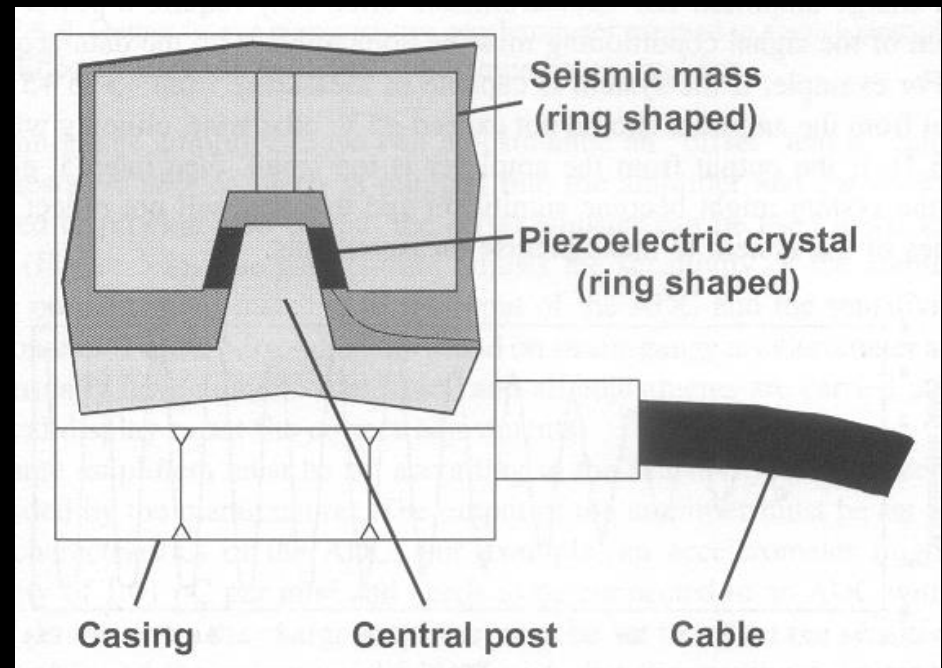
- Acelerômetros Piezoelétricos -

Acelerômetros Piezoelétricos:

Princípio de funcionamento:

consiste de uma massa sísmica que sob aceleração causa compressão ou cisalhamento sobre um cristal piezoelétrico.

A diferença de potencial induzida no cristal é proporcional à aceleração.





Acelerometria II

- Acelerômetros Piezoelétricos -

Aplicações, Vantagens e Desvantagens:

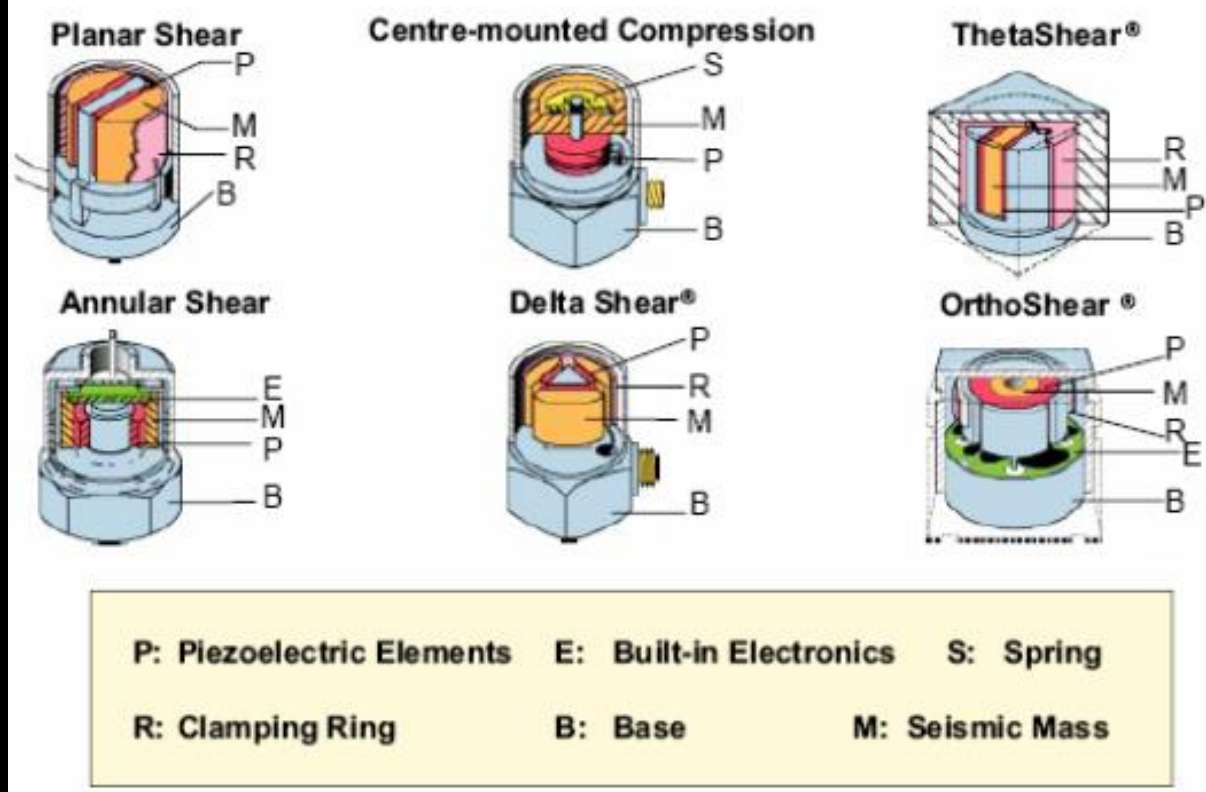
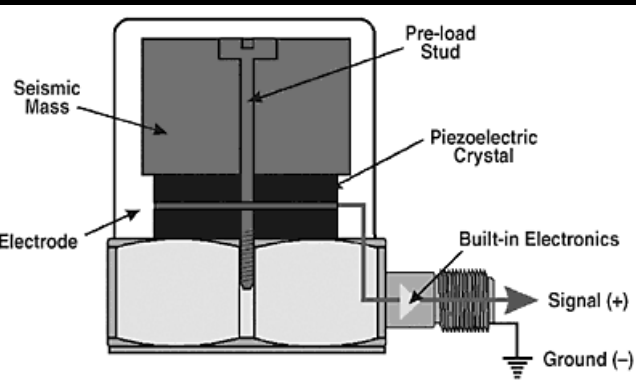
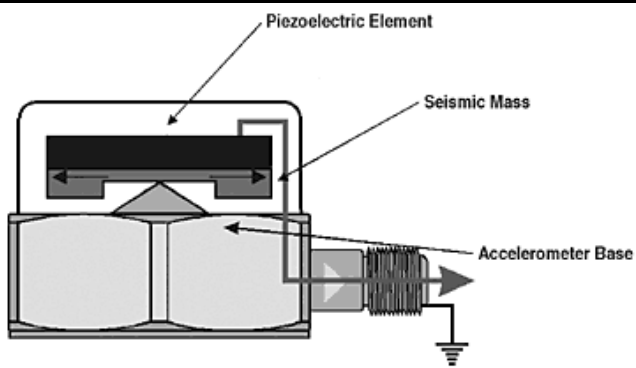
- Medição de vibrações de média a alta frequência;
- medição de acelerações de alto g;
- não é necessário suprimento de energia (os cristais são auto-geradores);
- podem operar a altas temperaturas;
- baixa sensibilidade (o sinal de saída necessita ser amplificado).



Acelerometria II

- Acelerômetros Piezoelétricos -

Algumas configurações:

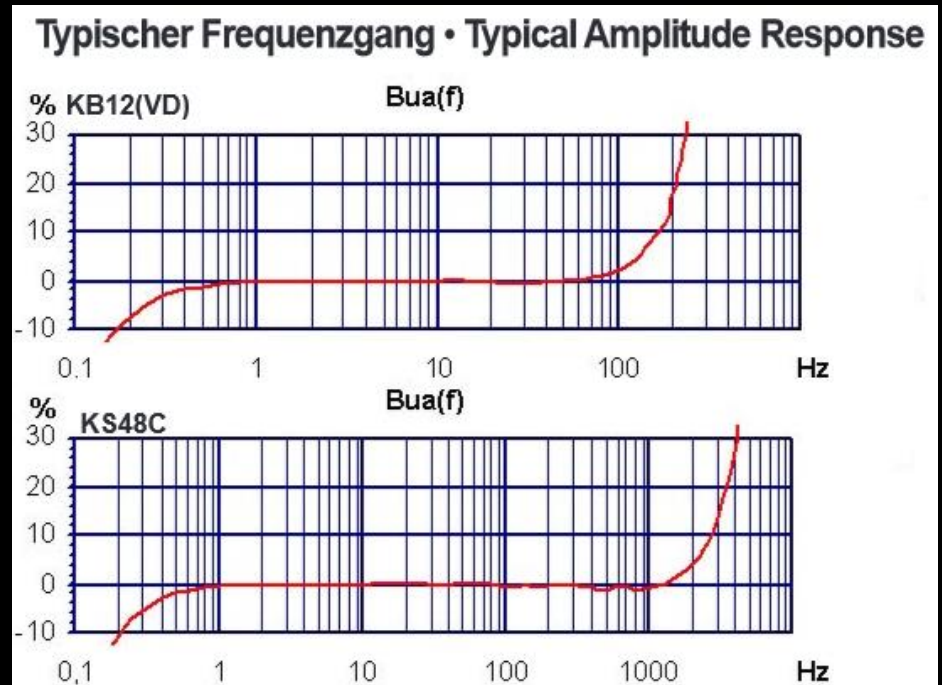
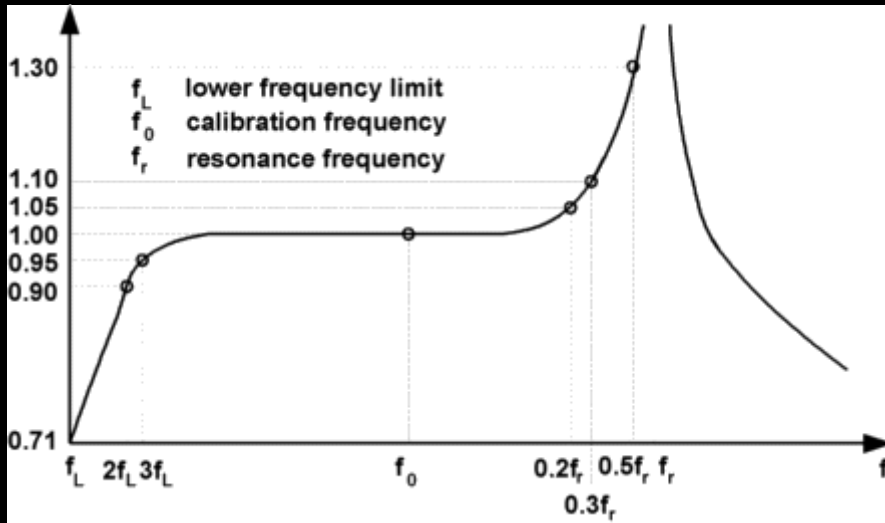




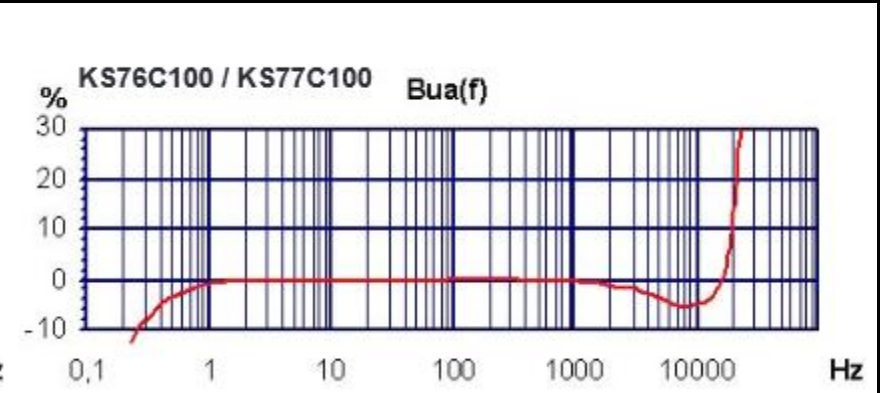
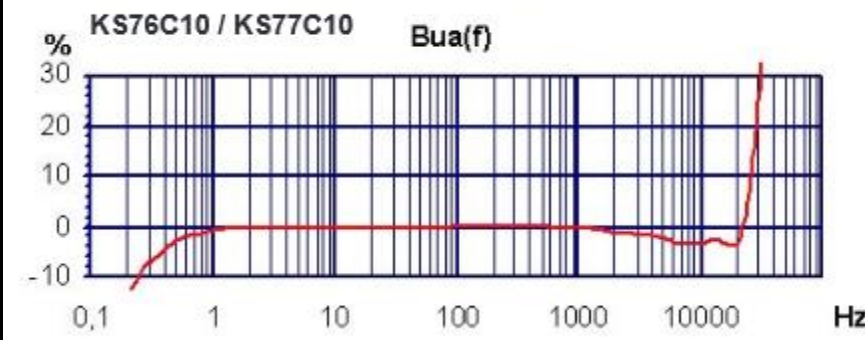
Acelerometria II

- Acelerômetros Piezoelétricos -

Respostas em Frequência Típicas:



Typical Amplitude Response





Acelerometria II

- Acelerômetros MEMS -

Acelerômetros Micro eletromecânicos: (em inglês, microelectromechanical systems)

Princípio de funcionamento: idêntico aos resistivos e capacitivos. Os acelerômetros mais empregados atualmente são do tipo capacitivo, sendo o silício o material mais utilizado para constituição dos capacitores.

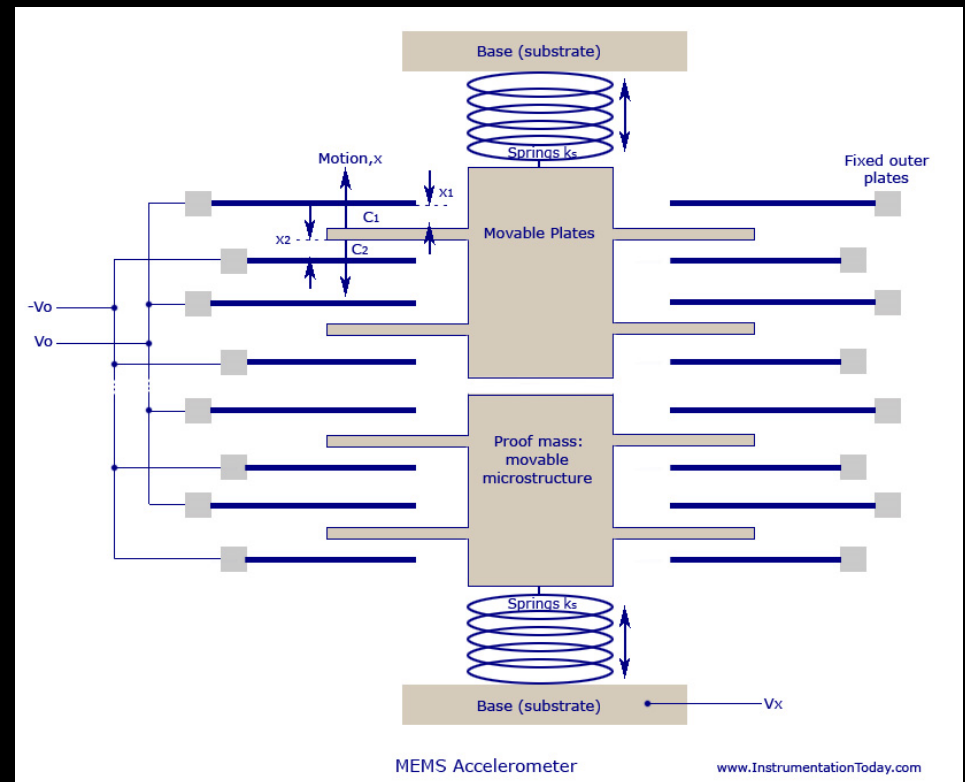
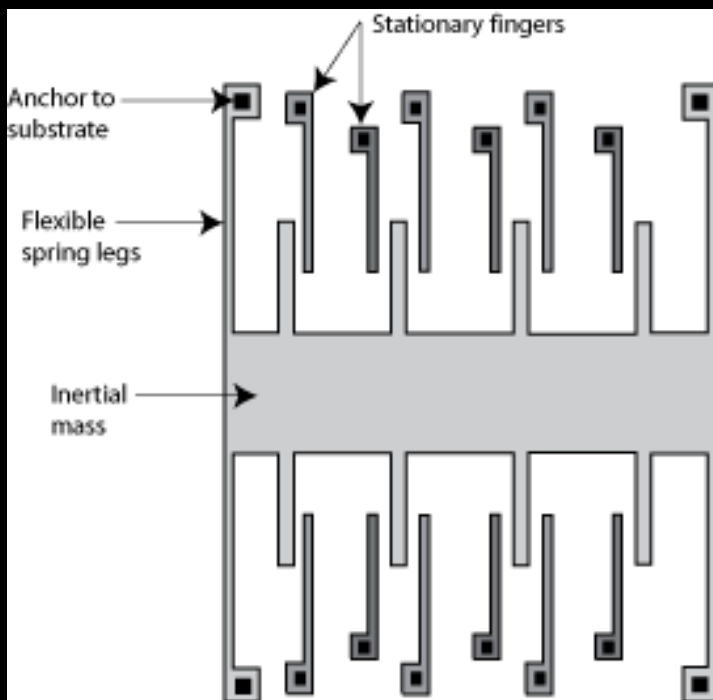




Acelerometria II

- Acelerômetros MEMS -

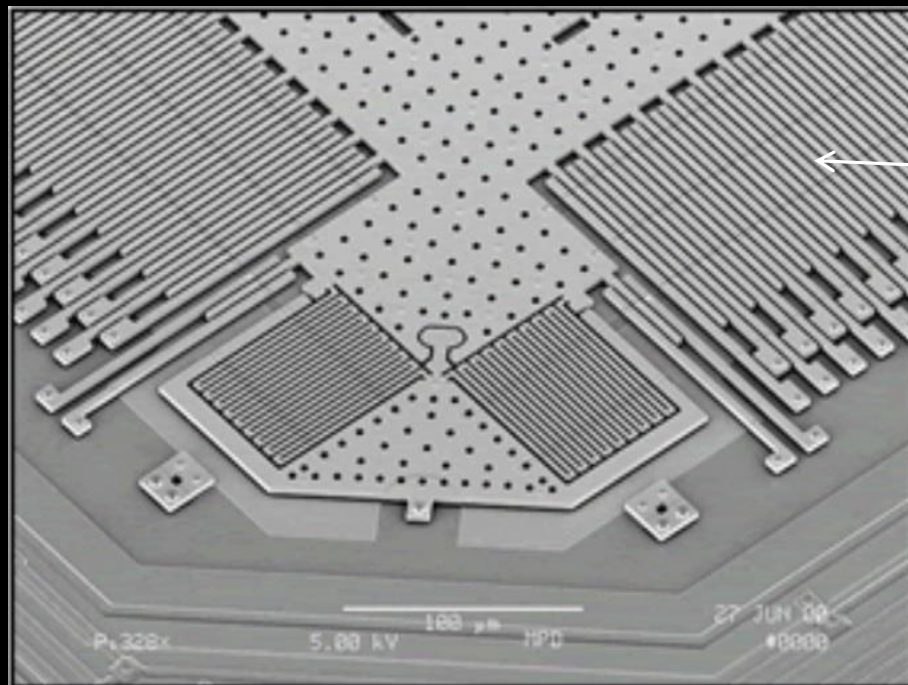
Princípio de funcionamento: Os acelerômetros MEMS do tipo capacitivos consistem de uma massa sísmica em camada de silício de onde partem filetes que compõem os capacitores. O deslocamento destes filetes, por atuação da aceleração, no interior de outro conjunto de filetes faz variar a capacitância do sistema.



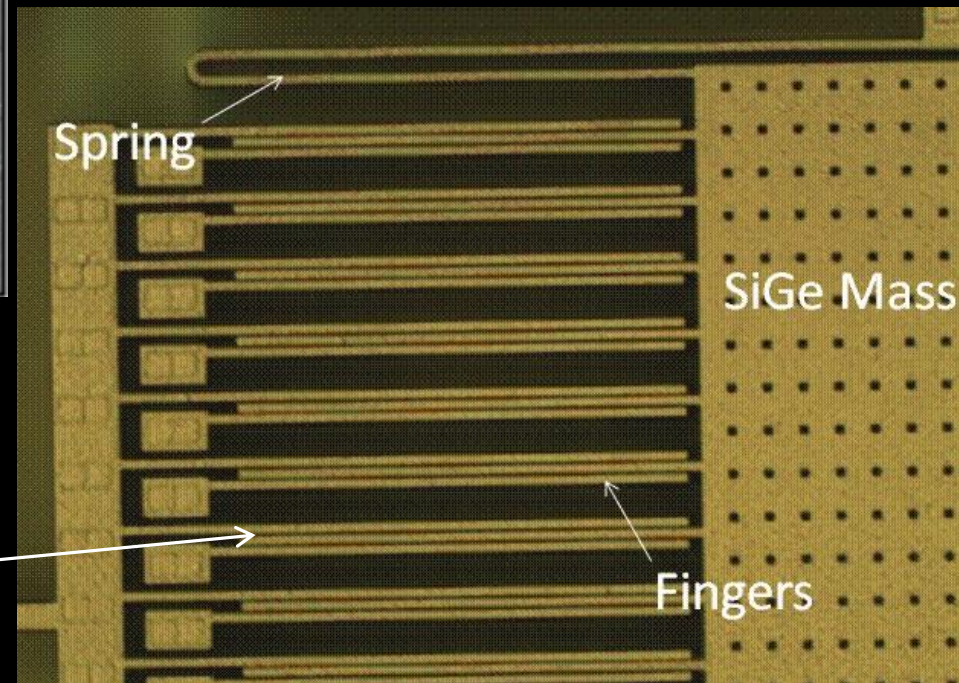


Acelerometria II

- Acelerômetros MEMS -



← Intervalos de $3\mu\text{m}$



Intervalos de 200 nm →

Fingers



Acelerometria II

- Acelerômetros MEMS -

Aplicações e Vantagens:

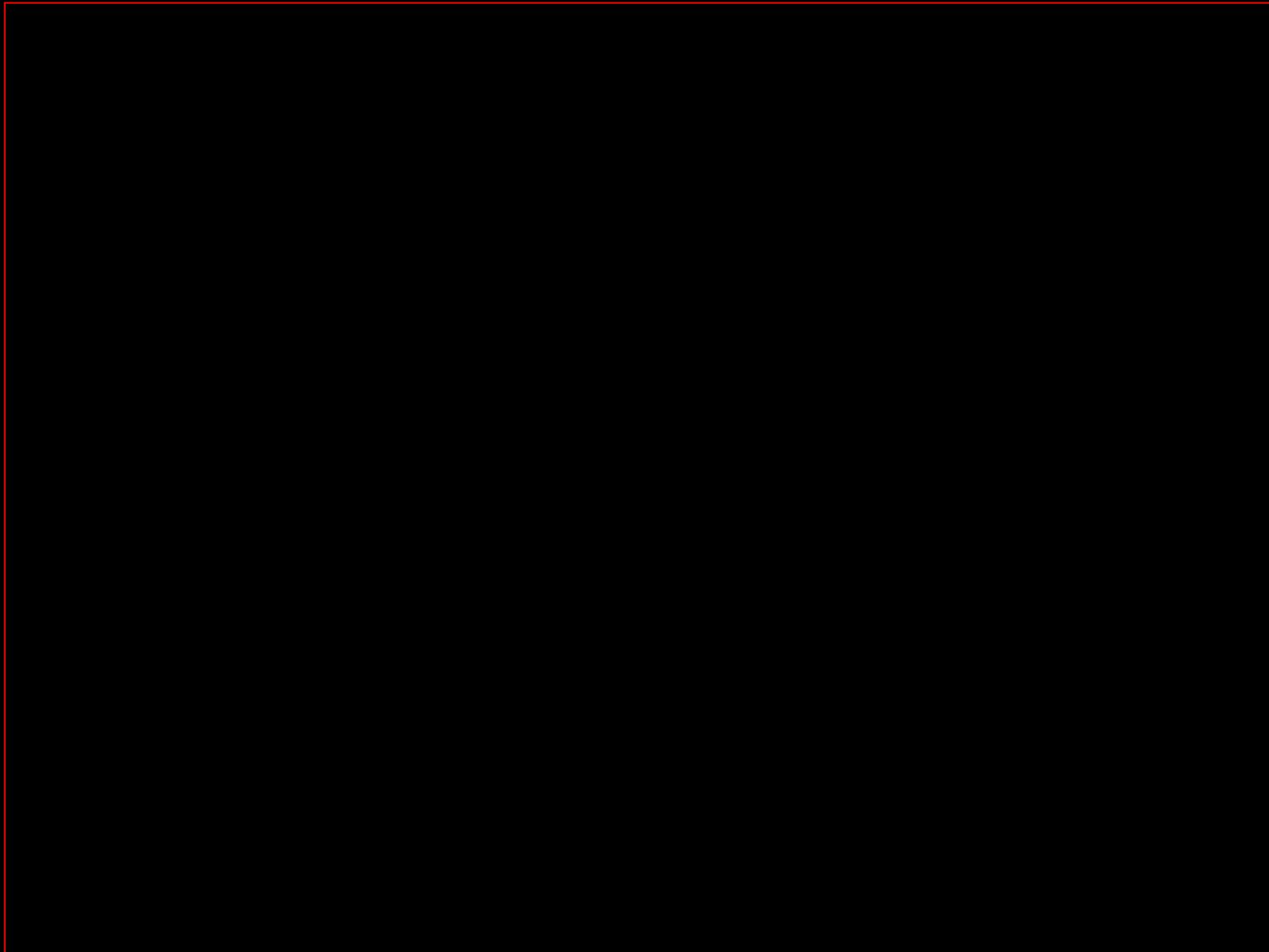
- Elevada sensibilidade ($0,003 \text{ pF/g}$) devido aos diminutos intervalos dos capacitores ($3 \text{ }\mu\text{m}$);
- Faixas de frequência de até 11 kHz ;
- Faixa dinâmica de até $\pm 150\text{g}$;
- Acelerações máximas de até 30.000g ;
- Guiamento e controle de vôo de mísseis;
- Notebooks, airbags e smartphones;
- Navegação inercial em geral;
- Baixo custo dos modelos mais simples.



Acelerometria II

- Acelerômetros MEMS -

Funcionamento e construção:





Acelerometria II

- Acelerômetros -

Principais características:

- Sensibilidade: normalmente expressa em $\mu\text{C/g}$ ou mV/g . Quanto melhor a sensibilidade, maior a precisão do sensor;
- Massa: sensores pesados podem influir no comportamento dinâmico de sistemas leves. A massa do sensor não deve superar 10% da massa dinâmica do sistema a ser medido;
- Faixa dinâmica: normalmente expressa em g. Os acelerômetros devem ser escolhidos de acordo com a magnitude de acelerações a serem medidas;



Acelerometria II

- Acelerômetros -

Principais características:

- Faixa de frequência:

- faixa de utilização para a qual o sistema acelerômetro apresenta ganho aproximadamente unitário, e portanto não influi nas medições;
- expressa em Hz em função da variação no ganho em dB ou percentual de erro de leitura;
- os acelerômetros devem ser escolhidos de modo que o limite de sua frequência ressonante seja ao menos duas vezes superior à máxima frequência de interesse a ser medida;
- o limite inferior de frequência torna-se ainda mais importante para baixas frequências, como no caso do monitoramento de estruturas ou vibrações humanas;



Acelerometria II

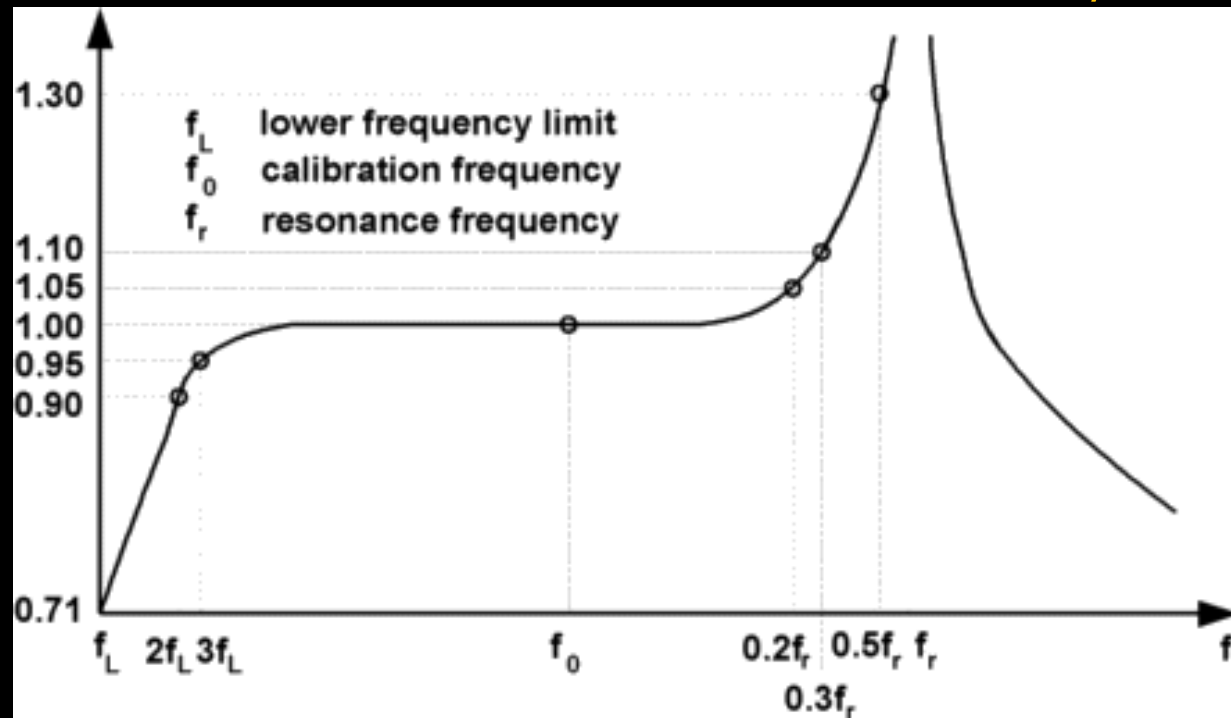
- Acelerômetros -

Principais características:

- Faixa de frequência:

Especificações comuns:

- $\pm 5\%$ equivale a um erro de $\pm 5\%$ nas extremidades da faixa;
- $\pm 10\%$: erro de $\pm 10\%$;
- 3 dB: erro de $\pm 30\%$ ou 3 dB.





Acelerometria II

- Acelerômetros -

Cuidados na fixação de acelerômetros:

- Os eixos do acelerômetro devem estar alinhados com os eixos do sistema. Eventuais *offsets* devem ser eliminados por ocasião do processamento dos dados;
- As especificações do fabricante para instalação do acelerômetro deverão ser respeitadas;
- Dentre os principais procedimentos de fixação, cita-se: pino rosqueado, cimento ou cola apropriada, fita dupla face, ímã permanente e ponta de prova.

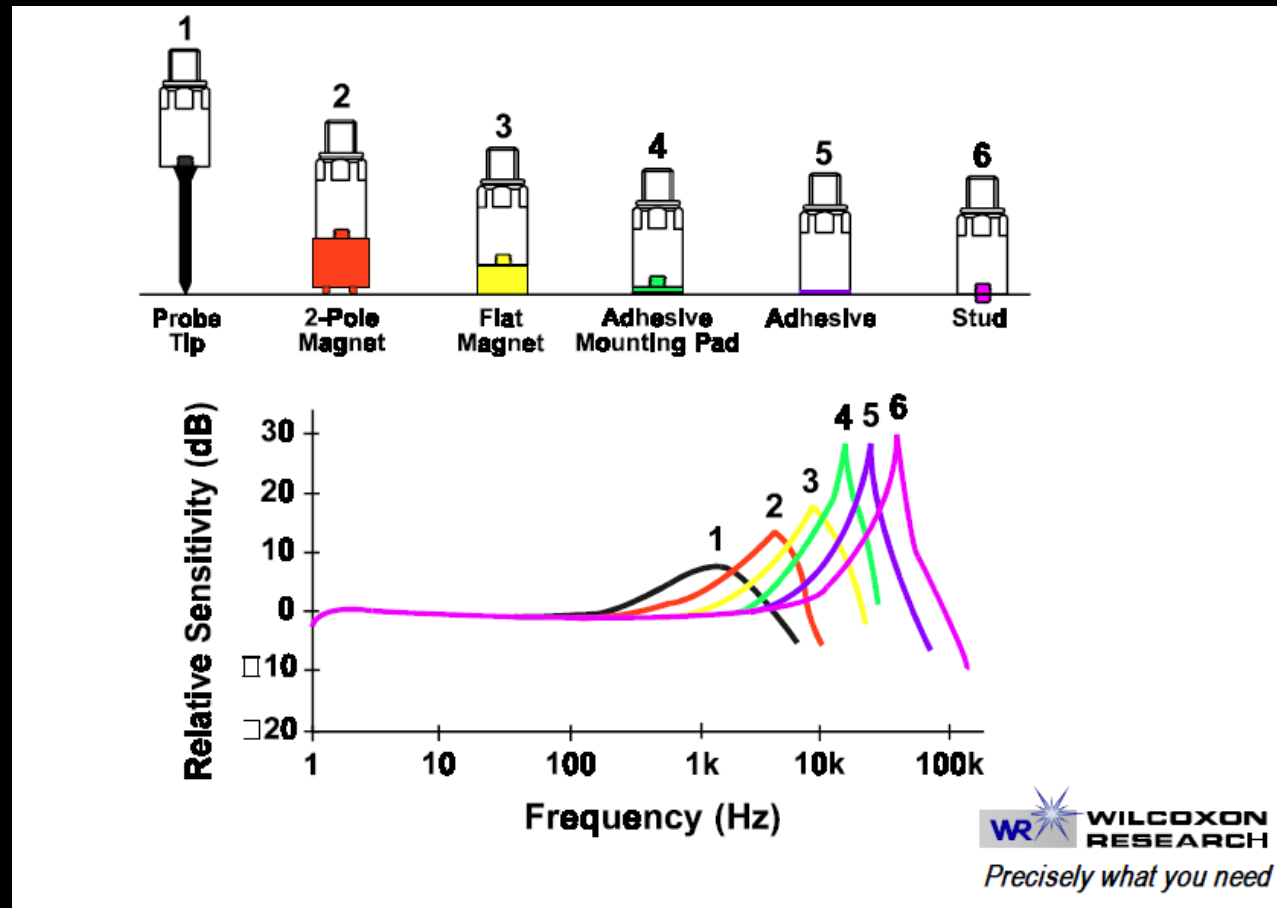


Acelerometria II

- Acelerômetros -

Cuidados na fixação de acelerômetros:

- A faixa de frequência varia sensivelmente com a forma pela qual o acelerômetro foi aderido à peça cuja aceleração se deseja medir. Portanto isso deve ser levado em considerações, principalmente se não for possível uma adesão rígida;





Acelerometria II

- Acelerômetros -

Cuidados na fixação de acelerômetros:

- Caso se pretenda adquirir acelerações de um corpo como se o mesmo fosse um corpo rígido, além da adesão ao corpo ser rígida, a mesma deverá ser um ponto rígido do mesmo, de pequena deformação. Veículos e aeronaves, por exemplo, possuem pontos especificados pelo fabricante onde as acelerações devem ser coletadas;
- Caso modos de vibração do corpo em estudo sejam conhecidos e indesejados, os mesmos deverão eliminados processando-se o sinal através de filtros específicos.



Acelerometria II

- Acelerômetros -

Prática:

- Adquirir dados de aceleração com a plataforma inercial.