



Materiais Magnetostrictivos e Aplicações

Invar

- ❖ Fe₆₅Ni₃₅ – descoberto em 1896 por Guillaume.
- ❖ Expansão térmica nula em temperatura ambiente e baixas temperaturas.
- ❖ Variação espantosa das propriedades eletrônicas devido a variação das distâncias interatômicas.
- ❖ Átomos de Fe na estrutura cfc podem apresentar dois estados de spin diferentes:
 - ❖ 1º. Estado: Parâmetro de rede maior e momentos de 2,2 a 2,5 μ_B
 - ❖ 2º. Estado: Parâmetro de rede menor e momentos de 0,8 a 1,5 μ_B

Invar



- ❖ 1°. Estado: Parâmetro de rede maior e momentos de 2,2 a 2,5 μ_B (BT)
- ❖ 2°. Estado: Parâmetro de rede menor e momentos de 0,8 a 1,5 μ_B
- ❖ Aquecendo o material a partir de baixas temperaturas o 2°. estado é gradativamente populado e há uma contração da célula unitária que compensa a dilatação térmica.
- ❖ Efeito devido mudança do valor do momento magnético.

Ligas similares ao Invar

- ❖ Têm propriedades de expansão térmica que podem ser sintonizadas
 - ❖ Metrologia, conexões metal-vidro, transportadores de metano.
 - ❖ Possuem uma alta magnetostricção de Joule.
 - ❖ o tanque de metano deve ser blindado de campos magnéticos (segurança).

ELINVAR – $\text{Fe}_{52}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_{12}$

- ❖ Ligas com módulo de elasticidade constante
- ❖ Estrutura cfc
- ❖ Neste caso a contribuição magnética compensa a componente térmica da variação desta constante
- ❖ Usados em Engenharia de precisão (relógios)

TERFENOL-D

- ❖ Terfenol – TbFe_2 : Descoberto por A. E. Clark (Terbium, Fe, Naval Ordnance Laboratory)
- ❖ Alta anisotropia magnetocristalina – satura em altos campos
- ❖ Substituição parcial de Tb por Dy – $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ – satura em campos menores.
- ❖ Usado em sensores e armas.

TERFENOL-D

Magnéticas

- ❑ Alta magnetização de saturação
- ❑ Alta permeabilidade magnética
- ❑ Mínima dissipação de energia

Mecânicas

- ❖ Boa conformação mecânica
- ❖ Fácil de cortar
- ❖ Alta resistência à oxidação e corrosão
- ❖ Barato (?)
- ❖ Reciclável

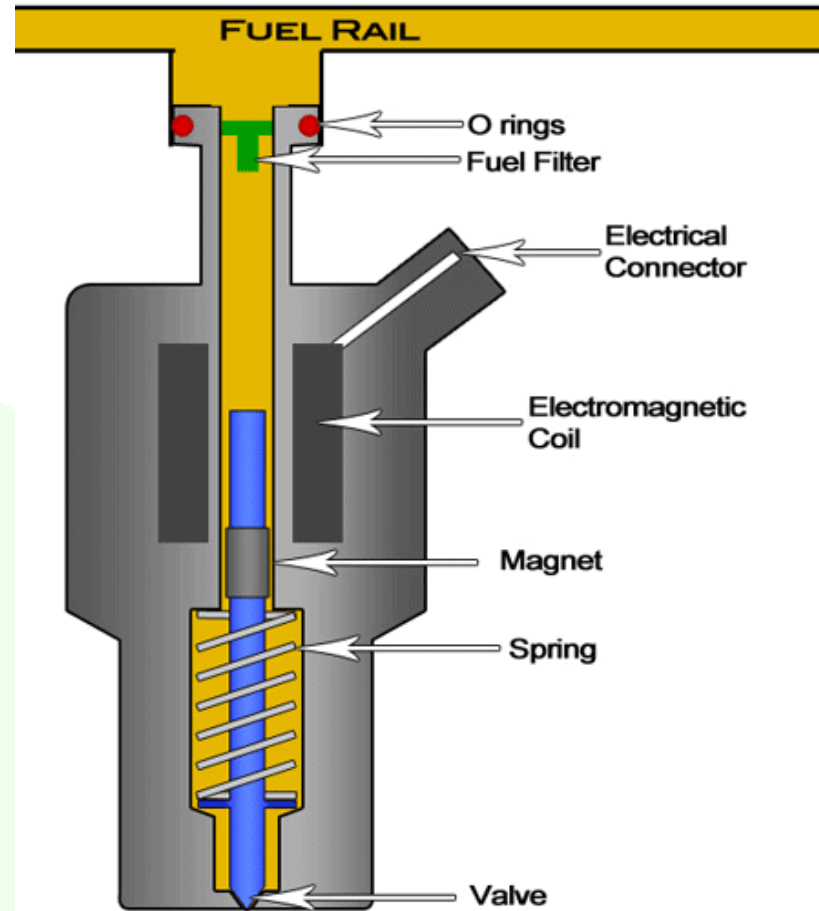
APLICAÇÕES DE MATERIAIS MAGNETOSTRICTIVOS COM ALTAS MAGNETOSTRICÇÕES

❖ Alta magnetostricção → pode produzir altas forças → movimentos precisos com alta potência.

❖ Atuadores lineares (Efeito Joule)

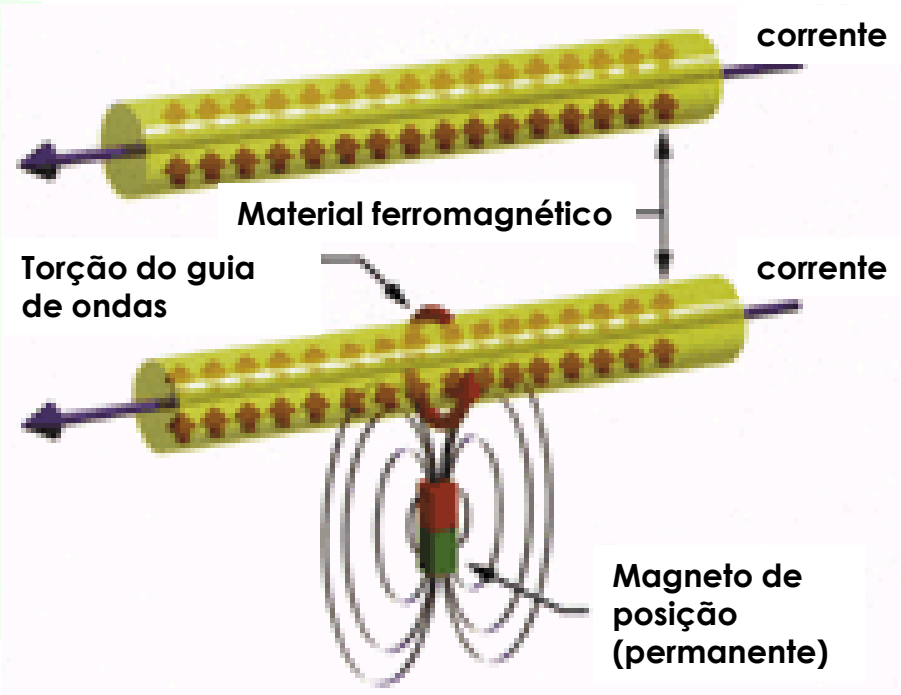
- Válvulas elétricas (injeção de combustível)
- Micro bombas (cabeças de impressoras jato de tinta)
- Posicionamento automático
- Amortecimento de vibrações
- Relês rápidos
- Engrenagens
- Robótica
- Foco automático (ótica)
- Persianas automáticas
- ETC

Válvula de injeção de combustível



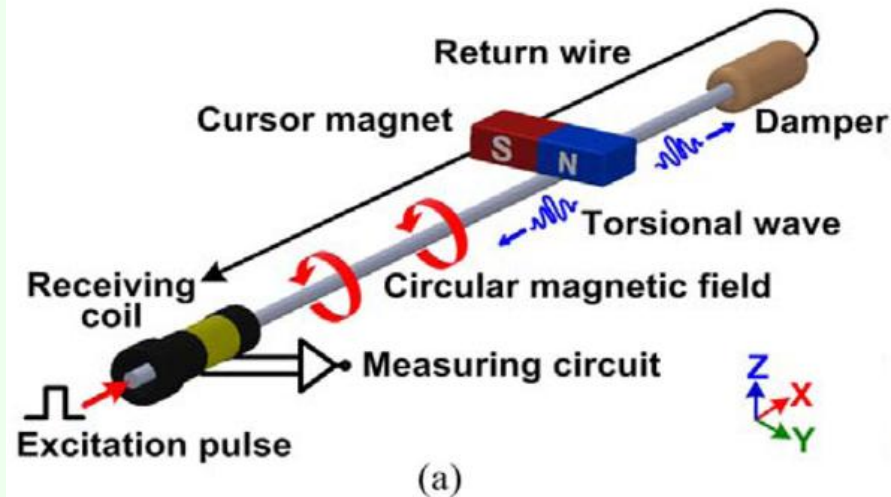
❖ Atuadores baseados no efeito Wiedemann

- Quando um campo magnético axial é aplicado a um fio magnetostrictivo e uma corrente passa através do fio, uma torção ocorre no local do campo magnético axial.
- A torção é causada pela interação do campo magnético axial (ímã) com o campo magnético ao longo do fio, que está presente devido à corrente.
- A corrente é aplicada como um impulso de curta duração, ou 1 - 2 ms.



❖ Atuadores baseados no efeito Wiedemann

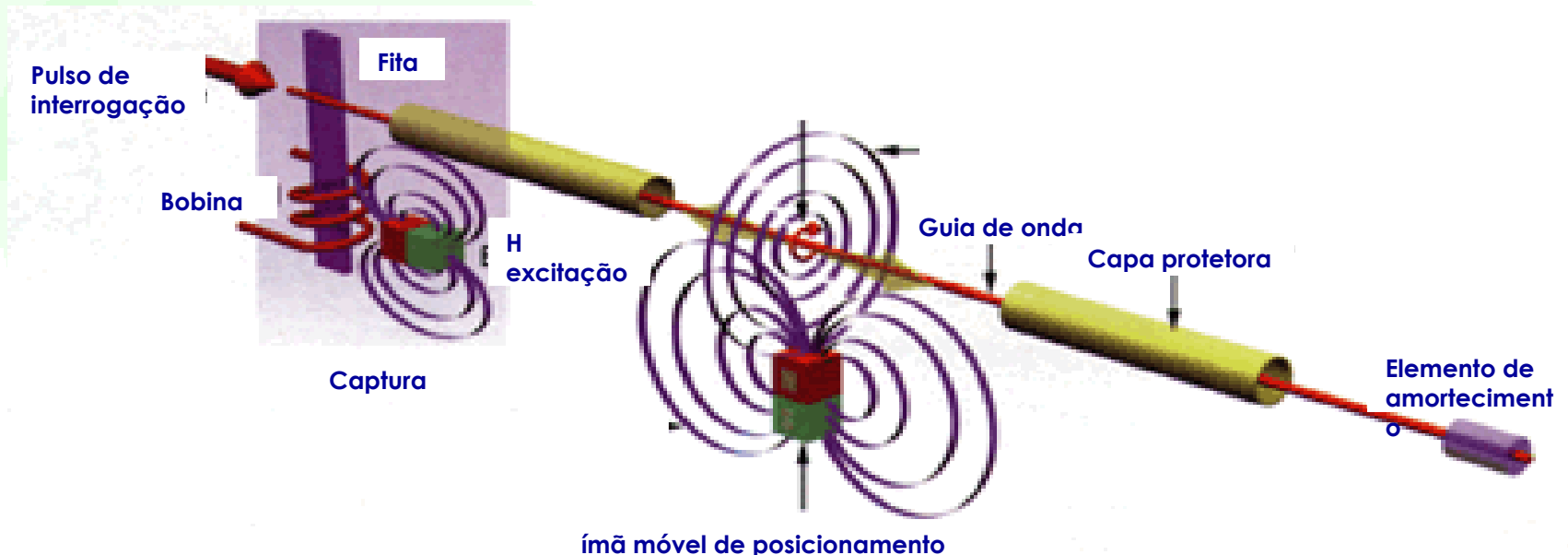
- A corrente é aplicada como um impulso de curta duração, ou 1 - 2 ms.
- Uma vez que a corrente é aplicada como um pulso, a torção mecânica viaja pelo fio como uma onda ultrasônica.
- O fio magnetostritivo é chamado o guia de onda; ~ 3000 m/s.



Magnetostrictive delay line (MDL)

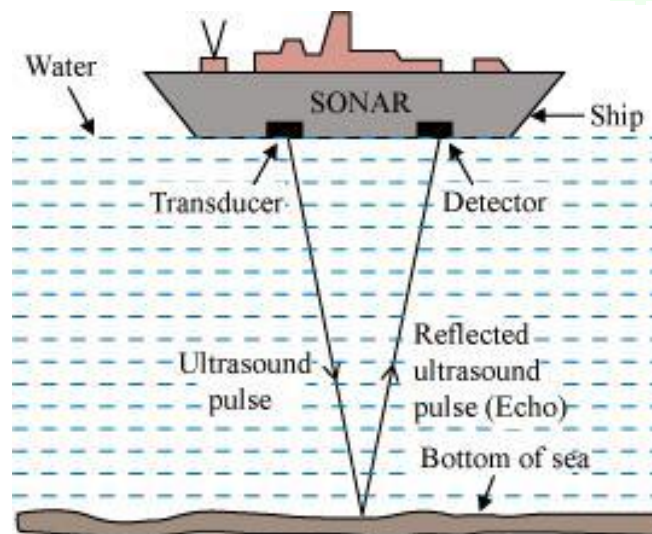
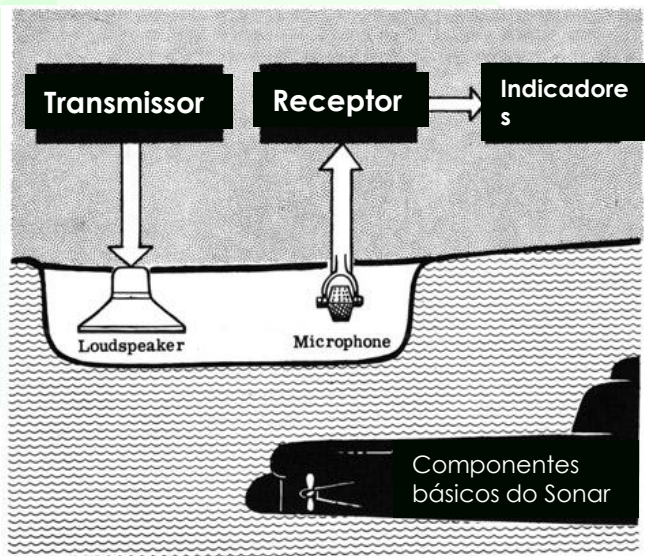
❖ Atuadores baseados no efeito Wiedemann

- O ímã de posicionamento está ligado uma máquina.
- Primeiro pulso localiza a posição do sensor, iniciando o medidor de tempo assim que o pulso é aplicado.
- A onda sonora também viaja na direção que se afasta da bobina de captura. A fim de evitar um sinal de interferência de ondas que viajam nessa direção, sua energia é absorvida por um dispositivo de amortecimento.
- A bobina de captura é formada por uma fita magnetostrictiva e uma bobina. A onda causa variação de fluxo na fita e esta gera uma voltagem na bobina.

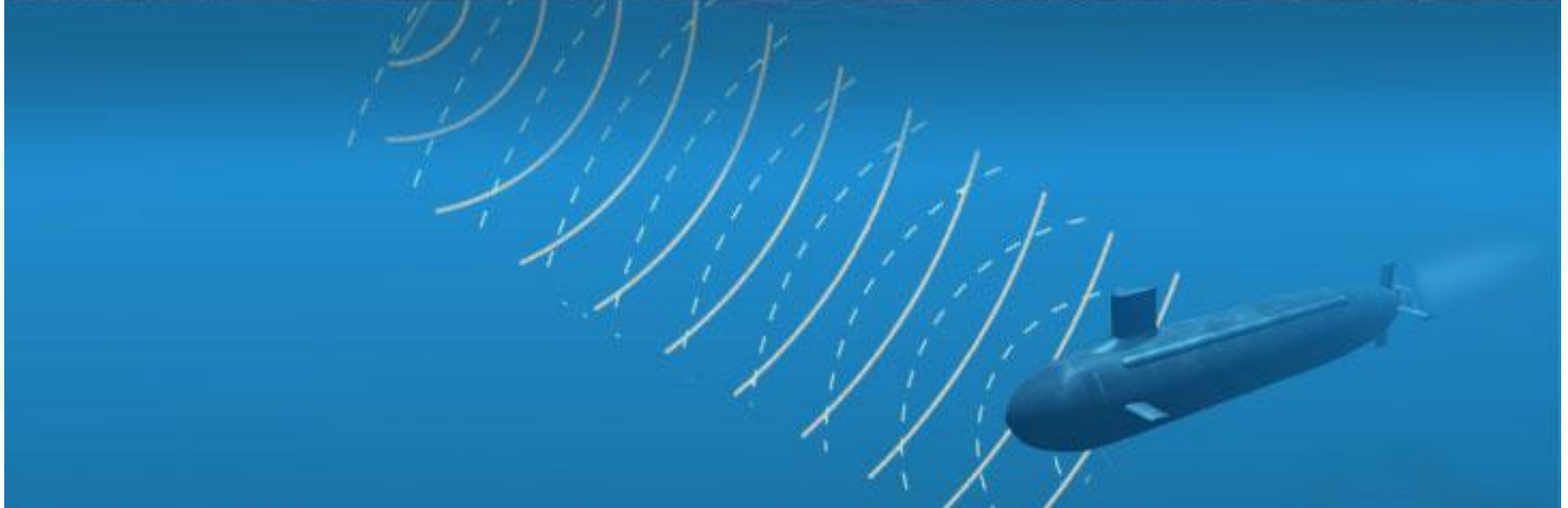


❖ Sonares

- Transmissor do sonar = oscilador de áudio de alta frequência + amplificador de potência (eletrônica básica).
- Alto-falante + microfone estão combinados em um dispositivo chamado "transdutor" (projeto) → montado fora do casco do navio, abaixo da linha de água.
- Receptor da sonda ~ um receptor de rádio. Os dispositivos indicadores para operador mostram indicações visuais e de áudio, sobre o que está acontecendo abaixo da superfície do oceano e ao redor do navio, são indicadores: de rumo, alcance, etc.



<http://maritime.org/doc/firecontrol/parth.htm>



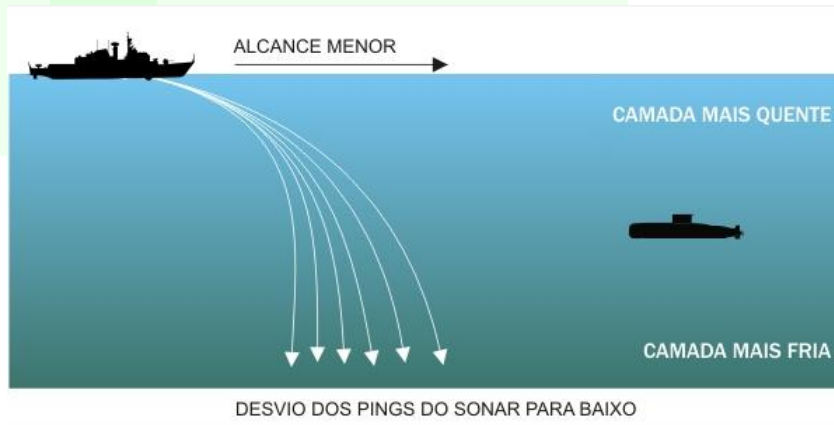
O Sonar é instrumento fundamental da guerra anti-submarino. Ele é um dispositivo criado para detectar e localizar objetos submersos na água por meio das ondas sonoras que os alvos refletem ou produzem.

- ▶ O pulso do sonar é emitido e ao encontrar um obstáculo, retorna ao emissor. Mede tempo → distância
- ▶ A precisão é “relativa” → atenuação
 - ▶ temperatura, salinidade e pressão da água.

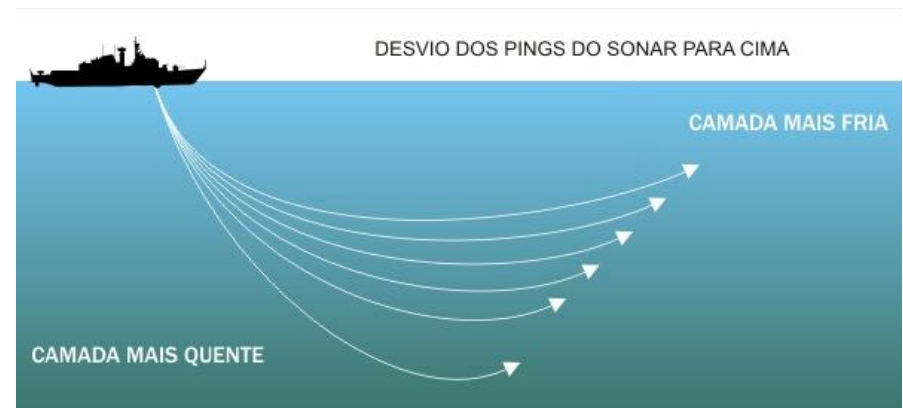
Velocidade do som (v_s) na água é 1.438m/s para 8 °C (4,4X maior que no ar).

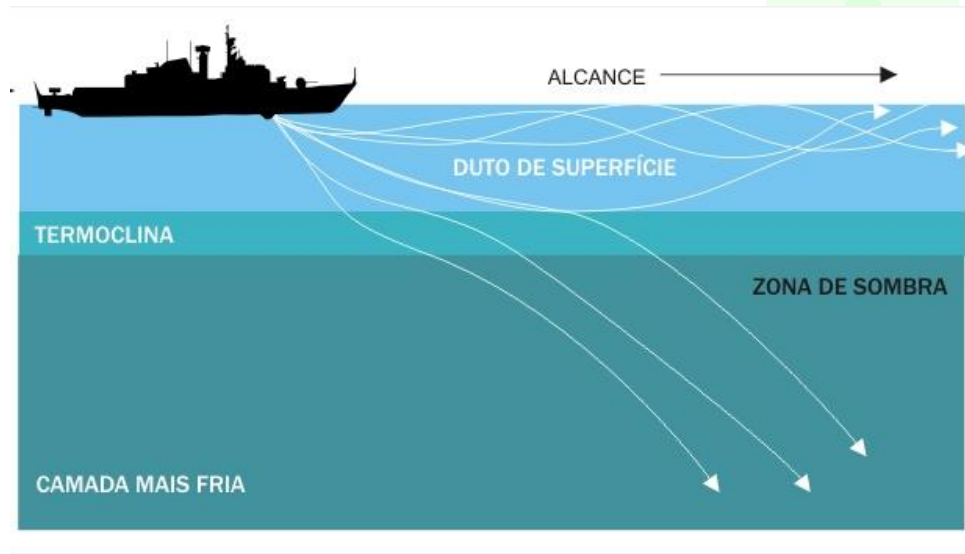
↑ T → ↑ v_s : Quando o som se propaga através de camadas de água de diferentes temperaturas, ocorre o fenômeno da refração, que é o desvio da onda sonora. A refração pode ser negativa (verão) ou positiva (inverno).

Refração negativa



Refração positiva





Termoclina é a variação brusca de temperatura em uma certa profundidade do mar. Ocorre tipicamente entre 300 e 1000 metros abaixo da superfície.

Se um submarino está submerso na termoclina ou abaixo dela, ele não será capturado pela onda sonora e assim não será detectado.

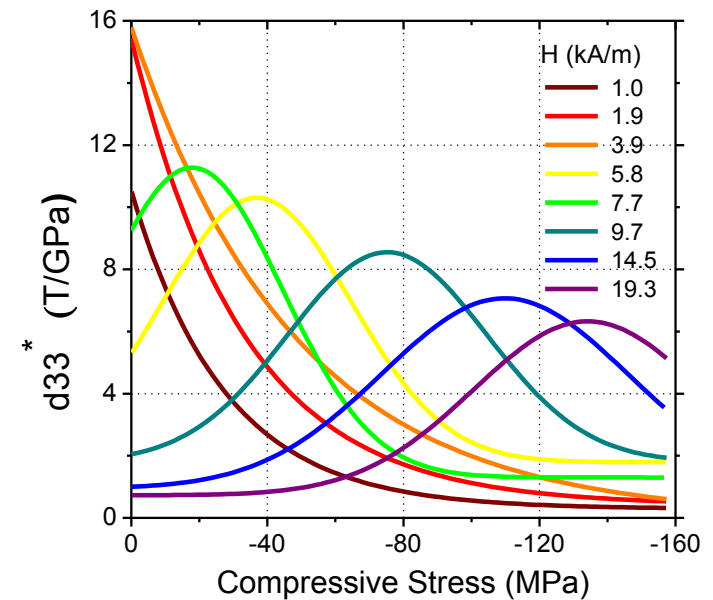
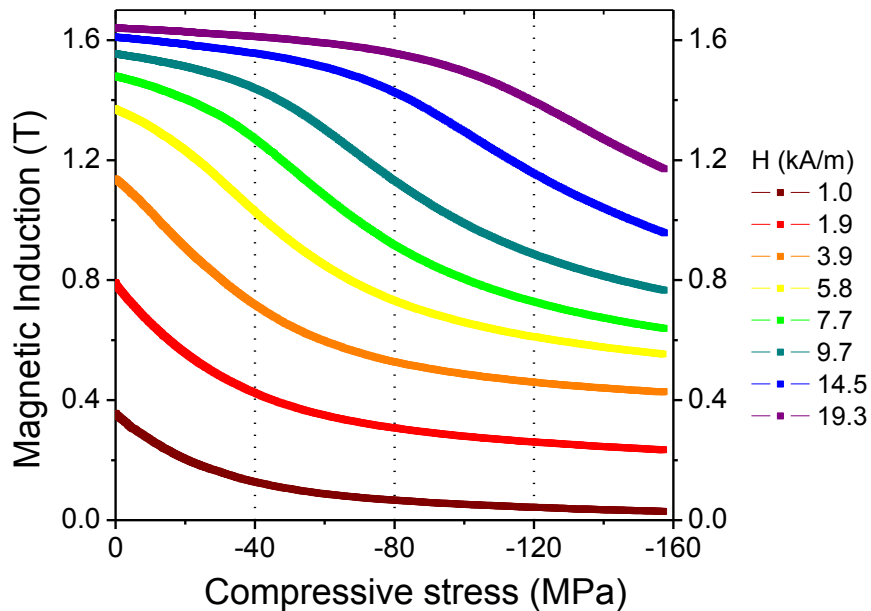
Se um navio de superfície pretende detectar um submarino, ele terá de ser equipado com sonar rebocado de profundidade variável (VDS). Nesse caso, o sonar deve ser mergulhado abaixo da termoclina.

Em sonares

- ❖ Até 1935 – usava-se níquel
- ❖ Níquel muito caro durante a 2ª. Guerra
- ❖ Substituído por Alfer/ Alfenol (FeAl)
- ❖ Depois da 2ª. Guerra Alfer substituído por cerâmicas piezoelétricas.
- ❖ Mais recentemente TERFENOL-D – recorde de potência emitida.
- ❖ Substituído por GALFENOL (Fe-Ga)? Nem sempre, somente onde é necessário ser parte estrutural.

Sensores baseados no efeito Villari

► Transdutor (Mateus) – medida de força $d_{33}^* = \frac{\partial B}{\partial \sigma} \Big|_H$



Monitoramento de coagulação sanguínea

- ▶ Coagulação sanguínea é um processo fisiológico complexo (hemóstase)
- ▶ No sistema vascular existe um balanço delicado entre: células sanguíneas, plaquetas, fatores de coagulação e fatores externos de tecido (pele).
- ▶ Interesse: série de reações enzimáticas chamada de cascata de coagulação.
- ▶ O processo de coagulação envolve a mudança da viscosidade
- ▶ Esta mudança pode ser medida por transdutores magnetoelásticos

Sensores magnetoelásticos baseados em ligas amorfas SR

- Em campo variável a fita oscila em uma frequência fundamental que depende das dimensões da fita e das propriedades do material;
- As vibrações geram ondas acústicas e fluxo magnético que podem ser detectadas por um microfone e uma bobina de captura.
- A frequência de ressonância pode variar devido a estímulos externos como: viscosidade, pressão, aumento de massa.
- Na presença de um pulso magnético funciona como uma campainha.
- SR = solidificada rapidamente

Impulso de campo magnético



Excita energia elástica no material



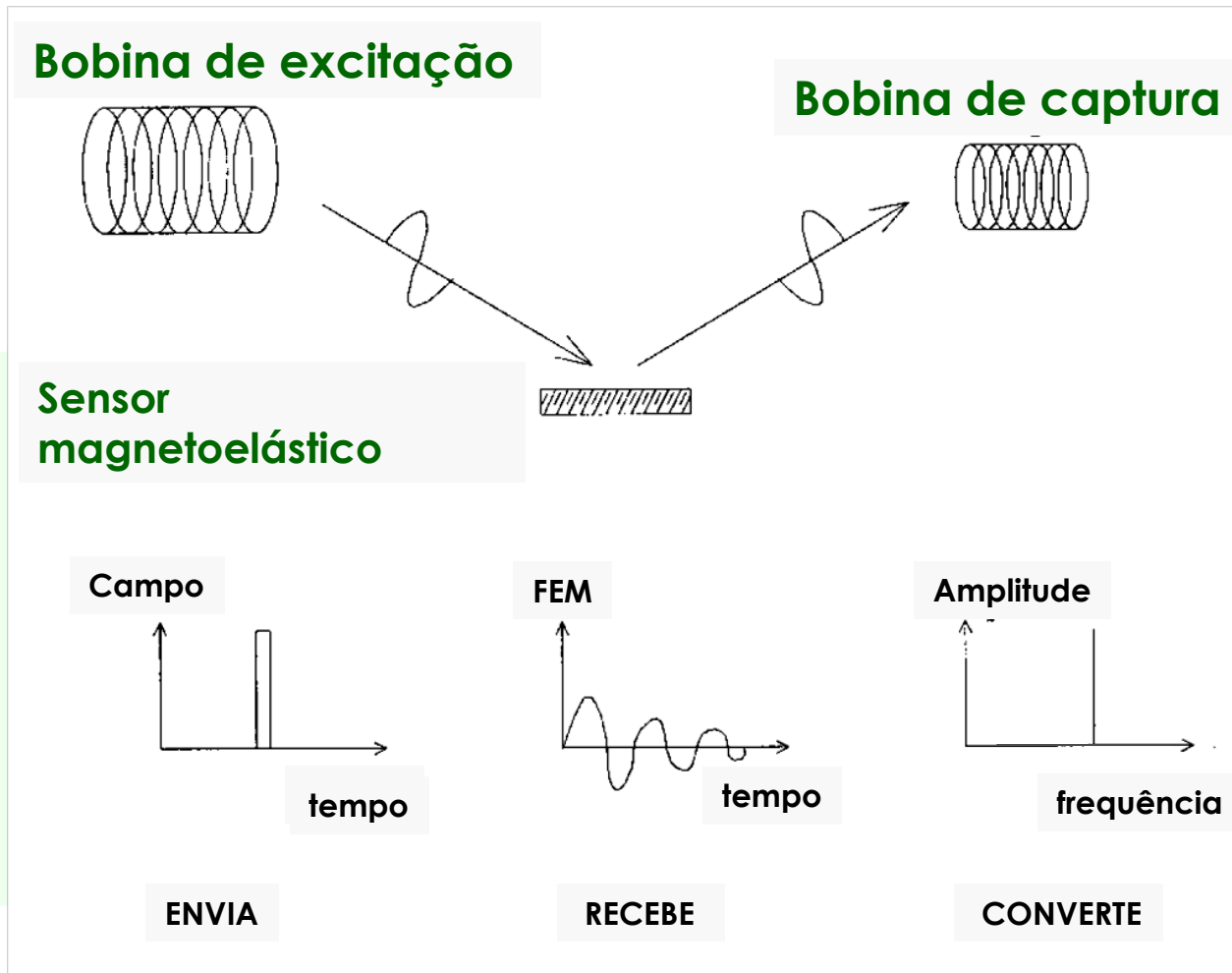
**Deforma transitoriamente o material,
decaindo com o tempo**

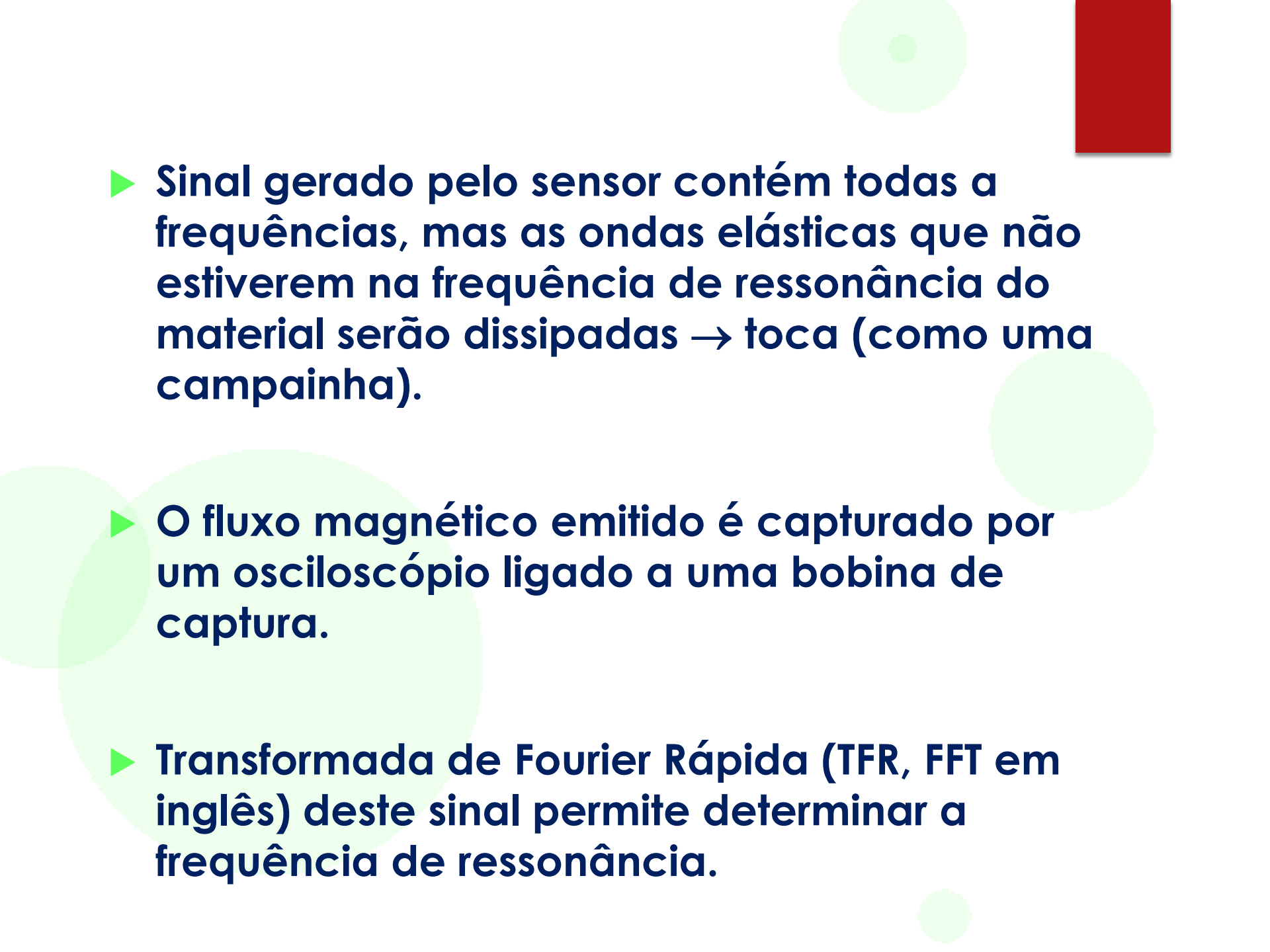


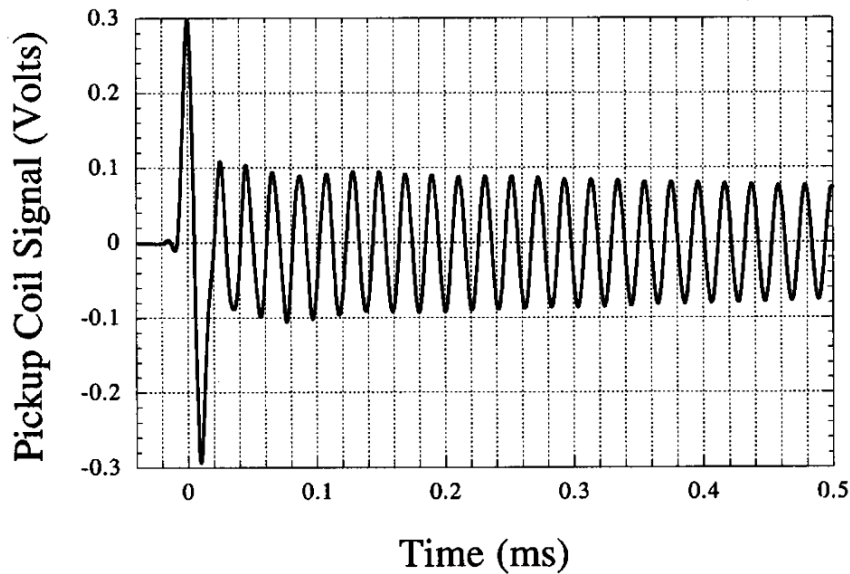
$\lambda = \Delta l / l \rightarrow \Delta M \rightarrow$ **pode ser detectado
remotamente por uma bobina de
captura**

Keith T. Loisel and Craig A. Grimes, Review of Scientific Instruments 71,
1441 (2000)

Ilustração esquemática da natureza remota de sensor magnetoelástico

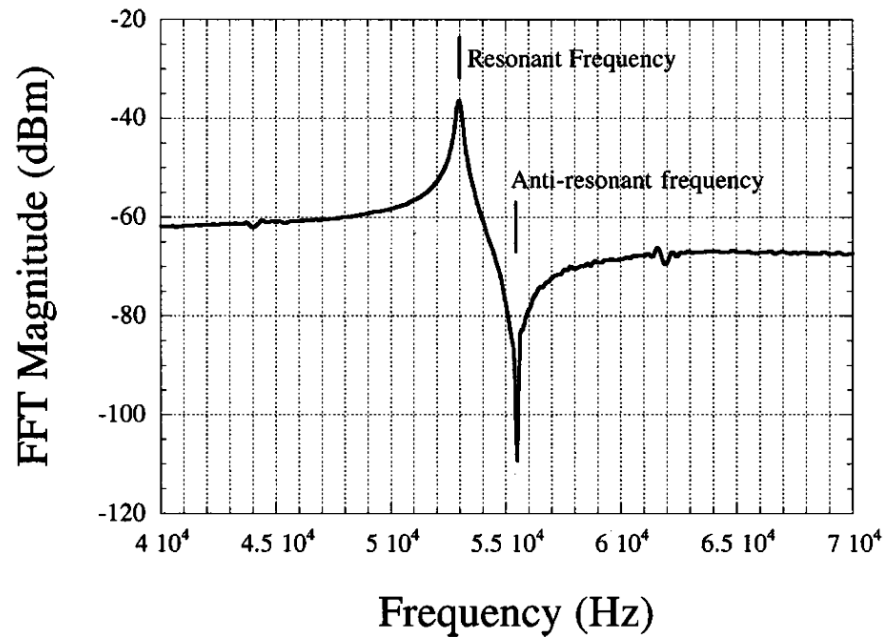


- 
- ▶ Sinal gerado pelo sensor contém todas as frequências, mas as ondas elásticas que não estiverem na frequência de ressonância do material serão dissipadas → toca (como uma campainha).
 - ▶ O fluxo magnético emitido é capturado por um osciloscópio ligado a uma bobina de captura.
 - ▶ Transformada de Fourier Rápida (TFR, FFT em inglês) deste sinal permite determinar a frequência de ressonância.



TRF é um método matemático para a transformação de uma função do tempo em função da frequência.

Uma aplicação importante é na análise do som.

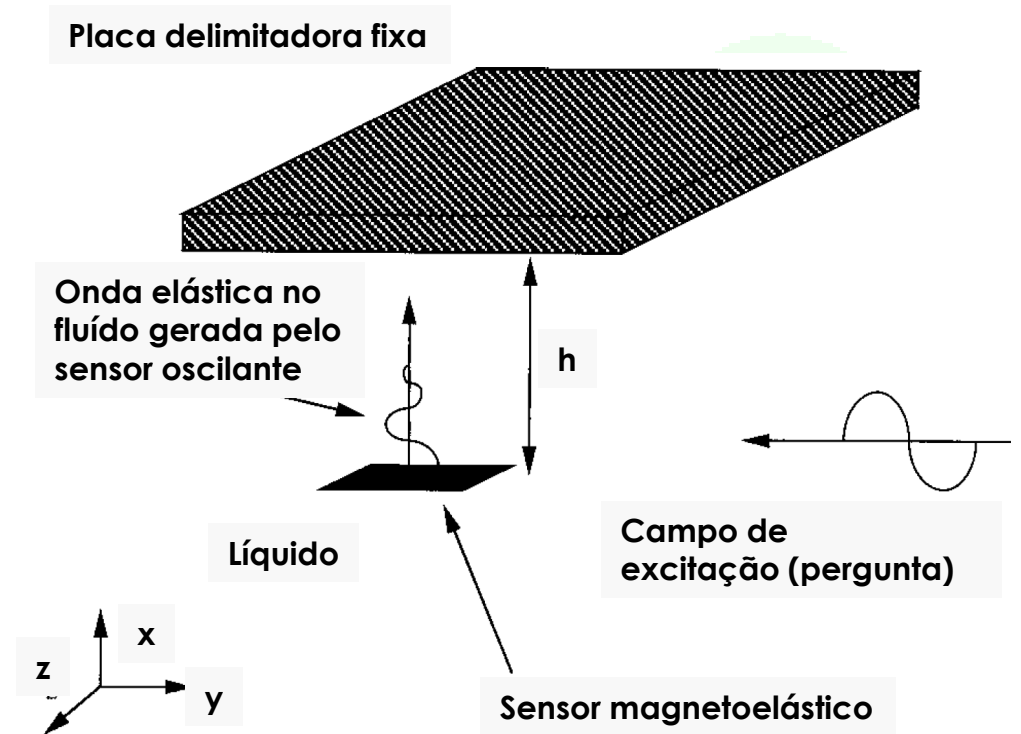


Modelo Teórico – Resposta do sensor à viscosidade e densidade de um líquido

Equação de movimento de uma placa vibrante

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{E}{1 - \sigma^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2}$$

- ✓ ρ_s - densidade do material sensorial
- ✓ E - módulo de elasticidade de Young
- ✓ σ - razão de Poisson
- ✓ u é o vetor deslocamento do sensor



Equação de movimento de uma placa vibrante

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{E}{1 - \sigma^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \quad (1)$$

- ✓ Se a frequência do campo AC é igual à frequência de ressonância mecânica do sensor, a conversão de energia mecânica em elástica energia é maximizada e o sensor entra em ressonância.
- ✓ Portanto, procura-se soluções de ondas estacionárias do tipo:

$$u = e^{-i\omega_n t} \cos \frac{n\pi y}{L} \quad (2)$$

- ✓ ω_n é o conjunto de frequências longitudinais do sensor;
- ✓ n é um número inteiro
- ✓ L é o comprimento do sensor
- ✓ t é o tempo

Substituindo-se (2) em (1), obtém-se a frequência fundamental de ressonância para $n = 1$.

$$f = \sqrt{\frac{E}{\rho_s(1 - \sigma^2)}} \frac{\pi}{L} = f_0$$

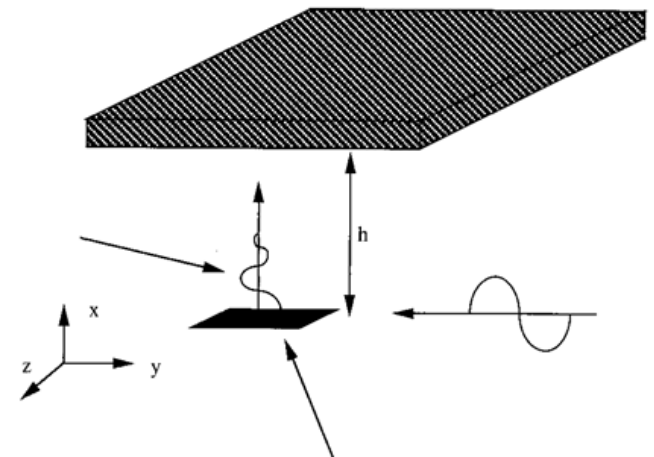
- ✓ A frequência depende :
 - ✓ Comprimento
 - ✓ Densidade
 - ✓ Módulo de Young
 - ✓ Módulo de Poisson , do material do sensor
- ✓ Também dependerá dos detalhes da mecânica interfacial entre o sensor e o meio em que ele está imerso.
- ✓ No líquido, a frequência de ressonância diminuirá devido a efeitos de caráter dissipativo das forças de cisalhamento associadas à viscosidade.

Equação que relacione a viscosidade do líquido com a frequência de ressonância.

- ✓ Movimento de um fluido incompressível acoplado por oscilações do sensor e uma superfície paralela ao sensor distante de h na direção x .
- ✓ Velocidade de vibração do sensor – v
- ✓ Onda gerada na direção x na direção da placa parada

Condições de contorno para o fluido:

- $v_y = s$ em $x = 0$ ($v_x = 0$ e $v_z = 0$) e
- $v_y = 0$ em $x = h$



Equação de Navier-Stokes (Landau e Lifshitz, Fluid Mechanics, Cap. 2, 2ª. ed.)*

$$v = s \frac{\sin k(h - x)}{\sin kx}$$

$$k = \frac{1 + i}{\delta}, \quad i = \sqrt{-1} \quad \text{e} \quad \delta = \sqrt{2\eta/\rho_l\omega}$$

Sensor + líquido: Eq. da lei de Newton na forma hidrodinâmica* para descrever a força de atrito na superfície do sensor exercida pelo líquido devido sua viscosidade:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_s(1 - \sigma^2)} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{2\eta k}{\rho_l d} \frac{\partial u}{\partial t} \cot kh \quad (3)$$

d é a espessura do sensor

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_s(1 - \sigma^2)} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{2\eta k \partial u}{\rho_l d \partial t} \cot kh \quad (3)$$

$$v = s \frac{\sin k(h - x)}{\sin kx} \quad k = \frac{1 + i}{\delta}, \quad i = \sqrt{-1} \quad \text{e} \quad \delta = \sqrt{2\eta/\rho_l \omega}$$

A equação de dispersão que relaciona a frequência de ressonância as propriedades do líquido é obtida resolvendo a equação (3):

$$\omega^2 = \frac{E}{\rho_s(1 - \sigma^2)} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - \frac{2\eta\omega}{\delta\rho_s d} \frac{\sinh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h}{\delta}\right)} = (\omega_0 + \Delta\omega)^2$$

ω_0 é a frequência da sensor no ar, e o deslocamento da frequência devido ao efeito do líquido é no sentido de diminuir esta: $\Delta\omega = \omega_n - \omega_0 < 0$

$$\omega^2 = \frac{E}{\rho_s(1-\sigma^2)} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - \frac{2\eta\omega}{\delta\rho_s d} \frac{\sinh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h}{\delta}\right)} = (\omega_0 + \Delta\omega)^2$$

$$\delta = \sqrt{2\eta/\rho_l\omega}$$

Para $\frac{2h}{\delta} \ll 1 \rightarrow$ líquido de alta viscosidade

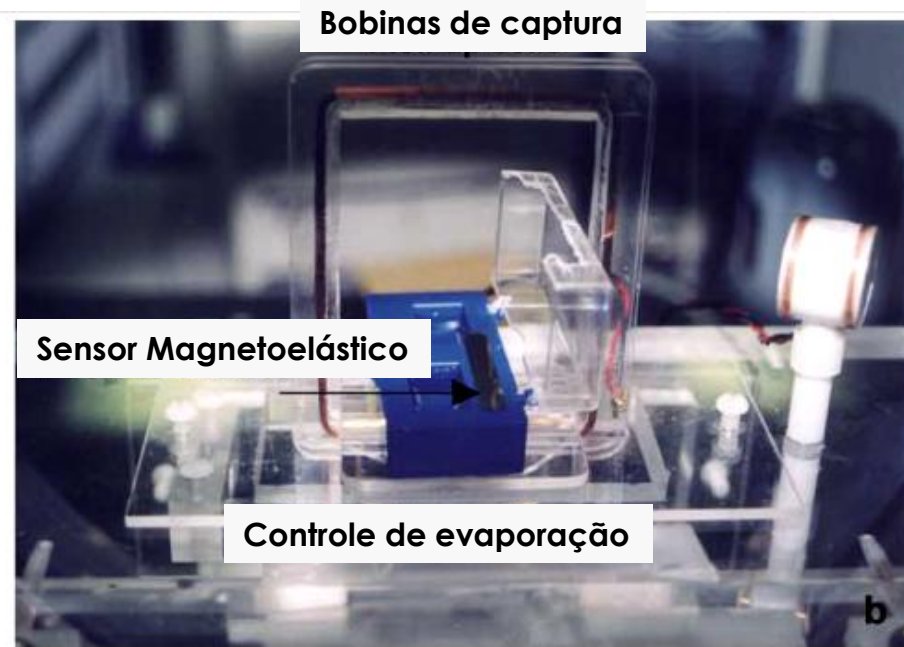
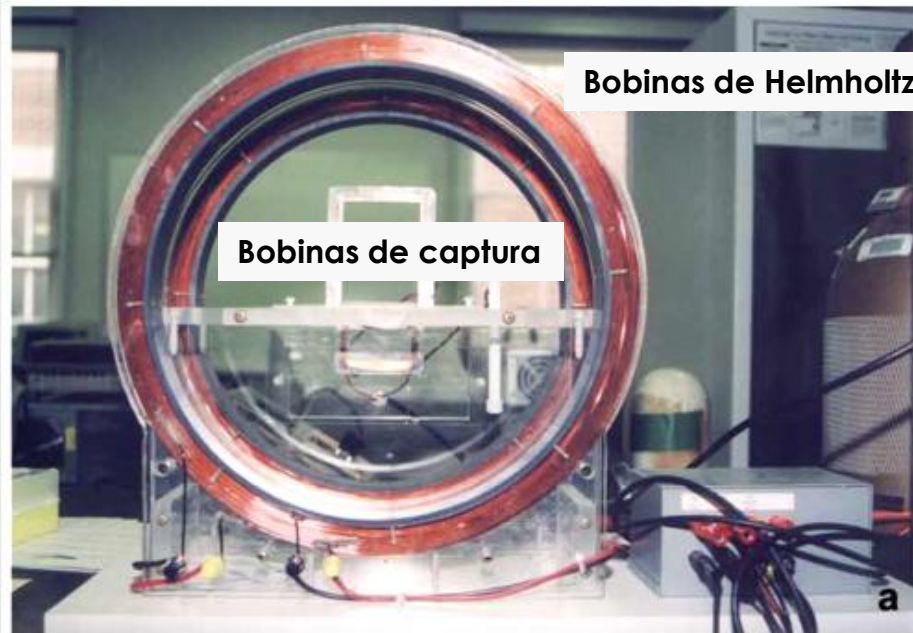
$$\Delta f = -\frac{1}{3}f_0 \frac{\rho_l h}{\rho_s d}$$

Para $\frac{2h}{\delta} \gg 1 \rightarrow$ líquido de baixa viscosidade

$$\Delta f = -\frac{\sqrt{\pi f_0}}{2\pi\rho_s d} (\eta\rho_l)^{1/2}$$

Detecção de coagulação de sangue

Sistema de medição



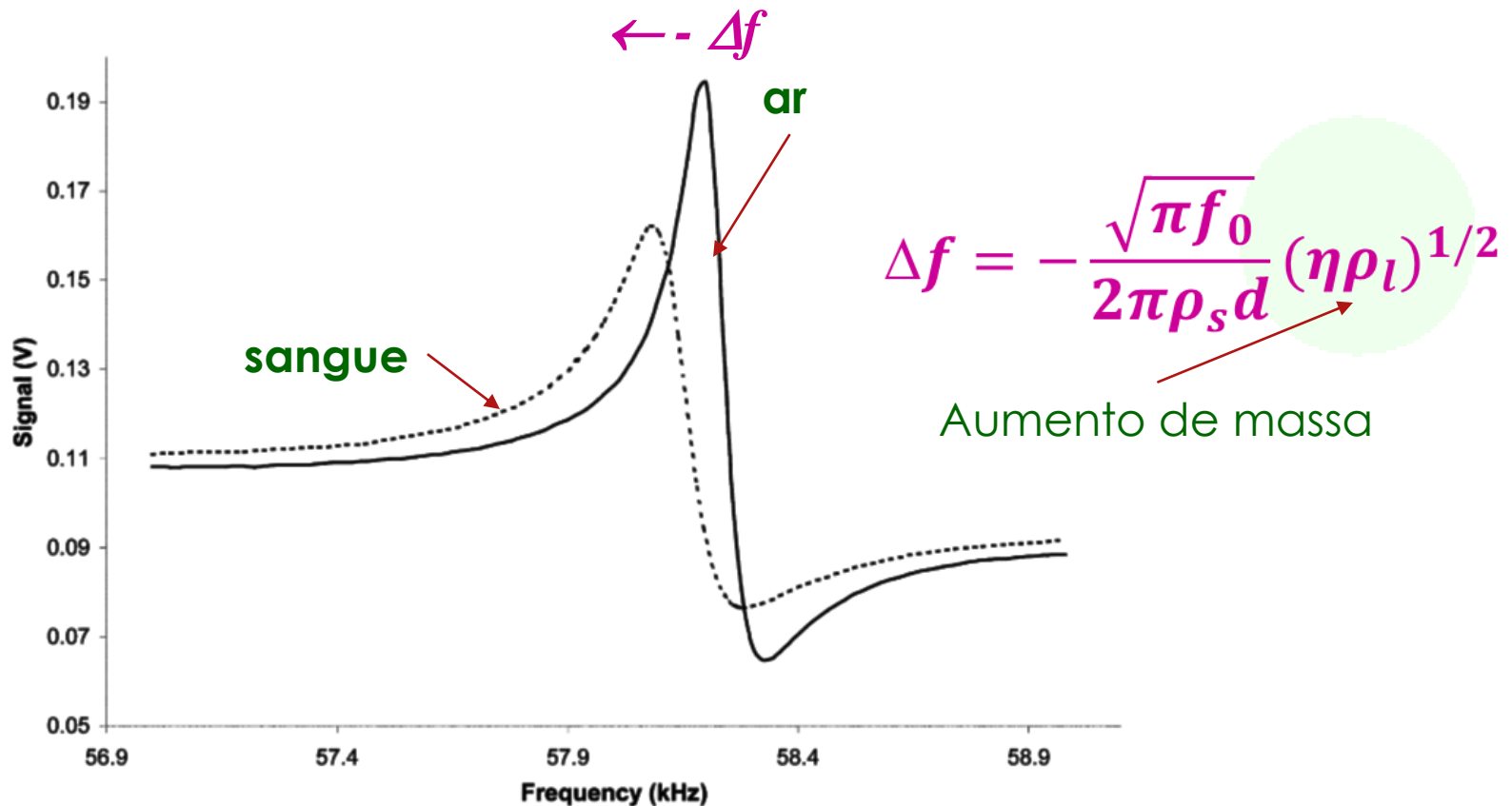
Libby G. Puckett et al Biosensors and Bioelectronics 18 (2003) 675,681

Detecção de coagulação de sangue

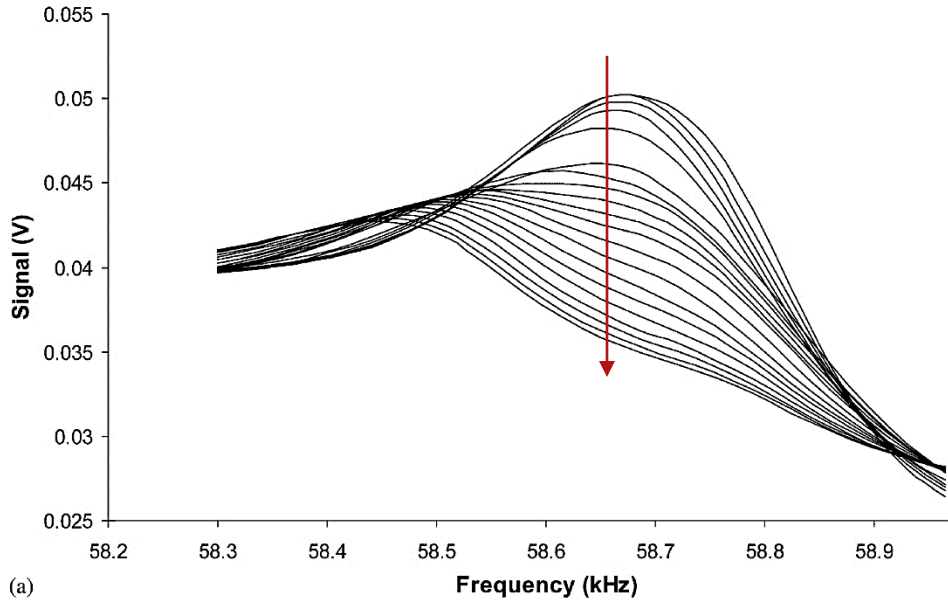
Sistema de medição

- ❖ Duas bobinas de Helmholtz de 33,2 cm de diâmetro e 36 voltas;
- ❖ Um campo magnético senoidal AC de 80 mOe → interrogação (excitação) dos filmes magnetoelásticos;
- ❖ Um campo magnético DC de 3,9 Oe → compensação da anisotropia do material do sensor;
- ❖ Uma bobina de captura de 120 voltas de $8,4 \times 8,4$ cm foi colocada dentro da configuração de bobinas;
- ❖ Material: fita Metglas™® 2826MB ($\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$), com dimensões 6,35 mm / 38,1 mm / 30 μm .

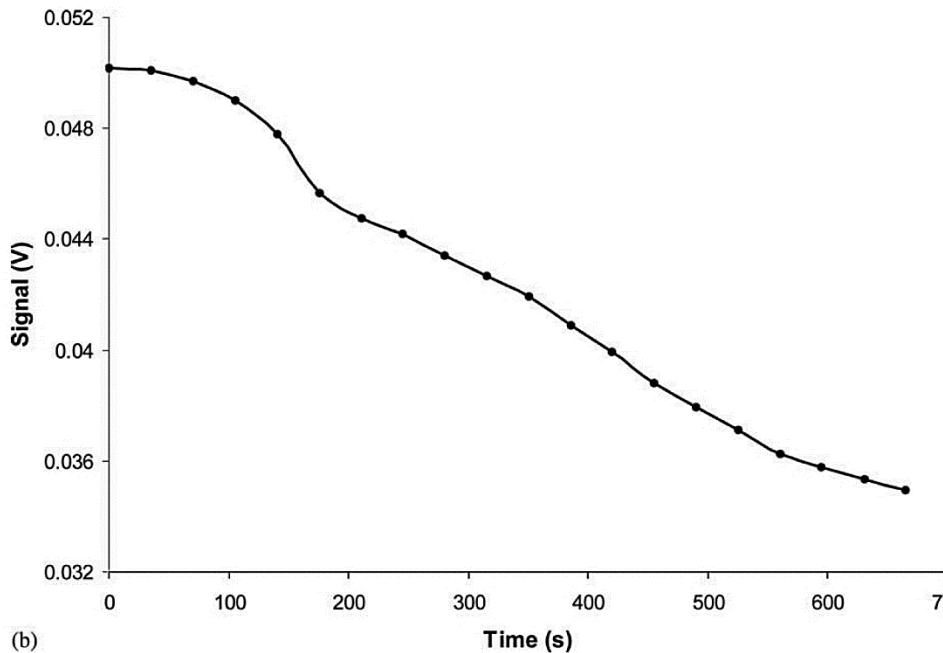
TFR do sinal da fita Metglas™® 2826MB



4 μL de sangue humano; $f_{\text{ar}} = 58.20 \text{ kHz}$; $f_{\text{sangue}} = 58.08 \text{ kHz}$



(a)



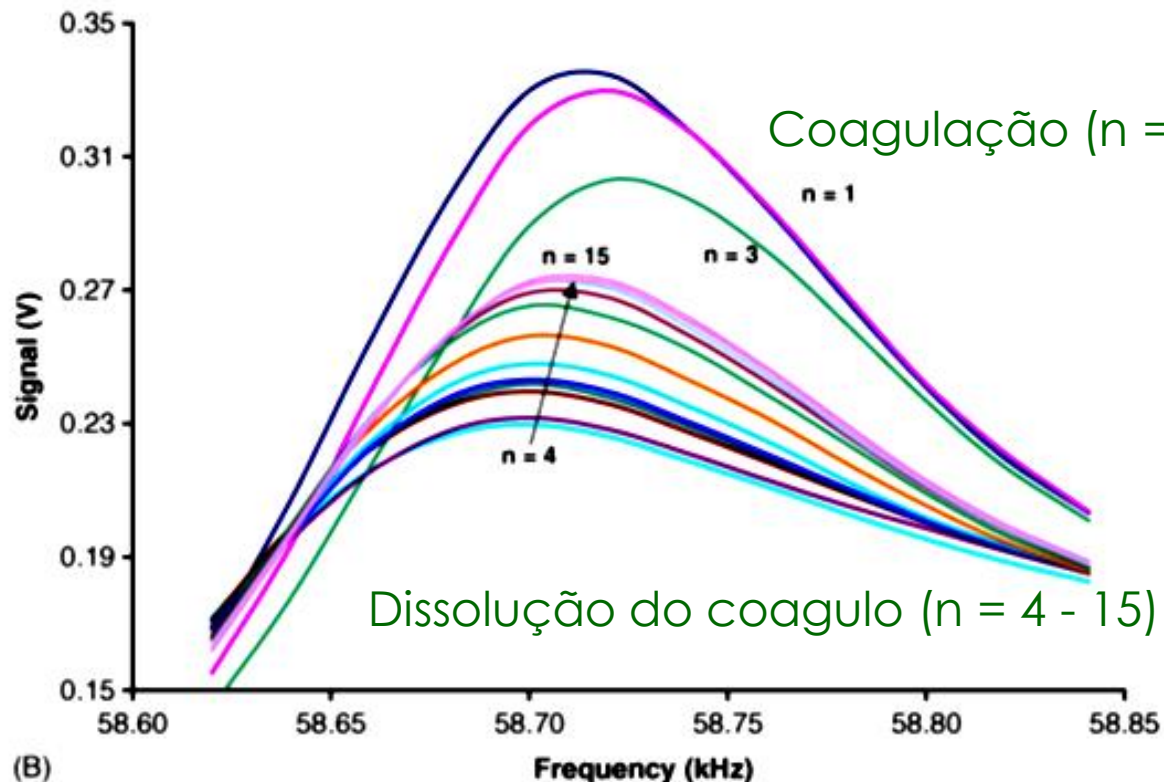
(b)

❖ Para frequências próximas da ressonância há a máxima variação do sinal de resposta a mudanças na frequência.

❖ À medida que o sangue coagula, as alterações adicionais poderão ser observadas no perfil de frequência do sensor.

- O tempo entre cada varredura foi de ~ 50 s.

- Múltiplas varreduras de frequência do processo coagulação e que ilustra a mudança de frequência ao longo do tempo.
- Foram feitas 15 varreduras, foi adicionado plasmina (anticoagulante) entre a terceira e a quarta varredura.
- O tempo entre cada varredura foi de aproximadamente 36 s.

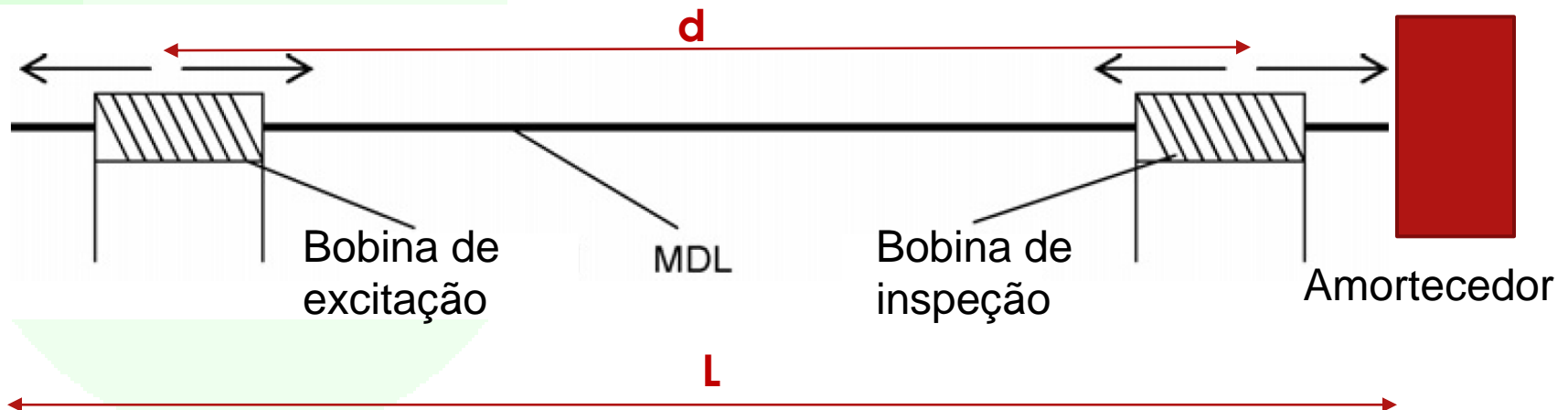


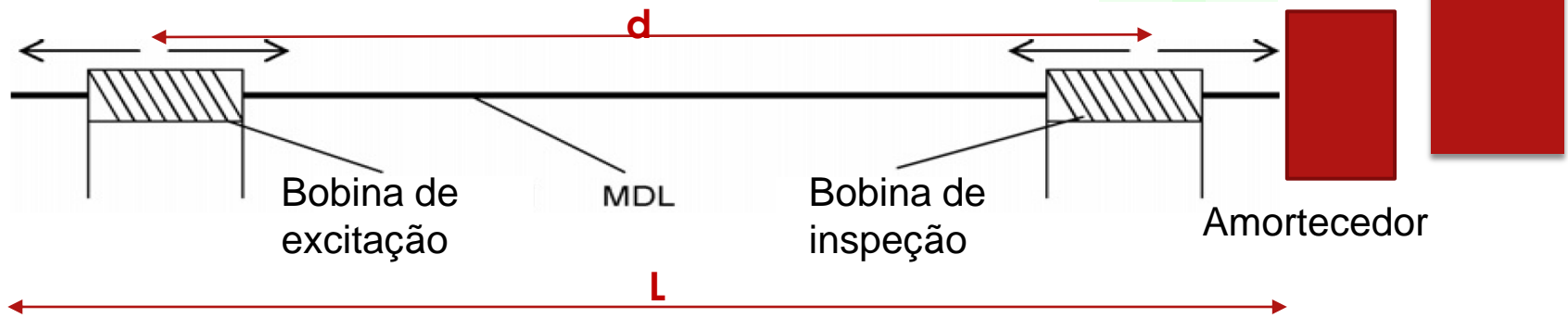
Libby G. Puckett et al, *Magnetoelastic transducers for monitoring coagulation, clot inhibition, and fibrinolysis*, *Biosensors and Bioelectronics* 20 (2005) 1737–1743

Magnetostrictive Delay Lines - MDL

► Constituída de:

- Uma barra de material magnetostrictivo de comprimento L ;
- Duas bobinas enroladas ao redor da barra e separadas de uma distância d .
- Extremidades adequadamente finalizadas para que não haja reflexão nas extremidades.





- Bobina de excitação → campo longitudinal → contração → onda mecânica se propaga.
- Qdo a onda mecânica chega na 2ª. bobina (inspeção) o material muda a dimensão longitudinal e a permeabilidade → $\Delta\phi \rightarrow \varepsilon$ (voltagem)
- O tempo gasto pelo pulso para chegar na 2ª. bobina é d/v_0 , sendo v_0 a velocidade do som no material. No Ni é $\sim 5 \times 10^5$ cm/s

Conclusões e perspectivas

- ▶ **Perspectiva de sensoriamento remoto – não é possível em cerâmicas piezoelétricas**
- ▶ **Microsensores e micro atuadores em aplicações médicas (início) – filmes finos**
- ▶ **Aplicações espaciais; redução de peso**
- ▶ **Aplicações em baixa frequência e submersas.**