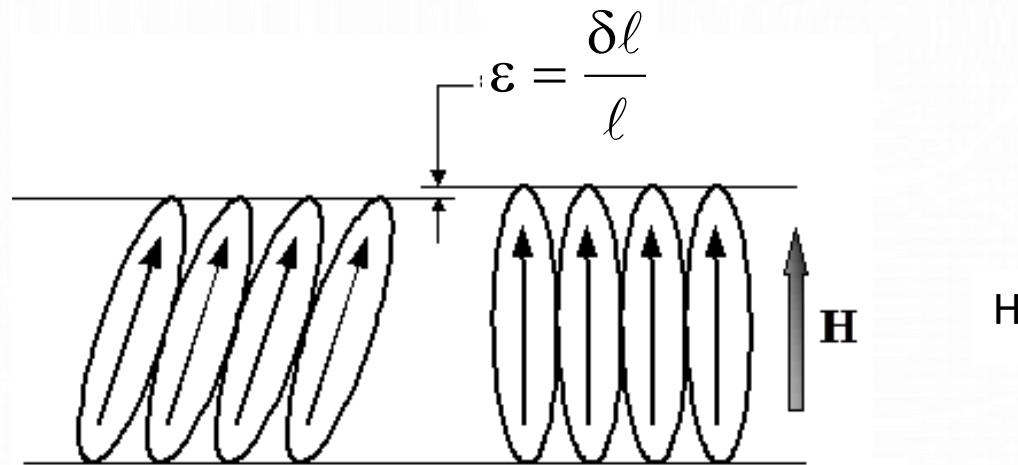


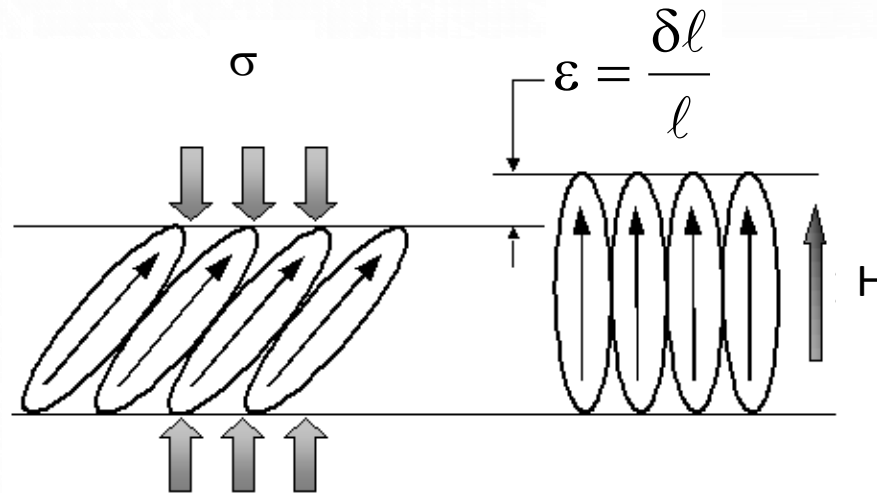
The background of the slide is white and features several realistic-looking water droplets of various sizes scattered across the surface. A central purple rectangular box contains the title text in blue. The text is written in a bold, sans-serif font and is arranged in two lines.

# EFEITOS MAGNETOELÁSTICOS

# MAGNETOSTRICÇÃO

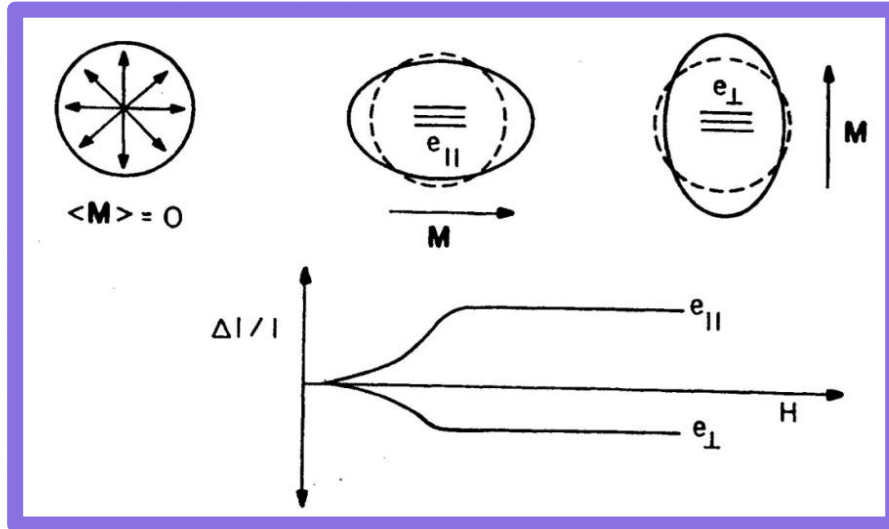


Deformação do material por aplicação de campo magnético



A origem da magnetostricção é o acoplamento dos momentos magnéticos com a rede cristalina (anisotropia magnetocristalina)

# DEFORMAÇÕES ANISOTRÓPICAS



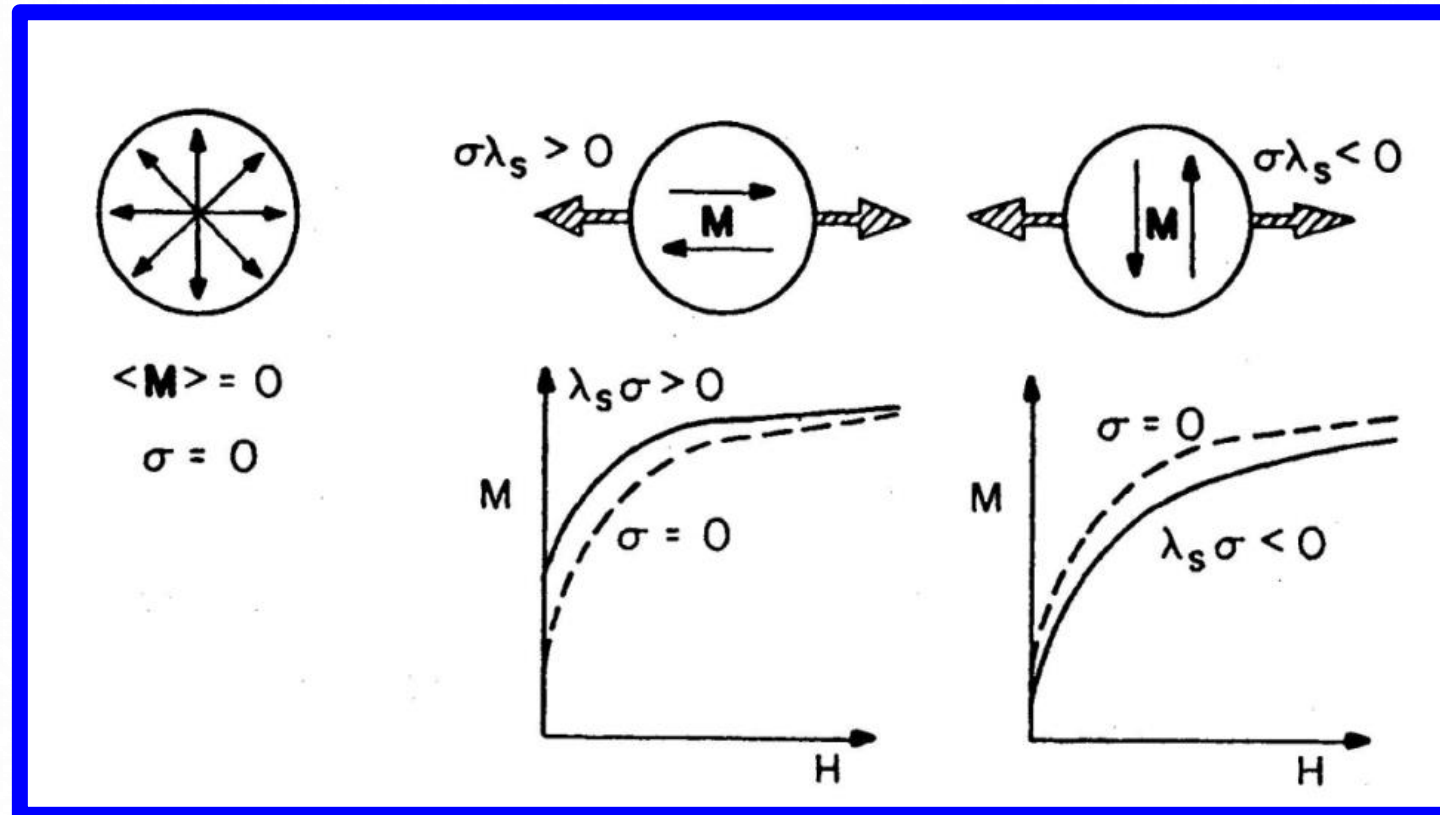
- Material isotrópico  
( $e_{\perp}$  e  $e_{||}$ , deformações para campo perpendicular e paralelo a direção da medida da deformação).

- As deformações  $\Delta l / l = \lambda$ , são chamadas de **magnetostricção de Joule ou anisotrópica**;
- Pode variar de zero ( $\lambda < 10^{-7}$ ) até  $\pm 10^{-4}$  em ligas e metais 3d;
- Em alguns metais 4f, compostos intermetálicos e ligas ~ acima de  $\pm 10^{-3}$ .

# Efeito Inverso

## Deformação Causa Variação Na Magnetização

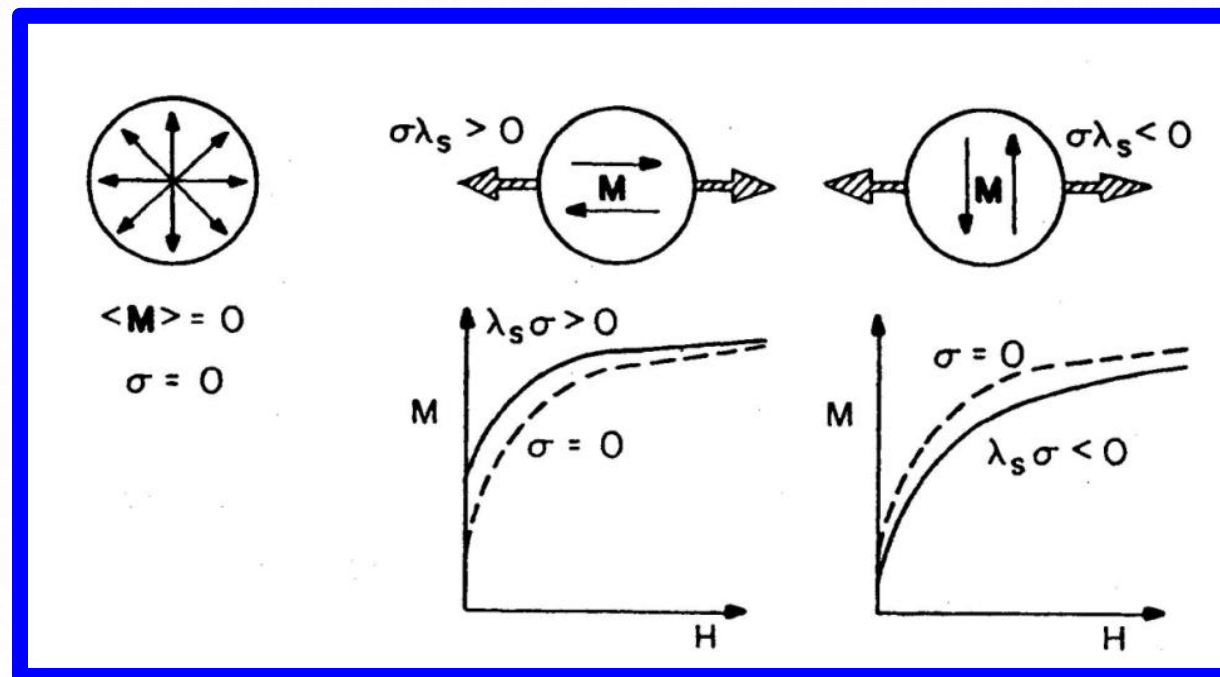
Denominado de Efeito Joule inverso ou efeito Villari, piezomagnetismo, ou mais comumente, anisotropia induzida por tensão.



# EFEITO INVERSO

## DEFORMAÇÃO CAUSA VARIAÇÃO NA MAGNETIZAÇÃO

Se  $\lambda_s > 0$ , é mais fácil magnetizar o material na direção da tração aplicada ( $\sigma > 0$ )  $\rightarrow \lambda_s \sigma > 0$



Se  $\lambda_s < 0$ , é mais difícil magnetizar na direção da tração  $\rightarrow \lambda_s \sigma < 0$ . (o mesmo raciocínio pode ser feito para a compressão, ou seja,  $\sigma < 0$ )

# DEPENDÊNCIA DA MAGNETOSTRICTIÇÃO DE JOULE DO CAMPO MAGNÉTICO

- A deformação magnetostrictiva anisotrópica, em um **material isotrópico**, em relação à direção da magnetização pode ser dada

por:

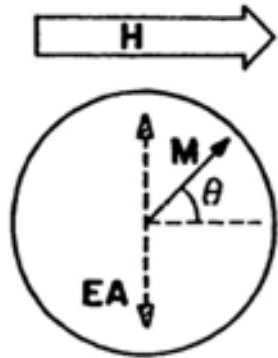
$$e = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right)$$

$e = \frac{\Delta l}{l}$  É a deformação medida;  $\theta$  é o ângulo relativo à magnetização de saturação;

- a deformação  $e$  é denominada de *magnetostrictão*  $\lambda$ .
- $e$  é uma função de  $m$  ou do campo aplicado, portanto não deve ser confundido com  $\lambda_s$  que é uma constante do material.

A magnetização em um material uniaxial na direção de difícil magnetização é  $M/M_0 = m$ ;

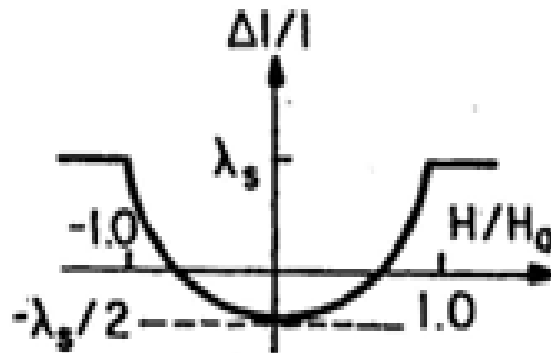
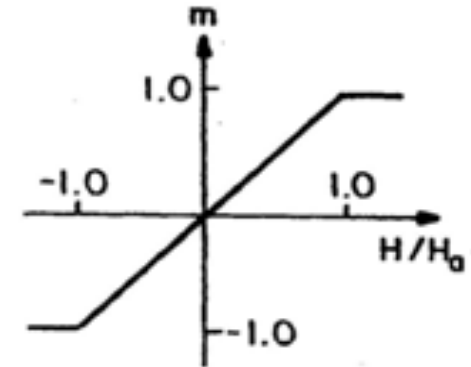
$H_a$  é o campo anisotrópico, o campo necessário para atingir a magnetização de saturação  $M_0$



Field Transverse to EA



$$m = \cos\theta$$



$$e = \frac{3}{2} \lambda_s \left( m^2 - \frac{1}{3} \right)$$

Acima da saturação - isotrópico

$$e_{\parallel} = \frac{3}{2} \lambda_s \left( 1 - \frac{1}{3} \right) = \lambda_s \quad e_{\perp} = \frac{3}{2} \lambda_s \left( 0 - \frac{1}{3} \right) = -\frac{\lambda_s}{2}$$

Para materiais não isotrópicos deve-se medir  $e_{\parallel}$  e  $e_{\perp}$ , pois se  $e_{\parallel} > \lambda_s \rightarrow e_{\perp} < | \lambda_s / 2 |$

$$e_{\parallel} - e_{\perp} = \frac{3}{2} \lambda_s \quad \text{ou} \quad \lambda_s = \frac{2}{3} (e_{\parallel} - e_{\perp})$$

**CONSTANTES DE MAGNETOSTRICÇÃO ( $\times 10^{-6}$ ) EM  
TEMPERATURA AMBIENTE PARA DIVERSOS MATERIAIS  
ANISOTRÓPICOS.**

Material	$\lambda_{100}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\lambda_{111}$ ( $\times 10^{-6}$ )	Policristal ( $\times 10^{-6}$ )
Fe (ccc)	21	-21	7
Co (hp)	-140	50	-62
Ni (cfc)	-46	50	-34
Fe-Co (ccc)	140	30	--
Fe-Ga (GALFENOL)	375	$\sim 0$	90
Fe-Al (ALFENOL)	185	$\sim 0$	40
Gd	-10	0	--
Tb	--	30	--
TbFe <sub>2</sub> (TERFENOL)		2600	1750
Tb <sub>0,3</sub> Dy <sub>0,7</sub> Fe <sub>2</sub> (TERFENOL D)		1600	1200
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (FERRITA)	-15	56	40
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-54	10	--
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-670	120	-110



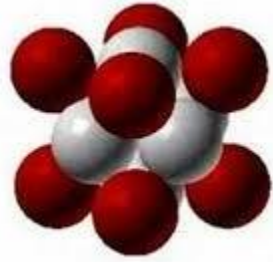
# EFEITO INVAR

- ❖ Fe65Ni35 – Descoberto Em 1896 por Guillaume.
- ❖ Expansão Térmica Nula Em Temperatura Ambiente E Baixas Temperaturas.

## ❖ ORIGEM

- ❖ Variação enorme 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  $\mu_B$
  - ❖ 2º. Estado: parâmetro de rede menor e momentos de 0,8 A 1,5  $\mu_B$ 
    - Depende da temperatura

# INVAR



- ❖ 1º. Estado: parâmetro de rede maior e momentos de 2,2 a 2,5  $\mu_B$  (BT)
- ❖ 2º. Estado: parâmetro de rede menor e momentos de 0,8 a 1,5  $\mu_B$
- ❖ Aquecendo o material a partir de baixas temperaturas o 2º. 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.
- ❖ **USO:** Metrologia, conexões metal-vidro, transportadores de metano.
  - ❖ Por possuírem uma alta magnetostricção de Joule (varia com  $H$ ), quando usado no tanque de metano deve ser blindado de campos magnéticos (segurança).



- ❖ 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 - PÊNULOS DE COMPENSAÇÃO E ENGRENAGENS EM BALANÇAS PARA RELÓGIOS MECÂNICOS E RELÓGIOS DE PULSO



Photograph showing tubular products that have glass-to-metal junctions. The thermal expansion coefficient of the metal alloy (Kovar) is approximately the same as that of the Pyrex glass. Thus, with changes in temperature, the likelihood of the establishment of thermal stresses and fracture at the junction are minimized. [Photograph courtesy of Moores (EVIC) Glassworks, Ltd., Walton-on-Thames, England.]

KOVAR (54%Fe-29Ni-17Co (% em peso))

**Uso (estabilidade dimensional)**

- Componentes estruturais em lasers em que é necessário estabilidade dimensional ~ comprimento de onda.**
- Recipientes e tubulações para guardar e transportar gás natural**
- Tubos catódicos e telas de TV; melhora brilho e definição (VERY OLD!!)**

The background features a light gray circular pattern of concentric rings centered in the upper half. Scattered throughout the white background are several realistic water droplets of various sizes, some with soft shadows and highlights, giving them a three-dimensional appearance.

**TERFENOL-D**

# TERFENOL – $\text{TbFe}_2$ : DESCOBERTO POR A. E. CLARK (TERBIUM, FE, NAVAL ORDINANCE 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. (menor campo anisotrópico)
- ❖ Usado em sensores e armas.

# MATERIAIS MAGNETOSTRICTIVOS COM ALTAS MAGNETOSTRICÇÕES

❖ **Alta magnetostricção** → **pode produzir altas forças**

→ **movimentos precisos com alta potência.**

❖ **Atuadores lineares (efeito Joule)**

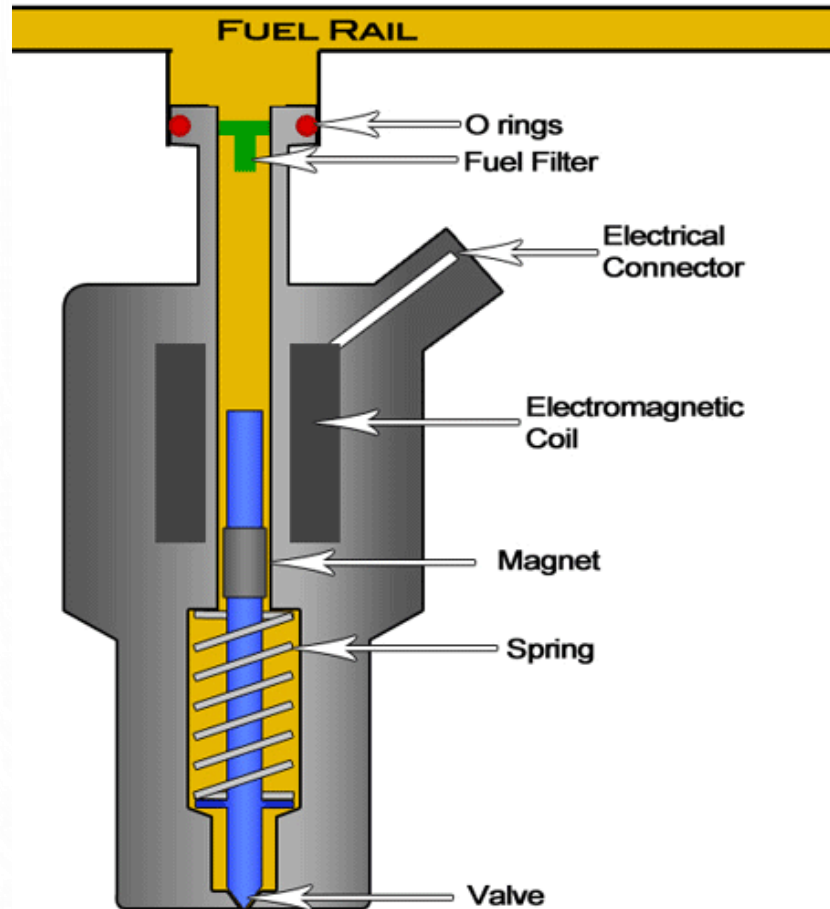
- Válvulas elétricas (injeção de combustível)
- Micro bombas (cabeças de impressoras jato de tinta)
- posicionamento automático
- amortecimento de vibrações
- Relês rápidos
- Engrenagens
- Robótica
- Foco automático (ótica)
- Persianas automáticas
- Etc



The background features a light blue radial gradient emanating from the center. Several realistic, 3D-rendered water droplets of various sizes are scattered in the corners: top-left, top-right, and bottom-right.

# **DISPOSITIVOS FEITOS DE MATERIAIS MAGNETOSTRICTIVOS**

# VÁLVULA DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL



# SONARES

- ❖ Até 1935 – usava-se níquel
- ❖ Níquel muito caro durante a 2ª. Guerra
- ❖ Substituído por Alfer/ Alfenol (Fe-Al)
- ❖ Depois da 2ª. Guerra Alfer substituído por cerâmicas piezoelétricas.
- ❖ Mais recentemente Terfenol-D – recorde de potência emitida.

# Sonares

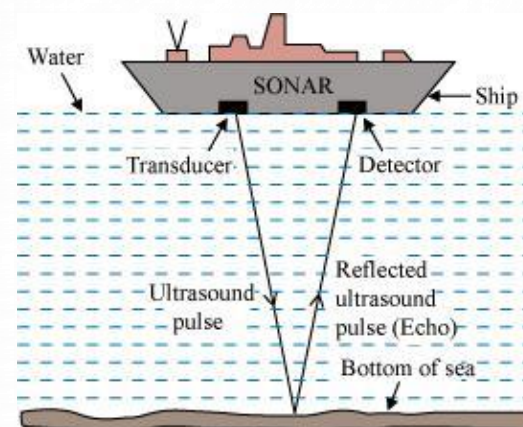
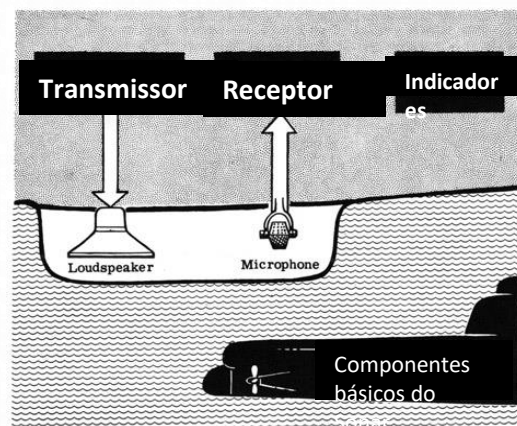
- Transmissor do sonar =

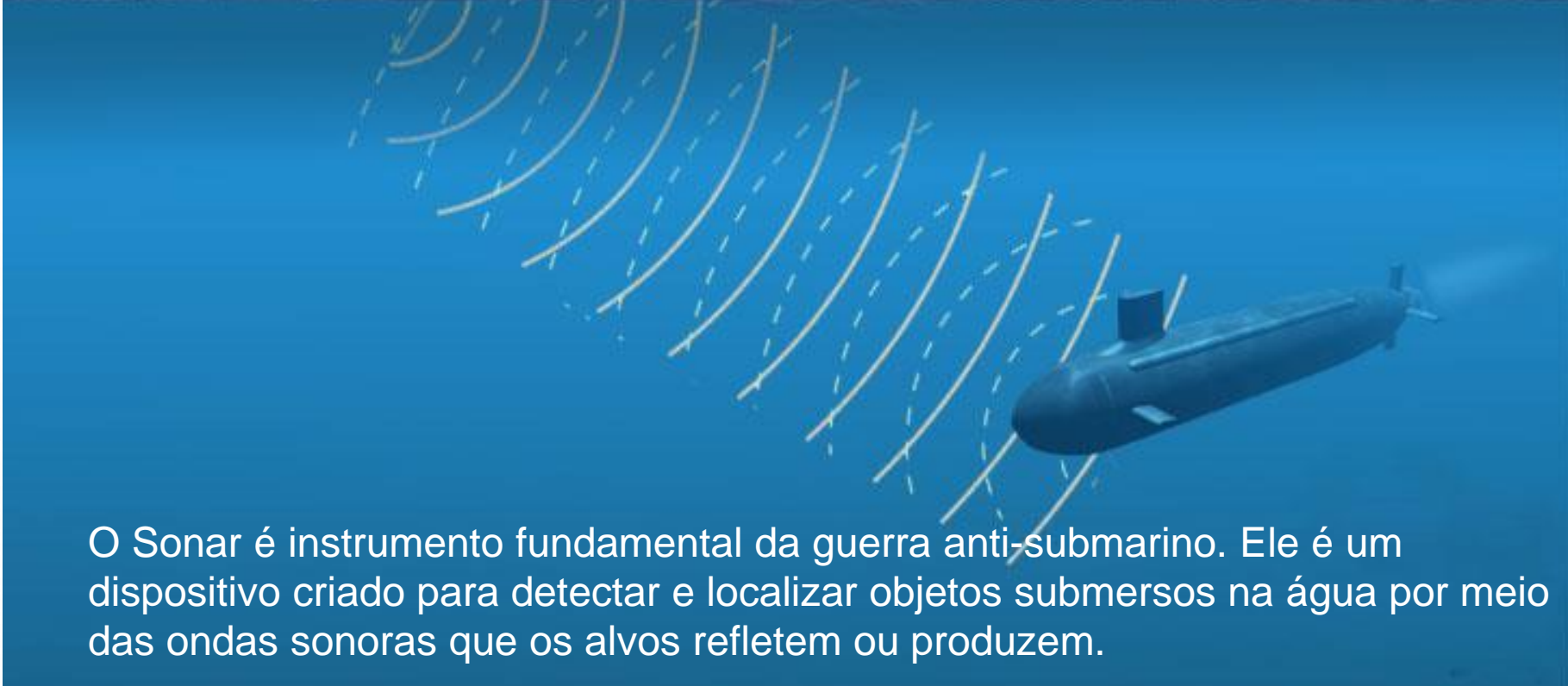
Oscilador de áudio de alta frequência + amplificador de potência (eletrônica básica).

Alto-falante + microfone estão combinados em um dispositivo chamado "transdutor" (projektor) 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.



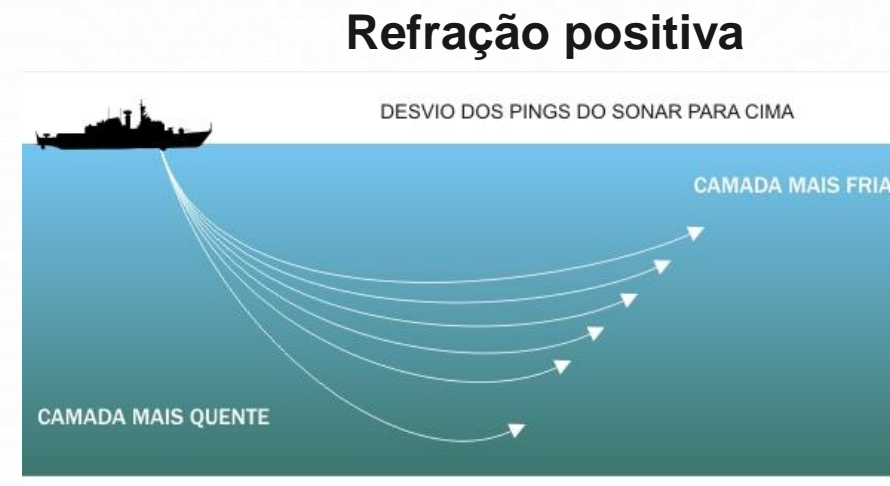
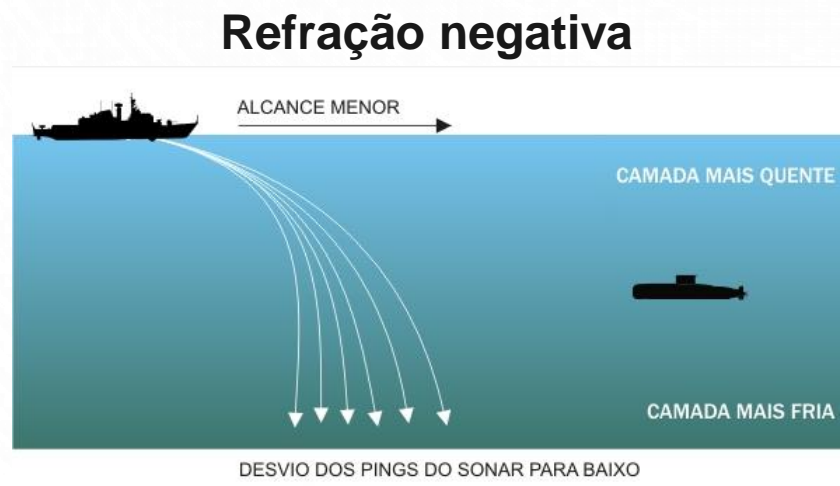


O Sonar é instrumento fundamental da guerra anti-submarino. Ele é um dispositivo criado para detectar e localizar objetos submersos na água por meio das ondas sonoras que os alvos refletem ou produzem.

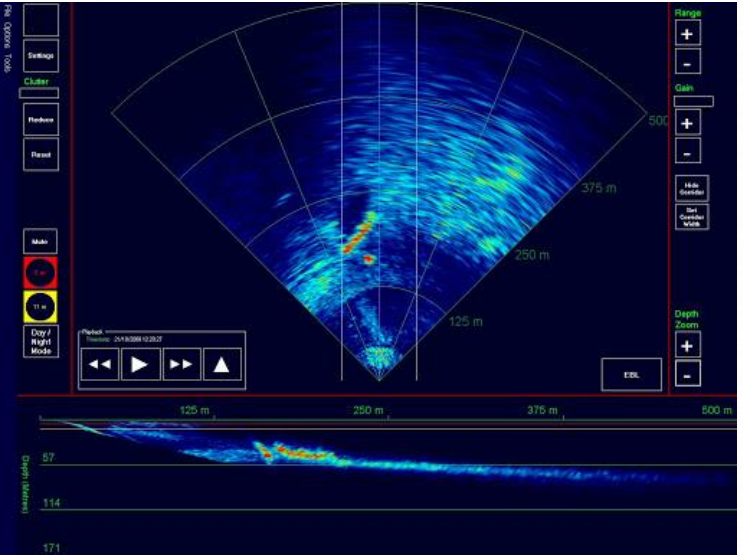
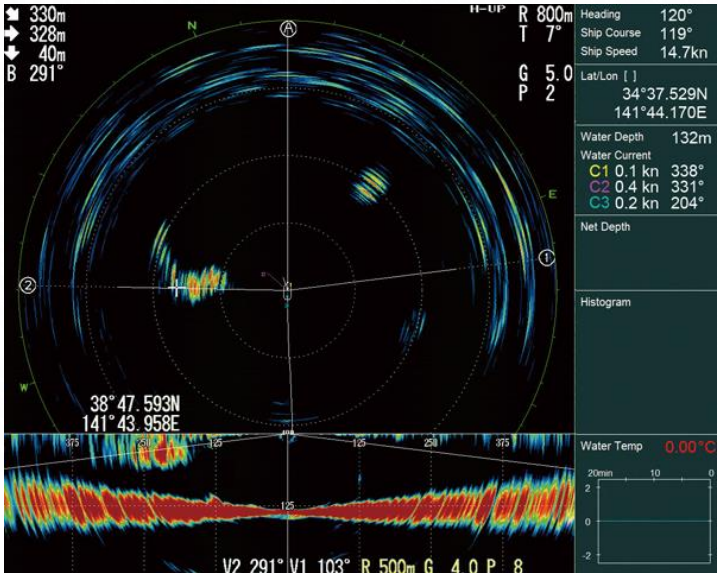
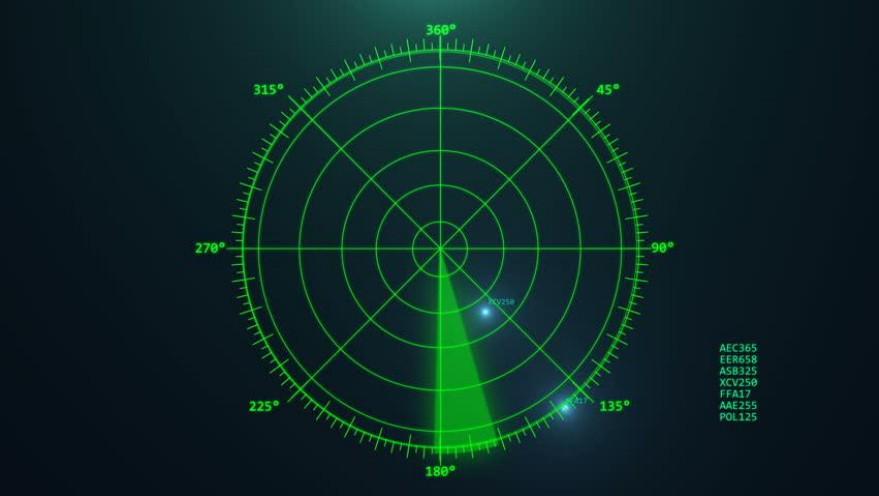
- O PULSO DO SONAR É EMITIDO E AO ENCONTRAR UM OBSTÁCULO, RETORNA AO EMISSOR. MEDE TEMPO → DISTÂNCIA
- A PRECISÃO É “RELATIVA” → ATENUAÇÃO
  - TEMPERATURA, SALINIDADE E PRESSÃO DA ÁGUA.

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).



# DISPLAY DE SONARES



# SONAR PING



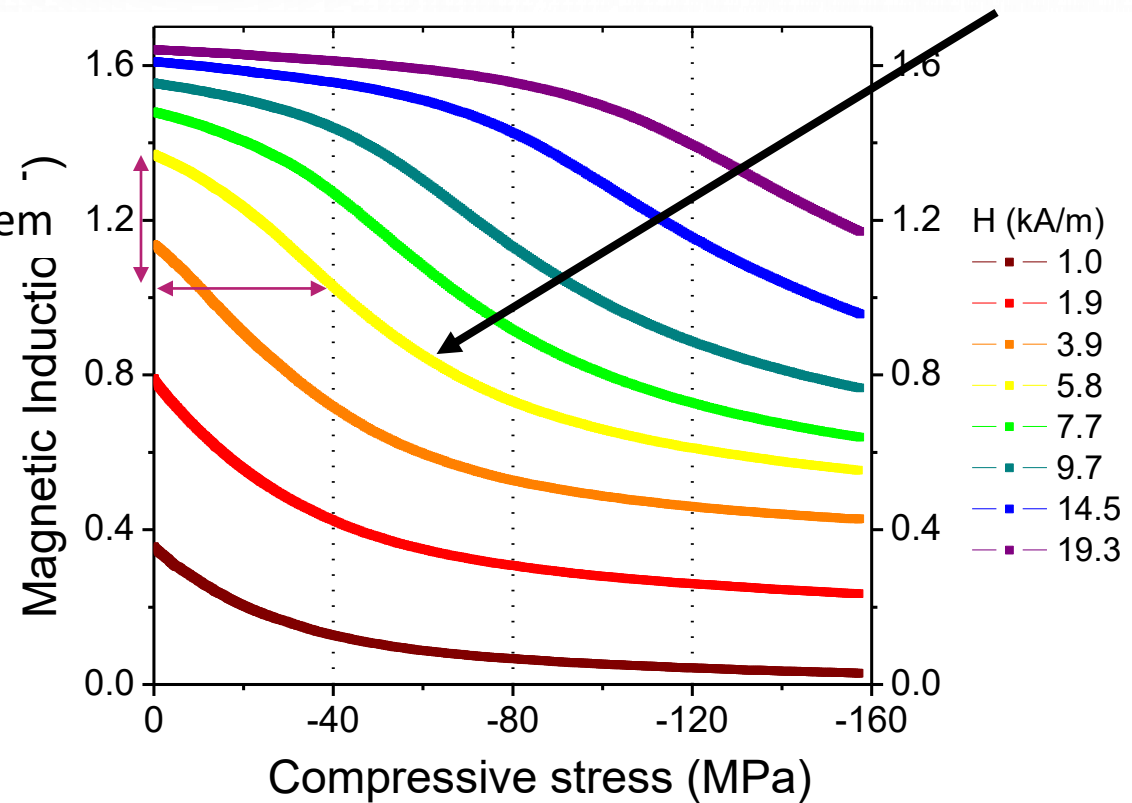


# SENSORES BASEADOS NO EFEITO VILLARI (Fe-Al-B)

- TRANSDUTOR – MEDIDA DE FORÇA

Variação de voltagem

$$d_{33}^* = \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H$$



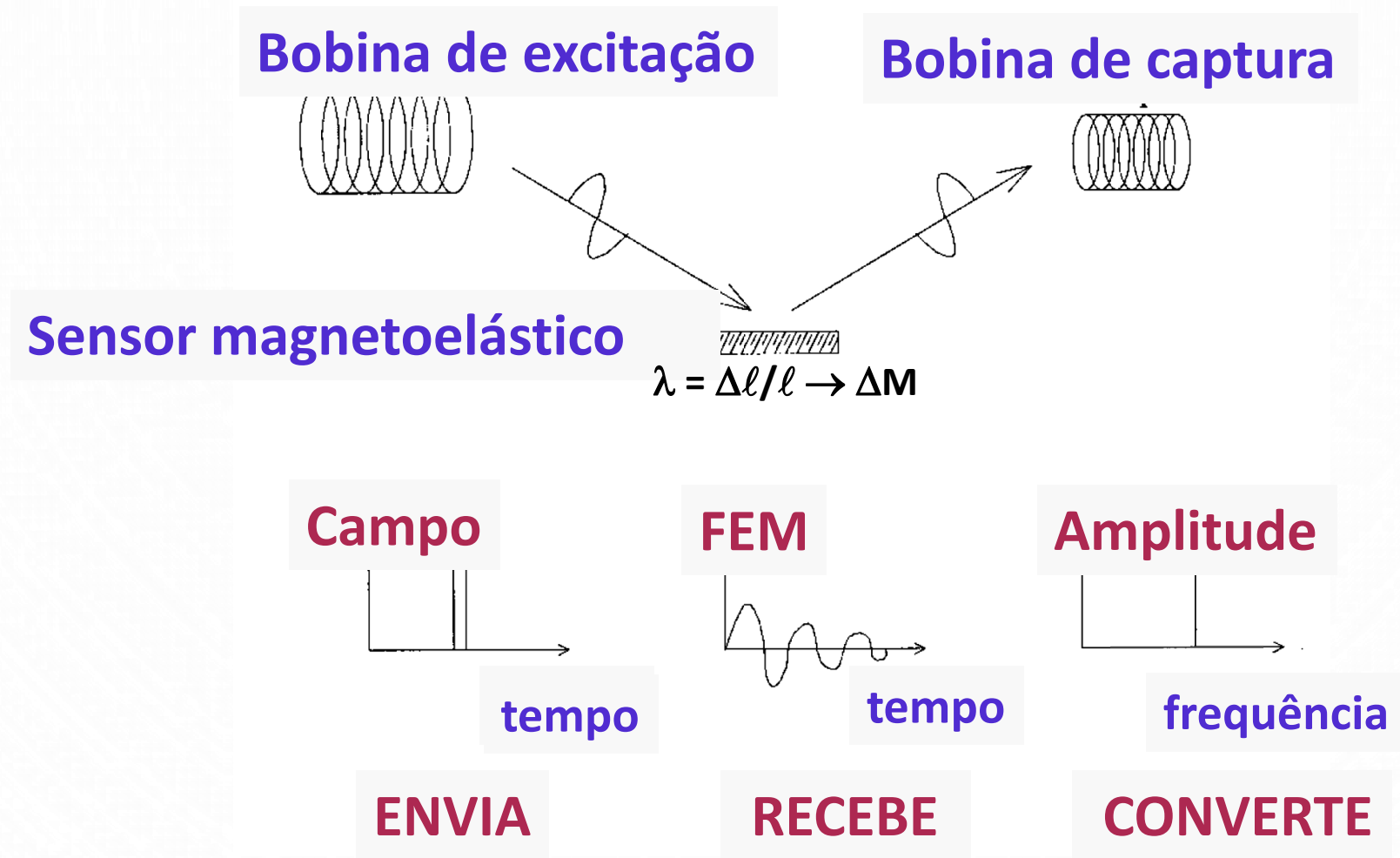


# **SENSORES BASEADOS EM LIGAS AMORFAS**

**FITAS AMORFAS OBTIDAS POR SOLIDIFICAÇÃO RÁPIDA  
(MELTING SPINNING)**

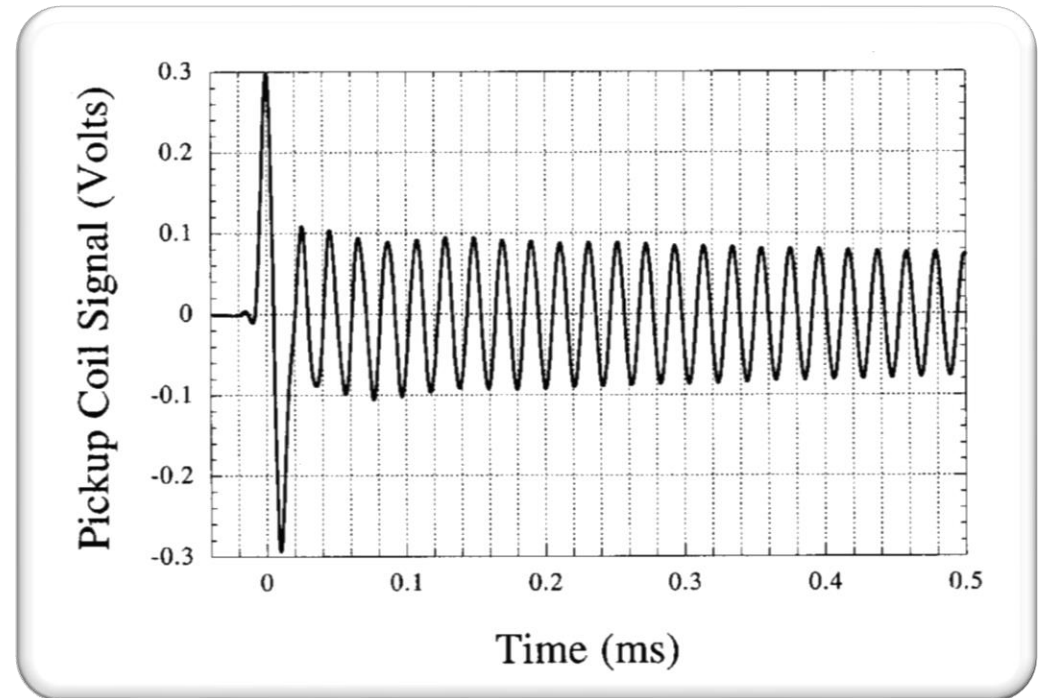
- Em campo variável a fita oscila em um frequência fundamental que depende das dimensões da fita e das propriedades do material;
- As vibrações geram ondas acústicas e fluxo magnético que podem ser detectadas por um microfone e uma bobina de captura.
- A frequência de ressonância pode variar devido a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

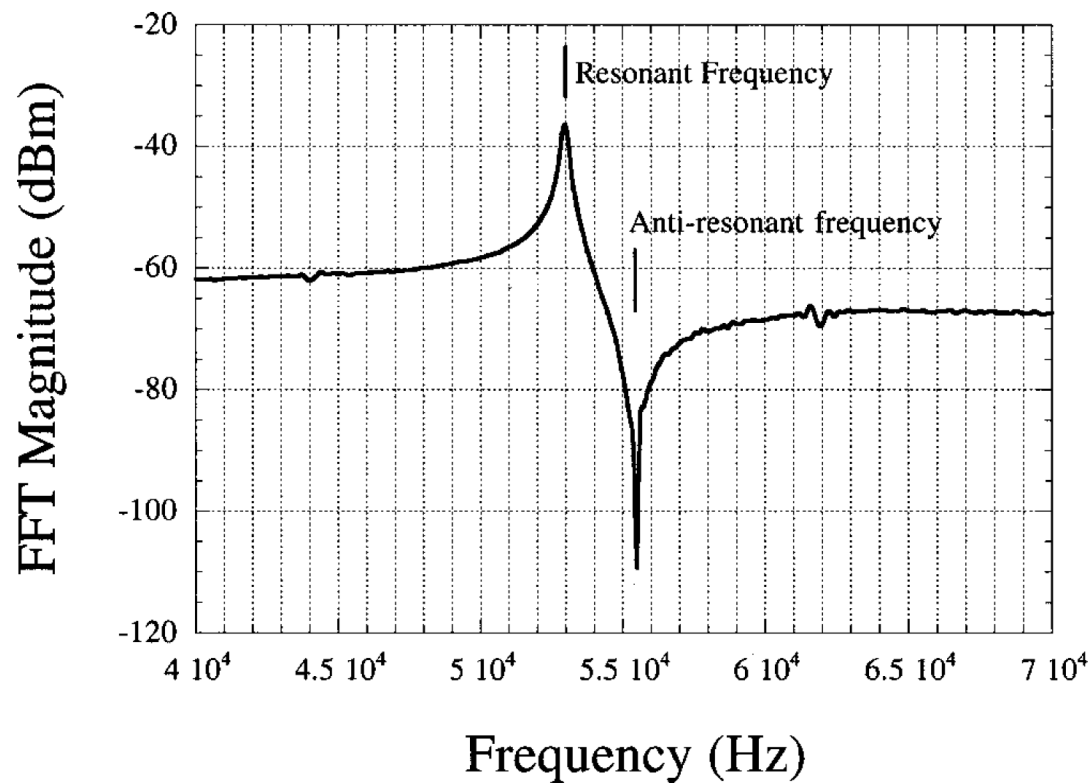
# ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA NATUREZA REMOTA DE SENSOR MAGNETOELÁSTICO



O fluxo magnético emitido é capturado por um osciloscópio ligado a uma bobina de captura.

- Sinal gerado pelo sensor contém todas as frequências, mas as ondas elásticas que não estiverem na frequência de ressonância do material serão dissipadas





- **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.

# SENSOR DE 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.**

# MODELO TEÓRICO – RESPOSTA DO SENSOR À VISCOSIDADE E DENSIDADE DE UM LÍQUIDO

Equação de movimento de uma placa vibrante

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

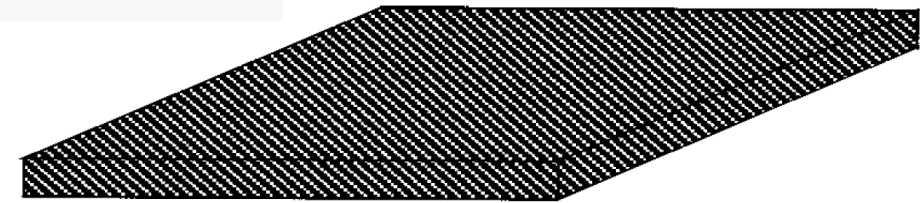
$\rho_s$  - densidade do material sensorial

$E$  – módulo de elasticidade de Young

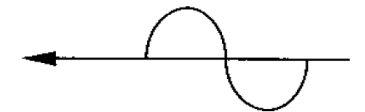
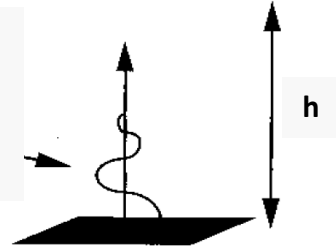
$\sigma$  - razão de Poisson

$u$  é o vetor deslocamento do sensor.

Placa delimitadora fixa

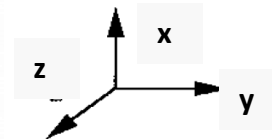


Onda elástica no fluido gerada pelo sensor oscilante



Líquido

Campo de excitação (pergunta)



Sensor magnetoelástico



## Equação de movimento de uma placa vibrante

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

Equação de onda!!!!

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Se a frequência do campo AC é igual à frequência de ressonância mecânica do sensor, a conversão de energia mecânica em energia elástica é maximizada e o sensor entra em ressonância.

Portanto, procura-se soluções de ondas estacionárias do tipo:

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

$\omega_n$  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.**

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

$h$  é a distância do sensor à placa delimitadora

$$k = (1 + i)/\delta, \quad i = \sqrt{-1},$$

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

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

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

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

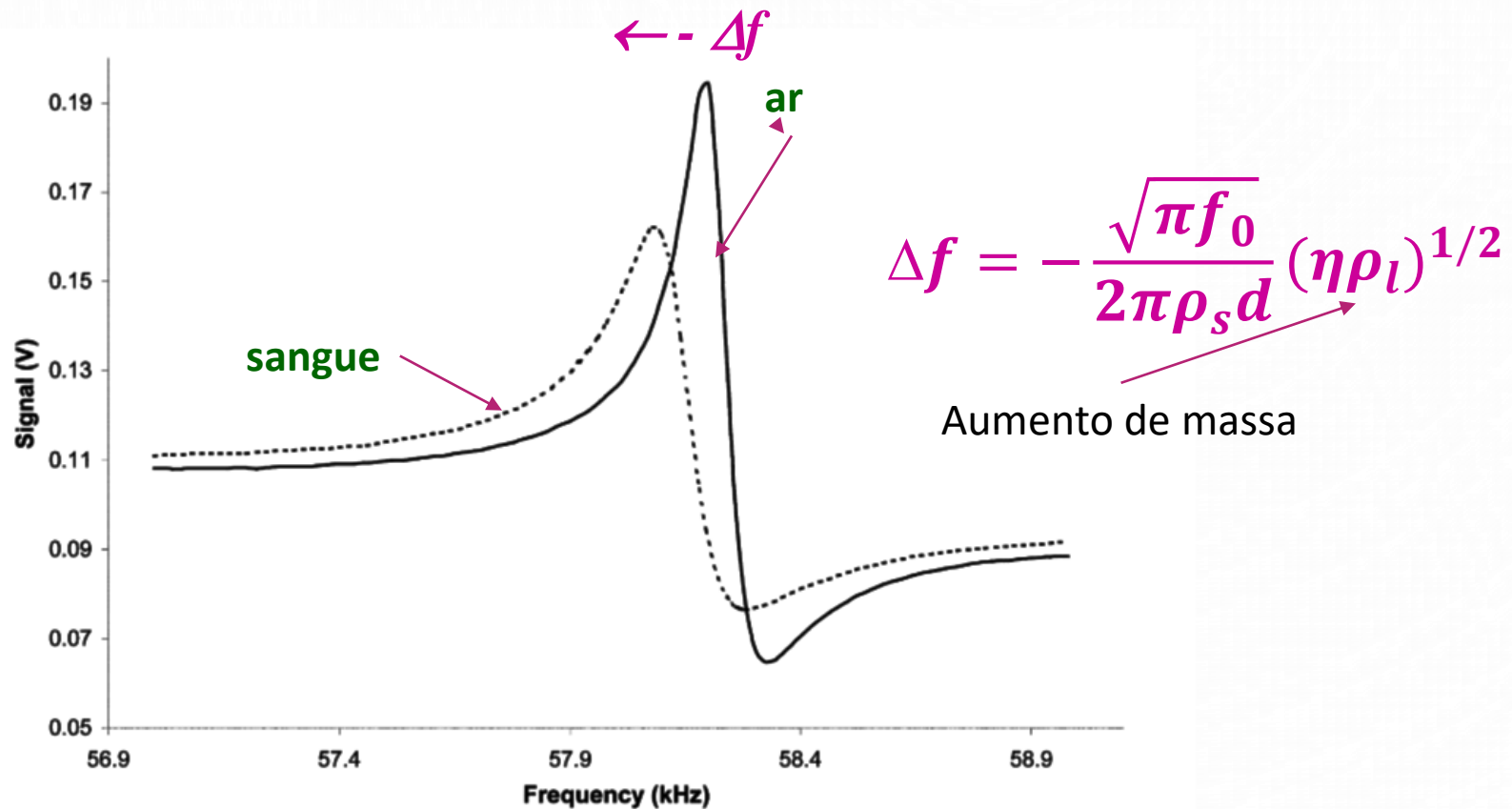


$$\Delta f = -\frac{\sqrt{\pi f_0}}{2\pi\rho_s d} (\eta\rho_l)^{1/2}$$

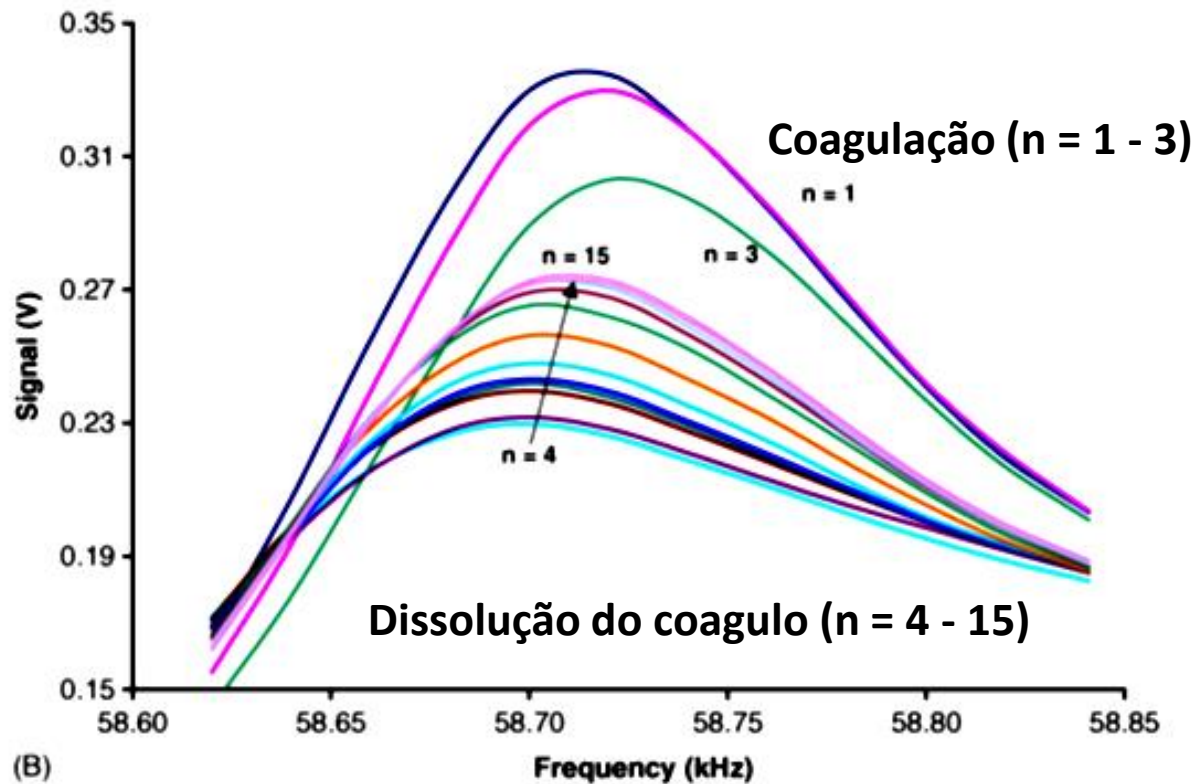
# DETECÇÃO DE COAGULAÇÃO DE SANGUE

- ❖ Bobinas primárias geram um campo magnético DC de 310 A/m superpondo um campo senoidal AC de 6.4 A/m → interrogação (excitação) dos filmes magnetoelásticos;
- ❖ Uma bobina de captura é colocada dentro do arranjo
- ❖ Material: fita Metglas™® 2826MB ( $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ ), com dimensões 6,35 mm / 38,1mm / 30  $\mu\text{m}$ .

# TFR DO SINAL DA FITA METGLAS™® 2826MB



4  $\mu$ L de sangue humano;  $f_{ar} = 58.20$  kHz;  $f_{sangue} = 58.08$  kHz



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

- 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.

# 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.**