

The background of the slide is white with numerous realistic water droplets of various sizes scattered across it. Some droplets are in sharp focus, while others are blurred, creating a sense of depth. In the center of the slide, there is a rectangular purple box with a thin black border. Inside this box, the text 'MATERIAIS MAGNETOSTRICTIVOS APLICAÇÕES' is written in a bold, blue, sans-serif font, arranged in three lines.

MATERIAIS MAGNETOSTRICTIVOS APLICAÇÕES

LIGAS SIMILARES AO INVAR

- ❖ Têm propriedades de expansão térmica que podem ser sintonizadas.
- ❖ **USO:** Metrologia, aplicações espaciais, 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).

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

INVAR
 $\text{Fe}_{65}\text{Ni}_{35}$

- ❖ Ligas com módulo de elasticidade constante com a temperatura
- ❖ Estrutura cfc
- ❖ Neste caso a contribuição magnética compensa a componente térmica da variação desta constante
- ❖ Usados em engenharia de precisão - PÊNDULOS DE COMPENSAÇÃO E ENGRENAGENS EM BALANÇAS PARA RELÓGIOS MECÂNICOS E RELÓGIOS DE PULSO

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!!)



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.]

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 of the image features a light gray, textured surface with numerous water droplets of varying sizes scattered across it. A faint, stylized DNA double helix is visible in the background, centered behind the text.

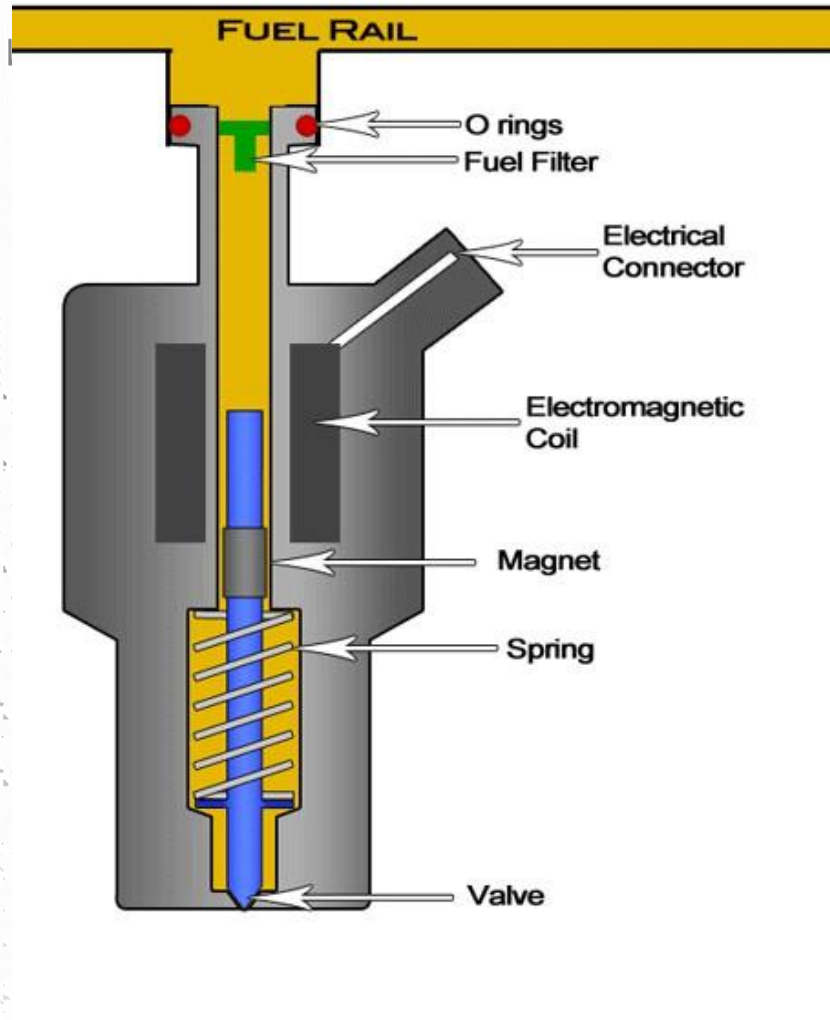
TERFENOL-D

TERFENOL – 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.

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

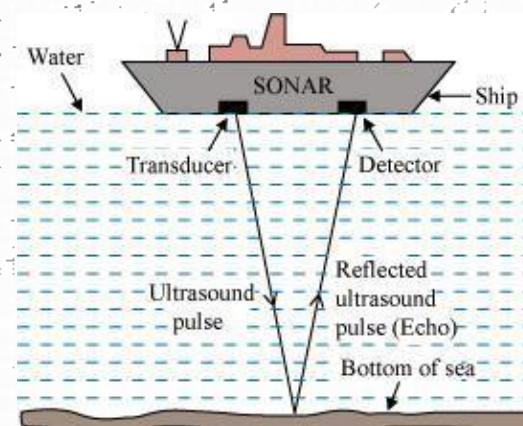
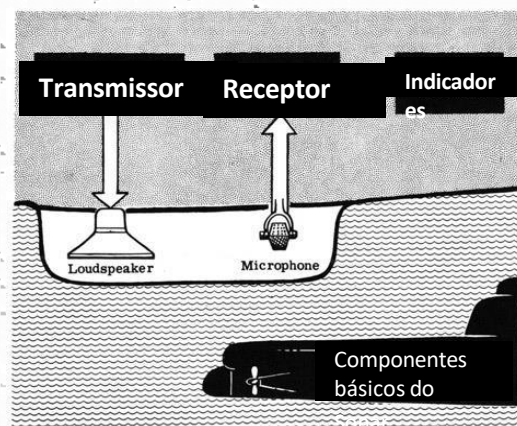
➤ Transmissor do sonar =

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

Alto-falante + microfone estão combinados em um dispositivo chamado "transdutor" (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>

<http://www.naval.com.br/blog/wp-content/uploads/2009/01/ping-sonar.wav>

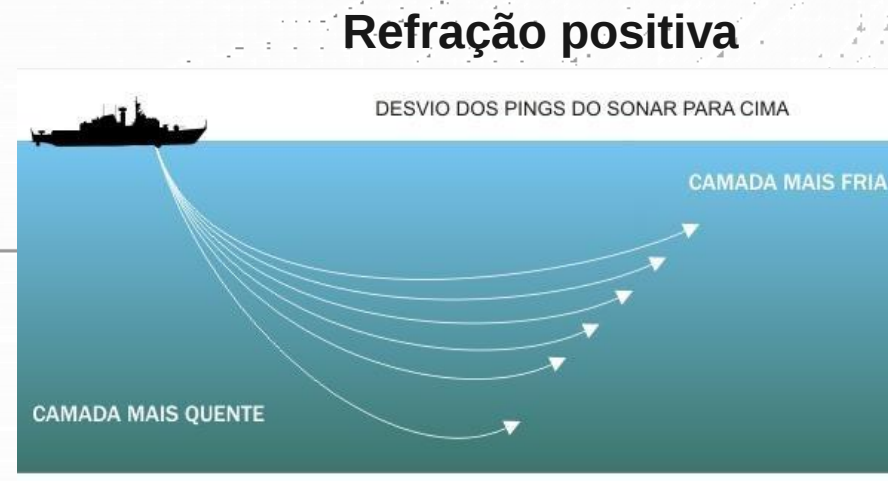
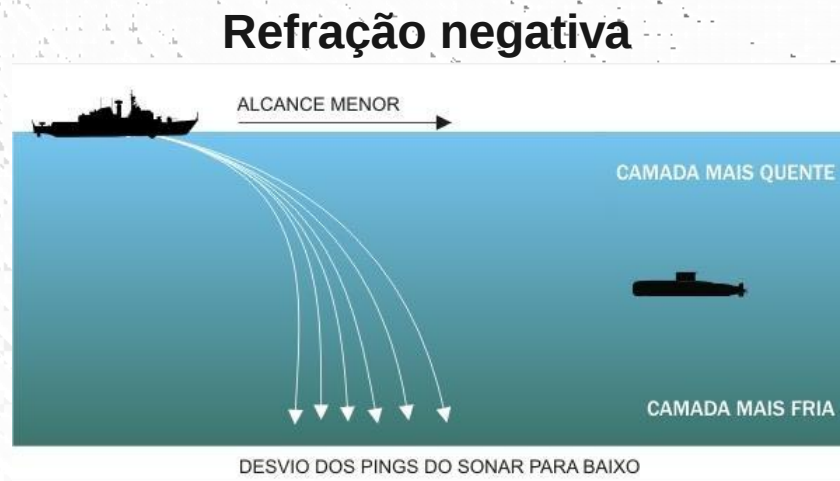


O Sonar é instrumento fundamental da guerra anti-submarino. Ele é um dispositivo criado para detectar e localizar objetos submersos na água por meio das ondas sonoras que os alvos refletem ou produzem.

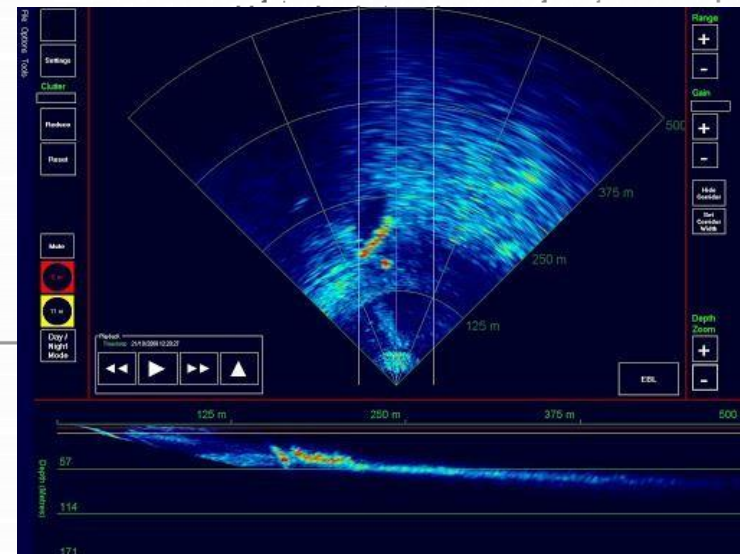
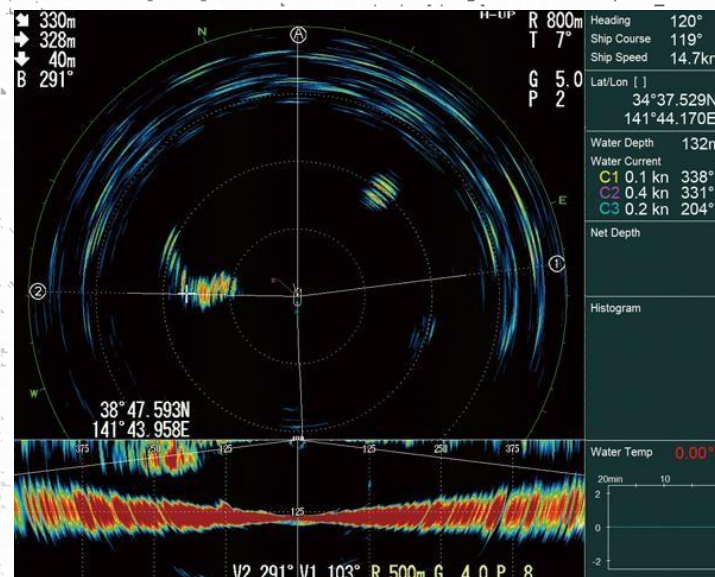
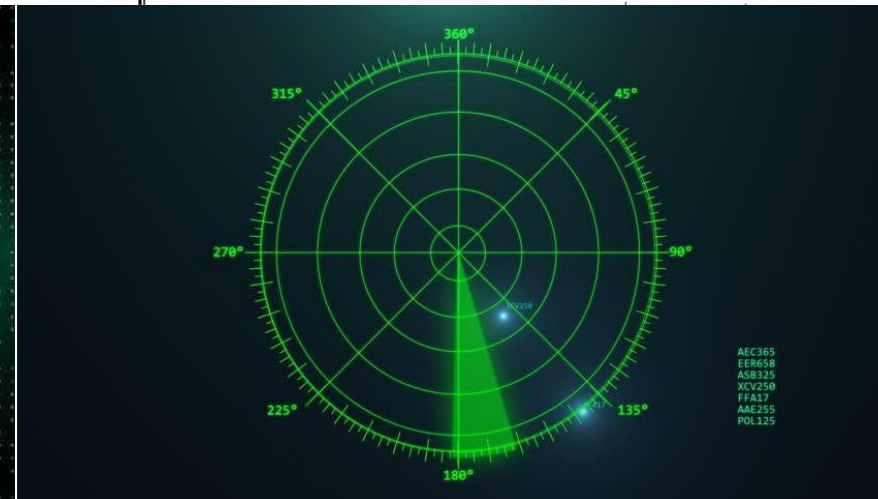
- O PULSO DO SONAR É EMITIDO E AO ENCONTRAR UM OBSTÁCULO, RETORNA AO EMISSOR. MEDE TEMPO → DISTÂNCIA
- A PRECISÃO É “RELATIVA” → ATENUAÇÃO
 - A ATENUAÇÃO DEPENDE DA TEMPERATURA, SALINIDADE E PRESSÃO DA ÁGUA.

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

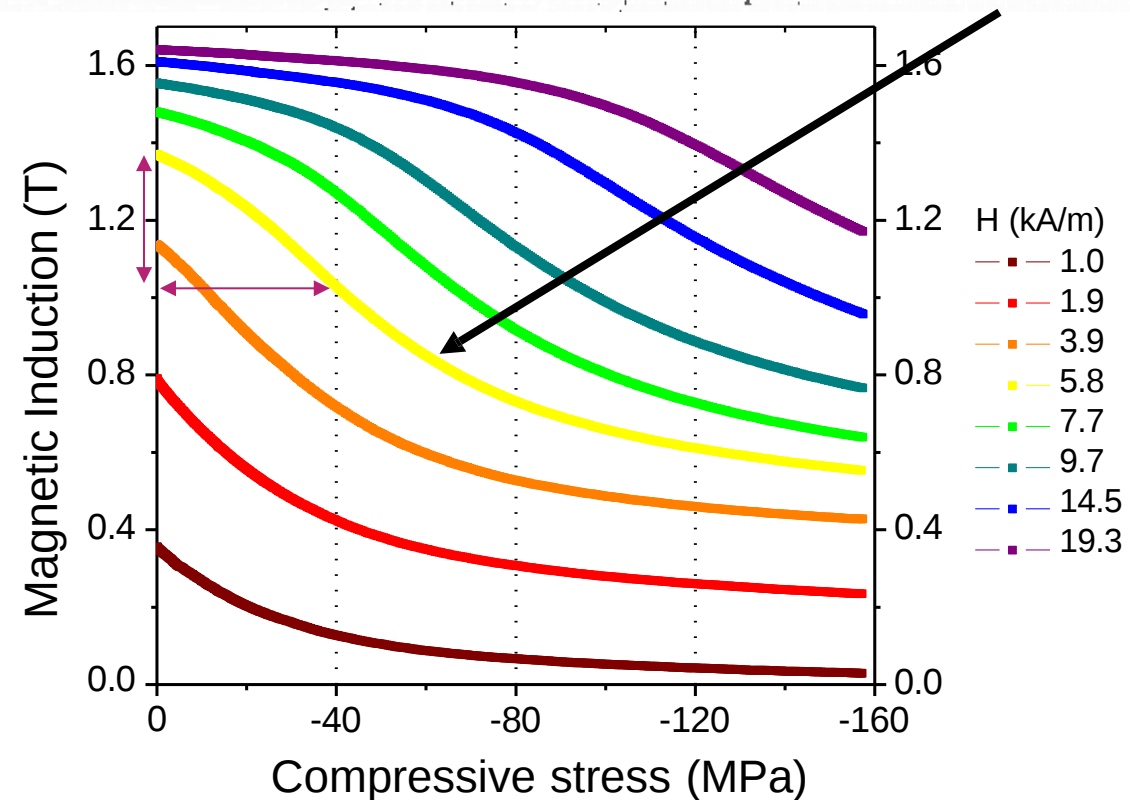


SENSORES BASEADOS NO EFEITO VILLARI (Fe-Al-B)

- TRANSDUTOR – MEDIDA
DE FORÇA

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

Variação de voltagem

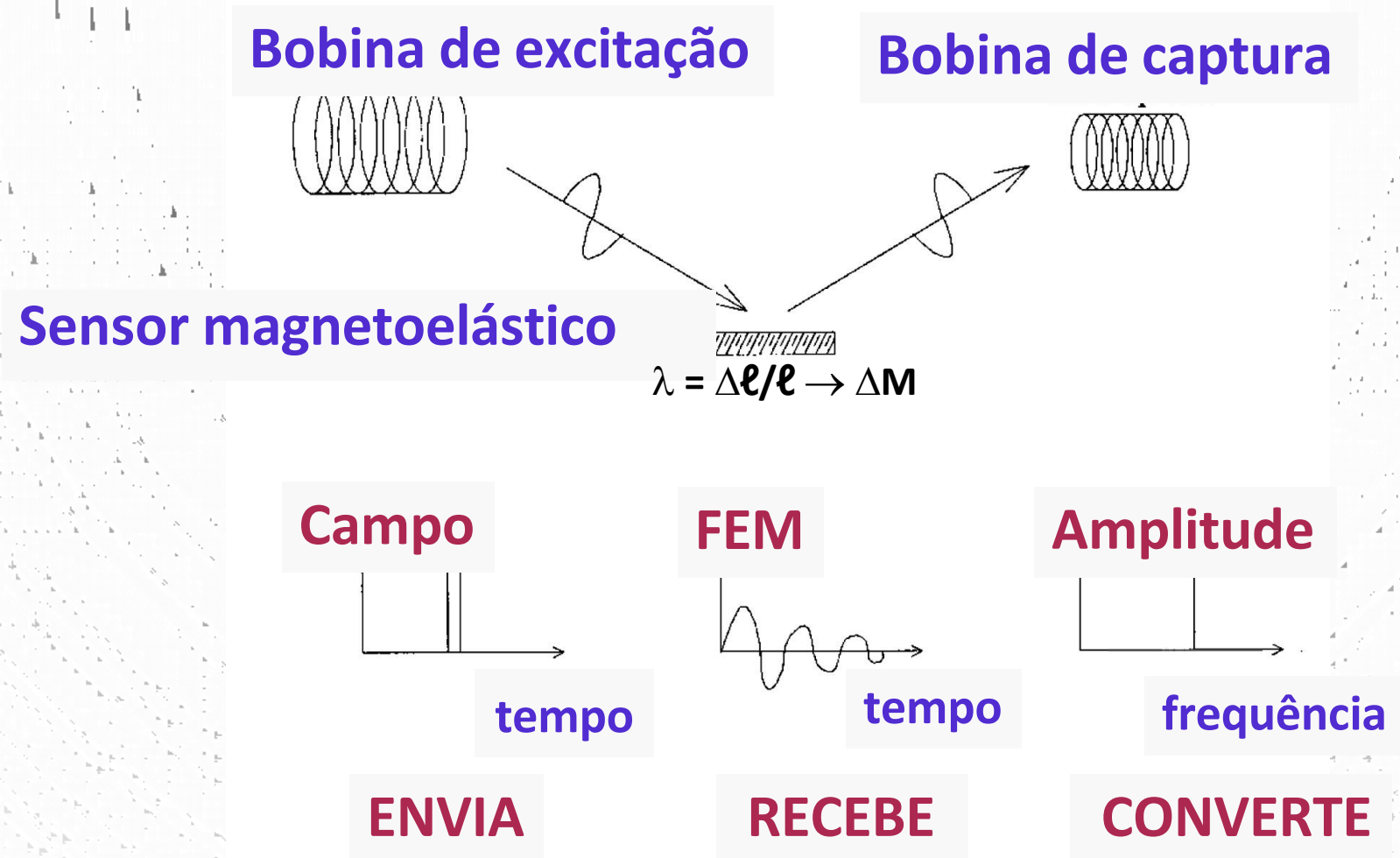


SENSORES BASEADOS EM LIGAS AMORFAS

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

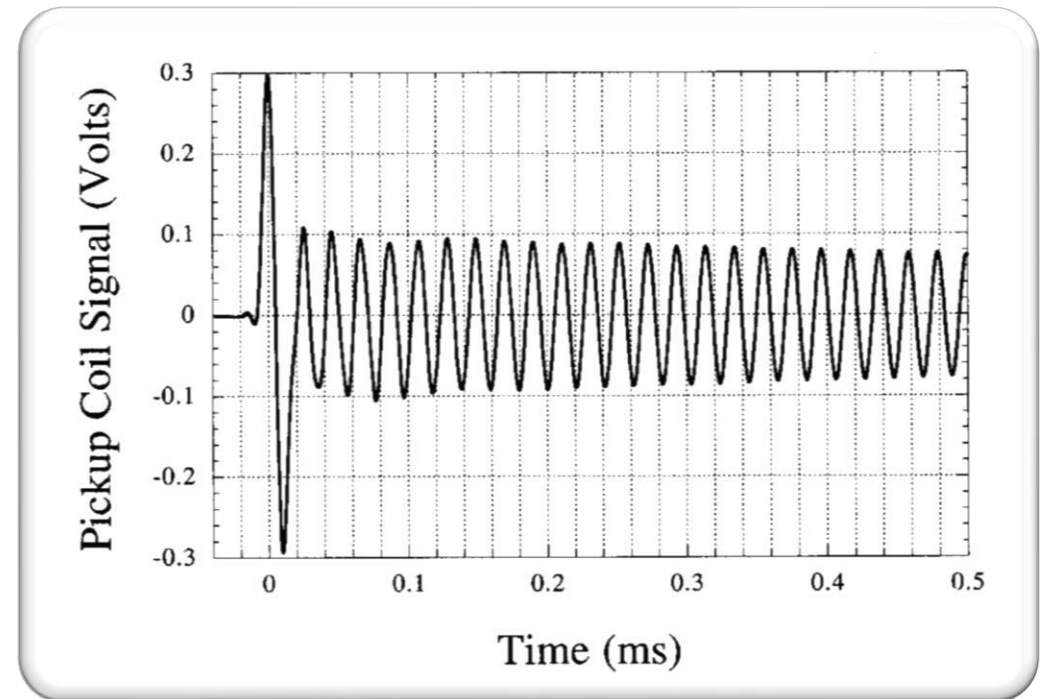
- Em campo variável (AC) a fita oscila em uma frequência fundamental que depende das dimensões da fita e das propriedades do material;
- As vibrações geram ondas acústicas e fluxo magnético que podem ser detectadas por um microfone e uma bobina de captura.
- A frequência de ressonância pode variar devido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

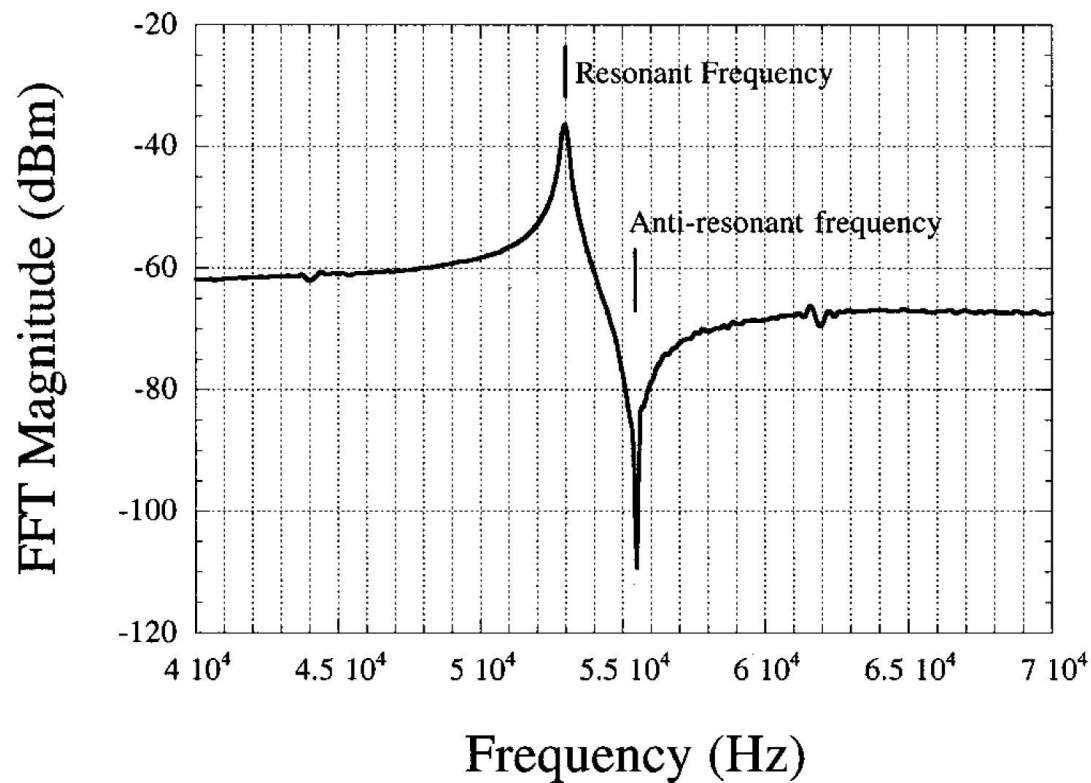
ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA NATUREZA REMOTA DE SENSOR MAGNETOELÁSTICO



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)

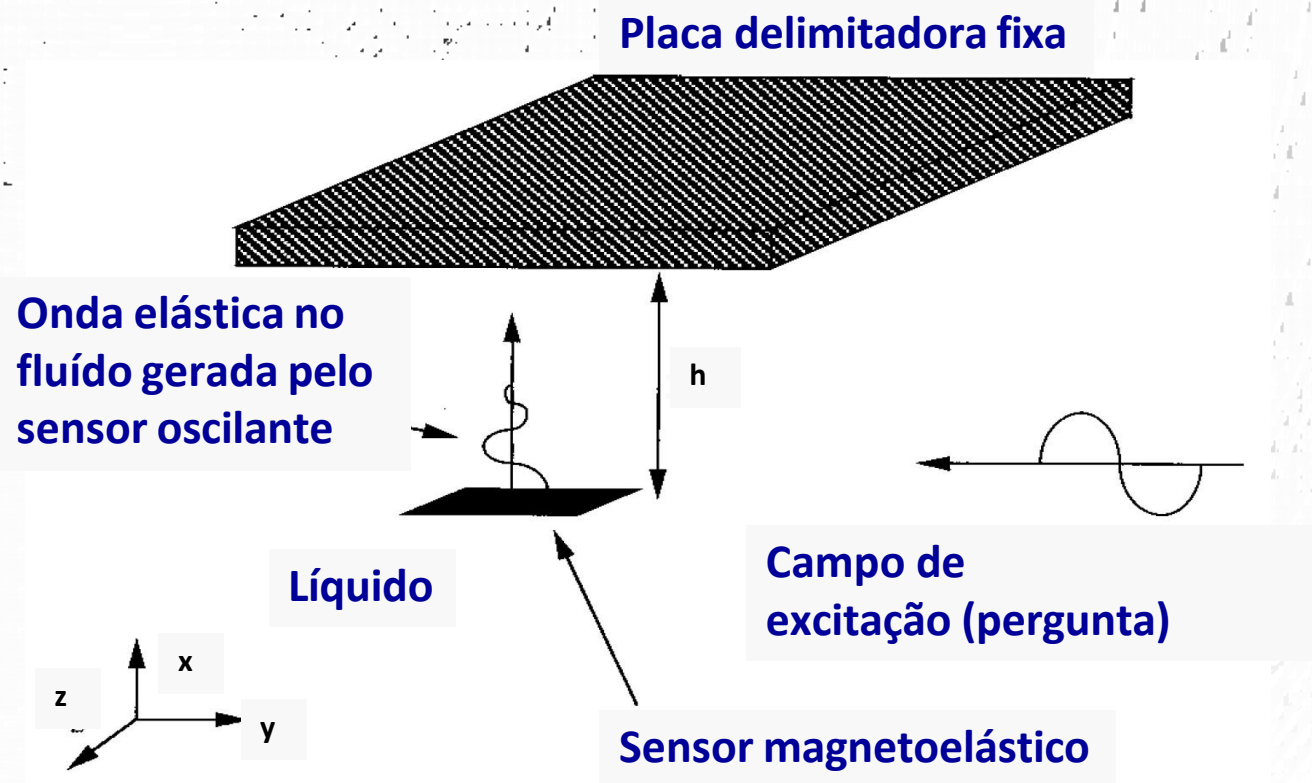
- No sistema vascular existe um balanço delicado entre: **células sanguíneas**, **plaquetas**, **fatores de coagulação** e **fatores externos de tecido (pele)**.
- Interesse: série de reações enzimáticas chamada de *cascata de coagulação*.
- **O processo de coagulação envolve a mudança da viscosidade** → 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
(fita magnética amorfa)

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

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

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

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:

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

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), e usando as condições de contorno e iniciais, 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.**

- ✓ No líquido, é necessário adicionar à equação o **termo dissipativo** devido as forças de cisalhamento associadas à viscosidade.
- ✓ A frequência de ressonância diminuirá devido a efeitos de caráter dissipativo

h é a distância do sensor à placa delimitadora

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

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

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

$$f^2 = \frac{E}{\rho_s(1 - \sigma^2)} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - \frac{2\eta\omega}{\delta\rho_s d} \frac{\sinh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h}{\delta}\right)} = (f_0 + \Delta f)^2$$

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

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



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



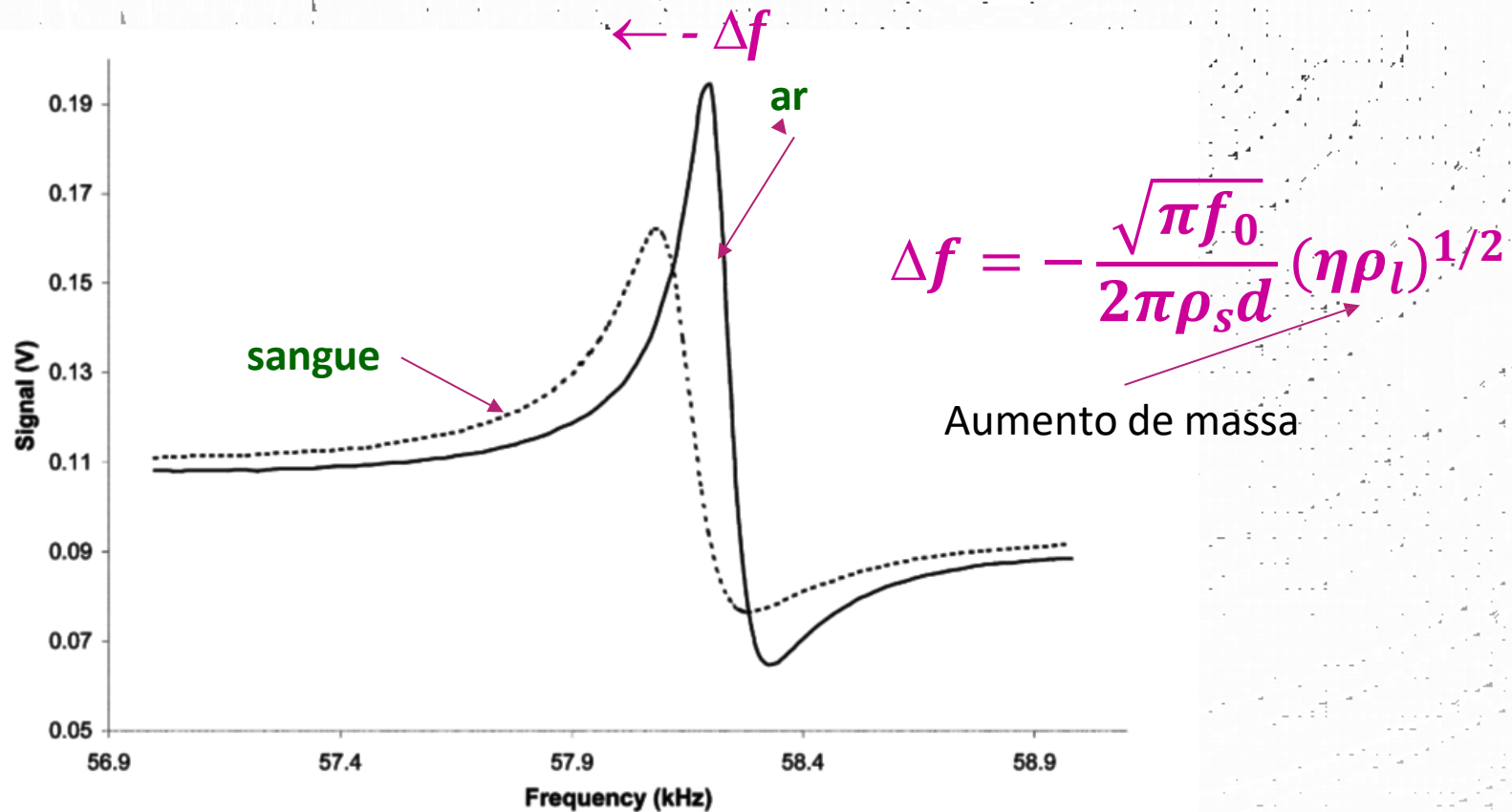
$$\Delta f = -f_0 \frac{1}{3} \frac{\rho_l h}{\rho_s d}$$

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

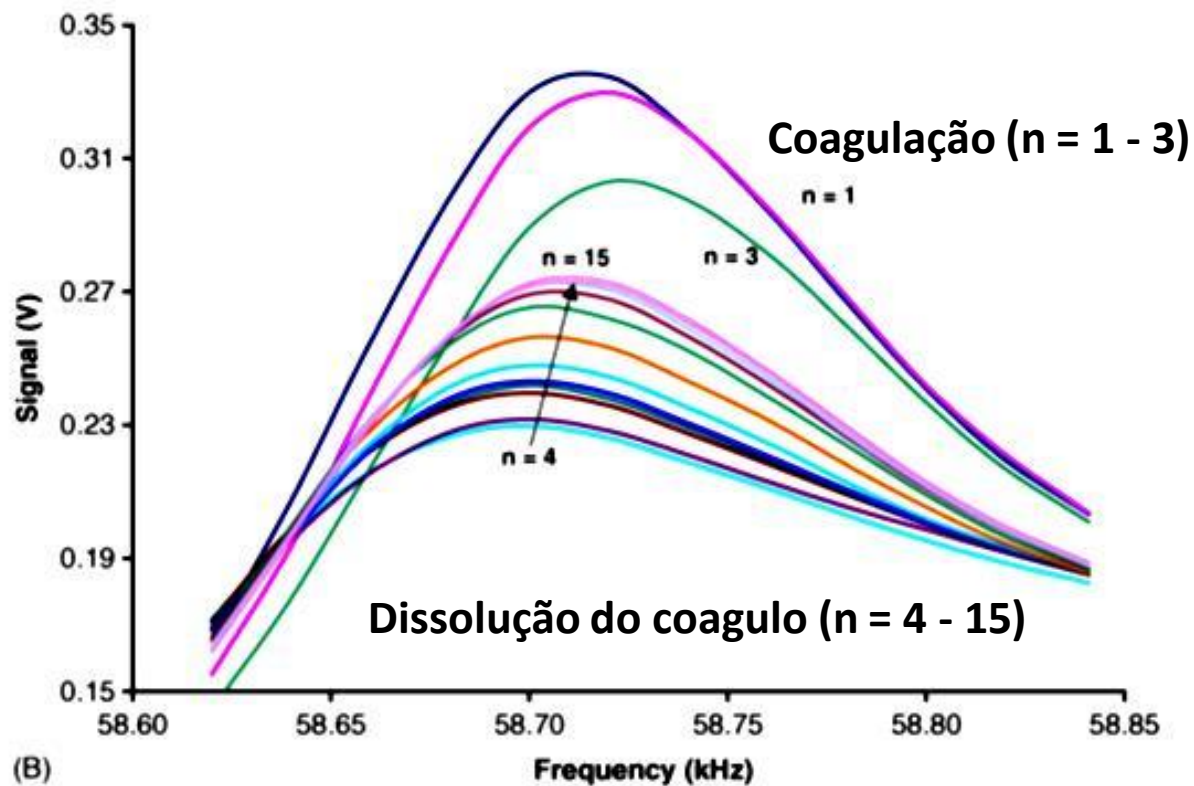
DETECÇÃO DE COAGULAÇÃO DE SANGUE

- ❖ 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 MetglasTM® 2826MB ($\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$), com dimensões 6,35 mm / 38,1mm / 30 μm .

TFR DO SINAL DA FITA **METGLAS™® 2826MB**

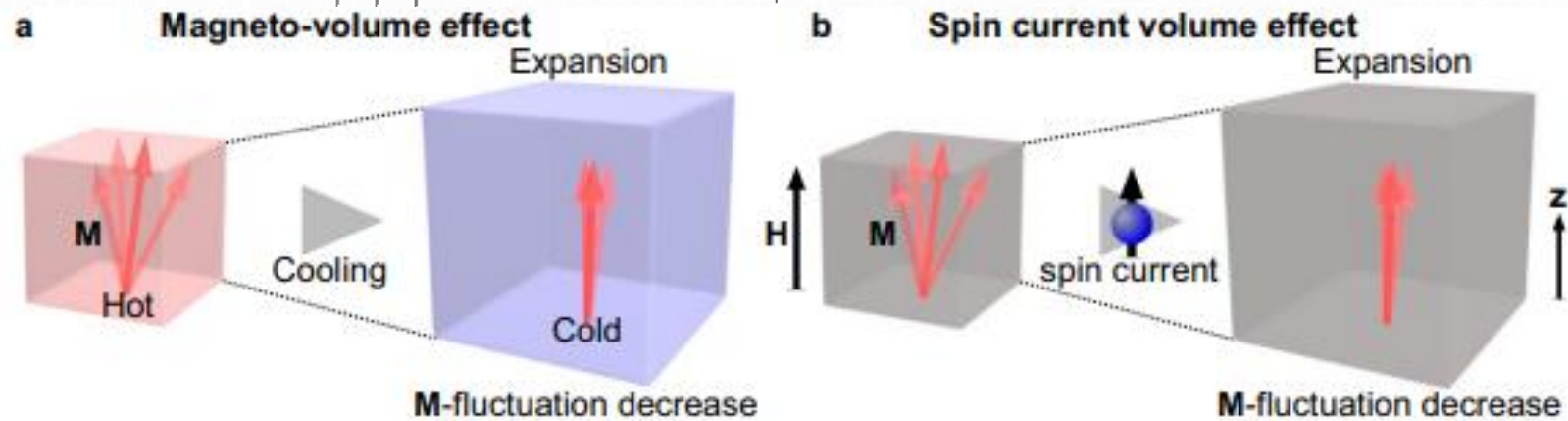


4 μ L de sangue humano; $f_{ar} = 58.20$ kHz; $f_{sangue} = 58.08$ kHz



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

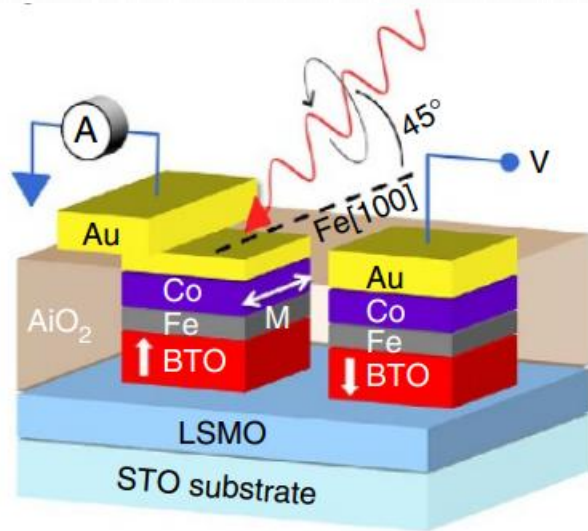
- Múltiplas varreduras de frequência do processo coagulação e que ilustra a mudança de frequência ao longo do tempo.
- Foram feitas 15 varreduras, foi adicionado plasmina (anticoagulante) entre a terceira e a quarta varredura.
- O tempo entre cada varredura foi de aproximadamente 36 s.



Magnetização volumétrica
induzida por corrente de spin

- Possibilidade de uso como atuador em spintrônica -> conversão de corrente de spin em força
- Estudo em filme fino de TbDyFe

Compósitos magnetoelétricos



- Filme eletrostrictivo de BaTiO₂
- Filme magnetostrictivo de Fe

- Efeito magnetoelétrico (acoplamento de susceptibilidade elétrica e magnética)
- Aparece naturalmente em alguns materiais, em pequena escala
- Pode ser atingido indiretamente por compósitos de filmes magnetostrictivos e eletrostrictivos, com grande intensidade
- Aplicações em sensoriamento de campos elétricos e magnéticos, armazenamento de dados (MERAM), gyrators

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- **Perspectiva de sensoriamento remoto para sensores magnetostrictivos (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.**
- **Aplicações em spintrônica**