

Ondas eletromagnéticas

Física IV. Ondas

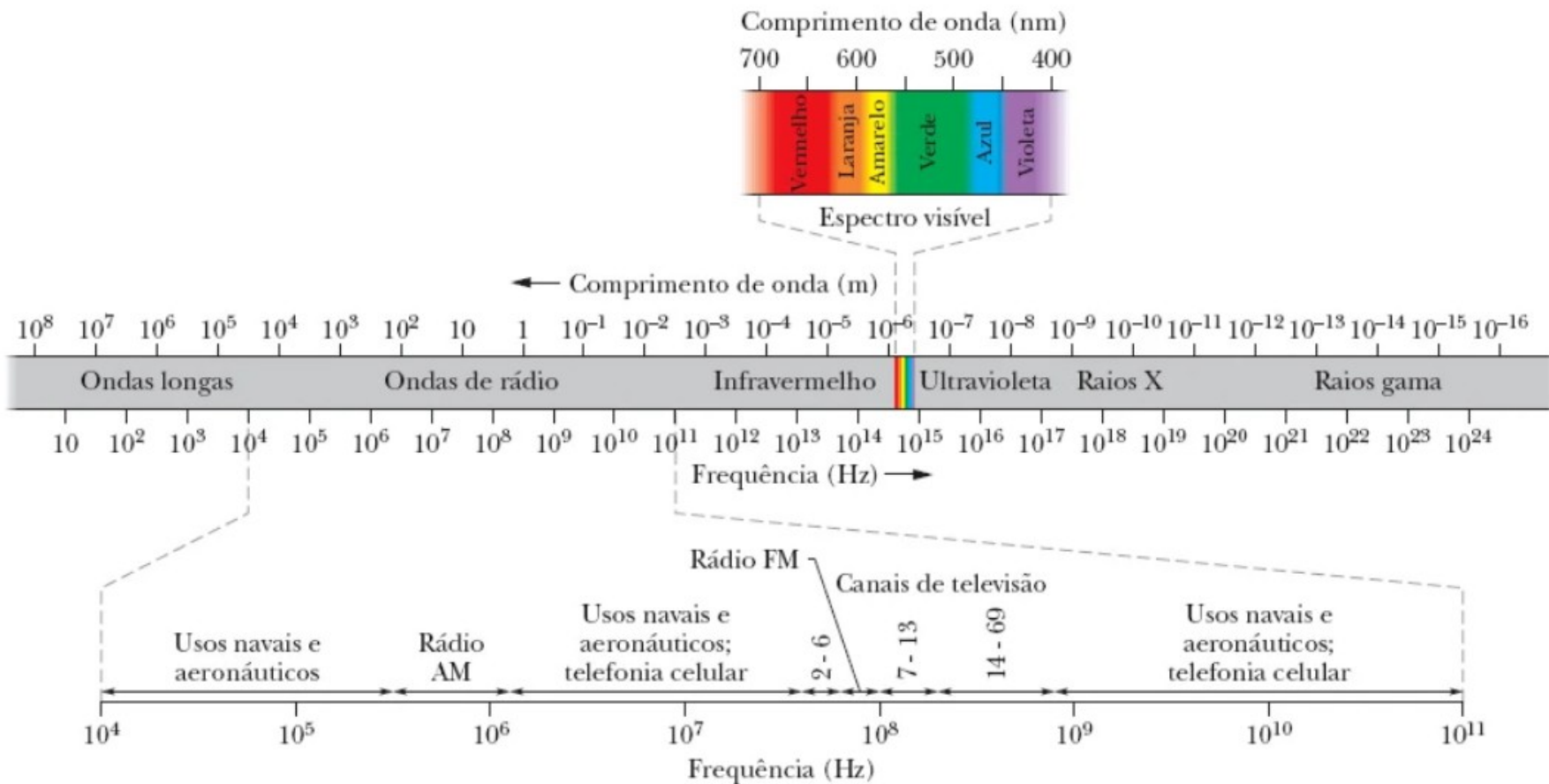
Ondas eletromagnéticas

O que é: Ondas transversais compostas por campos elétricos E e magnéticos B oscilantes e perpendiculares entre si.

Origem: Cargas elétricas aceleradas.

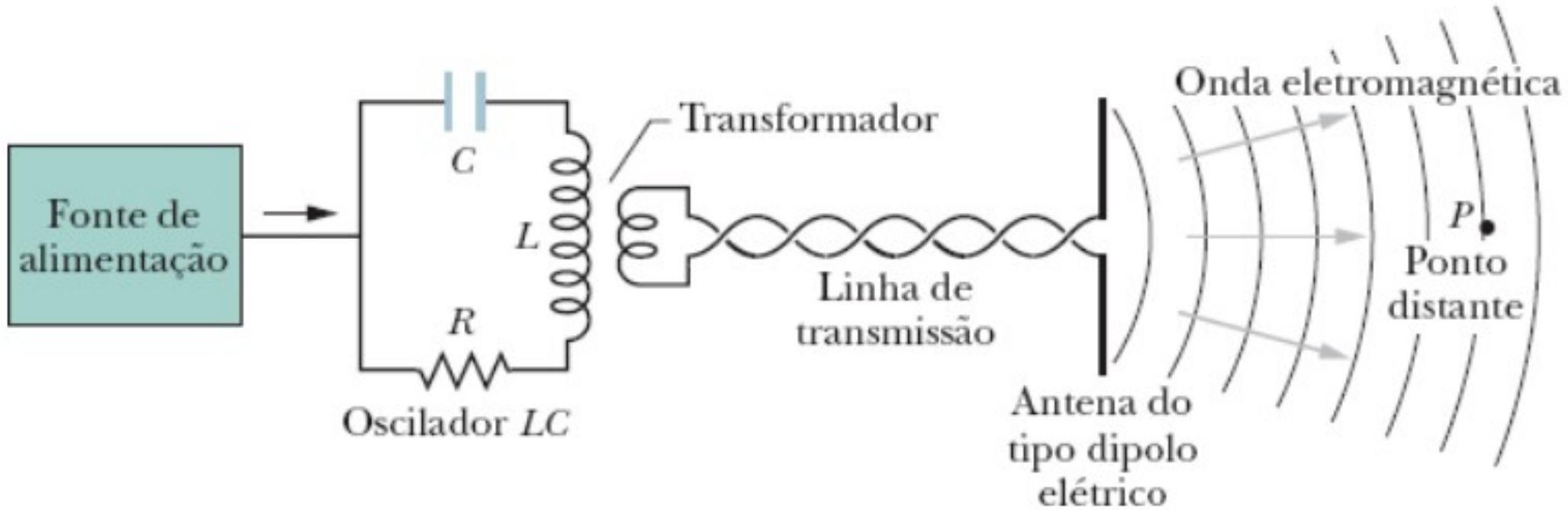
Meio de propagação: Diferente das ondas mecânicas, as ondas EM não requerem meio material; propagam-se no vácuo à velocidade $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

Ondas eletromagnéticas



Video

Gerador de ondas EM



Video: Experimento de Hertz

Onda eletromagnética plana

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

Os campos variam senoidalmente, como as ondas transversais, com a mesma frequência e estão em fase

$$\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$$

$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ – direção de propagação

Video: ondas EM

Equações de Maxwell

- Lei de Gauss para a Eletricidade

$$\oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{q_{env}}{\epsilon_0} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

O fluxo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional à carga líquida envolvida.

- Lei de Gauss para o Magnetismo

$$\oint \vec{B} d\vec{A} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

As linhas de campo magnético são sempre laços fechados; o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é zero

A **permeabilidade magnética** ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) mede a capacidade de um material concentrar linhas de campo magnético. A **permissividade elétrica** ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m) indica a capacidade de um material de polarizar e armazenar cargas elétricas em um campo elétrico.

- Lei de Faraday

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Uma variação no fluxo magnético induz uma força eletromotriz (fem) e um campo elétrico rotacional

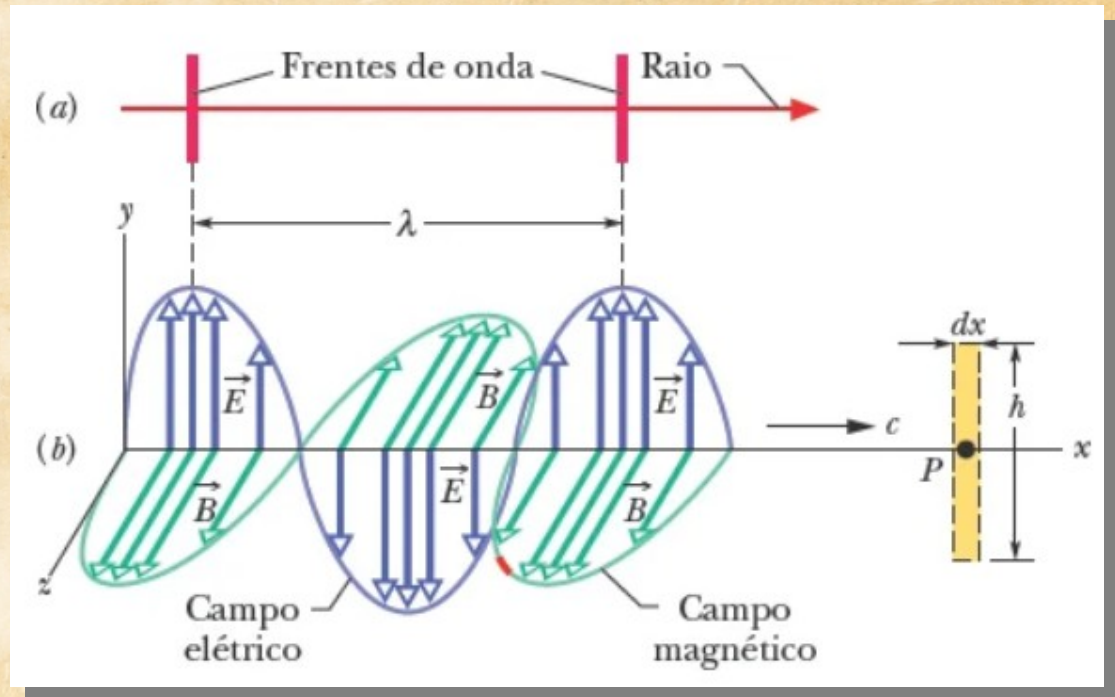
Lei de Maxwell

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

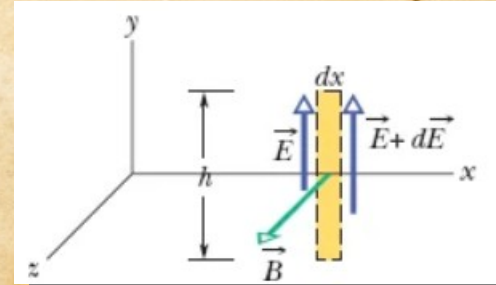
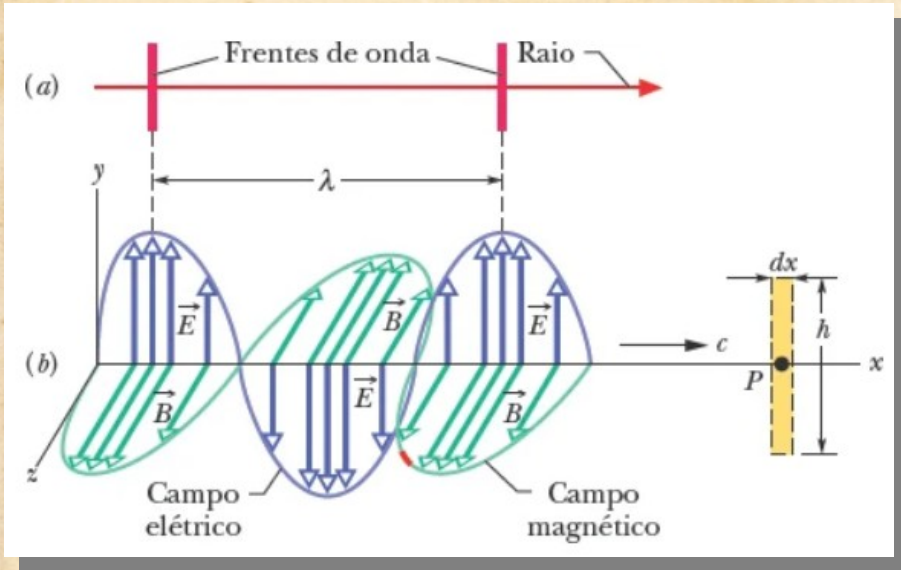
Um campo magnético é gerado por um campo elétrico variável.

Supomos corrente de condução $I = 0$

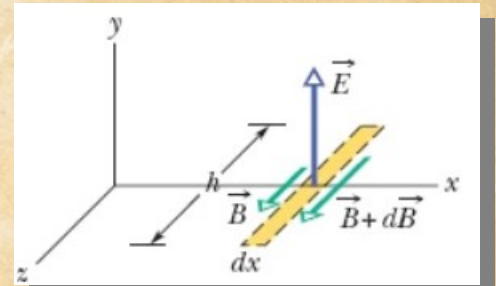
Onda EM



Descrição matemática



O campo magnético oscilante induz um campo elétrico oscilante perpendicular



O campo elétrico oscilante induz um campo magnético oscilante perpendicular

$$\frac{E_m}{B_m} = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Transporte de Energia e o Vetor de Poynting

- Ondas eletromagnéticas transportam energia através do espaço.
- A densidade de energia total, u , é a soma das densidades dos campos elétrico e magnético

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2 \mu_0} B^2$$

- Ao manipular as formas diferenciais da Lei de Faraday e da Lei de Ampère-Maxwell

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \right) - \vec{J} \cdot \vec{E}$$

- du/dt é a variação da energia no tempo
- \mathbf{JE} [e o trabalho realizado sobre as cargas (Efeito Joule/Perda de energia)]
- O termo dentro do divergente $\left(\frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \right)$ é o fluxo de energia que sai do volume

Transporte de Energia e o Vetor de Poynting

- Ondas eletromagnéticas transportam energia através do espaço.
- Vetor de Poynting: Define a taxa de transporte de energia por unidade de área.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

- Direção: **S** aponta na direção de propagação da onda.
- O módulo **S** do vetor de Poynting depende da taxa instantânea com a qual a energia é transportada por uma onda através de uma área unitária
- Unidade: Watts por metro quadrado, W/m².

Transporte de Energia e o Vetor de Poynting

- Como $\vec{E} \perp \vec{B} \rightarrow |S| = \frac{1}{\mu_0} E B = \frac{1}{\mu_0 c} E^2$

Valores S, E e B são instantâneos

- A intensidade I da onda é a média temporal do módulo do vetor de Poynting S_{med}

$$I = \frac{1}{\mu_0 c} \frac{E_m^2}{2} = \frac{1}{\mu_0 c} E_{\text{rms}}^2$$

E_{rms} é o valor médio quadrático

- Para uma fonte pontual que emite potência P_s isotropicamente:

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

Video

Problema: Descrição Matemática da Onda EM

Uma onda eletromagnética plana e senoidal, com frequência de 40,0 MHz, propaga-se no vácuo no sentido positivo do eixo x . Em um determinado instante e ponto do espaço, o campo elétrico máximo tem módulo $E_m = 750$ V/m e está orientado ao longo do eixo y .

- a) Determine o comprimento de onda, λ , e o período, T , desta onda.
- b) Calcule o módulo e a direção do campo magnético máximo B_m .
- c) Escreva as equações das funções de onda para $E(x, t)$ e $B(x, t)$, determinando os valores numéricos de k (número de onda) e ω (frequência angular).

Problema: O Vetor de Poynting e Intensidade

O campo elétrico de uma onda eletromagnética plana é dado por

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$E_m = 200 \text{ V/m}, k = 10^7 \text{ rad/m}.$$

- Determine a intensidade I desta onda.
- Calcule a potência média que atravessa uma superfície perpendicular à direção de propagação com área de $5,0 \text{ m}^2$.
- Determine o valor máximo do módulo do Vetor de Poynting, S_{max} .

Problema: Fonte Puntiforme e Conservação de Energia

Uma lâmpada de sódio emite energia uniformemente em todas as direções (emissão isotrópica) com uma potência de 100 W. Considere que toda a potência é emitida como radiação eletromagnética monocromática.

- a) Calcule a intensidade da radiação a uma distância de 5,0 m da lâmpada.
- b) Determine os valores máximos de E_m e B_m nesta posição.
- c) Se substituirmos a lâmpada por um laser de 100 W com um feixe de diâmetro constante de 2,0 mm, qual seria a nova intensidade? Compare com o resultado do item (a).