

Ondas Eletromagnéticas

Neste capítulo discutiremos os seguintes tópicos:

- Onda Eletromagnética-Uma introdução;
- Energia e Vetor de Poynting.

1.Onda Eletromagnética-uma introdução

Em nosso cotidiano usamos muita tecnologia baseada nas ondas eletromagnéticas.

Alguns exemplos são a televisão, o telefone, a internet, os raios X e a luz. Um raio luminoso é uma onda progressiva de campos elétricos e magnéticos, por isso chamado de onda eletromagnética.

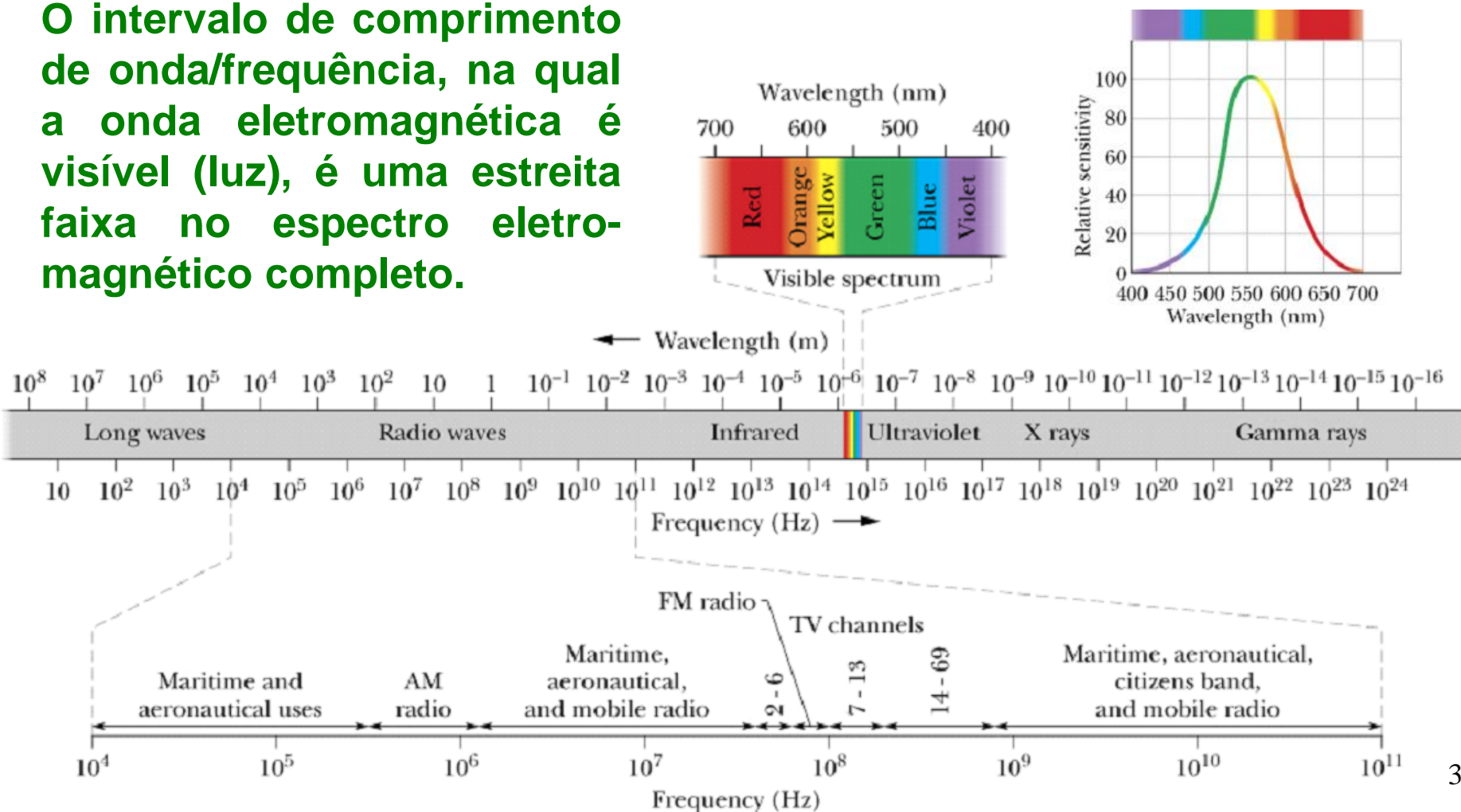
Alguns tipos de onda eletromagnética, tais como os raios X, os raios gama e a luz visível, são produzidos por fontes de dimensões atômicas ou nucleares, e sua geração é explicada pela física quântica.

Ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar.

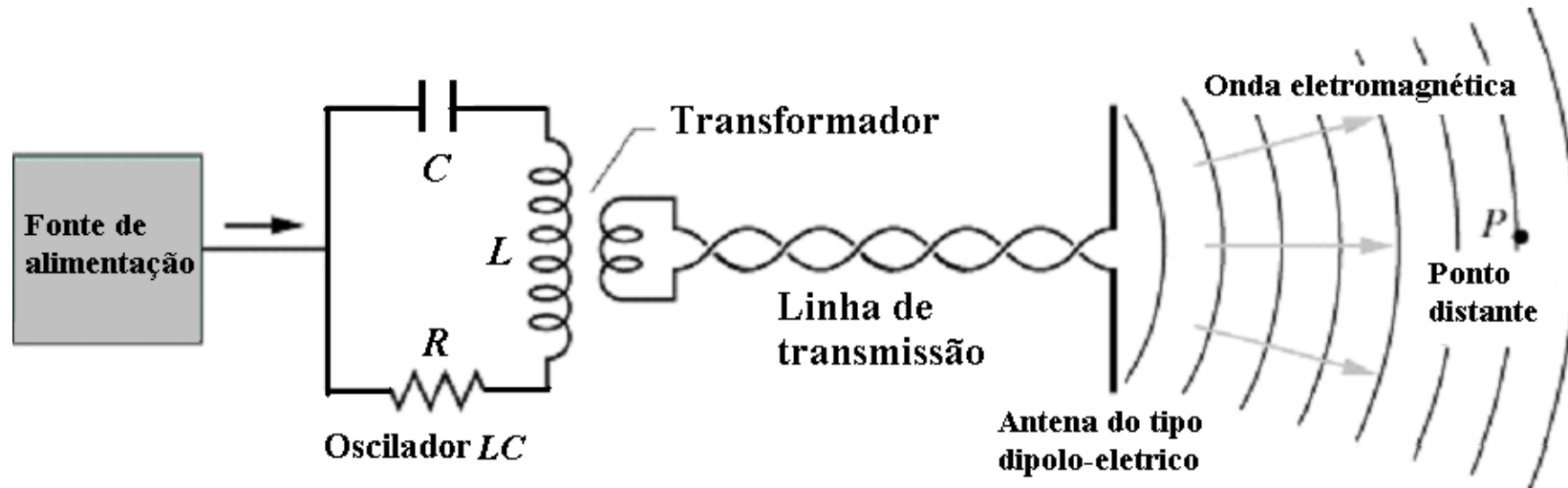
O Arco-íris de Maxwell

Maxwell mostrou que um raio luminoso é uma onda progressiva de campos elétricos e magnéticos -uma onda eletromagnética.

O intervalo de comprimento de onda/frequência, na qual a onda eletromagnética é visível (luz), é uma estreita faixa no espectro eletromagnético completo.



Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética



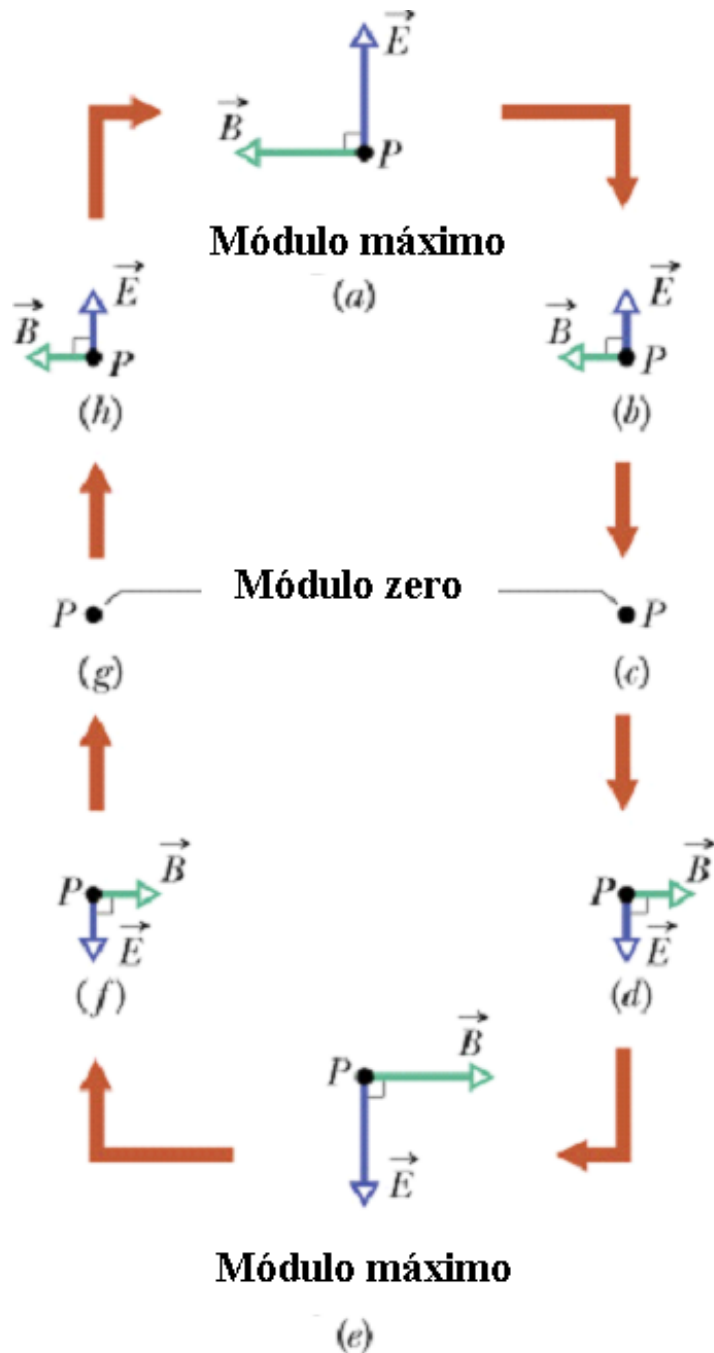
Frequência de oscilação:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Sistema gerador de onda eletromagnética na faixa de rádio de ondas curtas no espectro eletromagnético.

O oscilador LC produz uma corrente senoidal na antena, que gera a onda eletromagnética.

Um detector colocado em um ponto P distante indica a presença da onda eletromagnética.



Variação do campo \vec{E} e do campo \vec{B} no ponto distante P quando um ciclo da onda eletromagnética passa pelo ponto. A onda está se propagando para fora do papel.

O campo elétrico \vec{E} é sempre perpendicular ao campo magnético \vec{B} .

Os vetores \vec{E} e \vec{B} variam senoidalmente (no tempo e no espaço) e estão em fase um com o outro.

O produto vetorial $\vec{E} \times \vec{B}$ fornece a direção de propagação da onda.

O campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} são sempre perpendiculares à direção na qual a onda está propagando (onda transversal).

Funções senoidais que descrevem os campos elétrico e magnético

$$\text{Campo Elétrico: } E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$\text{Campo Magnético: } B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

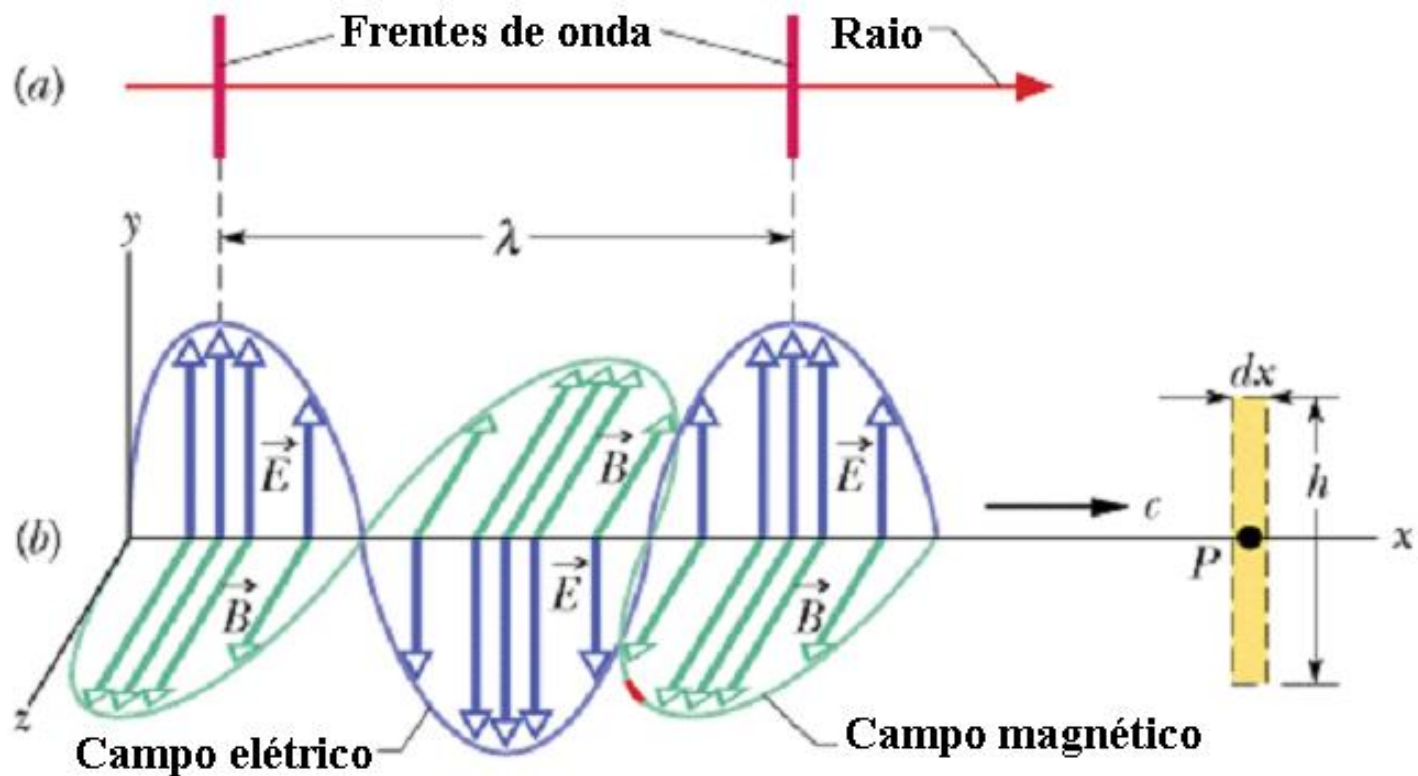
E_m e B_m são as amplitudes dos campos;

ω e k são a frequência angular e o número de onda, respectivamente;

ω/k é a velocidade de propagação da onda (símbolo c)

***TODAS AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS,
INCLUINDO A LUZ VISÍVEL, SE PROPAGAM NO
VÁCUO COM A MESMA VELOCIDADE C.***

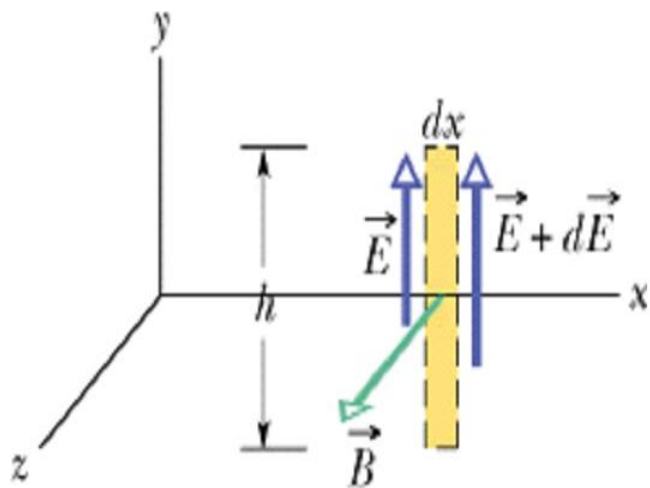
Representação da onda eletromagnética



(a) Onda eletromagnética representada por um raio e duas frentes de onda.

(b) A onda eletromagnética representada no instante "t", mostrando os campos elétrico e magnético em vários pontos do eixo x. A onda se propaga com velocidade c .

Variações no campo magnético produzem campo elétrico:



$$\frac{dE}{dx} = - \frac{dB}{dt}$$

Das equações vistas anteriormente:

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

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

Da eq.:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

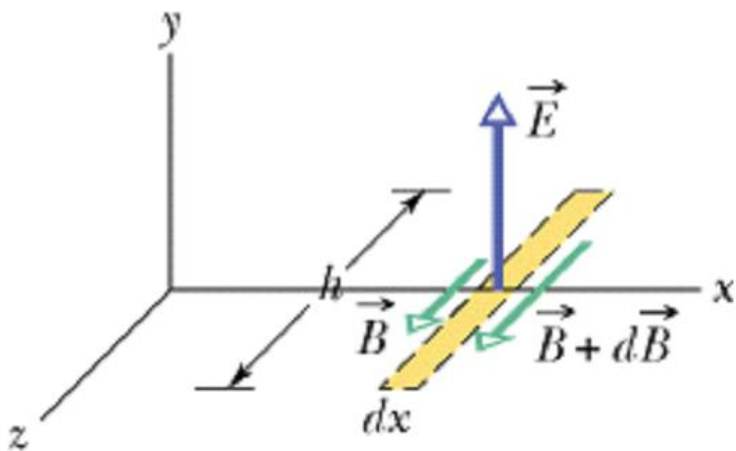
$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_m \cos(kx - \omega t) \qquad \frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$kE_m \cos(kx - \omega t) = B_m \cos(kx - \omega t)$$

E fazendo a razão entre as amplitudes:

$$\boxed{\frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c}$$

Variações de campo elétrico produzem campos magnéticos:



$$-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Usando novamente as equações da onda:

Campo Elétrico: $E = E_m \sin(kx - \omega t)$	Campo Magnético: $B = B_m \sin(kx - \omega t)$
---	--

e também a igualdade obtida anteriormente: $-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$

Obtemos: $-kB_m \cos(kx - \omega t) = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_m \cos(kx - \omega t)$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 (\omega/k)} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

Então:

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

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

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

*Velocidade de
todas as ondas
eletromagnéticas
(incluindo a luz
visível) no vácuo*

**Razão entre os módulos
dos campos:**

$$\frac{E(t)}{B(t)} = c$$

**Razão entre as amplitudes
dos campos:**

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

Transporte de Energia e Vetor de Poynting

Uma onda eletromagnética transporta energia. A taxa de transporte de energia por unidade de área é descrita pelo vetor de Poynting, definido pela equação a seguir:

$$\text{Vetor de Poynting : } \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

A unidade de S no SI é dada por (W/m²)

A direção do vetor de Poynting de uma onda eletromagnética em um ponto coincide com a direção de propagação da onda. Como a onda transporta energia, a direção de \vec{S} é a direção na qual a energia é transportada nesse ponto.

Sabemos que uma das características da onda eletromagnética é que os vetores campo elétrico e campo magnético são mutuamente perpendiculares. Portanto o módulo do vetor de Poynting é:

$$S = \frac{EB}{\mu_0}$$

Com a relação entre os campos: $E = cB$

Podemos escrever o módulo do vetor de Poynting como:

$$S = \frac{E^2}{c\mu_0}$$

Fluxo instantâneo de energia (energia por unidade de área por unidade de tempo)

Intensidade da Onda (I)

É a energia média transportada, ou seja, a média do módulo do vetor de Poynting ao longo do tempo ($S_{méd}$).

$$I = S_{méd} = \frac{1}{c\mu_0} [E^2]_{méd} = \frac{1}{c\mu_0} [E_m^2 \text{sen}^2(kx - \omega t)]_{méd}$$

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_m^2 [\text{sen}^2(kx - \omega t)]_{méd} \rightarrow I = \frac{1}{c\mu_0} E_m^2 \left(\frac{1}{2}\right)$$

Definimos o valor médio quadrático (valor rms) do campo elétrico como:

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Reescrevemos a intensidade I da onda como:

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

SI: W/m²