

SLC 641 – Óptica

Licenciatura em Ciências Exatas – São Carlos

## **Aula 1**

Natureza da Luz/Velocidade da luz/ Princípio de Huyghens

21/08/2023

# Introdução

O que é a luz? Como ela se propaga? Como ela é gerada? Onda ou partícula?

1690 – Christian Huygens: “Tratado sobre a luz”, Teoria ondulatória da luz, Princípio de Huygens.

1704 (1717) – Newton: “Ótica”, Teoria corpuscular (ótica geométrica) e ondulatória (decomposição da luz, anéis de Newton (Interferência), comprimento de onda, etc.)

1830 – Young, Arago e Fresnel: Teoria ondulatória da luz, Fenda dupla: Interferência e difração, polarização, ondas transversais, etc.

1861 – Maxwell: Teoria das ondas eletromagnéticas (propagação na ausência de meio: éter).

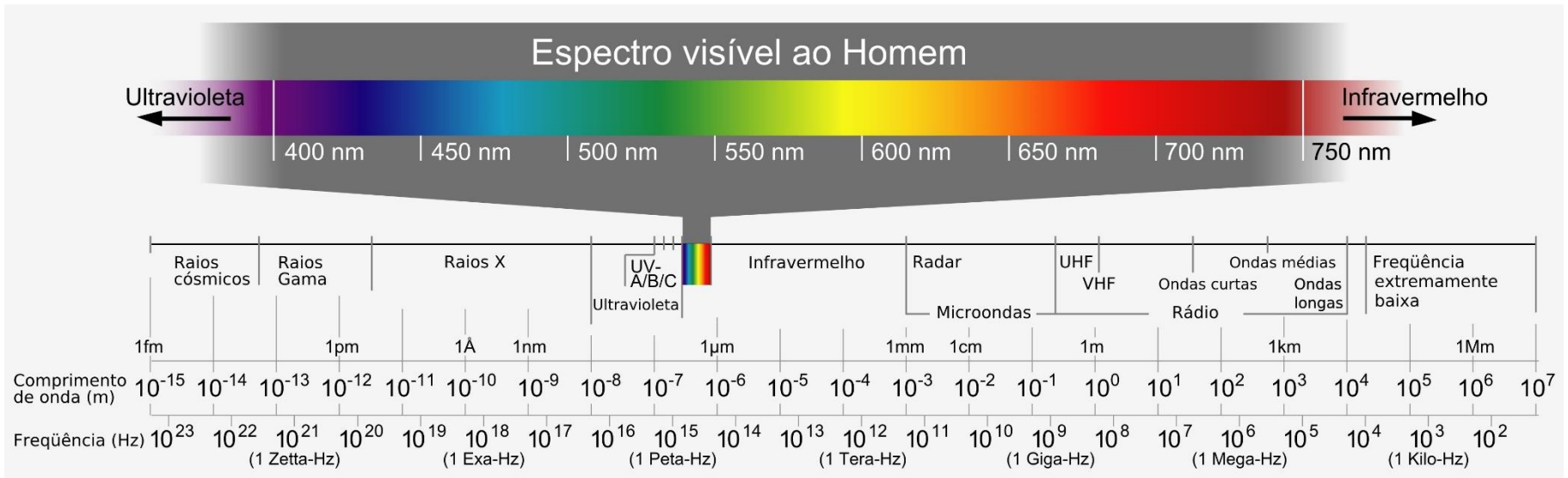
1888 – Hertz: geração de ondas eletromagnéticas de rádio (antena).

1900 – Max Planck: Teoria do quanta: Partícula?

1905 - Einstein: Efeito fotoelétrico: Fótons com caráter corpuscular.

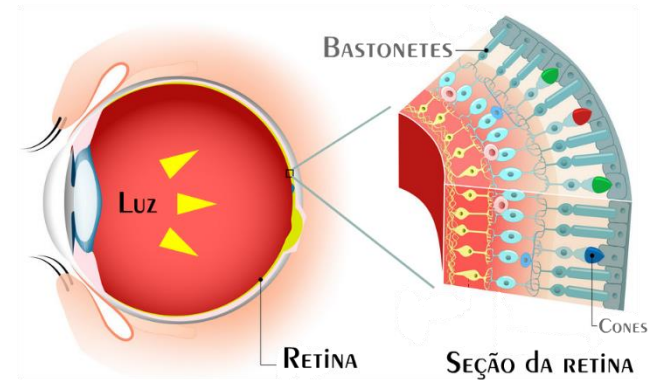
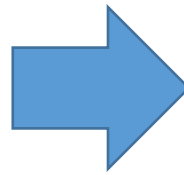
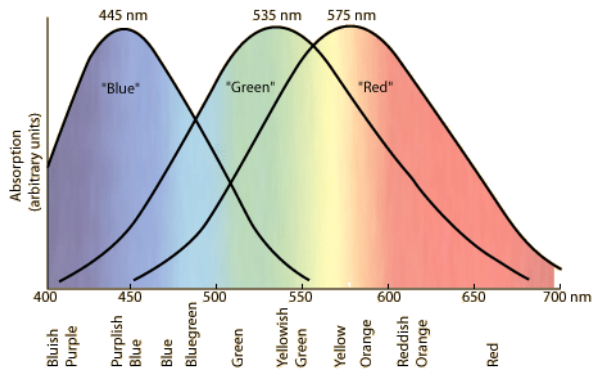
1920 – Planck, Einstein, Bohr, etc.: Teoria quântica: Coexistência de aspectos corpusculares e ondulatórios da luz.

# Espectro eletromagnético



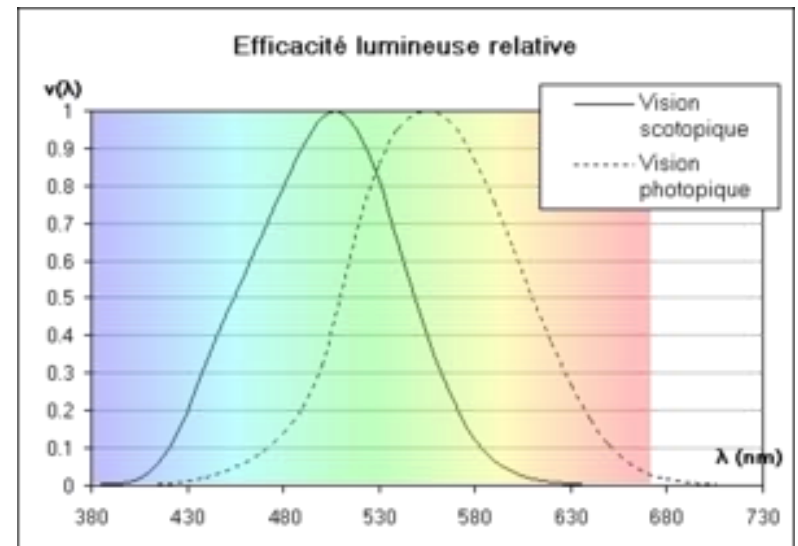
“Arco íris” de Maxwell

# Visão humana



**Visão fotópica:** Visão diurna colorida (luz branca intensa, cones).

**Visão escotópica:** Visão noturna, preto e branco (bastonetes).



# Geração de ondas eletromagnéticas

Depende fortemente do comprimento de onda:  
(dimensão da fonte)

**Raios x, gama, etc.:** Fontes são de dimensões atômicas. Aceleradores de partículas, radioatividade, estrelas, luz síncrotron, etc.

**UV, visível e IR:** Fontes também são de dimensões atômicas. Radiações térmicas, transições atômicas, estrelas (sol), lasers, reações químicas, etc.

**Ondas de rádio, micro-ondas:** Dimensões macroscópicas como antenas, circuitos eletrônicos, etc.

## Geração de ondas de raios-x (Bremsstrahlung)

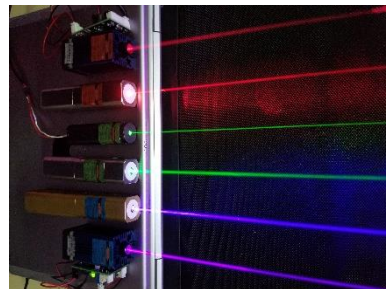


# Geração de UV, luz visível, IR



Sol (estrela)

Lâmpadas, LED

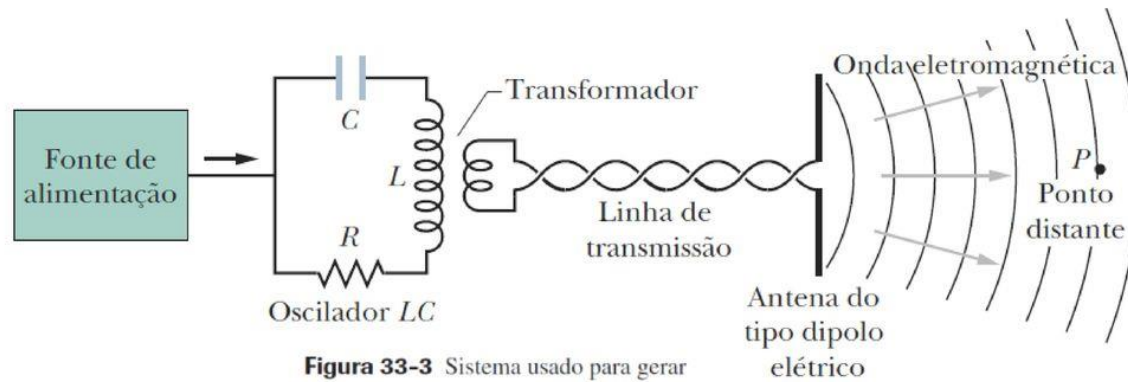


Laseres

# Geração de ondas de rádio

## Ondas Eletromagnéticas e Fótons

### *A geração de uma onda eletromagnética*



**Figura 33-3** Sistema usado para gerar uma onda eletromagnética na região de ondas curtas de rádio do espectro eletromagnético: um oscilador *LC* produz uma corrente senoidal na antena, que gera a onda. *P* é um ponto distante no qual um detector pode indicar a presença da onda.



# Sem ondas eletromagnéticas

## Antes de Maxwell

Lei de Gauss para a eletricidade

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lei de Gauss para o magnetismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{ausência de mono polo})$$

Lei de indução de Faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Ampere

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i$$

# Equações de Maxwell

## Equações de Maxwell (SI)

Lei de Gauss para a eletricidade

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lei de Gauss para o magnetismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{ausência de mono polo})$$

Lei de indução de Faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Ampere-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i$$

# Ondas eletromagnéticas

Na ausência de cargas e correntes de condução

Lei de Gauss para a eletricidade

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$$

Lei de Gauss para o magnetismo

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

Lei de indução de Faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Ampere-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

# Ondas eletromagnéticas: Campos elétrico + magnético

Consideração mais simples é supor uma onda transversal propagando-se no eixo x:

$$E = E_0 \text{sen}(kx - \omega t) \quad \longrightarrow \quad \text{Componente elétrico}$$

$$B = B_0 \text{sen}(kx - \omega t) \quad \longrightarrow \quad \text{Componente magnético}$$

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \longrightarrow \quad \text{Velocidade de propagação da onda}$$

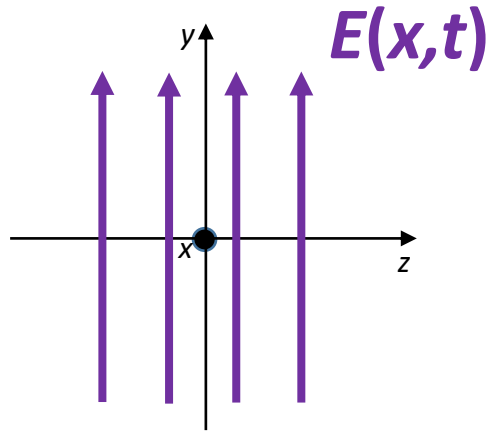
De acordo com as duas últimas equações de Maxwell, o campo elétrico tem correlação com o campo magnético e vice-versa.

**Mas qual é a correlação entre eles?**

# Campos elétrico e magnético variáveis: Análise qualitativa

Suponha uma onda eletromagnética transversal variável no tempo propagando-se de dentro para fora, em direção ao observador, no eixo-x, com velocidade  $c$ .

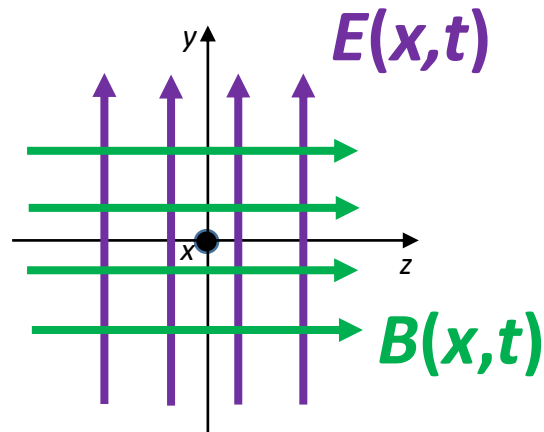
Considere o campo elétrico vertical variável (roxo) apontando para cima (eixo-y positivo).



# Campos elétrico e magnético variáveis: Análise qualitativa

Suponha uma onda eletromagnética transversal variável no tempo propagando-se de dentro para fora, em direção ao observador, no eixo-x, com velocidade  $c$ .

Considere o campo elétrico vertical variável (roxo) apontando para cima (eixo-y positivo).

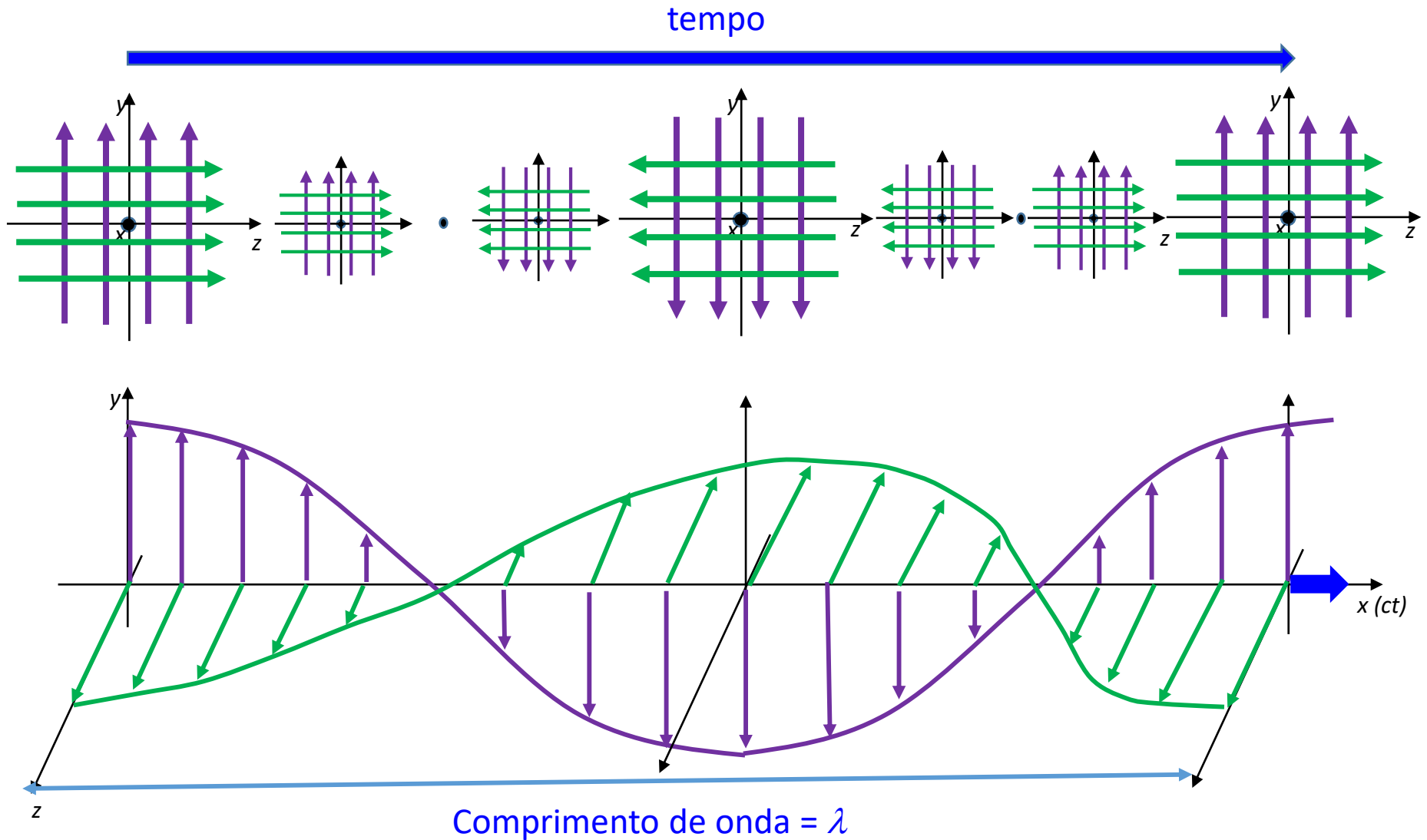


Haverá o surgimento de um campo magnético variável (verde) **em fase e perpendicular** ao campo elétrico, no eixo-z, devido a **lei de Ampere-Maxwell!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

# Campos elétrico e magnético variáveis

No caso de um campo elétrico variante no tempo, propagando-se ao longo do eixo-x ( $ct$ ):



# Campos elétrico e magnético variáveis

Suponha uma onda eletromagnética transversal variável propagando-se no eixo-x, com velocidade  $c = \omega/k$ . Supondo o campo elétrico no eixo-y:

$$E_y(x, t) = E_{0,y} \text{sen}(kx - \omega t) \quad \longrightarrow \quad \text{Componente elétrico}$$

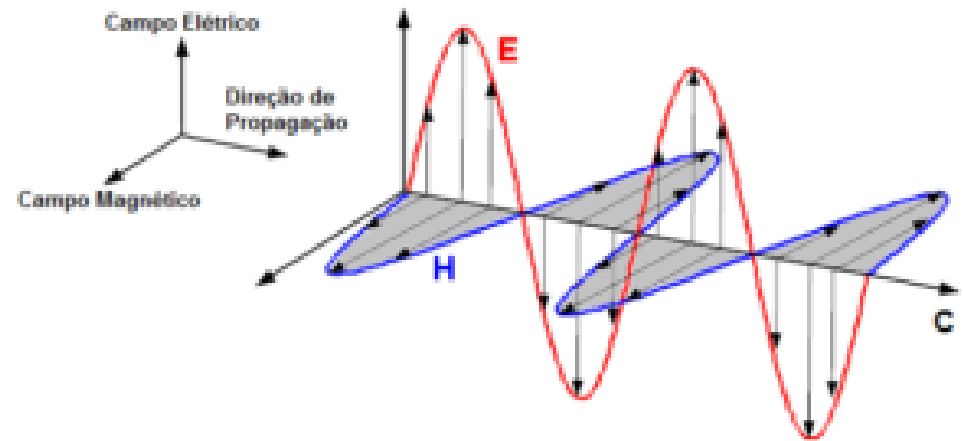
$$B_z(x, t) = B_{0,z} \text{sen}(kx - \omega t) \quad \longrightarrow \quad \text{Componente magnético}$$

Velocidade de propagação da onda

$$v = \frac{\omega}{k} = c$$

Vetor de onda

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

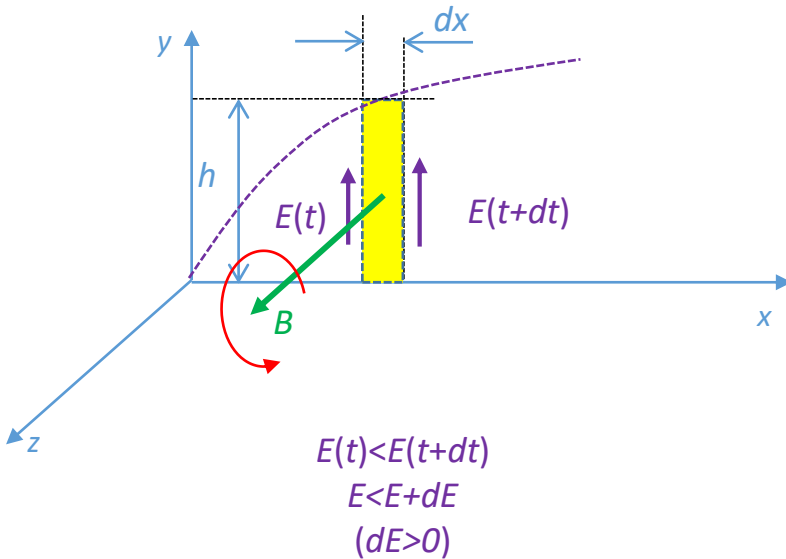


Os campos elétrico e magnético ortogonais e em fase: **Ondas eletromagnéticas!**



# Campos elétrico e magnético variáveis: Análise quantitativa

Entendo melhor as equações de Maxwell (Lei de indução de Faraday):  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$



Considere um instante de tempo infinitesimal:  $dt$ ,  $dx = cdt$  (retângulo amarelo)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (E + dE)h - E h = h dE$$

O fluxo de  $B$  ( $\Phi_B$ ) nesse retângulo será:

$$\Phi_B = B(h dx)$$

Portanto a derivada do fluxo no tempo:

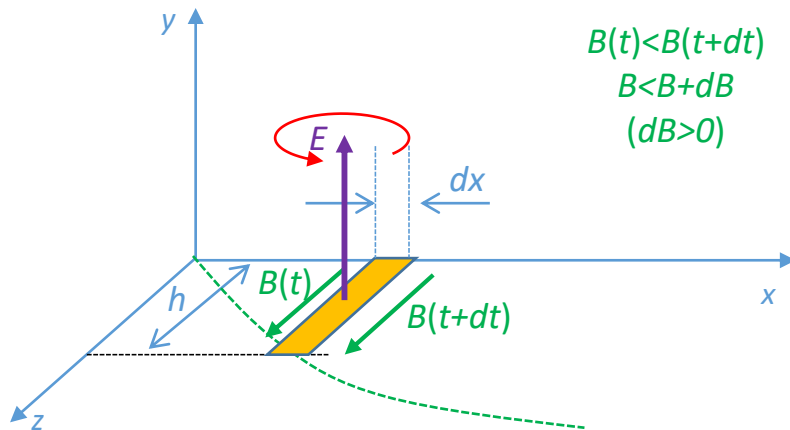
$$\frac{d\Phi_B}{dt} = (h dx) \frac{dB}{dt}$$

Substituindo as duas expressões na lei de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \longrightarrow \quad h dE = -h dx \frac{dB}{dt} \quad \longrightarrow \quad \frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt}$$

# Campos elétrico e magnético variáveis: Análise quantitativa

Entendo melhor as equações de Maxwell (Lei de Ampere-Maxwell):  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$



$$\begin{aligned} B(t) < B(t+dt) \\ B < B + dB \\ (dB > 0) \end{aligned}$$

Considere um instante de tempo infinitesimal:  $dt$ ,  $dx = c dt$  (retângulo laranja)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = -(B + dB)h + B h = -h dB$$

O fluxo de  $E$  ( $\Phi_E$ ) nesse retângulo será:

$$\Phi_E = E(h dx)$$

Portanto a derivada do fluxo no tempo:

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = (h dx) \frac{dE}{dt}$$

Substituindo as duas expressões na lei de Ampere-Maxwell:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad \longrightarrow \quad -h dB = \mu_0 \epsilon_0 h dx \frac{dE}{dt} \quad \longrightarrow \quad -\frac{dB}{dx} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{dE}{dt}$$

## Velocidade da onda: Velocidade da luz

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

$$-\frac{dB}{dx} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{dE}{dt}$$

$$E = E_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$B = B_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

Calculado as derivadas:

$$\frac{dE}{dx} = kE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{dE}{dt} = -\omega E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{dB}{dx} = kB_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{dB}{dt} = -\omega B_0 \cos(kx - \omega t)$$

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

$$kE_0 \cos(kx - \omega t) = \omega B_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$kE_0 = \omega B_0$$

$$\frac{E_0}{B_0} = \frac{\omega}{k}$$

$$-\frac{dB}{dx} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{dE}{dt}$$

$$-kB_0 = \mu_0 \epsilon_0 (-\omega E_0)$$

$$\frac{E_0}{B_0} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{k}{\omega}$$

# Velocidade da onda: Velocidade da luz

$$\frac{E_o}{B_o} = \frac{\omega}{k}$$



$$\frac{E_o}{B_o} = \frac{\omega}{k} = c$$

Campo magnético é muito fraco!

$$B_o = \frac{E_o}{c}$$

$$\frac{E_o}{B_o} = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o} \frac{k}{\omega}$$



$$c = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o} \frac{k}{\omega} = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o} \frac{1}{c}$$

$$c^2 = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}}$$

$$\begin{aligned} \mu_o &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \\ \epsilon_o &= 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \end{aligned}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}} = \frac{1}{\sqrt{1,1121 \times 10^{-17}}} = \frac{1}{3,33485 \times 10^{-9}} = 299.863.380,5 \text{ m/s}$$

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

Por definição, no vácuo

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Valor simplificado, no vácuo

$$v = \frac{\omega}{k} = c$$

