

[MOD-HIS] Aspectos Históricos do Eletromagnetismo

Dos Primeiros Experimentos às Altas
Frequências, Fotônica e Computação

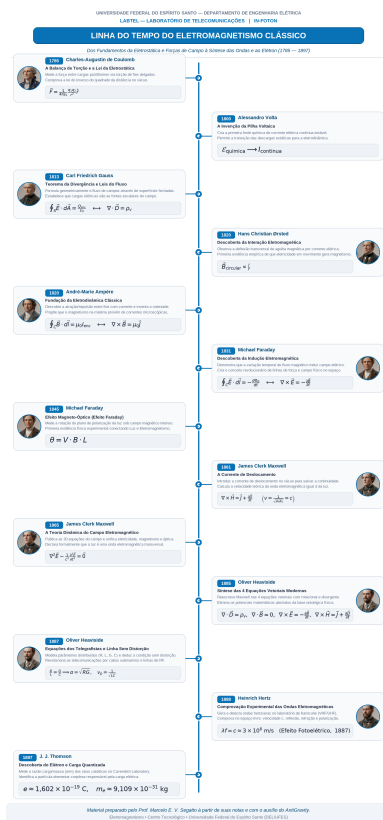
Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-FOTON



Sumário da Apresentação

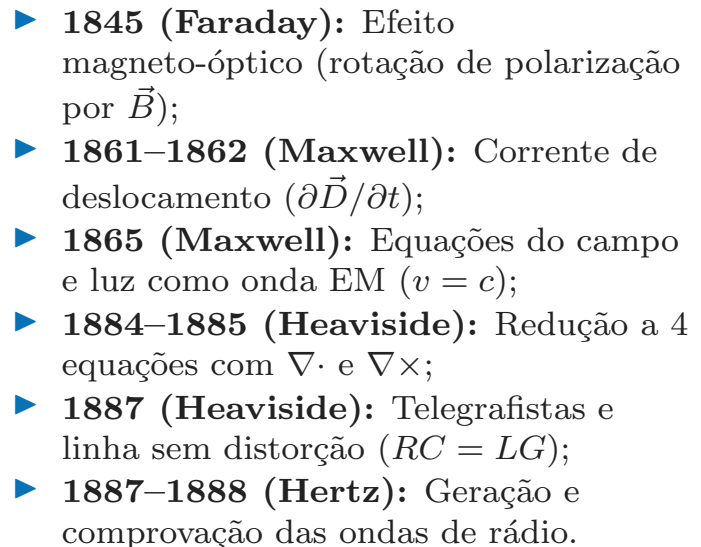
1. A Era Clássica e a Síntese de Maxwell
2. A Revolução das Altas Frequências no Século XX
3. Mapeamento Curricular e Transição



Fundamentos da Eletrostática à Indução:

- ▶ **1785 (Coulomb):** Quantificação da força eletrostática ($F \propto 1/r^2$);
- ▶ **1800 (Volta):** Pilha química e fontes de corrente contínua estável;
- ▶ **1813 (Gauss):** Teorema da divergência e fluxo de campo;
- ▶ **1820 (Ørsted):** Descoberta da deflexão magnética por corrente;
- ▶ **1820 (Ampère):** Forças entre correntes e invenção do solenoide;
- ▶ **1831 (Faraday):** Indução eletromagnética e conceito físico de campo.

4 / 21



Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)



C.-A. de Coulomb

Balança de Torção

(1785)

- ▶ **A Balança de Torção:** Medição direta da atração e repulsão entre cargas elétricas puntiformes por torção de fios delgados de prata.
- ▶ **Lei do Inverso do Quadrado:** Demonstração experimental de que a força decai com o quadrado da distância ($1/r^2$).

Lei Eletrostática Fundamental

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

- ▶ **Conexão Curricular:** Define a intensidade de campo elétrico $\vec{E}$ e fundamenta a Lei de Gauss ($\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q_{\text{enc}}/\epsilon_0$).

Hans Christian Ørsted (1777–1851)



H. C. Ørsted
Deflexão Magnética
(1820)

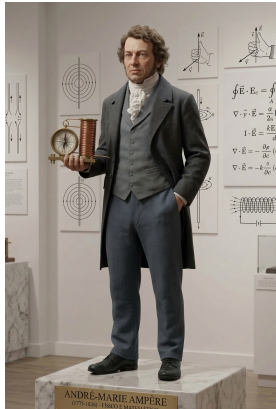
- ▶ **A Pilha Voltaica (Alessandro Volta, 1800):** Forneceu a primeira fonte de corrente contínua estável em condutores.
- ▶ **A Descoberta de Ørsted (1820):** Em demonstração experimental, observou a deflexão transversal da agulha magnética ao aproximar um fio percorrido por corrente contínua.

Interação Eletromagneto-Mecânica

$$\vec{B}_{\text{circular}} \propto \frac{I}{r} \quad (\text{Circulação transversal de campo})$$

- ▶ **Significado Físico:** Primeira comprovação de que eletricidade em movimento cria campo magnético no espaço.

André-Marie Ampère (1775–1836)



A.-M. Ampère
Eletrodinâmica Clássica
(1820)

- ▶ **Eletrodinâmica Quantitativa:** Dedução da força mecânica mútua entre elementos diferenciais de corrente ($I_1 d\vec{l}_1$ e $I_2 d\vec{l}_2$).
- ▶ **O Solenoide:** Bobina helicoidal concentrando fluxo magnético equivalente a um ímã cilíndrico permanente.
- ▶ **Correntes Moleculares:** O magnetismo na matéria é fruto de correntes atômicas microscópicas circulantes.

Lei Circuital de Ampère (Regime Estático)

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enc}} \quad \Longleftrightarrow \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

Carl Friedrich Gauss (1777–1855)



Carl Friedrich Gauss

Teorema do Fluxo
(1813)

- **Teorema da Divergência (1813):** Relação geométrica entre o fluxo em superfícies fechadas e a divergência volumétrica:

$$\iiint_V (\nabla \cdot \vec{F}) dV = \oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}$$

- **Lei de Gauss para o Campo Elétrico:** Relação entre o fluxo de $\vec{D}$ e fontes escalares de carga (ρ_v):

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho_v dV \quad \Longleftrightarrow \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$$

- **Lei de Gauss Magnética (Sem Monopolos):**

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\vec{B} = \nabla \times \vec{A})$$

Michael Faraday (1791–1867)



Michael Faraday

Indução

Eletromagnética (1831)

- ▶ **Indução Eletromagnética (1831):**
Demonstrou que a variação temporal de fluxo magnético gera campo elétrico rotacional induzido.
- ▶ **O Conceito Físico de Campo:** Superação da ação à distância newtoniana através das linhas de força físicas no espaço.
- ▶ **Efeito Faraday (1845):** Rotação do plano de polarização da luz sob campo magnético — evidência fundamental ligando Luz e Eletromagnetismo.

Lei da Indução de Faraday-Lenz

$$\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \iff \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

James Clerk Maxwell (1831–1879)



James Clerk Maxwell

Unificação Teórica

(1861–1865)

- ▶ **A Corrente de Deslocamento ($\partial \vec{D}/\partial t$):**
Para satisfazer a conservação de carga ($\nabla \cdot \vec{J} = -\partial \rho_v / \partial t$), postulou que campos elétricos variantes geram campo magnético no vácuo.

Lei de Ampère-Maxwell

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

- ▶ **Teoria Eletromagnética da Luz (1865):**
Deduziu a equação de onda no espaço livre e predisse a velocidade de propagação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} = c$$

Conclusão Fundamental: A luz é uma onda eletromagnética transversal!

Oliver Heaviside (1850–1925)



Oliver Heaviside

Formulação Vetorial

(1885)

- ▶ **As 4 Equações Canônicas:** Condensou as 20 equações de Maxwell em 4 equações vetoriais com os operadores $\nabla \cdot$ e $\nabla \times$.
- ▶ **Equações dos Telegrafistas (1887):**
Modela a propagação guiada:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = R i + L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial z} = G v + C \frac{\partial v}{\partial t}$$

- ▶ **Linha Sem Distorção:**
 $\frac{R}{L} = \frac{G}{C} \implies \alpha = \sqrt{RG}, \quad v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$

Heinrich Hertz (1857–1894)



Heinrich Hertz
Ondas de Rádio
(1887–1888)

- ▶ **Geração e Detecção (1887–1888):** Oscilador centelhador ressonante (LC) e detecção de microfaíscas em antena de laço.
- ▶ **Propriedades Ópticas Comprovadas** ($v = c$): Reflexão metálica, refração em prismas, polarização linear e interferência.
- ▶ **Efeito Fotoelétrico (1887):** Observação pioneira da emissão estimulada por luz UV.

Equação de Onda Homogênea no Vácuo

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

A Síntese Canônica das Equações de Maxwell

Campos Rotacionais (Circulação)

Lei da Indução de Faraday:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Lei de Ampère-Maxwell:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Campos Divergentes (Fluxo)

Lei de Gauss Elétrica:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho_v dV$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$$

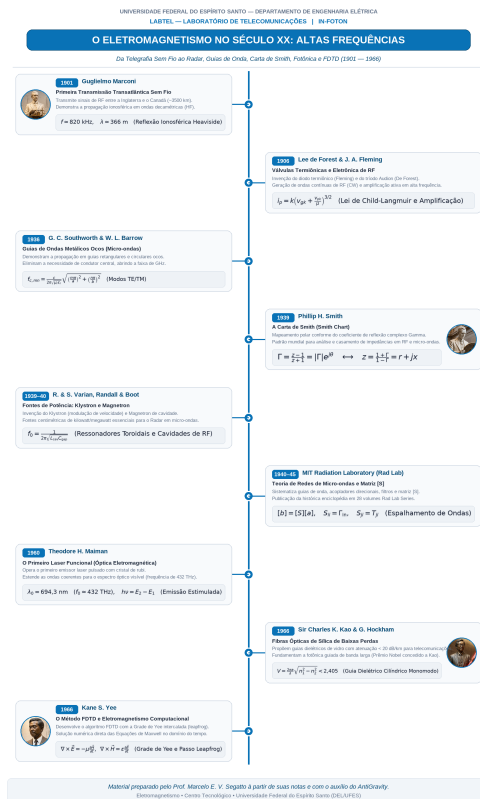
Lei de Gauss Magnética:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Relações Constitutivas: $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$.

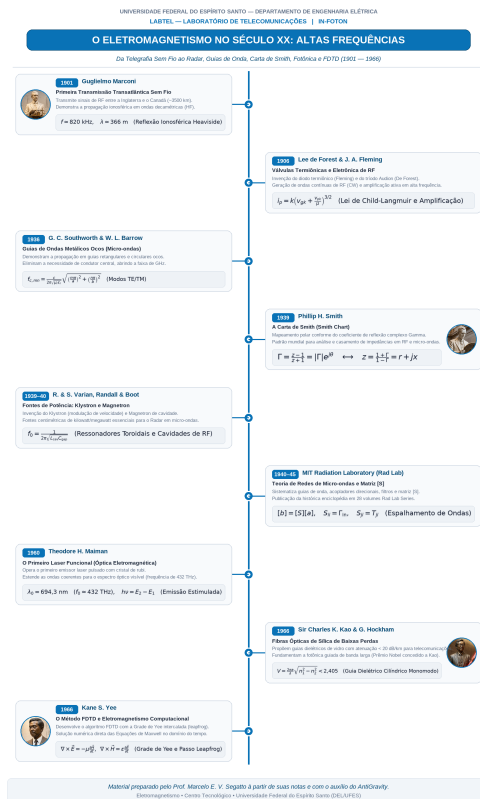
O Século XX (1901–1945): RF, Guias e Radares



Da Radiotelegrafia ao MIT Rad Lab:

- ▶ **1901 (Marconi):** Transmissão transatlântica (3.500 km) e detecção da ionosfera;
- ▶ **1906 (De Forest & Fleming):** Válvula tríodo e osciladores de RF;
- ▶ **1936 (Southworth & Barrow):** Guias de ondas ocos sem condutor central;
- ▶ **1939 (Smith):** Carta de Smith para análise de impedâncias de RF;
- ▶ **1939–1940 (Varian & Boot):** Invenção do Klystron e Magnetron de cavidade;
- ▶ **1940–1945 (MIT Rad Lab):** Circuitos de micro-ondas e Matriz [S].

O Século XX (1960–1966): Fotônica e Computação



A Fronteira Óptica e Numérica:

- ▶ **1960 (Theodore Maiman):** Primeiro Laser funcional (rubí, $\lambda = 694,3 \text{ nm}$), estendendo o eletromagnetismo a frequências ópticas (432 THz);
- ▶ **1966 (Sir Charles K. Kao):** Fibras ópticas de sílica de baixas perdas ($< 20 \text{ dB/km}$), fundando a fotônica moderna;
- ▶ **1966 (Kane S. Yee):** Criação do método FDTD com a Grade de Yee intercalada no espaço-tempo.

Guglielmo Marconi (1874–1937)



Guglielmo Marconi
Transmissão de RF
(1901)

Nobel de Física (1909)

- ▶ **A Façanha Transatlântica (1901):** Transmissão de RF de Poldhu (Inglaterra) a Signal Hill (Canadá) ao longo de mais de 3.500 km.
- ▶ **Descoberta da Ionosfera:** Provou a reflexão na camada condutora atmosférica (Heaviside-Kennelly), superando a curvatura da Terra.
- ▶ **Inovações de RF:** Antena monopolo aterrada ($\lambda/4$) e circuitos sintonizados LC acoplados com sintonia seletiva (Patente 7.777).

Parâmetro de Operação Transatlântico

$$\lambda \approx 366 \text{ m} \quad \Longleftrightarrow \quad f \approx 820 \text{ kHz}$$

Phillip H. Smith (1905–1987)



Phillip H. Smith
A Carta de Smith (1939)
Bell Telephone Labs

- ▶ **O Problema Prático de RF:** Determinar a impedância de entrada em linhas exigia avaliar funções hiperbólicas complexas exaustivas ($\tanh(\gamma\ell)$).
- ▶ **Transformação Conforme Bilinear:** Mapeou o plano $z = r + jx$ no círculo unitário do coeficiente de reflexão $\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i$:

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \iff z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

Aplicações Canônicas em Engenharia

Casamento de impedâncias com stubs, cálculo de reflexão e ondas estacionárias (TOE / VSWR) e projeto de circuitos de micro-ondas.

Sir Charles Kuen Kao (1933–2018)



Sir Charles K. Kao
Fibras Ópticas (1966)

Nobel de Física (2009)

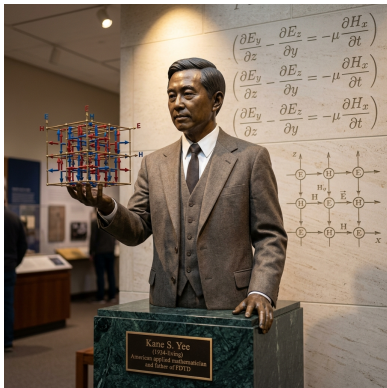
- ▶ **A Quebra do Dogma (1966):** Demonstrou que perdas nos vidros (> 1000 dB/km) decorriam de impurezas, e não de limite fundamental.
- ▶ **Profecia de Baixas Perdas:** Previu atenuação < 20 dB/km com sílica pura (hoje $< 0,18$ dB/km em 1550 nm).
- ▶ **Guia Dielétrico Cilíndrico Monomodo:**

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,4048$$

(Modo fundamental HE_{11} monomodo)

Espinha Dorsal da Sociedade Conectada

Fundamentou a infraestrutura óptica que transporta mais de 99% do tráfego mundial da Internet.



Kane S. Yee

Método FDTD (1966)

Eletromagnetismo

Computacional

- **O Método FDTD (1966):** Resolução direta das equações rotacionais de Maxwell no domínio do tempo sem inversão matricial:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{E}), \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}(\nabla \times \vec{H} - \sigma \vec{E})$$

- **Grade de Yee & Leapfrog:** Campos $\vec{E}$ e $\vec{H}$ intercalados no espaço ($\Delta/2$) e no tempo ($\Delta t/2$). As leis de Gauss são satisfeitas intrinsecamente!

Impacto Contemporâneo

Padrão ouro em modelagem de antenas, espalhamento radar (RCS) e circuitos fotônicos integrados (PICs).

Mapeamento dos Avanços nos Módulos do Curso

- ▶ **Módulo 2 (Equações de Maxwell e Ondas Planas):** Formulação diferencial/integral e propagação no vácuo e meios materiais (Maxwell, Faraday, Hertz).
- ▶ **Módulo 3 (Reflexão e Refração):** Coeficientes de Fresnel, ângulo de Brewster e reflexão interna total (base da fotônica de Charles Kao).
- ▶ **Módulo 4 (Linhas de Transmissão):** Teoria dos parâmetros distribuídos (R, L, G, C) de Heaviside e Carta de Smith de Phillip H. Smith.
- ▶ **Módulo 5 (Matrizes de Espalhamento):** Teoria circuital de RF e formalismo da matriz $[S]$ desenvolvidos pelo MIT Radiation Laboratory.
- ▶ **Módulo 6 (Guias de Onda e Fotônica):** Guias metálicos ocos de Southworth/Barrow e fibras ópticas monomodo de Charles Kao.
- ▶ **Módulo 7 (Métodos Numéricos):** Soluções computacionais diretas via FDTD (Kane Yee), resolvidores modais FDE e métodos variacionais.

Referências Bibliográficas Canônicas

1. **WHITTAKER, Sir Edmund.** *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories*. London: Thomas Nelson and Sons, 1951.
2. **HUNT, Bruce J.** *The Maxwellians*. Ithaca: Cornell University Press, 1991.
3. **MAXWELL, James Clerk.** *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 1873.
4. **CHENG, David K.** *Field and Wave Electromagnetics*. 2. ed. Reading: Addison-Wesley, 1989.
5. **TAFLOVE, Allen; HAGNESS, Susan C.** *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3. ed. Artech House, 2005.
6. **AGRAWAL, Govind P.** *Fiber-Optic Communication Systems*. 4. ed. John Wiley & Sons, 2010.

Material preparado pelo Prof. Marcelo E. V. Segatto à partir de suas notas e com o auxílio do AntiGravity.