

## APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL

**Marly Nascimento Salles Passos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP), Cubatão, SP, Brasil.

**Alexandre Maniçoba de Oliveira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP), Cubatão, SP, Brasil.

**Anna Karina Fontes Gomes**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP), Cubatão, SP, Brasil.

**Resumo:** A teoria do eletromagnetismo mudou a concepção da realidade no campo da física e, com isso, originou novas áreas de conhecimento— incluindo novas teorias até, até mesmo, a criação de aparelhos domésticos. Neste trabalho, temos o objetivo de analisar e estudar algumas aplicações das equações de Maxwell.

**Palavras-chave:** Eletromagnetismo. Equações de Maxwell. Aplicações.

**Abstract:** The electromagnetism theory changed the conception of reality in physics and, thus, new areas of knowledge were originated - including new theories and even the creation of household appliances. In this work, we have the aim to analyze and study some of Maxwell's equations applications.

**Keywords:** Electromagnetism. Maxwell equations. Applications.

### 1. INTRODUÇÃO

James Clerk Maxwell foi um físico escocês do século XIX, conhecido por ter formulado a teoria do eletromagnetismo. Tendo base nos estudos experimentais conduzidos por Michael Faraday, essa teoria se condensa em um formulado de equações diferenciais, que são conhecidas como Equações de Maxwell.

Separadamente, essas equações conseguem explicar matematicamente fenômenos elétricos e magnéticos, que, anteriormente, não eram bem entendidos e explicados. fbc(Comb, 1998)

Apesar de ter sido Maxwell que ficou conhecido por ter formulado a teoria do eletromagnetismo, a história começa por volta de 1820, quando o estudioso Hans Christian Oesterd consegue entender a relação entre a eletricidade e o magnetismo, inventando os geradores elétricos. Esses geradores permitiram a produção de correntes elétricas estáveis e duradouras, que foram fundamentais para a pesquisa deste fenômeno. O experimento desenvolvido foi simples, consistindo no uso de uma agulha magnética, bússola e um condutor de eletricidade – este último era um fio de platina em circuito. Assim que a bússola se aproximava do fio, a agulha era deslocada de sua posição inicial (Snelders, 1990).

Anos depois, Faraday utilizou a variação do fluxo magnético para produzir correntes elétricas, empregando o uso de duas bobinas e um núcleo de ferro para conduzir seus estudos. Com isso, percebeu que, à medida que uma bobina era ligada ou desligada, uma corrente elétrica passava para a outra bobina. Dessa forma, Faraday concluiu que essa energia se originava da variação do campo magnético. Tal fenômeno leva o nome de Lei de Faraday (ou indução magnética) (Faraday, 1855).

Esses experimentos possibilitaram uma série de outros estudos, desde Joseph Henry até William Sturgeon. Em particular, os estudos de Maxwell, que finalmente levou ao entendimento dos fenômenos de eletromagnetismo. Com seus trabalhos, foi possível demonstrar que os campos magnéticos e elétricos são manifestações do campo eletromagnético. Além disso, as equações obtidas foram muito importantes para a descrever os raios de luz, como ondas eletromagnéticas.

Com a descrição matemática do eletromagnetismo, os fenômenos eletromagnéticos puderam ser observados e estudados de um outro ponto de vista. Com isso, foram obtidos novos resultados como, por exemplo, a lei de Ohm, que descreve fenômenos da eletricidade; a teoria da relatividade de Einstein; estudos sobre a mecânica quântica; desenvolvimento de antenas; aparelhos de micro-ondas, entre outros.

## 2. AS GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS

As equações do eletromagnetismo são descritas a partir de grandezas físicas, explicitadas a seguir.

- O campo elétrico, representado por  $\vec{E}$ ;
- O campo magnético, representado por  $\vec{H}$ ;
- A indução magnética, representada por  $\vec{B}$ ;
- A permeabilidade magnética, representada por  $\mu$ ;
- A indução elétrica, representada por  $\vec{D}$ ;
- A permissividade elétrica, representada por  $\epsilon$ ;
- A densidade superficial de corrente, representada por  $\vec{j}$ ;
- A densidade volumétrica de carga, representada por  $\rho_V$ ;
- Condutividade elétrica, representada por  $\sigma$ .

### 2.1 Campo elétrico $\vec{E}$

Essa grandeza vetorial é gerada por cargas  $q$  que não se movimentam no espaço e formam um campo vetorial que é distinguido como o campo elétrico  $\vec{E}$ . No SI, sua unidade é expressa como V/m (volts por metro).

### 2.2 Campo magnético $\vec{H}$

Quando as cargas  $q$  se movimentam e tem uma velocidade determinada, uma corrente elétrica é gerada, sendo em seguida criado um campo vetorial magnético. No SI, sua unidade é expressa como A/m (ampère por metro).

### 2.3 Indução magnética $\vec{B}$ e a permeabilidade magnética $\mu$

A indução magnética é também conhecida como densidade do campo magnético, e pode ser expressa a relacionando ao produto do campo magnético com a permeabilidade magnética do meio em questão:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}.$$

Pode-se então dizer que a intensidade da permeabilidade magnética do meio é inversamente proporcional ao campo magnético, ao mesmo tempo que, quanto maior a permeabilidade, maior será a indução do campo magnético pelo meio. A relação do campo magnético em uma superfície pode ser descrita como:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S},$$

em que  $\phi$  é o fluxo magnético. A unidade no SI da indução magnética é expressa por T (tesla), enquanto a da permeabilidade magnética é H/m (henry por metro).

#### 2.4 Indução elétrica $\vec{D}$ e a permissividade elétrica $\epsilon$

A indução elétrica é também conhecida como densidade do fluxo elétrico, e pode ser representada como a relação entre o campo elétrico e a permissividade elétrica, isto é,

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}.$$

As relações agem de maneira análoga às da indução magnética, ou seja, uma menor permissividade elétrica do meio implica em uma menor densidade do fluxo elétrico que é gerado, e vice-versa. Desta forma, também é possível inferir que:

$$\psi = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S},$$

em que  $\psi$  é o fluxo elétrico. A unidade da indução elétrica é C/m<sup>2</sup> (coulomb por metro), enquanto a da permeabilidade magnética é F/m (farad por metro).

#### 2.5 Densidade superficial de corrente $\vec{j}$

Sendo representada pela unidade A/m<sup>2</sup> (ampère por metro quadrado), essa densidade através de uma superfície  $\vec{S}$  é definida como

$$\vec{j} = \frac{i}{\vec{S}}.$$

De modo a obter o fluxo de  $\vec{j}$  pela superfície, obtêm-se a corrente elétrica  $i$  ao aplicar o teorema de Stokes, ou seja,

$$i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}.$$

#### 2.6 Condutividade elétrica $\sigma$

Os tipos de meios que podemos encontrar são os dielétricos (ou isolantes) e os condutores. Os isolantes têm alta permissividade elétrica, enquanto os condutores apresentam condutividade elétrica. É possível notar isso na equação descrita abaixo:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E},$$

que basicamente é a Lei de Ohm, relacionando densidade de corrente, campo elétrico e condutividade, e denotando uma característica no campo dos elétrons (Oberziner, 2008). A condutividade elétrica tem S/m (siemens por metro) como unidade do SI.

## 2.7 Densidade volumétrica de carga $\rho_V$

A densidade volumétrica de carga é apresentada como sendo relacionada a densidade de corrente de convecção e a movimento, dada pela equação

$$\rho_V = \frac{\vec{j}}{\vec{v}},$$

em que  $\vec{v}$  denota o vetor de velocidade desse movimento. A unidade é C/m<sup>3</sup> (coulombs por metro cúbico).

## 3. EQUAÇÕES DE MAXWELL

Tendo definido as constantes que são relevantes para o estudo do eletromagnetismo, chega-se ao conjunto de equações que define o eletromagnetismo em si, que descrevem fenômenos elétricos e magnéticos ao mesmo tempo que conseguem conciliar ambas as ideias em uma única forma de raciocínio. Essas quatro equações foram inicialmente baseadas em ideias já concebidas por Michael Faraday, Ampère e Gauss – posteriormente revistas por Maxwell. Elas são apresentadas em suas formas diferenciais como:

$$3.1 \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

$$3.2 \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

$$3.3 \nabla \cdot \vec{D} = \rho_V,$$

$$3.4 \nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

A equação (3.1) é baseada na Lei de Faraday e ela descreve como a variação do campo elétrico equivale a variação negativa da indução magnética com o tempo, ou seja, a variação de um campo magnético no tempo pode induzir um campo elétrico. Por sua vez, a equação (3.2) se refere à Lei generalizada de Ampère e aponta como a densidade da corrente de deslocamento no tempo ( $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ), somada aos efeitos da densidade superficial da corrente, está ligada à variação do campo magnético – ou seja, a variação do campo magnético pode depender da corrente elétrica e da variação da indução elétrica. As equações restantes são independentes da variação do tempo. A equação (3.3) determina que a densidade da carga é uma fonte de linhas do fluxo elétrico induzido e ela é baseada na Lei de Gauss para campos elétricos. Por último, a equação (3.4), baseada na Lei de Gauss para campos magnéticos, reforça a ideia de que não há como conhecer os polos magnéticos, pois o fluxo é sempre encontrado em um caminho fechado e não se propaga de uma origem.

#### 4. APLICAÇÕES

As equações de Maxwell permitem a existência de uma infinidade de aparelhos que utilizam as regras do eletromagnetismo para seu funcionamento, como antenas, linhas de transmissão, capacitores (trabalham com corrente de deslocamento, que é a relação  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ) (Bartlett et al, 1985), transformadores, motores, além de descrever conceitos da ótica e de propagação de elétrons. Outras leis que também derivam das equações de Maxwell são a lei de Ohm e a de Kirchoff, que fazem parte do campo da eletricidade. A seguir, entra-se em maior detalhes sobre algumas das várias aplicações possíveis.

##### 4.1 Linhas de Transmissão

O objetivo de uma linha de transmissão é conectar um ponto a outro através da transmissão de energia eletromagnética, podendo ser a conexão entre um cabo USB e um computador, um celular e uma tomada, uma casa e uma subestação de energia etc. No geral, tem-se interesse em conectar uma fonte geradora de energia e uma

carga que a recebe. Essa conexão, no geral, representa uma certa distância, que interfere na transmissão, e, se muito longínquas, podem acarretar diferenças de fases devido ao atraso do tempo entre os dois pontos (Hayt, 2013). Ou seja, a forma de lidar com energia dentro de uma linha se atém às mesmas regras da propagação de energia em um ambiente livre. No entanto, assim como num circuito elétrico, o circuito de uma linha de transmissão também apresenta indutâncias e capacitâncias e, associado a elas, também há a existência de campos magnéticos e elétricos.

As equações que descrevem o funcionamento de uma linha de transmissão são conhecidas como equações do telégrafo (ou, simplesmente, equações de onda gerais para a linha de transmissão) e foram originalmente deduzidas através das equações de Maxwell, por Oliver Heaviside. São elas

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial V}{\partial t} + RGV,$$

para a forma de diferença de potencial, e

$$\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial I}{\partial t} + RGI,$$

para a forma de corrente elétrica. Uma linha de transmissão somente emite energia na configuração *Transverse Electro Magnetic* (TEM), ou seja, não apresenta campos elétricos e nem magnéticos na direção da transversal de sua propagação. Ela também pode operar com frequências muito altas.

## 4.2 Guia de Ondas

Uma guia de onda é uma forma especial de uma linha de transmissão, que não possui os dois condutores e utiliza uma configuração diferente da utilizada nas linhas. Em suma, suas definições são a mesma – enviam uma onda eletromagnética de um ponto a outro. Segundo Hayt, a equação de potência de um guia de ondas pode ser calculada a partir da corrente, da tensão ou do campo, e é apresentada como:

$$P_z = \int_0^b \int_0^d \frac{1}{2} \Re\{\vec{E}_{xs} \vec{H}_{ys}\} dx dy = \frac{1}{2} \frac{V_0}{d} \frac{V_0}{bZ_0} (bd) = \frac{|V_0|^2}{2Z_0} = \frac{1}{2} \Re\{V_s I_s\}.$$

Ao contrário de uma linha de transmissão convencional, a propagação de campo não é necessariamente de configuração TEM, e funciona com um condutor ou mais – diferentemente dos dois condutores das linhas de transmissão. Um guia de onda pode trabalhar com modos TEM, TM (transversal magnético), TE (transversal elétrico) e modos híbridos que contam com tanto o modo elétrico quanto o magnético na direção da propagação. Uma guia de onda é geralmente utilizada em frequências de micro-ondas, não suporta corrente contínua e há uma certa frequência de corte em que ela pode operar, ou seja, uma guia de onda resulta por operar como um filtro passa-alta (Sadiku, 2004). Essa frequência de corte e o comprimento de onda de corte são, respectivamente, dados por:

$$f_{c_{mn}} = \frac{u'}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad \text{e} \quad \lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

em que  $m$  e  $n$  são constantes inteiras e  $u' = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ . Segundo Sadiku, a configuração das componentes do campo magnético  $\vec{H}_S$  e elétrico  $\vec{E}_S$  de um guia de onda pode ser representada pelas equações

$$\begin{aligned} E_{XS} &= \frac{-\gamma}{h^2} \frac{\partial E_{ZS}}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_{ZS}}{\partial y}, \\ E_{YS} &= \frac{-\gamma}{h^2} \frac{\partial E_{ZS}}{\partial y} - \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_{ZS}}{\partial x}, \\ H_{XS} &= \frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial E_{ZS}}{\partial y} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_{ZS}}{\partial x}, \\ H_{YS} &= \frac{-j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial E_{ZS}}{\partial x} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_{ZS}}{\partial y}. \end{aligned}$$

É imprescindível ressaltar que, no modo TEM,  $H_{ZS}$  e  $E_{ZS}$  equivalem a 0; no modo TE,  $H_{ZS} \neq 0$  e  $E_{ZS} = 0$ ; no modo TM,  $H = 0$  e  $E_{ZS} \neq 0$ ; e no modo híbrido, ambos são diferentes de zero. Os tipos de cabos que realizam esse tipo de trabalho são o cabo coaxial, o cabo bifilar e a linha microfita, cada qual com suas características e dependentes da frequência.

### 4.3 Fibra Óptica



Capaz de transmitir sinais em altíssima velocidade, essa espécie de guia de onda dielétrica, usada em comprimentos de onda ópticos, possui uma seção reta circular que a distingue dos guias de onda comuns. É basicamente constituída de ínfimas fibras de vidro ultrapuro ou então fibras de plástico. A luz é guiada pelo núcleo da fibra, que, por sua vez, está coberto por uma casca de material óptico, com menor índice de refração, que prende a luz no núcleo através da reflexão total interna e permite que o feixe inteiro de luz seja refletido, propagado pelo meio sem grandes perdas. Esse sistema todo é envolto por um buffer, que protege o cabo de danos externos (Carvalho, 2015).

A Lei de Snell para ângulo de refração de  $90^\circ$  ajuda a descrever o fenômeno da reflexão total, isto é,

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2,$$

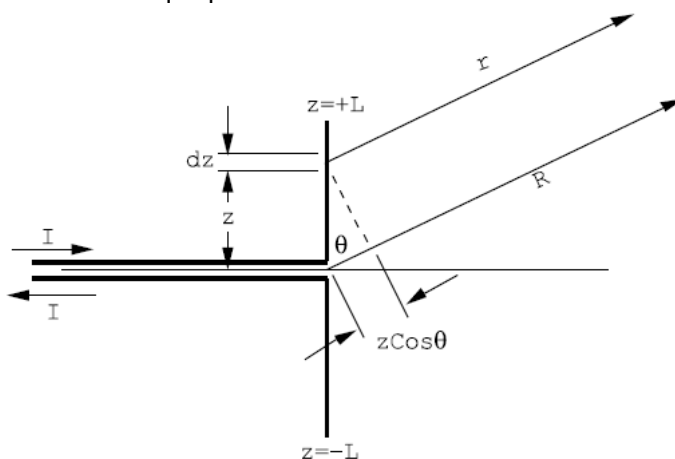
em que  $n$  é o índice de refração e  $\theta$  é o ângulo de incidência. A fim de se obter o ângulo crítico em que ocorre a reflexão total, o meio em que a luz reflete deve ter o índice de refração maior que o outro ( $n_1 < n_2$ ) (Almeida et al, 2007). O tamanho do núcleo e da casca interferem no funcionamento da fibra, sendo disponibilizados fibras de várias configurações. Dentre essas configurações, há a fibra óptica do estilo monomodo, que é mais utilizada para situações onde o sinal precisa ser transmitido por longos caminhos devido ao fato de apresentar menores perdas. O núcleo é tão reduzido que a luz pode se propagar no meio através de um único feixe de luz. No caso de fibras multimodo, mais usadas para cabos LAN de redes privadas, o núcleo é de dimensões consideráveis e a luz pode se dispersar entre vários feixes sendo refratados – é também o modo mais lento. Dentro do multimodo, temos a de índice degrau e a de índice gradual.

#### 4.4 Antena de Rádio

As terminações em uma linha de transmissão ou em um circuito impresso são, geralmente, as antenas, que caracterizam radiadores eletromagnéticos que recebem a energia eletromagnética gerada e emitem esse sinal de volta. A projeção de suas dimensões está relacionada a suas dimensões e relações entre a fonte e o campo eletromagnético de flutuações de carga.

A partir das equações não-homogêneas de Maxwell (com termos fonte no lado direito das equações) mostra-se realizável calcular uma aproximação da distribuição de corrente em um condutor tal como uma antena de rádio em específico, com uma fonte de corrente alternada senoidal a uma frequência  $\omega$ . A variação de tempo da corrente também é pensada como sendo senoidal. Uma corrente também senoidal acaba percorrendo o fio ligando a antena e a linha de transmissão, que por sua vez é refletida pelas extremidades do fio, resultando em uma corrente nula nas mesmas extremidades – com a direção transversal se equivalendo a  $z = \pm L$ .

Figura 1 – Uma antena de rádio linear, onde temos o esquema de uma antena do tipo analisado, exemplificando a direção transversal  $z$ , as distâncias  $R$  e  $r$  do observador, o ângulo entre  $z$  e  $R$ , e a corrente  $I$  que percorre a linha de transmissão até chegar à antena.



Fonte: Cochran et al, 2004

Em um campo eletromagnético dependente do tempo, a modo de satisfazer as estipulações da lei da eletromagnética, o vetor potencial dependente da distância vetorial entre o observador ( $\vec{R}, \vec{r}$ ) e o tempo, produzido pela densidade de corrente  $\vec{J}_T(\vec{r}, t_R)$ , é definido como:

$$\vec{A}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_S d\tau \frac{\vec{J}_T(\vec{r}, t_R)}{|\vec{R} - \vec{r}|},$$

em que  $t_R$  é o tempo retardado dado por  $t_R = t - \frac{|\vec{R} - \vec{r}|}{c}$ ; e  $d\tau$  é o elemento de volume. Aos parâmetros da antena, já estipulados acima, resta aplicar a seguinte descrição da corrente da antena (Stratton, 1945):

$$I(z, t) = I_0 \exp(-i\omega t) \operatorname{sen} \frac{\omega}{c} (L - z), z \geq 0,$$

$$I(z, t) = I_0 \exp(-i\omega t) \operatorname{sen} \frac{\omega}{c} (L + z), z \leq 0,$$

Com essa aplicação, é possível obter o vetor potencial relacionado a densidade de corrente de uma antena.

A partir dos conceitos de campo elétrico e magnético, de acordo com as leis do eletromagnetismo, é possível desenvolver a ideia por trás do vetor potencial de uma antena integrando a densidade de corrente e supondo uma série de parâmetros como o comprimento da antena e o comprimento de onda dos campos elétricos e magnéticos. Para uma antena de meio comprimento de onda, a dependência angular dos campos eletromagnéticos pode ser expressa como

$$\operatorname{sen} \theta F(\theta) = \frac{\left(\frac{2c}{\omega}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cos \theta}{2}\right)}{\operatorname{sen} \theta},$$

em que  $\theta$  é o ângulo entre a direção de  $\vec{R}$  e a antena, como mostrado na figura (Cochran et al, 2004). Outros parâmetros para desempenho de uma antena, de acordo com o IEEE, estão listados abaixo:

#### 4.4.1 Intensidade de radiação

Denotada como  $U$ , a intensidade de radiação é calculada pela equação:

$$U = \frac{dP_{rad}}{d\theta},$$

onde  $P_{rad}$  é a potência média irradiada pela antena.

#### 4.4.2 Diretividade

Definida como a máxima intensidade de radiação ( $U_{max}$ ) dividida pela intensidade média de radiação (dada por  $\bar{U}$ ), é expressa na forma de:

$$D = \frac{U_{max}}{\bar{U}}.$$

#### 4.4.3 Resistência da radiação

Denotada como  $R_{rad}$ , se dá através da equação:

$$R_{rad} = \frac{2 \cdot P_{rad}}{|I|^2},$$

em que  $I$  é o fasor da corrente de alimentação.

#### 4.4.4 Ganho absoluto considerando antena isotrópica

O ganho absoluto  $G$  é definido como a intensidade de radiação máxima sobre a intensidade média num sistema em que a potência ativa de entrada é dissipada pela antena de forma isotrópica. De outra forma, também é possível obter o ganho absoluto através da potência ativa da entrada, com a equação:

$$G = \frac{4\pi \cdot U_{max}}{P_{in}},$$

em que  $P_{in}$  é a potência ativa da entrada e  $U_{max}$  é a intensidade de radiação máxima.

#### 4.4.5 Ganho relativo

O ganho relativo  $g$  avalia o ganho da antena em questão em relação ao ganho de uma antena de referência, demonstrado por:

$$g = \frac{G}{G_0},$$

em que  $G$  é a antena sendo avaliada e  $G_0$  é a referencial (Fontana, 2013).

### 4.5 Efeito Meissner

Walther Meissner e Robert Ochsenfeld fizeram experiências com amostras de chumbo e estanho, materiais com propriedade de supercondutores (Meissner et al, 1933), onde aplicavam um campo magnético em uma condição de temperatura abaixo da temperatura crítica dos materiais, ou seja, a temperatura máxima em que a característica de supercondutividade é manifestada. O que se constatou foi que as linhas do fluxo magnético de dentro dos materiais foi reduzida a zero, ou seja,  $\vec{B} = 0$ .

Esse experimento demonstrou que um supercondutor não é perfeitamente comparável a um condutor perfeito que funciona de acordo com a física estipulada pelas equações de Maxwell. Um condutor considerado perfeito consegue manipular uma variação do fluxo magnético dentro si, enquanto um supercondutor, além de manipular tal variação, consegue eliminá-lo de seu interior caso a temperatura crítica for atingida. (Rocha et al., 2004)

## 5. CONCLUSÃO

Em consideração de todas essas ramificações e consequências, podemos inferir que as teorias de Maxwell são a base para de uma parte considerável das invenções tecnológicas e teorias científicas do século XX – o chamado século da tecnologia. Desde a transmissão de energia elétrica para todos, desenvolvimento da telecomunicação – habilitando a possibilidade de juntar todos os cantos do mundo de maneira simultânea – até para outros conceitos medicinais como a radioterapia, o melhor entendimento das leis do eletromagnetismo nos proveu uma qualidade melhor de vida, de um lado mais pacífico, e modos colossalmente poderosos de travar guerras, de um lado mais violento. De qualquer maneira, o estudo mais específico dessas leis basicamente tornou possível a realização do homem contemporâneo e seu estilo de vida, radicalmente diferente do que era no século XIX.

De certa forma, ainda há possibilidade acerca dos campos que esse estudo compreende. Inicialmente, ele juntou áreas do conhecimento e, posteriormente, continuou juntando outras áreas, abrindo novas portas e desenvolvendo novas tecnologias. Essa junção ainda pode continuar para o futuro. Isso exemplifica o quão importante foram as equações de Maxwell para o século XX e XXI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, V. O.; CRUZ, C. A.; SOAVE, P. A. *Textos de Apoio ao Professor de Física*. Instituto de Física – UFRGS, v.18, n.2, 2007.

BARTLETT, D. F.; CORLE, T. R. *Measuring Maxwell's displacement current inside a capacitor*. Physical Review Letters 55, 59. N. 1, vol. 55. 1985.

CARVALHO, P. *Aplicação da Fibra Óptica em Sistemas FTTX*. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual Paulista. 2015.

FARADAY, M. *Experimental Researches in Electricity*. London: B. Quaritch 1839, 1855.

FONTANA, E. *Eletromagnetismo Parte 2*. Universidade Federal de Pernambuco. 2013.

HAYT Jr, W. H. *Eletromagnetismo*. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*. IEEE Std 145-1983, pp.1-31, 1983.

COCHRAN, J. F.; HEINRICH, B. *Applications of Maxwell's Equations*. Simon Fraser University, 2004.

DOMB, C. James Clerk Maxwell – Biography and Facts. Britannica. 1998.

MEISSNER, W.; OCHSENFELD, R. *Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit*. Naturwissenschaften. V. 44, N. 21, p. 787–788, 1933.

OBERZINER, Ana P. B. *As Equações de Maxwell e Aplicações*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Santa Catarina, 2008.

ROCHA, F. S. da; FRAQUELLI, H. A. *Roteiro para experiência de levitação de um ímã repelido por um supercondutor no Ensino de Física*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 1, pg. 11-18, 2004.

SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SNELDERS, H. A. M. *Oersted's discovery of electromagnetism* no livro Cunningham, A.; Jardine, N. *Romanticism and the Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

STRATTON, J.A. *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw-Hill, 1941.