

A ERA DO ELETROMAGNETISMO: DA UNIFICAÇÃO ÀS EQUAÇÕES DE MAXWELL E ALÉM

THE AGE OF ELECTROMAGNETISM: FROM UNIFICATION TO MAXWELL'S EQUATIONS AND BEYOND

LA ERA DEL ELECTROMAGNETISMO: DE LA UNIFICACIÓN A LAS ECUACIONES DE MAXWELL Y MÁS ALLÁ

Edson Silva Ferreira¹

RESUMO: Este artigo explora a convergência histórica da eletricidade e do magnetismo no século XIX, destacando as descobertas cruciais que levaram à sua unificação. Analisa as contribuições seminais de Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère e Michael Faraday, que estabeleceram a interconexão fundamental entre esses fenômenos.¹ O estudo culmina na apresentação da teoria clássica do eletromagnetismo de James Clerk Maxwell, detalhando suas famosas equações e a previsão da existência de ondas eletromagnéticas. Discute-se o impacto transformador dessas descobertas na física e no desenvolvimento tecnológico, incluindo as contribuições pós-Maxwell de cientistas como Carl Friedrich Gauss e Pierre Curie, que expandiram o campo e pavimentaram o caminho para inúmeras tecnologias contemporâneas.

Palavras-chave: Eletromagnetismo. Unificação. Equações de Maxwell. História da Física. Ondas Eletromagnéticas.

ABSTRACT: This review article explores the historical convergence of electricity and magnetism in the 19th century, highlighting the crucial discoveries that led to their unification. It analyzes the seminal contributions of Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, and Michael Faraday, who established the fundamental interconnection between these phenomena. The study culminates in the presentation of James Clerk Maxwell's classical theory of electromagnetism, detailing his famous equations and the prediction of the existence of electromagnetic waves.² The transformative impact of these discoveries on physics and technological development is discussed, including post-Maxwell contributions from scientists such as Carl Friedrich Gauss and Pierre Curie, who expanded the field and paved the way for countless contemporary technologies.

2261

Keywords: Electromagnetism. Unification. Maxwell's Equations. History of Physics. Electromagnetic Waves.

RESUMEN: Este artículo de revisión explora la convergencia histórica de la electricidad y el magnetismo en el siglo XIX, destacando los descubrimientos cruciales que llevaron a su unificación. Analiza las contribuciones seminales de Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère y Michael Faraday, quienes establecieron la interconexión fundamental entre estos fenómenos.³ El estudio culmina con la presentación de la teoría clásica del electromagnetismo de James Clerk Maxwell, detallando sus famosas ecuaciones y la predicción de la existencia de ondas electromagnéticas. Se discute el impacto transformador de estos descubrimientos en la física y el desarrollo tecnológico, incluyendo las contribuciones post-Maxwell de científicos como Carl Friedrich Gauss y Pierre Curie, quienes expandieron el campo y allanaron el camino para innumerables tecnologías contemporáneas.

Palabras clave: Electromagnetismo. Unificación. Ecuaciones de Maxwell. Historia de la Física. Ondas Electromagnéticas.

¹Professor do Instituto Federal de Mato Grosso- IFMT.

I. INTRODUÇÃO

As primeiras observações sobre magnetismo e eletricidade remontam a períodos antigos, quando esses fenômenos ainda eram tratados como domínios distintos (PERRY, 1876; GILBERT, 1600). Por muitos séculos, o magnetismo foi associado à magnetita e à invenção da bússola (GOODRICH; NEEDHAM, 1962), enquanto a eletricidade era percebida em manifestações eletrostáticas simples, como a atração exercida pelo âmbar (AUGUSTO VIEIRA TONIDANDEL; EMÍLIO ANGUETH DE ARAÚJO; DO COUTO BOAVENTURA, 2018). Apesar do interesse despertado por ambos os fenômenos desde os tempos antigos, a ciência os investigava separadamente.

O século XIX marcou um ponto de virada fundamental na história da física. Foi nesse período que a visão de eletricidade e magnetismo como entidades independentes começou a desmoronar, dando lugar a uma compreensão unificada. A descoberta da interconexão entre esses dois fenômenos, conhecida como eletromagnetismo, revolucionaria não apenas a física teórica, mas também abriria caminho para inovações tecnológicas sem precedentes.

Cientistas visionários como Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, Michael Faraday e, finalmente, James Clerk Maxwell, foram os principais arquitetos dessa unificação. Suas descobertas e formulações matemáticas transformaram o mistério em ciência e estabeleceram as bases para grande parte da tecnologia moderna, desde a geração de energia até as comunicações sem fio.

O objetivo deste artigo é explorar as descobertas cruciais que unificaram eletricidade e magnetismo, culminando nas icônicas Equações de Maxwell e suas profundas implicações para a física e a tecnologia. Buscaremos traçar essa evolução, destacando o impacto transformador de cada contribuição e como elas, juntas, moldaram nossa compreensão de uma das forças mais essenciais da natureza.

2. MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa e exploratória de natureza histórico-científica, com o objetivo de analisar a trajetória da unificação dos fenômenos elétricos e magnéticos ao longo do século XIX, culminando na formulação das equações de Maxwell e suas consequências para a física moderna. A investigação fundamenta-se em levantamento e análise documental de fontes bibliográficas clássicas e contemporâneas.

A seleção do material considerou obras amplamente reconhecidas no campo da história da ciência, da física teórica e da eletrodinâmica, incluindo manuais acadêmicos, artigos de revisão e compilações históricas. Foram consultadas bases como Google Scholar e Scielo, bem como referências cruzadas de autores consagrados, como Siegel (1991) e Darrigol (2000), que abordam a evolução do eletromagnetismo em seu contexto histórico e científico.

A análise foi conduzida a partir de uma organização cronológica dos marcos científicos, destacando os trabalhos de Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, Michael Faraday e James Clerk Maxwell, além das contribuições posteriores de Carl Friedrich Gauss e Pierre Curie. Para cada cientista, foram descritas suas principais descobertas, os métodos experimentais ou teóricos empregados, e o impacto de suas contribuições no processo de unificação do eletromagnetismo.

O estudo buscou, além da descrição factual, compreender a interdependência entre os avanços individuais e o desenvolvimento do arcabouço teórico que culminou nas equações de Maxwell. A metodologia, portanto, não se limita à exposição linear dos fatos, mas procura evidenciar como o conhecimento científico foi construído de forma cumulativa, dialética e colaborativa ao longo do tempo.

2263

3. O ELETROMAGNETISMO: UNINDO FORÇAS

No século XIX, o entendimento do magnetismo e da eletricidade sofreu uma grande transformação com a unificação desses dois fenômenos em um único conceito: o eletromagnetismo. Essa unificação foi fruto dos trabalhos inovadores de três cientistas fundamentais: Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère e Michael Faraday. Cada um deles fez descobertas e formulações que lançaram as bases para o desenvolvimento de uma teoria completa e moderna do eletromagnetismo.

Hans Christian Oersted (1777–1851), um físico dinamarquês, foi o pioneiro na descoberta da relação entre eletricidade e magnetismo. Em 1820, durante uma experiência em que passava uma corrente elétrica através de um fio condutor próximo a uma agulha de bússola, figura 1, Oersted observou que a agulha se deslocava (Ørsted, 2014).

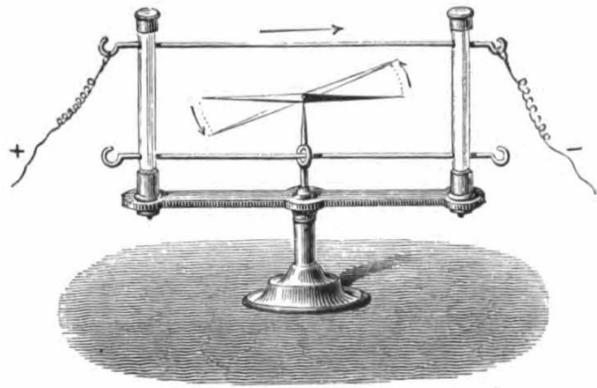


Figura 1 - Ilustração do experimento de Oersted (“File:Oersted experiment.png - Wikimedia Commons”, [S.d.]).

Esse fenômeno indicava que uma corrente elétrica gerava um campo magnético ao seu redor, uma descoberta fundamental que mostrou pela primeira vez que a eletricidade e o magnetismo estavam intrinsecamente ligados. Oersted não apenas confirmou que a eletricidade podia influenciar o magnetismo, mas também estabeleceu a base para o desenvolvimento posterior do eletromagnetismo como um campo unificado.

A descoberta de Oersted foi um marco para a ciência da época, mas apenas iniciou a exploração de como a eletricidade e o magnetismo poderiam interagir de forma mais profunda. Foi André-Marie Ampère (1775–1836), um físico francês, que avançou ainda mais nesse campo. Ampère, partindo da descoberta de Oersted, formulou as primeiras leis matemáticas que descreviam a interação entre correntes elétricas e campos magnéticos (Blondel, 1978). Ele estabeleceu a Lei de Ampère, que define como a intensidade do campo magnético gerado por uma corrente elétrica depende da magnitude da corrente e da geometria do fio condutor. Além disso, Ampère desenvolveu o conceito de que as forças magnéticas entre correntes paralelas poderiam ser calculadas, e formulou a ideia de que as correntes elétricas poderiam ser vistas como responsáveis pela criação de campos magnéticos, o que ficou conhecido como teoria das correntes elétricas. Assim, enquanto Oersted demonstrou a existência da conexão, Ampère a quantificou e formalizou.

2264

Michael Faraday (1791–1867), um dos maiores experimentadores da história da ciência, também fez contribuições cruciais para a teoria do eletromagnetismo. Em 1831, Faraday descobriu a indução eletromagnética, um fenômeno em que uma corrente elétrica é gerada em um circuito fechado pela variação de um campo magnético ao seu redor (Faraday, 2012), figura 2.

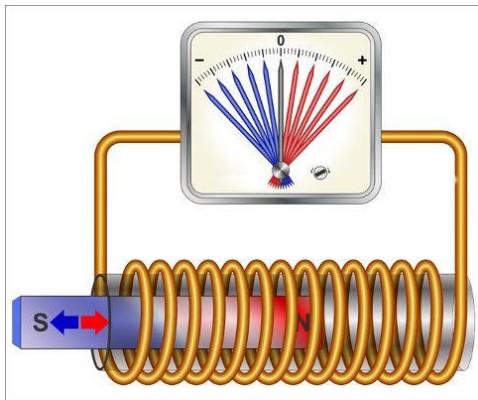


Figura 2 - Experimento de indução eletromagnética de Michael Faraday (“Lei de Faraday: o que é, aplicações, exercícios - Mundo Educação”, [S.d.]).

Essa descoberta não apenas demonstrou a interconexão entre eletricidade e magnetismo, mas também revelou como o movimento de um campo magnético pode gerar eletricidade, um princípio fundamental para o funcionamento de geradores e transformadores elétricos. Faraday também formulou a ideia de linhas de campo magnético e elétrico, que são representações visuais das forças invisíveis que permeiam o espaço, o que se tornaria a base para as equações de Maxwell, formuladas posteriormente por James Clerk Maxwell.

Embora Oersted, Ampère e Faraday tivessem desvendado as interconexões entre eletricidade e magnetismo, a tarefa de formalizar e unificar essas descobertas em uma teoria coerente e abrangente caberia a James Clerk Maxwell, preparando o terreno para a próxima seção.

2265

4. A TEORIA CLÁSSICA DO ELETROMAGNETISMO

A teoria clássica do eletromagnetismo, desenvolvida por James Clerk Maxwell (1831–1879), figura 3, no século XIX, é uma das conquistas mais significativas da física moderna (Maxwell, 2010a). Maxwell consolidou as descobertas de experimentadores anteriores, como Oersted, Ampère e Faraday, e as unificou em um conjunto matemático de quatro equações, agora conhecidas como as Equações de Maxwell (Maxwell, 2010a). Essas equações descrevem de forma precisa a interação entre campos elétricos e magnéticos, revelando sua natureza interdependente e dinâmica.

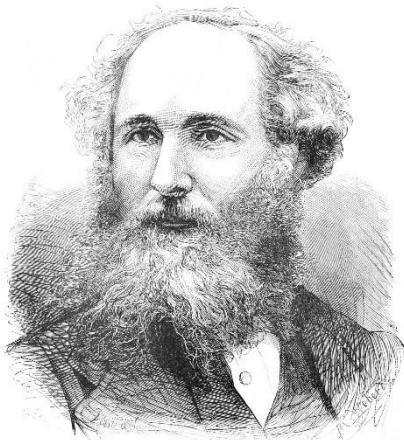


Figura 3 - James Clerk Maxwell (1831-1879) (“File:James clerk maxwell.jpg - Wikimedia Commons”, [S.d.]).

Maxwell, um físico e matemático escocês, publicou sua teoria em 1861-1862, ao demonstrar que as leis do eletromagnetismo poderiam ser descritas de maneira elegante e concisa em termos de equações diferenciais (Maxwell, 2010a). As equações de Maxwell não apenas formalizaram a relação entre eletricidade e magnetismo, mas também introduziram uma nova maneira de entender a propagação das ondas eletromagnéticas, como a luz. Ele mostrou que as flutuações nos campos elétricos e magnéticos podem se propagar no espaço como ondas, viajando à velocidade da luz, figura 4.

2266

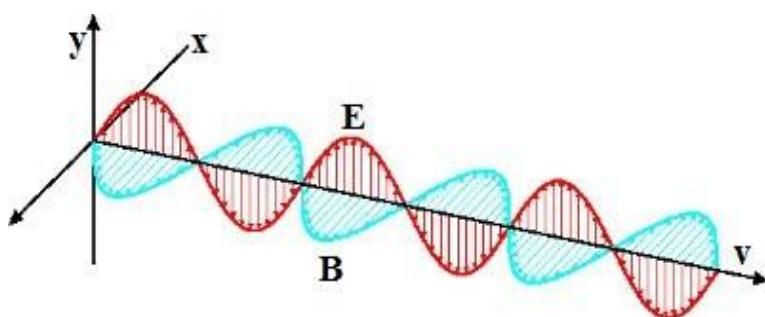


Figura 4 - Esquema de uma onda eletromagnética, em que E representa o campo elétrico e B o campo magnético (“Tipos de ondas eletromagnéticas: quais são - Mundo Educação”, [S.d.]).

Isso implicava que a luz era uma forma de radiação eletromagnética, e que todas as formas de radiação, desde as micro-ondas até os raios-X, eram manifestações de ondas eletromagnéticas.

As quatro equações de Maxwell estão representadas na tabela 1:

Tabela 1. As Equações de Maxwell representam a síntese das leis do eletromagnetismo, unificando os campos elétrico e magnético e descrevendo a natureza da luz como uma onda eletromagnética. Fonte: Adaptado de (Maxwell, 2010a).

Equação (Forma Diferencial)	Nome da Equação	Descrição
$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Lei de Gauss para o Campo Elétrico	Descreve como as cargas elétricas geram campos elétricos e como as linhas de campo elétrico se originam e terminam em cargas.
$\nabla \cdot B = 0$	Lei de Gauss para o Campo Magnético	Estabelece que não existem "cargas magnéticas" isoladas (monopólos magnéticos); as linhas de campo magnético são sempre fechadas.
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	Lei de Faraday da Indução	Descreve como um campo magnético variável no tempo pode gerar um campo elétrico.
$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$	Lei de Ampère-Maxwell	Relaciona os campos magnéticos com as correntes elétricas e com as variações dos campos elétricos no tempo.

Legenda dos símbolos:

- E: Campo Elétrico
- B: Campo Magnético
- ρ : Densidade de carga elétrica
- ϵ_0 : Permissividade do vácuo
- μ_0 : Permeabilidade do vácuo
- J: Densidade de corrente elétrica
- t: Tempo
- $\nabla \cdot$: Divergente
- $\nabla \times$: Rotacional
- $\frac{\partial}{\partial t}$: Derivada parcial em relação ao tempo

2267

Essas equações não apenas explicam uma vasta gama de fenômenos observados, mas também preveem novos comportamentos da luz e das ondas eletromagnéticas. A principal implicação da teoria de Maxwell foi a unificação das leis da eletricidade e do magnetismo em uma teoria única, o que representou uma verdadeira revolução no campo da física.

A visão de Maxwell sobre a luz, como uma onda eletromagnética, foi confirmada experimentalmente em 1887, quando Heinrich Hertz demonstrou a existência de ondas de rádio, confirmando que as ondas eletromagnéticas podiam se propagar através do espaço (Hertz; Doncel, 1995). Isso abriu as portas para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em ondas eletromagnéticas, figura 5, como rádio, televisão, radar e, mais recentemente, a comunicação sem fio e a internet.

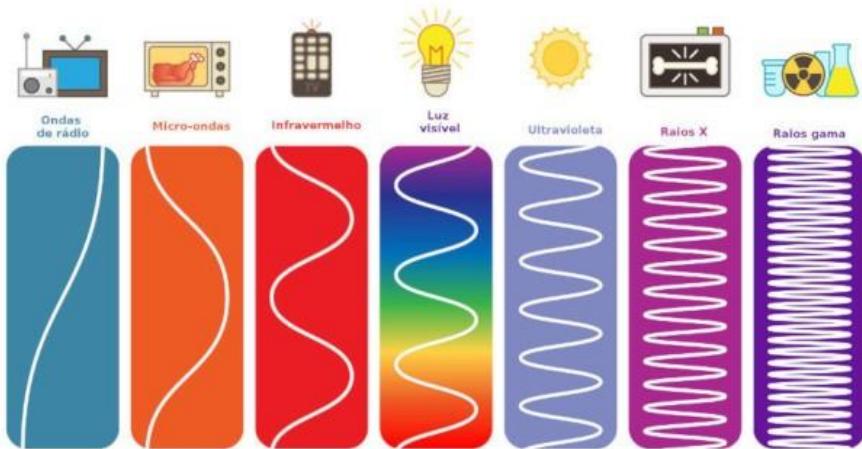


Figura 5 - Espectro eletromagnético em diferentes frequências (“Espectro eletromagnético: o que é, usos, cores, frequências”, [S.d.]).

Maxwell também introduziu o conceito de permissividade e permeabilidade no espaço, que determinam como os campos elétrico e magnético interagem com os materiais. Isso é fundamental para a engenharia de dispositivos eletrônicos e de comunicação moderna. A teoria de Maxwell estabeleceu a base para o entendimento do comportamento da luz, da propagação de sinais eletromagnéticos e da teoria dos circuitos elétricos, sendo fundamental para o desenvolvimento da física do século XX (Jackson; Fox, 1999; Tipler; Mosca, 2016).

2268

Além disso, a teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell influenciou profundamente a física moderna. Sua descrição das ondas eletromagnéticas levou, eventualmente, à teoria da relatividade de Albert Einstein, uma vez que o comportamento da luz, como previsto por Maxwell, seria fundamental para a formulação da teoria da relatividade restrita, onde a velocidade da luz se torna uma constante universal. O trabalho de Maxwell também teve um impacto significativo em outras áreas, como a óptica, a física do estado sólido, a eletrônica e as telecomunicações, formando a espinha dorsal das tecnologias que sustentam o mundo moderno. As equações de Maxwell são a base do estudo do eletromagnetismo e continuam sendo ensinadas como fundamentais em cursos de física até hoje.

5. CONTRIBUIÇÕES DE OUTROS CIENTISTAS

Além das contribuições fundamentais de Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, Michael Faraday e James Clerk Maxwell, diversos outros cientistas desempenharam papéis essenciais no desenvolvimento da teoria e das aplicações do magnetismo. Entre esses,

destacam-se Carl Friedrich Gauss e Pierre Curie, cujos trabalhos aprofundaram a compreensão dos fenômenos magnéticos e suas implicações para as ciências físicas e materiais.

Carl Friedrich Gauss (1777–1855), figura 6, um dos maiores matemáticos e físicos da história, fez contribuições significativas para o estudo do magnetismo, especialmente no campo da medição e da quantificação de campos magnéticos. Gauss foi responsável pelo desenvolvimento de técnicas de medição precisas do campo magnético terrestre (Gauss, 1837).



Figura 6 - Carl Friedrich Gauss (1777–1855) (“File:Carl Friedrich Gauss.jpg - Wikimedia Commons”, [S.d.]).

Ele introduziu o conceito de "intensidade do campo magnético", e suas medições permitiram uma descrição mais quantitativa do campo magnético da Terra, o que é crucial para diversas áreas, desde a navegação até o entendimento da geodinâmica. Ele também formulou o Teorema de Gauss para o magnetismo, uma das equações de Maxwell, que afirma que o fluxo do campo magnético através de qualquer superfície fechada é sempre zero, o que implica que não existem monopólos magnéticos (Griffiths, 2017). Suas medições e teorias ajudaram a solidificar a ideia de que o magnetismo é um fenômeno físico mensurável e fundamental. Em 1839, Gauss, juntamente com Wilhelm Weber, iniciou um trabalho sobre a definição do magnetismo terrestre com o uso de instrumentos mais precisos, o que representou um avanço na compreensão das variações do campo magnético (Gauss, 1837). As observações feitas por Gauss e Weber sobre o campo magnético terrestre são ainda fundamentais para estudos geofísicos e para a construção de modelos do interior da Terra.

2269

Pierre Curie (1859–1906), figura 7, um dos cientistas mais destacados da história da física, também fez contribuições notáveis para o estudo do magnetismo, especialmente no campo da magnetização de materiais.

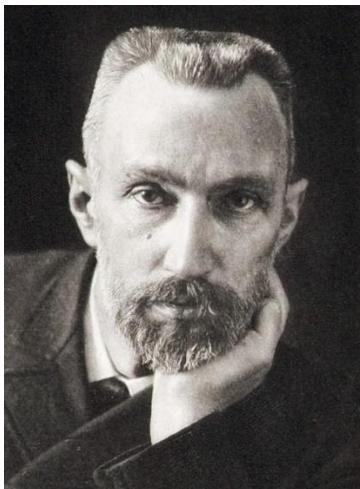


Figura 7 - Pierre Curie (1859–1906) (“File:Pierrecurie.jpg - Wikimedia Commons”, [S.d.]).

Em 1895, Curie descobriu o efeito Curie, figura 8, um fenômeno que descreve como a magnetização de um material ferromagnético diminui com o aumento da temperatura (Pierre Curie, 1895). Esse efeito é uma das bases da termodinâmica do magnetismo e foi crucial para o entendimento de como os materiais respondem a mudanças de temperatura em presença de um campo magnético.



Figura 8 - Gráfico do efeito Curie (Magnetização vs. Temperatura) (“O que é a temperatura de Curie nos ímanes? - IMA”, [S.d.]).

DISCUSSÃO

A análise do percurso histórico do magnetismo e do eletromagnetismo revela uma notável trajetória de interconexão entre observação empírica, formulação teórica e validação experimental. Os primórdios, marcados pela curiosidade dos gregos sobre a magnetita e a inovação chinesa com a bússola, estabeleceram as bases para a investigação sistemática

(METIOUI, 2022). A obra de William Gilbert, *De Magnete*, foi um divisor de águas, desmistificando o magnetismo e estabelecendo a Terra como um gigantesco ímã, um marco para a ciência experimental (GILBERT, 1600). Contudo, essa fase ainda via eletricidade e magnetismo como fenômenos distintos.

A verdadeira revolução ocorreu no século XIX, impulsionada pela série de descobertas de Oersted, Ampère e Faraday. A descoberta de Oersted da relação entre corrente elétrica e campo magnético foi a faísca que acendeu a compreensão do eletromagnetismo (ØRSTED, [s.d.]). Ampère, com sua capacidade de formular leis matemáticas precisas para a interação entre correntes (BLONDEL, 1978), e Faraday, com a elucidação da indução eletromagnética (FARADAY, [s.d.]), não só demonstraram a profunda interligação desses fenômenos, mas também forneceram os pilares conceituais e experimentais que seriam sintetizados. A genialidade de Faraday em visualizar "linhas de força" foi particularmente profética, preparando o terreno para a abstração de Maxwell.

A contribuição de James Clerk Maxwell transcende a mera unificação; ela representa a síntese definitiva e a previsão de uma nova realidade física. Suas quatro equações não apenas descrevem todos os fenômenos eletromagnéticos conhecidos, mas predizem a existência de ondas eletromagnéticas, cuja velocidade no vácuo é a da luz (MAXWELL, 2010a). Essa previsão, posteriormente confirmada por Hertz (HERTZ; DONCEL, 1995), não apenas validou a teoria de Maxwell, mas também estabeleceu a luz como uma forma de radiação eletromagnética, expandindo dramaticamente nossa compreensão do espectro. A teoria de Maxwell é um exemplo paradigmático de como a matemática pode revelar verdades profundas sobre o universo, guiando a experimentação.

2271

As contribuições de cientistas como Gauss e Curie, embora não diretamente focadas na unificação eletromagnética, foram cruciais para a solidificação e expansão do campo. Gauss, com suas medições precisas do campo terrestre e a formulação da lei que nega a existência de monopólos magnéticos, reforçou a compreensão fundamental do magnetismo (GAUSS, 1837). Pierre Curie, ao desvendar a relação entre magnetização e temperatura (Efeito Curie), abriu caminhos para a física dos materiais e a termodinâmica do magnetismo (CURIE, 1895).

No entanto, é importante notar que, mesmo com a teoria de Maxwell, certas anomalias e a necessidade de explicar fenômenos em escalas muito pequenas ou muito grandes levariam ao desenvolvimento da física moderna. A constância da velocidade da luz, uma consequência direta das equações de Maxwell, foi o ponto de partida para a Teoria da Relatividade de

Einstein, e a interação da luz com a matéria em níveis atômicos, como no efeito fotoelétrico, apontaria para a necessidade da mecânica quântica, mostrando que o eletromagnetismo clássico de Maxwell, embora um triunfo, era parte de um quadro ainda maior e mais complexo (EINSTEIN, 1905; TIPLER; LLEWERLLYN, 2006).

CONCLUSÃO

O percurso histórico do magnetismo e do eletromagnetismo, desde suas primeiras observações empíricas na Antiguidade até a formulação da teoria clássica, é um testemunho da natureza progressiva e colaborativa da ciência. A curiosidade inicial sobre as propriedades da magnetita evoluiu, ao longo dos séculos, para um campo de estudo sistemático e rigoroso, impulsionado pelas descobertas de mentes brilhantes.

As contribuições de William Gilbert desmystificaram o magnetismo, estabelecendo as bases para sua investigação científica. Posteriormente, Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère e Michael Faraday desvendaram a intrínseca relação entre eletricidade e magnetismo, pavimentando o caminho para sua unificação.²³ O ápice desse processo foi alcançado por James Clerk Maxwell, cujas equações não apenas descreveram de forma elegante o eletromagnetismo, mas também revelaram a natureza eletromagnética da luz e impulsionaram o desenvolvimento de uma vasta gama de tecnologias que moldaram o mundo moderno, desde a geração de energia elétrica até as comunicações sem fio.

2272

As contribuições de outros cientistas, como Carl Friedrich Gauss, Pierre Curie e Heinrich Hertz, complementaram e aprofundaram esse conhecimento, expandindo as aplicações práticas e teóricas do magnetismo. A jornada do eletromagnetismo é um exemplo vívido do poder da investigação científica e do impacto transformador que a compreensão das forças naturais pode ter na sociedade, revelando como mistérios ancestrais se tornam pilares da tecnologia e do conhecimento humano, e continuam a ser campos férteis para a pesquisa e inovação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao IFMT que contribuiu para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO VIEIRA TONIDANDEL, Danny; EMÍLIO ANGUETH DE ARAÚJO, Antônio; DO COUTO BOAVENTURA, Wallace. História da Eletricidade e do Magnetismo: da Antiguidade à Idade Média. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, [s.n.], p. 4602, 2018.

BLONDEL, Christine. Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère (octobre 1820). **Revue d'histoire des sciences**, v. 31, n. 1, p. 1-13, 1978.

CURIE, Pierre. Propriétés magnétiques des corps à diverses températures. Paris: Gauthier-Villars, 1895.

DARRIGOL, Olivier. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press, 2000.

EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. **Annalen der Physik**, v. 322, n. 10, p. 891-921, 1905.²⁴

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO: o que é, usos, cores, frequências. [S. l.]: Brasil Escola. [2025?]. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/espectro-eletromagnetico.htm>. Acesso em: 8 jun. 2025.

FARADAY, Michael. *Experimental researches in electricity*. [S. l.]: [s.n.], v. 2, 1844.

GAUSS, Karl Friedrich. Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata. **Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, p. 488-490, 1837. 2273

GILBERT, William. *De Magnete: on the loadstone and magnetic bodies and on the great magnet the earth*. New York: John Wiley & Sons, 1893. p. 436.

GILBERT, William. *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure*. Londres: Petrus Short, 1600.

GOODRICH, L. Carrington; NEEDHAM, Joseph. Science and Civilization in China, Vol. 4, Physics and Physical Technology. Part I: Physics. **Journal of the American Oriental Society**, v. 82, n. 3, p. 370-373, 1962.

GRIFFITHS, David J. *Introduction to Electrodynamics*. 4. ed. New York: Cambridge University Press, 2017.

HERTZ, H. G.; DONCEL, Manuel G. Heinrich Hertz's laboratory notes of 1887. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 49, n. 3, p. 197-270, 1995.

JACKSON, J. D.; FOX, Ronald F. Classical Electrodynamics, 3rd ed.²⁵ **American Journal of Physics**, v. 67, n. 9, p. 841, 1999.

LEI DE FARADAY: o que é, aplicações, exercícios. [S. l.]: Mundo Educação. [2025]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/lei-faraday.htm>. Acesso em: 8 jun. 2025.

MAST | Bússola. [S. l.]: Museu de Astronomia e Ciências Afins. [2025]. Disponível em: http://site.mast.br/multimidia_instrumentos/bussola_historico.html. Acesso em: 4 jun. 2025.

MAXWELL, James C. *A treatise on electricity and magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010a. v. 1. (Cambridge Library Collection - Physical Sciences).

MAXWELL, James C. *A treatise on electricity and magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010b. v. 1.

METIOUI, Abdeljalil. Brief Historical Review about Magnetism: From the Ancient Greeks up the Beginning of the XXth Century. **Journal of Biomedical Research & Environmental Sciences**, v. 3, n. 9, p. 1-10, 2022.

O QUE É A TEMPERATURA DE CURIE NOS ÍMANES?. [S. l.]: IMA. [2025]. Disponível em: <https://imamagnets.com/productos/pt-pt/blog/o-que-e-a-temperatura-de-curie-nos-imanes/>. Acesso em: 8 jun. 2025.

ØRSTED, Hans Christian. Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle (1820). In: *Selected Scientific Works of Hans Christian Oersted*. Princeton: Princeton University Press, [s.d.].

PERRY, S. J. History of Magnetism. **Nature**, v. 14, n. 340, p. 10, 1876.

2274

SERWAY, Raymond A.; KIRKPATRICK, Larry D. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics.²⁶ **The Physics Teacher**, v. 26, n. 4, p. 250, 1988.

SHAMOS, Morris H. *Great Experiments in Physics: Readings from Galileo to Einstein*.²⁷ New York: Henry Holt, 1959.

SIEGEL, Daniel M. *Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory*. Cambridge University Press, 1991.

TIPLER, Paul A.; LLEWERLLYN, Ralph A. *Física Moderna*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. único.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. *Física para cientistas e engenheiros*. Vol. 3, 5^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: quais são. [S. l.]: Mundo Educação. [2025]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-que-sao-ondas-eletromagneticas.htm>. Acesso em: 8 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. *File:Carl Friedrich Gauss.jpg*. [2025]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_Friedrich_Gauss.jpg. Acesso em: 8 jun. 2025.



WIKIMEDIA COMMONS. *File:Earth's magnetic field, schematic.svg*. [2025?]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s_magnetic_field,_schematic.svg. Acesso em: 4 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. *File:James clerk maxwell.jpg*. [2025]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_clerk_maxwell.jpg. Acesso em: 8 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. *File:Oersted experiment.png*. [2025]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oersted_experiment.png. Acesso em: 8 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. *File:Pierrecurie.jpg*. [2025]. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierrecurie.jpg>. Acesso em: 8 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. *File:Thales of Miletus.jpg*. [2025]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thales_of_Miletus.jpg. Acesso em: 4 jun. 2025.