



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

HILKIAS PENHA DA SILVA  
MÁRCIO DA SILVA GUIMARÃES

ELETROMAGNETISMO  
Início dos estudos eletromagnéticos e suas aplicações tecnológicas

MACAPA

2010

HILKIAS PENHA DA SILVA  
MÁRCIO DA SILVA GUIMARÃES

ELETROMAGNETISMO

Início dos estudos eletromagnéticos e suas aplicações tecnológicas

Trabalho apresentado para avaliação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso TCC, do curso de licenciatura plena em Física, da Universidade Federal do Amapá ministrado pelo professor Dr. Henrique Duarte Fonseca Filho.

MACAPA

2010

HILKIAS PENHA DA SILVA  
MÁRCIO DA SILVA GUIMARÃES

ELETROMAGNETISMO  
Início dos estudos eletromagnéticos e suas aplicações tecnológicas

AVALIADORES

---

Prof. Dr. Henrique Duarte da Fonseca Filho  
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

---

Prof. Dr. Yony Walter Milla Gonzales  
Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

---

Prof. Dr. José Reinaldo Cardoso Nery  
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

Avaliado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

MACAPA

2010

Agradecemos à nossa família, por estarem a postos sempre que precisamos.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Henrique Duarte da Fonseca Filho pela paciência e auxílio, e por ter aceitado nosso trabalho.

Aos nossos grandes amigos, André Bitencourt, Daniele Ramalho, Fábio Sardinha e o Kleison Batista, que sempre nos apoiaram nessa grande jornada.

Aos (quase-) Físicos da nossa turma com quem compartilhamos alegrias e inquietações ao longo do curso.

Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.

Albert Einstein

## RESUMO

O trabalho apresenta o resultado de uma investigação sobre a história do Eletromagnetismo e suas aplicações tecnológicas no decorrer dos anos, relatando os primeiros indícios da Eletricidade e do Magnetismo, chegando até ao momento onde ambos relacionam-se, dando início a uma nova ciência, o Eletromagnetismo. Diante de tal descoberta, James Clerk Maxwell, dedicou-se durante décadas no estudo dessa relação e acabou por sintetizar em quatro equações, chamadas posteriormente de Equações de Maxwell. Em paralelo ao estudo dessa nova ciência, há também, a corrida para desenvolver aparelhos envoltos a essa ciência. Tecnologias desenvolvidas a partir do estudo do eletromagnetismo surgiram, provocando grandes modificações no modo de vida da sociedade, estando presente em todos os setores que a compõe, como o transporte, comunicação, saúde, lazer, educação, indústria e etc.

Palavras-chave: História, Eletromagnetismo, Tecnologia

## ABSTRACT

The paper presents the results of an investigation into the history of electromagnetism and its technological applications over the years, reporting the first signs of electricity and magnetism, even to the point where both are related, beginning a new science, the Electromagnetism. Before that discovery, James Clerk Maxwell, he devoted himself for decades to study this relationship and eventually summarized into four equations, later called Maxwell's equations. In parallel to study this new science, there is also the race to develop machines that are related to it. Technologies developed from the study of electromagnetism arose, causing great changes in the way of life of the society, present in all sectors within it, such as transport, communication, health, leisure, education, industry and so on.

**KEYWORDS:** History, Electromagnetism, Technology

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b> - Uma carga $q$ interagindo com uma carga $q_0$ .....	23
<b>Figura 02</b> - Linhas de campo elétrico de um dipolo elétrico.....	24
<b>Figura 03</b> - Linhas de campo magnético de um ímã.....	24
<b>Figura 04</b> - Percurso para integral de linha de B a redor de um condutor retilíneo.....	25
<b>Figura 05</b> - Um ímã aproximando-se de um solenóide ligado a um amperímetro.....	26
<b>Figura 06</b> - Um anel mergulhado em um campo magnético variável .....	27
<b>Figura 07</b> - Telégrafo de Morse.....	30
<b>Figura 08</b> - Pontos e Traços do código Morse.....	30
<b>Figura 09</b> - Esquema de funcionamento do telégrafo de Morse.....	31
<b>Figura 10</b> - Princípio da Levitação por Atração Magnética.....	34
<b>Figura 11</b> - Modelo do trem alemão denominado Transrapid.....	34
<b>Figura 12</b> - Princípio da Levitação Magnética.....	35
<b>Figura 13</b> - Princípio da Orientação Lateral.....	35
<b>Figura 14</b> - Sistema de transmissão de dados entre central de controle e o trem maglev.....	36

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
1 – PRIMEIROS INDÍCIOS DO MAGNETISMO.....	12
1.1 - Antiguidade.....	12
1.2 - Idade Média.....	13
1.3 - Idade Moderna.....	14
1.4 - Surgimento da eletricidade.....	15
1.4.1- Idade Moderna.....	15
1.5 - Os primeiros indícios da relação entre eletricidade e magnetismo.....	17
1.5.1 - Idade Contemporânea.....	17
1.6 - A unificação da eletricidade com o magnetismo.....	20
2 – AS EQUAÇÕES DE MAXWELL.....	22
2.1- Lei de Gauss para o Campo Elétrico.....	22
2.2 - Lei de Gauss para o Campo Magnético.....	24
2.3 - Lei de Ampère.....	25
2.4 - Lei de Faraday.....	25
2.4.1- Um Campo Magnético variável produz um Campo Elétrico.....	27
3 - APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO ELETROMAGNETISMO.....	29
3.1 - Telégrafo.....	29
3.1.1- Fundamentação teórica do telegrafo de Morse.....	30
3.1.2- Contribuições para sociedade.....	32
3.2 - Trem Bala (MagLev).....	32
3.2.1- Fundamentação teórica do trem bala.....	33

3.2.1.1- Levitação por atração magnética.....	33
3.2.1.2- Princípio da levitação magnética.....	34
3.2.1.3- Princípio da orientação lateral.....	35
3.2.1.4- Princípio da propulsão.....	35
3.2.2- Sistema de controle.....	36
3.2.3- Vantagens da tecnologia.....	37
3.2.4- Vantagens ambientais.....	38
3.2.4.1- Poluição sonora.....	38
3.2.4.2- Vibração.....	38
3.2.4.3 Poluição atmosférica.....	38
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	40
6 – ANEXO.....	42
ANEXO A – Equações de Maxwell.....	43
7 - APÊNDICE.....	49
APÊNDICE A – Autores e datas.....	50

## INTRODUÇÃO

Este trabalho desenvolve uma relação muito importante entre a evolução da ciência e sua aplicação tecnológica desenvolvida a partir de seu estudo: o eletromagnetismo. Ilustra-se a dependência entre o conhecimento científico e tecnológico.

Provavelmente o interesse da humanidade pelo magnetismo tenha começado há milhares de anos, quando o homem conheceu o poder dos ímãs sobre certos materiais. De lá para cá, vários novos fenômenos foram descobertos, explicados e muitos se transformaram em equipamentos que tornaram nossa vida muito mais cômoda. Fenômenos como a levitação magnética, estão, aos poucos, se revelando como aplicações inovadoras, que prometem revolucionar, entre outros, o setor de transporte.

Até o fim do século XVIII a eletricidade e o magnetismo eram pouco mais que curiosidades de laboratório, sem qualquer interconexão conhecida. Foi no século XIX que se descobriram os efeitos magnéticos das correntes. No princípio do século XX, com a incorporação do eletromagnetismo à relatividade restrita, percebeu-se que campos elétricos e magnéticos são aspectos diferentes de um mesmo campo fundamental, o campo eletromagnético. (NUSSENZVEIG, 2003)

Diante disso, o objetivo desse trabalho é apresentar um estudo sobre a ciência do eletromagnetismo e suas aplicações tecnológicas, desde que essa ciência era estudada isoladamente em duas vertentes, eletricidade e magnetismo, até os dias atuais onde nos proporcionam inovadoras tecnologias.

No capítulo 1, relata-se o início dos estudos da eletricidade e magnetismo, até o descobrimento da relação entre ambos. São citados trabalhos de Christian Oersted, André Marie Ampère, Michael Faraday, e algumas das figuras de renome da ciência do século

passado. No capítulo 2, mostra-se matematicamente a essência das quatro equações de James Clerk Maxwell. No capítulo 3, é apresentada a aplicação do conhecimento científico do eletromagnetismo, a tecnológicas importantes e suas mudanças diante da sociedade.

## 1. PRIMEIROS INDÍCIOS DO MAGNETISMO

### 1.1 Antiguidade (600 a.C. e 1100 d.C)

A palavra magnetismo está associada ao fenômeno pelo qual um ente tem o poder de atrair e enunciar outro ente. Sua origem está ligada ao nome de uma cidade da região da antiga Turquia, que era rica em minério de ferro, a Magnésia. Este mineral que no seu estado natural, freqüentemente têm o poder de atrair o ferro e outros metais, era extraído na província da Ásia menor. (PAVAN, 2000, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22)

Provavelmente foram os gregos, quem primeiro repetiram sobre as propriedades da magnetita ( $Fe_2O_4$ ). O pensamento e a filosofia grega dominaram todo conhecimento neste tema nos vinte e três séculos seguintes. Pois uma característica da filosofia grega era de não buscar a explicação e predição das maravilhas da natureza, mas sim compreendê-las no campo das idéias.

Por volta do ano 600 a.C o filósofo grego chamado Thales de Miletus (640-550 a.C.) notou que ao esfregar um pedaço de âmbar a um pedaço de lã, o mesmo ganhava propriedades de atração e, deste modo, atraia os pedaços de palha. Thales também descobriu a existência desta mesma propriedade do âmbar em uma pedra encontrada na Magnésia, sendo que a diferença entre elas seria de que essa pedra não precisaria ser atritada para ficar magnetizada. A partir desta descoberta, Thales passou a conhecer os efeitos atrativos da pedra da Ásia. Segundo estudos, nesta pedra há um tipo de óxido de ferro, a qual foi batizada de magnetita em homenagem ao pastor chamado Magnes que percebeu que as pedras grudavam em seu cajado de ferro. (BASSALO, 1996, p. 26)

A partir desta descoberta os estudiosos atribuíram as propriedades da magnetita à existência de umidade no ferro, da qual a secura da magnetita (ímã) se alimentava. A idéia

dos ímãs se alimentarem da umidade do ferro era também uma superstição, já se pensava em dois elementos: a umidade e a secura que representariam dois elementos opostos que se complementaríamos como os pólos norte e sul. O poder que o ferro magnetizado possui de atrair e repelir pedaços de ferros também era conhecido por Platão (428/7 a.C – 348/7 a.C) e Tito Lucretius Caro (99 a.C – 55 a.C) que provavelmente estariam entre os primeiros a perceber que os materiais magnéticos poderiam também se repelir; tais fatos aguardavam a elaboração de um conceito de pólo magnético para uma melhor explicação. (BASSALO, 1996, p. 26)

A primeira aplicação tecnológica magnética é a bússola; o período e o lugar de seu surgimento é assunto de disputa entre historiadores. Segundo Bassalo (1996) provavelmente o lugar foi a China, por volta do ano 215 a.C. e segundo Pavan (2000), afirma que a bússola foi introduzida na China em algum tempo entre 2637 a.C e 1100 d.C, e os pioneiros na sua utilização foram os Árabes. Entretanto todos concordam que a bússola era certamente conhecida no oeste da Europa por volta do século XII, pois a primeira referência sobre a sua utilização foi feita por Alexander Neckma (1157-1217).

## 1.2 Idade Média (476 – 1453)

Na Idade Média, Petrus Peregrinus (1240 – ?), engenheiro militar francês, produziu uma obra intitulada *Epístola de Magnete*, onde relata experiências com o magnetismo, talvez este seja o primeiro trabalho, da qual temos notícias, que buscava explicar os fenômenos elétricos e magnéticos. Peregrinus não fazia, porém, distinção entre os diferentes tipos de atração: a magnética e a elétrica. Essa obra permaneceu ignorada até meados do século XVI. Em 1269, Peregrinus fez experiências com uma magnetita esférica, colocando pedaços de ímã em várias regiões e traçou as linhas de campo magnético que se interceptavam em dois pontos. Estes pontos foram chamados de pólos do ímã, como analogia aos pólos geográficos da terra, sendo que o pólo sul de um ímã aponta aproximadamente para o pólo norte do planeta. (BASSALO, 1996, p. 45; PAVAN, 2000)

De acordo com Bassalo (1996), no mesmo ano, Peregrinus em uma carta a um amigo, descreve a maioria das experiências elementares sobre magnetismo, que aparecem até hoje nos livros escolares de ciências, foi ele quem determinou o pólo norte e o pólo sul, das extremidades do ímã, baseando-se na orientação natural da bússola. Ele também observou que a agulha da bússola não apontava exatamente para o norte geográfico da terra devido o norte

da bússola apontar para o sul geográfico da terra. Ainda nesta perspectiva tem-se as descoberta dos seguintes elementos:

- aproximando-se dois ímãs pelos seus pólos de mesmo nome, eles se repelem;
- aproximando-se pelos pólos opostos, eles se atraem;
- um ímã, partido matém a polaridade do ímã original;
- cada divisão de um ímã faz surgirem outros ímãs, em outras palavras, não existe monopólo magnético.

Peregrinus acreditava que a bipolaridade estivesse ligada a todo o universo, o ímã trazendo em si "a semelhança do céu". Petrus permaneceu praticamente desconhecido por mais de trezentos anos.

### 1.3 Idade Moderna (1453 – 1789)

Dos filósofos naturais que estudaram o magnetismo, o que mais se destacou foi o Willian Gilbert de Colchester (1544 – 1603), chamado como “Pai do Eletromagnetismo”, pois este sintetizou as teorias do assunto, e reuniu suas conclusões no livro *De Magnete*, um dos primeiros clássicos da literatura científica. Gilbert sabia que os antigos navegadores já relatavam que os raios desviavam as agulhas das bússolas, porém propôs que ambos seriam efeitos distintos apesar de provocarem atração e repulsão. Ele idealizou a experiência de Peregrinus com a magnetita esférica como sendo um modelo atual da Terra e assim foi o primeiro a afirmar que a Terra é um ímã, ou seja, que a Terra possui um campo magnético próprio e também descobriu a imantação por indução.

## 1.4 Surgimento da eletricidade (séc. XV - XVIII)

### 1.4.1 Idade Moderna (1453 – 1789)

Por volta de 1570, um inglês chamado William Gilbert (1544 – 1603), físico, médico e pesquisador no campo do magnetismo e eletricidade, passou a se interessar pelo ímã e logo depois pelo âmbar. Ele já conhecia as propriedades do ímã o que já lhe intrigava muito e depois passou a se perguntar: “por que o âmbar atraía objetos depois de friccionado?”, “Que haveria de especial nele?” Gilbert, não ignorava que o âmbar era chamado de “elektron” em grego, e de “electrum”, em latim. Por isso chamou todas as substâncias que tinham a capacidade de atrair coisas depois de friccionadas de “elétricas”. Usou a palavra para mostrar que tinham a mesma propriedade do âmbar. Por volta de 1650 um inglês, médico e escritor, de nome Walter Charleton (1619 – 1707) chamou-a de “eletricidade”.

Na mesma época, um físico alemão chamado de Otto Von Guericke (1602 - 1686), que se notabilizou pelo estudo do vácuo e da eletrostática, friccionou um pedaço de âmbar com um pano o máximo que pôde e quando o pressionava entre os dedos, ouvia pequenos estalos. Se o fizesse na escuridão percebia uma pequena fagulha de luz a cada estalo. Não satisfeito, Guericke usou em 1672, uma substância amarela chamada enxofre, que era uma substância que atraía objetos leves quando friccionada. Ele pegou uma grande quantidade de enxofre e os colocou num frasco redondo de vidro e o aqueceu derretendo o enxofre. Foi adicionando mais e mais enxofre, até que o frasco ficou cheio. Então atravessou o enxofre com uma manivela de madeira e o deixou esfriar. O enxofre endureceu, formando uma sólida bola amarela e a colocou num suporte de madeira. Podia girá-la usando a manivela. Se pusesse a outra mão sobre a bola de enxofre enquanto girasse a fricção a encheria de eletricidade. A bola de enxofre provocava altos estalos quando “carregada”, provocava fagulhas brilhantes, visíveis mesmo à luz do dia. (BASSALO, 1996, p. 45)

Em 1629, o físico italiano Niccolo Cabeo (1586 – 1650), publicou o livro intitulado *Philophia magnetica in qua magnetis natura penitus explicatur, et omnium quae hoc lapide cernuntur, cuasae propriae afferentur*, no qual registrou, talvez pela primeira vez, o fenômeno da repulsão elétrica entre corpos eletrizados. (BASSALO, 1996, p. 121)

Em 1736 o cientista Stephen Gray (1679 – 1736) friccionou um tubo longo e oco de vidro com mais ou menos um metro de comprimento. O tubo atraiu penas, mostrando que a eletricidade havia penetrado nele. Depois vedou o tubo com rolhas de cortiça e então notou um fato estranho: as penas eram atraídas para as rolhas também. Então introduziu a ponta de uma vareta de uns dez centímetros de comprimento numa das rolhas do tubo. A outra ponta da vareta foi presa a uma bola de marfim, depois, friccionou somente o vidro. Trabalhou com cuidado, evitando tocar na rolha, na vareta ou na bola de marfim e as penas agarraram-se à bola de marfim, ao ser friccionado o tubo. Não havia engano: o cientista inglês descobriu que era possível transferir para outros corpos a eletricidade produzidas no vidro, por atrito, através de um grupo de materiais.

Stephen Gray concluiu que era capaz de transferir a carga elétrica de um bastão de vidro para uma bola de marfim pendurada por um barbante e também observou que a transferência de carga não ocorria se a bola fosse pendurada por um fio metálico. Portanto percebeu que o metal “levava embora” o fluido (cargas) e concluiu que existem substâncias condutoras, que são os metais e soluções iônicas, que permitem o fluxo livre do fluido e os isolantes que não permitem esse fluxo de fluido. Logo Gray foi o descobridor da eletrização por indução e dava preferência à eletrização em corpos metálicos. (BASSALO, 1996, p. 298-299 pass.)

Após a experiência de Gray que mostrava que podia produzir e armazenar a eletricidade, surgiram outras propriedades interessantes. William Watson (1715-1787), médico e cientista, conseguiu transmitir a eletricidade por mais de 3 km e admitiu que a transmissão fosse instantânea.

No mesmo período, Benjamim Franklin (1706 - 1790) ficou conhecido internacionalmente por descobertas feitas sobre a eletricidade através da sua experiência altamente perigosa. Fez uma pipa e com um objeto de ferro preso a ela fez voar durante uma tempestade, induzindo uma descarga elétrica a acertar a pipa. Esse experimento levou-o a provar que o relâmpago é um fenômeno elétrico, e posteriormente a criação do pára-raios, foi quem criou a terminologia de que cargas positivas e negativas e também disse que cargas de mesmo sinal se repelem e cargas de sinais opostos se atraem.

Em 1759, o físico russo Franz Maria Ulrich Theodor Hoch Aepinus (1724 – 1802) publicou o livro intitulado *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi* (Uma

*Tentativa Teórica da Eletricidade e Magnetismo*), considerado como sendo o primeiro trabalho sobre a aplicação da matemática para explicar a eletricidade e magnetismo. Com efeito, nesse livro, Aepinus usou a teoria de um fluido elétrico desenvolvida por Franklin, entre 1747 e 1748, para explicar as propriedades magnéticas dos “pólos” dos ímãs se deviam a falta ou excesso de um **fluido magnético**, cujas partículas repeliam uma a outra, assim como atraíam partículas de ferro e aço. Ainda nesse livro Aepinus afirmou que o magnetismo permanente do ímã era devido ao emaranhamento desse fluído nos poros desse mesmo ímã, e que a indução elétrica nos isolantes era mais fraca do que nos condutores. (BASSALO, 1996, p. 303-304 pass.)

Luigi Galvani (1737 - 1798) médico, investigador e professor de anatomia, descobriu a corrente elétrica, mas foi em 1800 que o físico italiano Alessandro Giuseppe Antônio Anastásio Volta (1745 – 1827), apaixonado por assuntos sobre eletricidade, desenvolveu a pilha voltaica, provando a Galvani, seu amigo, que a corrente elétrica não estava nos seres vivos. Nessas experiências, idealizou uma série de recipientes contendo salmoura, nos quais mergulhou placas de zinco e cobre e, ao ligá-las através de arcos metálicos, conseguiu produzir uma corrente elétrica contínua. (BASSALO, 1996, p. 308-309 pass.)

## 1.5 Os primeiros indícios da relação entre eletricidade e magnetismo

### 1.5.1 Século XIX

A existência de forças naturais de origem elétrica e magnética fora observada em contextos históricos independentes, mas só na primeira metade do século XIX um grupo de pesquisadores conseguiu unificar os dois campos de estudo e assentar os alicerces de uma nova concepção da estrutura física dos corpos.

Depois da publicação do livro *Epistola de Magnete*, pouco foi acrescentado ao estudo do magnetismo. Até o início do século XIX, havia indícios de que, mesmo vistos como fenômenos diferentes, a eletricidade e o magnetismo se relacionavam de alguma forma. A descoberta da relação, porém, só veio a ocorrer depois do aparecimento da pilha, que oferecia uma fonte mais duradoura de eletricidade, permitindo o aprofundamento do seu estudo. Um dos primeiros a descobrir e a publicar as relações entre corrente elétrica e o magnetismo foi um jurista e economista italiano, Gian Domenico Romagnosi (1761 – 1835) que em 1802

afirmou que um fio conectado a uma pilha provocava um desvio na agulha de uma bússola que estivesse próxima. No entanto essa notícia não recebeu o crédito que lhe era devido.

No final do século XVIII um engenheiro de nome Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) e um físico-químico Henry Cavendish (1731 – 1810) haviam determinado as leis empíricas que regiam o comportamento das substâncias eletricamente carregadas e o dos ímãs. Coulomb também publicou sete tratados sobre a eletricidade e magnetismo e estabeleceu a relação entre força elétrica, quantidade de carga e distância através do método de força de torção.

Embora a similaridade entre as características dos dois fenômenos indicasse uma possível relação entre eles, só em 1820 se obteve prova experimental dessa relação, quando o físico e químico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777 - 1851), durante uma aula de eletricidade na Universidade de Copenhague aproximou uma bússola de um fio de arame que unia os dois pólos de uma pilha elétrica. Ele descobriu que a agulha imantada da bússola deixava de apontar para o norte, orientando-se para uma direção perpendicular ao arame. (BASSALO, 1996, p. 311-312 pass.)

Após a divulgação do trabalho de Oersted, a reação mais comum dos físicos foi de incredulidade perante o fenômeno. Não porque fosse incrível uma relação entre eletricidade e magnetismo, pelo contrário, isso era perfeitamente aceitável. O que não se podia conceber era aquele campo magnético circulando em torno do fio.

Entre os vários efeitos que essa reação produziu, pode-se citar a própria direção tomada pelos trabalhos do físico e matemático André Marie Ampère (1775 - 1836). Achando absurda a teoria de Oersted, Ampère procurou reduzir o eletromagnetismo à eletrodinâmica, tomando como fenômeno básico a interação entre correntes, e explicando o magnetismo como efeito secundário de correntes circulares. Na opinião de Ampère, a grande vantagem dessa abordagem é que as forças entre correntes elétricas são de simples atração e repulsão, desaparecendo a quebra de simetria, pois o próprio ímã se torna sede de um fenômeno de rotação que permite explicar o sentido do deslocamento da bússola. Ampère procurou banir da física o conceito de campo magnético o que, em geral, não era conhecido. (BASSALO, 1996, p. 313)

Em 1825, Ampère preparou um trabalho intitulado *Mémoria sobre a Teoria dos Fenômenos Eletrodinâmicos Unicamente deduzidas da Experiência*, no qual registrou novas experiências realizadas sobre o efeito magnético da corrente elétrica, obtendo resultados importantes como, por exemplo, a ação do campo magnético terrestre sobre as correntes elétricas. Para medir tal efeito, construiu um aparelho baseado na deflexão da agulha magnética, denominando-o **galvanômetro**. Por outro lado, para indicar a direção que tomaria uma agulha imantada colocada nas proximidades de um fio condutor, Ampère idealizou uma regra, hoje, conhecida como **regra da mão direita de Ampère**. Então assim, Ampère foi desenvolvendo a cada semana um trabalho sobre suas pesquisas e logo fundou e batizou a eletrodinâmica, que hoje chamamos eletromagnetismo. Formulou a Lei de Ampère, que descreve matematicamente a força magnética entre correntes elétricas. (BASSALO, 1996, p. 313,8)

Os efeitos magnéticos das correntes elétricas agora forneciam meios para se medir suas intensidades e em 1826, o físico matemático Georg Simon Ohm (1787 - 1854) usou estes fatos para separar os conceitos de força eletromotriz, gradiente de potencial e de intensidade de corrente elétrica e derivou a lei que leva seu nome e que estabelece a proporcionalidade entre a diferença de potencial em um condutor e a corrente elétrica produzida. O fator de proporcionalidade representa a resistência do material. Provou também que a resistência de um fio é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional a sua seção reta, criando assim a base para o conceito de condutividade dos materiais. (BASSALO, 1996, p. 317,9)

Em 30 de outubro de 1820, os físicos Jean Baptiste Biot (1774 – 1862) e Félix Savart (1791 – 1841), anunciaram a descoberta experimental que fizeram sobre a lei que permite calcular a intensidade do campo magnético criado por uma corrente elétrica que circula em um fio condutor. (BASSALO, 1996, p.313)

Em 1813, o matemático e físico alemão Johann Friedrich Karl Gauss (1777 - 1855), que publicou seu famoso trabalho no qual demonstrou um teorema envolvendo integrais de superfície e de volume, segundo o qual, diz que, o fluxo de um vetor através de uma superfície que envolve um determinado volume pode ser calculado através da integral de volume da divergência daquele vetor, esse teorema ficou conhecido como teorema da divergência. Em 1830, Gauss desenvolveu sua teoria do campo magnético terrestre na qual

considerou o pólo magnético norte (boreal) da terra como situado no arquipélago chamado Passo do Noroeste e em 1832, formulou um sistema de unidades magnéticas, a partir de unidades mecânicas, também incluiu a lei de Coulomb um tratamento matemático geral da lei do inverso do quadrado da distancia.

#### 1.6 A unificação da eletricidade com o magnetismo

“O matemático italiano Girolano Gardano (1501 – 1576) foi um dos primeiros cientistas a fazer diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos”. (BASSALO, 1996, p. 119)

Surge Michael Faraday (1791-1867), então, aquele que se tornaria o maior físico experimental em eletricidade e magnetismo do século XIX. Faraday realizou uma série de experiências que o levaram a apresentar a seguinte idéia: - “Se a corrente elétrica atua em um ímã, então este deve produzir uma reação nessa mesma corrente”, e em 1831 enrolou duas espiras de fio em torno de um anel de ferro e observou que a corrente exercia uma ação para trás que correspondia a sua ação magnética. Quando ele criou uma corrente elétrica na primeira espira, um pulso de corrente surgiu na segunda espira no instante em que o circuito foi fechado, e novamente quando o circuito foi aberto, porém no sentido contrário. Assim esta ligação entre campo magnético e campo elétrico produzido é hoje chamada de Lei de Indução de Faraday. (BASSALO, 1996, p. 119)

Pouco depois de Faraday propor a lei da indução, Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) inventou uma regra o qual acabava com alguns problemas de direção da corrente induzida: “a corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente”. Que em 1833 ficou conhecida como “Lei de Lenz”. Observa-se que para chegar a esse resultado, Lenz utilizou as ações mecânicas entre os circuitos, e analisou-as por intermédio das leis da Mecânica. Ainda como resultado dessas experiências, Lenz descobriu que a resistência de um fio metálico variava com a temperatura. (BASSALO, 1996, p. 324)

O edifício teórico do eletromagnetismo, base de todos os desenvolvimentos da eletrotécnica, foi definitivamente estabelecido em 1873 pelas mãos do físico e matemático britânico James Clerk Maxwell (1831-1879), no qual deu forma final à teoria moderna do

eletromagnetismo, que une a eletricidade, o magnetismo e a óptica. Maxwell une as descobertas de Coulomb, Oersted, Gauss, Ampère e Faraday, entre outros físicos, em quatro equações matemáticas, chamadas posteriormente de Equações de Maxwell, que sintetizaram essa área do saber.

## 2. AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

Estudamos diversos aspectos dos campos elétricos e magnéticos. Quando os campos não variam com o tempo, como no caso de campos elétricos produzidos por cargas em repouso ou de campos magnéticos gerados por correntes estacionárias, podemos analisar os campos elétricos e magnéticos separadamente sem considerar as interações entre esses campos. Porém, quando ocorrem variações temporais, eles deixam de ser independentes. Essa interação envolvendo todas as relações entre campos elétricos e campos magnéticos é sintetizada completamente pelas quatro equações de Maxwell, A *Lei de Gauss para eletricidade*, *Lei de Gauss para o magnetismo*, *Lei de Faraday* e a *Lei de Ampère-Maxwell*. Faremos uma observação que, Maxwell não descobriu essas quatro equações, porém as reuniu e explicou o significado delas, particularmente ao prever a existência de ondas eletromagnéticas.

### 2.1. A lei de Gauss para o Campo Elétrico

A lei de Gauss para eletricidade relaciona o fluxo total de um Campo Elétrico através de uma superfície fechada (superfície Gaussiana) à carga total  $q$  que é envolvida por esta superfície. Porém, para entendermos a essência de Lei de Gauss para o Campo Elétrico, temos que entender o conceito de Campo Elétrico e Fluxo de um Campo Elétrico.

Para entendermos o conceito de Campo Elétrico, vamos considerar uma carga elétrica positiva ( $q$ ), fixada em um dado ponto do espaço. Caso outra carga elétrica ( $q_0$ ) seja colocada na região da carga ( $q$ ), qualquer que seja a distância entre elas, haverá uma interação entre as cargas, onde essa interação é devido à força eletrostática. A força eletrostática é atribuída ao campo elétrico produzido pela carga ( $q$ ), como ilustra a figura 1.

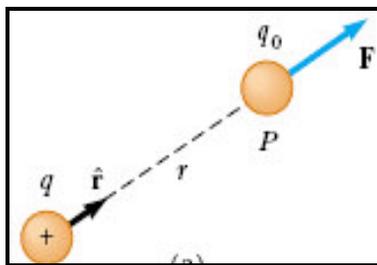


Figura 1: Uma carga  $q$  interagindo com uma carga  $q_0$

Fonte: Physics for Scientists and Engineers. Serway Raymond A. pg. 717

O cientista Michael Faraday introduziu a idéia de linhas de força. Ele imaginava que o espaço na vizinhança de um corpo eletricamente carregado era ocupado por linhas de forças, hoje conhecidas como linha de Campo Elétrico. Em cada ponto em torno do corpo eletricamente carregado teriam linhas que tem a mesma direção e mesmo sentido do vetor Campo Elétrico. Se imaginarmos certa quantidade de linhas de Campo passando por uma determinada área (por exemplo, um quadrado), temos a idéia de Fluxo Elétrico.

Devemos salientar que o campo elétrico é um campo vetorial, constituído por uma distribuição de vetores, um para cada ponto de uma região em torno de um objeto eletricamente carregado.

Usando a definição de Fluxo e Campo Elétrico, podemos escrever a Lei de Gauss para o Campo Elétrico como:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{q_{total}}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Onde  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico,  $d\vec{a}$  é o vetor do elemento de área,  $q_{total}$  é a carga total envolvida pela superfície e  $\epsilon_0$  é a permissividade do meio (o quanto o meio afeta o campo elétrico), nesse caso no vácuo.

A unidade de Campo Elétrico no Sistema Internacional é o Newton por Coulomb (N/C). Existe também outra unidade, volt por metro (V/m).

## 2.2 A lei de Gauss para Campo Magnético

Tal qual o campo elétrico, o campo magnético é um campo vetorial, relacionando o fluxo magnético às cargas magnéticas envolvidas. Definimos o fluxo magnético  $\Phi_B$  através de uma superfície de modo análogo a descrição do fluxo elétrico relacionando com a lei de Gauss. Podemos dividir qualquer superfície em elementos de área  $da$ . Para cada elemento determinamos  $\vec{B}_\perp$ , o componente de  $\vec{B}$  normal à superfície de elemento, temos  $\vec{B}_\perp = B \cos \phi$ . Em geral esse componente varia sobre a superfície.

Na lei de Gauss, o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é proporcional a carga elétrica total existente no interior da superfície. Por exemplo, quando a superfície fechada engloba um dipolo elétrico, como indicado na figura 2, o fluxo total é zero porque a carga total é igual a zero. Por analogia, o fluxo magnético total através de uma superfície fechada seria proporcional à carga magnética no interior da superfície fechada, como na figura 3. Conclui-se então que o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é sempre igual a zero.

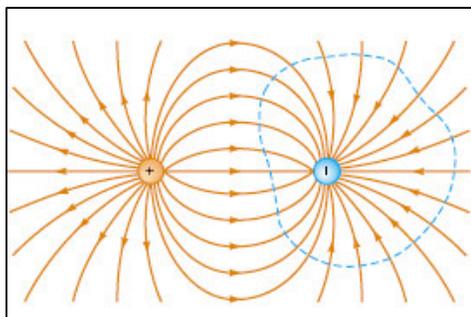


Figura 2: Linhas de campo elétrico de um dipolo elétrico  
Fonte: Physics for Scientists and Engineers. Serway Raymond A. pg. 942

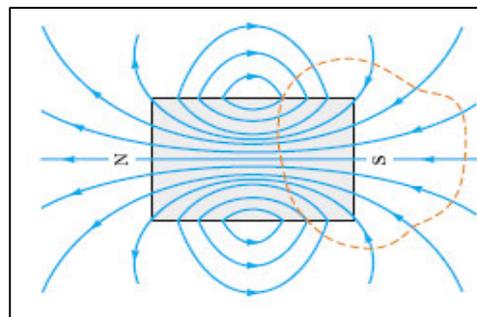


Figura 3: Linhas de campo magnético de um ímã.  
Fonte: Physics for Scientists and Engineers. Serway Raymond A. pg. 942

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad (2.2)$$

Onde  $\vec{B}$  é o vetor campo magnético,  $d\vec{a}$  é o vetor do elemento de área.

A unidade do Campo Magnético no Sistema Internacional é o Newton por Coulomb - metro por segundo. Por conveniência, esta unidade é chamada de tesla ( $T$ ), também pode ser chamada de Gauss ( $G$ ).

### 2.3 Lei de Ampère

É possível de um modo mais prático determinar um campo magnético total produzido por qualquer distribuição de correntes. Entretanto, se a distribuição possuir algum tipo de simetria, a lei que nos permite fazer isso, é a Lei de Ampère. A lei não é formulada em termos de um fluxo magnético, mas definida com base em uma integral de linha de  $\vec{B}$  em torno de uma trajetória fechada, como na figura 4. Para generalizá-la ainda mais, considere diversos fios retilíneos longos que passam na área delimitada pelo percurso de integração. Portanto, podemos substituir  $I$  por  $I_{total}$ , a corrente total dada pela soma algébrica das correntes no interior pelo percurso de integração, enunciando a Lei de Ampère é:

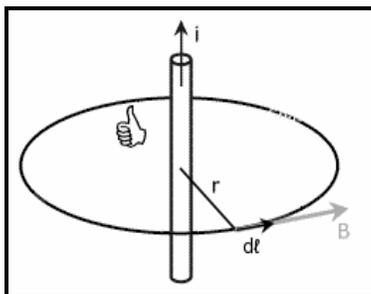


Figura 4: Percurso para a integral de linha de B ao redor de um condutor retilíneo.

Fonte:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I_{total} \quad (2.3)$$

Onde  $\vec{B}$  é o vetor campo magnético,  $d\vec{l}$  é o vetor do elemento de linha,  $\mu_0$  é a permeabilidade do material (grau de magnetização) e  $I_{total}$  é a corrente total envolvida pelo percurso de integração.

### 2.4 Lei de Faraday

A lei de indução, fenômeno comum em todos os efeitos de indução, é a variação do fluxo magnético através de um circuito. Faraday percebeu que uma força eletromotriz e uma corrente são induzidas em uma espira, fazendo variar a quantidade de campo magnético que atravessa a espira, como na figura 5. Percebeu ainda que a quantidade de campo magnético possa ser visualizada em termos das linhas de campo magnético que atravessam a espira.

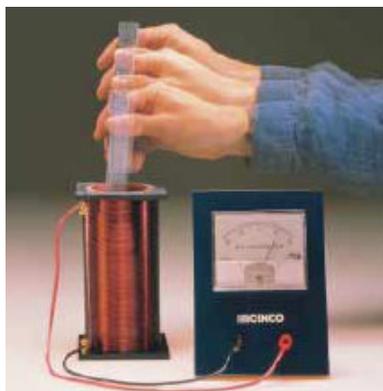


Figura 5: Um ímã aproximando-se de um solenóide ligado à um amperímetro.  
 Fonte: Physics for Scientists and Engineers. Serway Raymond A. pg. 979

Para aplicar a lei de Faraday a problemas particulares, precisamos saber calcular a quantidade de campo magnético, que atravessa uma espira, e também calcular a quantidade de campo elétrico, que a travessa a superfície. Usando a definição de fluxo magnético, podemos enunciar a Lei de Faraday.

A força eletromotriz (fem) induzida se opõe a variação de fluxo, de modo que, matematicamente, a lei de Faraday pode ser escrita na forma:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.4)$$

Onde  $\frac{d\Phi_B}{dt}$  é a taxa de variação do fluxo magnético em relação ao tempo e  $\mathcal{E}$  é a força eletromotriz induzida.

Mas para entendermos o sinal, precisa-se entender que, quando o fluxo está aumentando, é positivo, então a fem induzida ou a corrente é negativa; quando o fluxo esta diminuindo, é negativo e a fem induzida ou a corrente é positiva.

Para uma forma mais abrangente da Lei de Faraday, supomos que para uma corrente em um anel de cobre, deve haver um campo elétrico para colocar os elétrons de condução em movimento. Este campo elétrico induzido  $\vec{E}$ , produzido pela variação do fluxo magnético, é então real quanto o campo elétrico produzido por cargas estáticas; os dois tipos de campos exercem uma força elétrica ( $\vec{F} = q\vec{E}$ ) em uma partícula de carga  $q_0$ . Por esse raciocínio somos levados a um enunciado mais geral da Lei de Faraday.

### 2.4.1 Um Campo Magnético variável produz um Campo Elétrico

A figura 6 ilustra um anel submetido em um campo magnético variável gerando um campo elétrico induzido. O trabalho  $W$  realizado pelo campo elétrico induzido sobre as cargas do anel em revolução é  $W = \mathcal{E} \cdot q_0$  e, portanto, este é o trabalho realizado pela carga para realizar essa trajetória. Entretanto, por definição, o trabalho também é dado por:

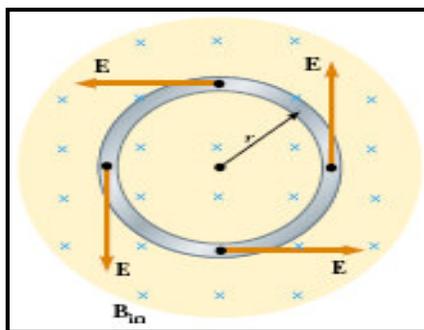


Figura 6: um anel mergulhado em um campo magnético variável.  
Fonte: Physics for Scientists and Engineers. Serway Raymond A. pg. 981

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (2.5)$$

O círculo nos sinais de integral indicam que a integral deve ser calculada para uma curva fechada. Substituindo o  $W$  por  $\mathcal{E}q_0$ , temos:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.6)$$

Já que a equação acima permite expandir o significado da força eletromotriz induzida, até agora, a força eletromotriz induzida era vista como trabalho por unidade de carga necessária para manter a corrente produzida pela variação de um campo magnético ou pelo trabalho por unidade de carga executado sobre uma partícula carregada que se move em uma região onde existe um fluxo magnético variável. Entretanto pode existir uma força eletromotriz induzida sem necessidade de que haja uma corrente ou uma partícula: a força eletromotriz induzida é a soma (por integração) do produto escalar  $\vec{E} \cdot d\vec{l}$  ao longo de uma curva fechada, onde  $\vec{E}$  é o campo elétrico induzido pela variação do fluxo magnético e  $d\vec{l}$  é o elemento de comprimento ao longo da curva.

Combinando as equações as equações (2.4) e (2.6) obtemos uma nova expressão para a lei de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.7)$$

A nova equação, Lei de Faraday, pode ser aplicada a qualquer curva fechada que possa ser traçada em uma região onde existe um campo magnético variável.

### 3. APLICAÇÕES TECNOLOGIAS DO ELETROMAGNETISMO

As descobertas no campo da eletricidade dos primeiros anos do século XIX levaram à invenção de uma quantidade de aparelhos úteis. Assim como as primeiras máquinas a vapor, essas invenções baseavam-se mais na observação e no conhecimento prático do que na compreensão verdadeira da teoria. A teoria veio mais tarde, fornecendo uma visão mais profunda, que levou a grandes melhoramentos nos aparelhos elétricos e a um fantástico aumento do número de tarefas que a eletricidade podia realizar.

As aplicações do eletromagnetismo revolucionaram toda a tecnologia industrial. Iluminação, transportes, computação, entretenimento, funcionam com base na energia elétrica, na “fada eletricidade”, como foi chamada no início deste século. Ondas eletromagnéticas (rádio, radar, televisão) são empregadas em todos os nossos sistemas de comunicação. (NUSSENZVEIG, 2003)

#### 3.1 Telégrafos

Antigamente eram usados diferentes sistemas para comunicação, desde sinais de fumaça a comunicação feita com materiais que refletiam a luz do sol. A partir do final do século XIX, surge um método mais seguro, vantajoso e econômico para a comunicação, o Telégrafo, um aparato que transmite mensagens codificadas em largas distâncias mediante impulsos elétricos que circulam através de cabos condutores.

O Telégrafo foi a invenção que mais ajudou o eletromagnetismo a se desenvolver. Muitos cientistas trabalharam com o telégrafo, entre eles: Wilhelm Weber, Karl Friedrich Gauss, Werner von Siemens, Charles Wheatstone e Samuel Finley Breese Morse, cada um criando seu tipo de telégrafo.

Temos que ressaltar que ao longo dos anos surgiram vários tipos de telégrafos, porém, todos com um único objetivo: a comunicação, seja ela direta ou codificada. Daremos ênfase ao telégrafo de Morse (ilustrado pela figura 7), tecnologia que foi muito usada em guerras, que serviu de aparelho de comunicação entre as tropas militares.

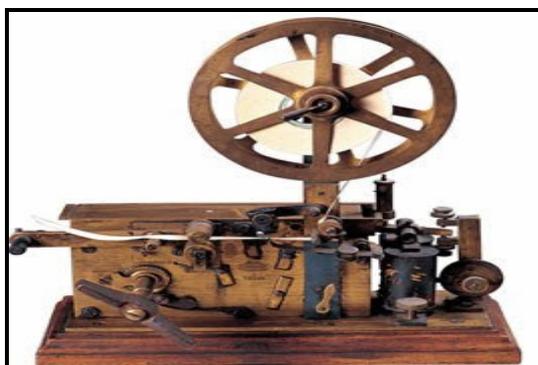


Figura 7: Telégrafo de Morse.

Fonte: [www.kalipedia.com/tecnologia/tema/telegrafomorse](http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/telegrafomorse)

### 3.1.1 Fundamentação teórica do telegrafo de Morse

Em 1832, Samuel F. B. Morse, artista americano, retornava da Europa em um navio paquete. Tinha lido uma publicação recente de Faraday sobre o eletromagnetismo e fez planos para construir um instrumento telegráfico de gravação. Três anos mais tarde, construiu um modelo experimental baseado no famoso código de pontos e traços que ainda hoje leva seu nome. Os pontos e os traços distinguem-se por 'largura' de pulsos de corrente, longos e curtos. Um ponto correspondia a um pulso de duração de cerca de 1/24 de segundo; os traços eram cerca de três vezes mais longos, como ilustra a figura 8.

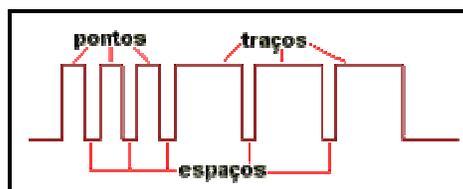


Figura 8: Pontos e Traços do código de Morse.

Fonte: [www.feiradeciencias.com.br](http://www.feiradeciencias.com.br)

As partes principais do telégrafo de Morse como ilustrado pela figura 9 são:

- o aparelho transmissor, constituído de um interruptor por meio do qual, baixando-se uma tecla, pode-se fechar o circuito da corrente;
- o aparelho receptor, constituído de um eletroímã, cujo enrolamento é percorrido pela corrente elétrica, e de uma alavanca, que traz numa das extremidades uma âncora, situada diante do núcleo do imã, e na outra extremidade uma ponta, sob a qual corre uma tira de papel envolta num vidro;
- uma bateria de pilhas para fornecer a corrente.

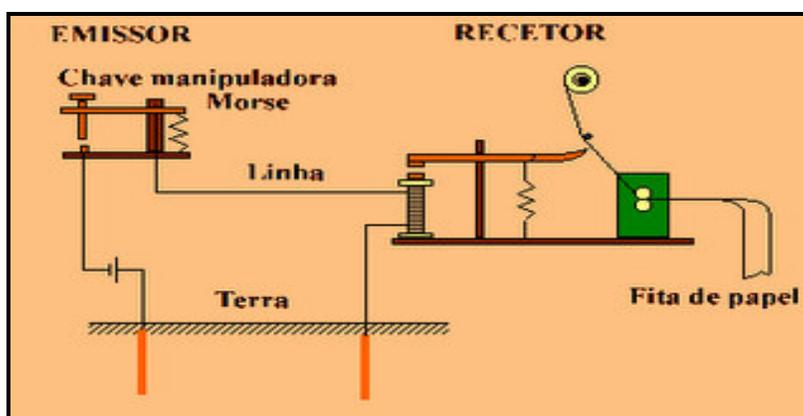


Figura 9: Esquema de funcionamento do telégrafo de Morse.  
Fonte: [www.feiradeciencias.com.br](http://www.feiradeciencias.com.br)

O fio da linha sustentado por postes telegráficos nos quais está fixado por meio de isoladores de porcelana ou de vidro. Para transmitir um telegrama aperta-se a tecla do transmissor: a corrente do circuito passa através do fio do eletroímã do receptor, que se magnetiza, atrai a âncora e aproxima a ponta da alavanca da fita de papel que corre debaixo dela. Esta ponta imprimindo sobre o papel, assinala um ponto se o contato do transmissor for instantâneo e uma linha, se o contato for prolongado. Por meio de pontos e linhas, pode-se formar um alfabeto convencional.

O coração do aparelho de recepção de Morse era um eletroímã que fazia um lápis deslocar-se quando recebia o pulso de uma corrente elétrica. O lápis estava em contato com um rolo de papel em deslocamento e traçava uma linha reta sobre o papel, quando nenhum sinal estava sendo recebido. Recebendo uma corrente, o lápis deslocava-se para o lado, voltando à posição neutra quando a corrente caía à zero. Dessa maneira, uma seqüência em

que a corrente era ligada e desligada ocasionava um traçado. Se a corrente permanecesse ligada por  $1/24$  do segundo, um “ponto” era traçado pelo lápis. Se ficasse ligada durante  $3/24$  do segundo, era desenhado um “traço”. O telégrafo gravador de Morse provia, assim, um registro permanente das mensagens, que mais tarde podiam ser decodificadas.

### 3.1.2 Contribuições para sociedade

Após sua invenção a rede de telégrafo cruzou os oceanos a cada continente, fazendo de imediato uma comunicação global pela primeira vez. Seu desenvolvimento permitiu que os jornais cobrissem eventos significativos do mundo em tempo real próximo.

O operador telegráfico Morse foi uma parte indispensável do cenário mundial durante mais de meio século. Até ser deslocado pelas máquinas automáticas modernas, ele desempenhou uma grande função nos tempos de guerras fazendo comunicações de informações sigilosas entre tropas militares, e também foi vital para o crescimento de uma nação. Podia transmitir e receber até quarenta palavras por minuto, hora após hora, com um *staccato* (separador de notas) de ruídos intermitentes. Sua habilidade, ao lado do telégrafo de Morse, tornará realidade o sonho das comunicações a longa distância.

### 3.2 Trem bala (MagLev)

Engarrafamento em rodovias e estradas, congestionamentos e atrasos em aeroportos tornam-se cada vez mais frequentes, porém, os aviões ainda propiciam a maneira mais rápida de viajar centenas ou milhares de quilômetros. A viagem aérea revolucionou a indústria de transporte no último século, permitindo que pessoas percorram grandes distâncias em uma questão de horas em vez de dias ou semanas.

As únicas alternativas ao invés de aviões hoje são: andar a pé, carro, ônibus, barco e trem convencional. Estes meios são muito lentos para a sociedade apressada de hoje. Entretanto, há uma forma que pode revolucionar o transporte do século XXI da mesma maneira que os aviões fizeram no século XX.

Alguns países estão usando uma nova tecnologia para desenvolver trens de alta velocidade e com um custo menor que os trens usuais, chamados trens maglev. O maglev é

um trem que funciona através da levitação magnética, o que significa que esses trens vão levitar sobre um trilho usando os princípios básicos dos ímãs para substituir as antigas rodas de aço e trens de trilhos.

### 3.2.1 Fundamentação teórica do trem bala

Hoje, existem vários protótipos de trens maglev construídos, trens que utilizam idéias diferentes para conseguir a levitação magnética. Existem três principais métodos para se conseguir à levitação magnética de trens:

- levitação por repulsão magnética: utiliza bobinas supercondutoras, sistema implantado principalmente nos protótipos japoneses.
- levitação por atração magnética: usa-se potentes eletroímãs, sistema adotado nos protótipos alemães.
- levitação por indução magnética: usa-se ímãs permanentes, sistema recente pesquisado pelos americanos.

#### 3.2.1.1 Levitação por atração magnética

Surgido na década de 70, os trens Maglevs alemães, denominados Transrapid, adotaram o sistema de atração magnética para a levitação dos trens. É usada a força de atração entre os eletroímãs, controlados individualmente e eletronicamente, localizados no veículo e as barras ferromagnéticas localizadas abaixo das guias dos trilhos, como ilustra as figuras 10 e 11. Existem três princípios básicos para o funcionamento do trem de levitação por atração magnética.

1. Princípio da levitação magnética: fará que o trem levite sobre o trilho.
2. Princípio da orientação lateral: manterá o trem centrado no trilho para que não haja movimentos bruscos na horizontal.
3. Princípio da propulsão: dará aceleração ao trem, fazendo com que ele ganhe velocidade ao longo do percurso.



Figura 10: Princípio da Levitação por Atração Magnética  
Fonte: [www.transrapid-international.de/english/welt.html](http://www.transrapid-international.de/english/welt.html)



Figura 11: Modelo do trem alemão denominado Transrapid.  
Fonte: [www.transrapid-international.de/english/welt.html](http://www.transrapid-international.de/english/welt.html)

### 3.2.1.2 Princípio da levitação magnética

No veículo existe um suporte onde se localizam os eletroímãs, encurvado para baixo dos trilhos e exercendo nas barras ferromagnéticas uma força de atração pelos eletroímãs que darão sustentação, levitando o veículo. O sistema de levitação é fornecido por baterias de bordo e, portanto, independente do sistema de propulsão. O veículo é capaz de pairar acima de uma hora sem energia externa. Ao viajar, as baterias de bordo são recarregadas pelos geradores lineares integrados no suporte ímãs Guidance magnet (ímã de orientação) e Guidance rail (ferroviário de orientação), conforme ilustrado pela figura 12.



Figura 12: Princípio da Levitação Magnética.  
 Fonte: [www.transrapid-international.de/english/welt.html](http://www.transrapid-international.de/english/welt.html)

### 3.2.1.3 Princípio da orientação lateral

O veículo possui um conjunto de eletroímãs e guias laterais, que controlam o movimento transversal, deixando-o sempre centrado no trilho (Figura 13). O suporte, assim como os guias laterais, existe em ambos os lados do veículo e por todo o seu comprimento. Entre o suporte e os trilhos, a distância é de 10 mm, controlados eletronicamente e, entre o trilho e a parte inferior do veículo de 150 mm, o que possibilita passar por cima de pequenos objetos ou camadas de neve.



Figura 13: Princípio da Orientação Lateral.  
 Fonte: [www.transrapid-international.de/english/welt.html](http://www.transrapid-international.de/english/welt.html)

### 3.2.1.4 Princípio da propulsão

O sistema de propulsão (Figura 13) usado é o motor linear que é colocado ao longo de todo o veículo. Este pode tanto ser usado como sistema de propulsão como sistema de freios do veículo. O motor linear nada mais é do que o motor elétrico, consistindo de rotor

(mecanismo giratório), localizado nos trilhos e o estator (parte estacionária que fica ao redor do rotor), localizado no veículo.

Dentro do enrolamento do motor, corrente alternada está gerando um campo magnético que viajam move o veículo. O sistema de propulsão do trilho é ativado somente na seção em que o veículo passa, a velocidade pode ser continuamente regulada através da variação da frequência da corrente alternada. Se a direção do campo que viaja é invertida, o motor torna-se um gerador que freia o veículo sem qualquer contato. A energia de frenagem pode ser reutilizada e alimenta a rede elétrica do trem.

### 3.2.2 Sistema de controle

O sistema de controle é responsável por todo o funcionamento do trem bala, assim garantindo a segurança do sistema Transrapid (trem bala). Ele é responsável pela aceleração, velocidade, frenagem do trem, também controla a passagem de corrente ao longo do trilho e ativa os trechos por onde o trem passa, entre outros sistemas. A comunicação entre o veículo e central de comando será feita através de um sistema de rádio. Ao longo dos trilhos ficaram instaladas torres, elas recebem as informações da central de controle através de cabos de fibra óptica e envia as informações ao trem através de ondas de rádio, nas extremidades do trem existem dispositivos onde recebem as ondas de rádio, conforme ilustra a figura 14.

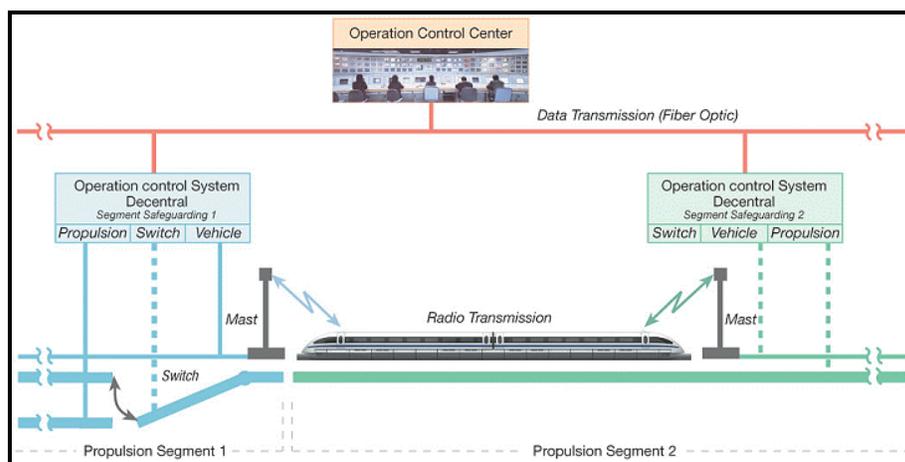


Figura 14: Sistema de transmissão de dados entre central de controle e o trem maglev.

Fonte: [www.transrapid-international.de/english/welt.html](http://www.transrapid-international.de/english/welt.html)

### 3.2.3 Vantagens da tecnologia

A grande diferença entre um trem maglev e um trem convencional é que os trens maglev não têm um motor, pelo menos não o tipo de motor usado para puxar os vagões de trem típico em trilhos de aço. O motor para os trens maglev é quase imperceptível. Em vez de usar combustível fóssil, o campo magnético criado pela bobina eletrificada nas paredes do trilho guia e os trilhos se juntam para impulsionar o trem.

O baixo custo do veículo, incluindo a implantação do sistema, é a principal vantagem sobre outros meios de transporte similares. Outra vantagem do Maglev é que as articulações entre os módulos o tornam mais flexível, facilitando seu desempenho nas curvas. Os trens com rodas e trilhos que operam em alta velocidade como o trem-bala, que chega a fazer 350 km/h, não conseguem trafegar em rampas com inclinação superior a 4%, pois dependem do atrito entre as rodas e os trilhos para sua locomoção. Já o Maglev, que utiliza motor linear, pode operar com inclinações de até 15%, limitada apenas pelo conforto dos passageiros.

A levitação magnética oferece as seguintes vantagens, se comparada às tecnologias convencionais:

- o veículo maglev é mais eficiente do que o trem convencional ou o avião para curtas distâncias, pois é mais modulável do que ambos e, além disso, não tem tempos operacionais passivos como os aviões (*check-in*, taxiamento, *check-out*, etc.);
- consome cerca de 30% menos energia por passageiro-km do que o trem convencional, para um trajeto de 400 km a uma velocidade média de 400 km/h, e 60% menos do que o avião para o mesmo trajeto;
- tem um horizonte de expansão da velocidade, se o veículo for posto em um tubo a vácuo parcial (projeto Swissmetro), enquanto que o trem convencional não pode passar de 400 km/h (barreira de tração).

### 3.2.4 Vantagens ambientais

#### 3.2.4.1 Poluição sonora

Considerando que entre o veículo Maglev e o guideway não existe contato, o único ruído gerado é advindo da aerodinâmica do veículo. Mesmo com velocidades superiores a 500 km/h, o ruído permanece com níveis abaixo do apresentado por trens de alta velocidade.

#### 3.2.4.2 Vibração

Da mesma forma, considerando que entre o veículo Maglev não existe contato, a vibração no solo oriundo da operação da circulação do veículo é inexistente.

#### 3.2.4.3 Poluição atmosférica

A aplicação de motores lineares para geração de energia substitui o uso de combustíveis e derivados de petróleo, sendo uma fonte de energia mais limpa e com menor índice poluidor, reduzindo assim, a emissão de particulados na atmosfera.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo dos anos foram se elevando em diferentes direções o edifício teórico e aplicação tecnológica do eletromagnetismo, esforços investigativos, tanto básicas quanto tecnológicas a fim de melhorar e modificar os diversos sistemas eletrônicos que nos são familiares

E foi definitivamente estabelecido em 1873, pelas mãos de James Clerk Maxwell, sábio escocês, criador das equações gerais do eletromagnetismo, que sintetizam elegante e magistralmente essa área do saber. A eletricidade e o magnetismo no mundo contemporâneo estão presentes em todos os setores econômicos, desde as áreas de transporte e comunicação, passando pelas de produção, até as de lazer. De forma bem simples e resumida o conhecimento do eletromagnetismo, entre outras determinações, possibilitou a transformação do movimento em eletricidade e a eletricidade em movimento onde o magnetismo entra como condição da possibilidade dessas geniais transformações.

No caso do magnetismo é notável porque, uma vez que há um descobrimento científico, este tem uma aplicação prática imediata que por sua vez fomenta a investigação científica, a qual serve para abrir novos horizontes científicos, tecnológicos que melhoram nossas vidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSALO, José Maria F. **Nascimento da Física (3500 a.C – 1900 a.D.)**. Belém: Editora universitária UFPA, 1996.

BONJORNO, José R. et al. **Física Fundamental Novo**. São Paulo: FTD, 1999

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Electrodynamics**. 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; **Fundamentos da Física**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 3 v.

LÖSER, Friedrich. Disponível em: <[http://www.transrapid.de/cgi-tdb/en/basics.prg?session=bd4dca364c79030b\\_131218&a\\_no=44](http://www.transrapid.de/cgi-tdb/en/basics.prg?session=bd4dca364c79030b_131218&a_no=44)>. Acesso em: 28 ago. 2010.

NERY, José R. C.; Borges, Maria L.T. **Orientações Técnicas para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Macapá: UNIFAP, 2005.

NETTO, Luiz Ferraz. Disponível em: <[http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12\\_HC09.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12_HC09.asp)> Acesso em: 14 jun. 2010.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

OLIVEIRA, Adilson J. A. **O Caminho que a bússola nos mostrou**. São Carlos. Disponível em: <[http://pordentrodaciencia.blogspot.com/2005\\_05\\_01\\_archive.html](http://pordentrodaciencia.blogspot.com/2005_05_01_archive.html)> Acesso em: 22 jul. 2010

REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R.; **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1982.

RIBEIRO, Giuliano A. P. As propriedades magnéticas da matéria: um primeiro contato. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Carlos, v. 22, n. 3, set. 2000. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_299.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_299.pdf)>. Acesso em: 25 mai. 2010.

ROCHA, José Fernando M.; FILHO, Aurino R. **Aspectos Histórico-Conceituais da Física no Ensino Pré e Universitário** – O Caso do Eletromagnetismo da Mecânica Quântica. Ideação, Feira de Santana, n. 3, jan/jun 1999. Disponível em: <<http://www.uefs.br/nef/aurino3.pdf>> Acesso em: 23 jun. 2010.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.; **Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo**. 10 ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2007. 3 v.

WIKIPÉDIA A enciclopédia livre. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Michel\\_Faraday](http://pt.wikipedia.org/wiki/Michel_Faraday)> Acesso em: 27 jul. 2010.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Lenz](http://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Lenz)>. Acesso em: 27 jul. 2010.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/James\\_Clerk\\_Maxwell](http://pt.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell)>. Acesso em: 27 jul. 2010.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Friedrich\\_Gauss](http://pt.wikipedia.org/wiki/Carl_Friedrich_Gauss)>. Acesso em: 27 jul. 2010.

COMO DESCOBRIMOS A ELETRICIDADE?. Disponível em: <<http://augustomania.sites.uol.com.br/>>. Acesso em: 17 jul. 2010

ELETROMAGNETISMO. Disponível em: <<http://www.biomania.com.br/bio/conteudo.asp?cod=1724>>. Acesso em: 16 jul. 2010.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <<http://www.coladaweb.com/fisica/eletromagnetismo.htm>>. Acesso em: 22 jul. 2010

TELÉGRAFO. Disponível em: <<http://buy-home-electronics.com/pt/telegrafo-eletrico>>. Acesso em: 14 jun.2010

\_\_\_\_\_. Disponível em: <[http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/pt/Elitrical\\_telegraph](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/pt/Elitrical_telegraph)>. Acesso em: 14 jun. 2010.

TÓPICOS CURIOSOS SOBRE ELETROMAGNETISMO. Disponível em: <<http://proavirtualg5.pbworks.com/Curiosidades>>. Acesso em: 16 jul. 2010

ANEXO

## Anexo A – Equações de Maxwell

### 1. Lei de Gauss para Campo Elétrico na forma Integral

Ao colocarmos uma carga no centro de superfície esférica imaginária de raio  $r$ . O campo elétrico  $\vec{E}$  em qualquer ponto sobre a superfície é dado por:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.0)$$

Sabendo que a força eletrostática de atração ou repulsão entre as duas cargas é dada por:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2} \quad (1.2)$$

Substituindo a equação (1.2) em (1.0) temos:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (1.2)$$

A Lei afirma que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é dado por:

$$\Phi_E = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} \quad (1.3)$$

Sabendo que a área de uma esfera é dada por:

$$a = 4\pi r^2 \quad (1.4)$$

Substituindo as equações (1.2) e (1.4) na equação (1.3), temos:

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.5)$$

Igualando as equações (1.3) e (1.5), obtemos:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (\text{Forma Integral}) \quad (1.6)$$

### 1.1 Lei de Gauss para Campo Elétrico na forma Diferencial

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.6)$$

Aplicando o teorema da divergência na equação (1.6), temos:

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.7)$$

Escrevendo  $q$  em termo da densidade de carga temos:

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (1.8)$$

Mantendo essa equação para qualquer volume, os integrados devem ser iguais, então:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (\text{Forma Diferencial}) \quad (1.9)$$

## 2. Lei de Gauss para o Campo Magnético na forma Integral

Tal qual como o campo elétrico o campo magnético é um campo vetorial, relacionando o fluxo magnético às cargas magnéticas envolvidas. Definimos o fluxo magnético através de uma superfície de modo análogo a descrição do fluxo elétrico, portanto temos que o fluxo magnético é dado por:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (2.0)$$

Na lei de Gauss, o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada e proporcional a carga elétrica total existente no interior da superfície. Por exemplo, quando a superfície fechada engloba um dipolo elétrico, o fluxo total e zero porque a carga total e igual a zero. Por analogia o fluxo magnético total através de uma superfície fechada seria

proporcional a carga magnética no interior da superfície fechada, concluiu-se que o fluxo magnético total através de uma superfície fechada e sempre igual a zero.

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad (\text{Forma Integral}) \quad (2.1)$$

### 2.1 Lei de Gauss para o Campo Magnético na forma Diferencial

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad (2.1)$$

Aplicando o teorema da divergência na equação (2.1) temos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = \int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) dV \quad (\text{Teorema da divergência})$$

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) dV = 0 \quad (2.2)$$

Usando o teorema de Gauss como no caso anterior, temos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Forma Diferencial}) \quad (2.3)$$

### 3. Lei de Ampère na forma Integral

Vamos considerar o campo magnético produzido por um condutor retilíneo longo transportando uma corrente  $I$  e que as linhas de campo magnético são circunferências centralizadas sobre o condutor, o campo é dado por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.4)$$

É possível de um modo mais prático determinar um campo magnético total produzido por qualquer distribuição de correntes, definida com base em uma integral de linha de  $\vec{B}$  em torno de uma trajetória fechada, designada por:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (2.5)$$

Para calcularmos essa integral, dividimos a trajetória em segmentos infinitesimais  $d\vec{l}$ , calculamos o produto escalar  $\vec{B} \cdot d\vec{l}$  para cada segmento e a seguir somamos esses produtos.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B_2 dl \quad (2.6)$$

Podemos dizer que  $B_2$  é constante é igual a  $B$  em todos os pontos ao longo da circunferência, portanto:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B_2 \oint dl \quad (2.7)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) \quad (2.8)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{Total} \quad (\text{Forma Integral}) \quad (2.9)$$

Adicionando o termo de correção na equação (2.9), descoberto por Maxwell que indica que um campo elétrico dependente do tempo contribui também para o campo magnético, temos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( I_{Total} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (2.10)$$

### 3.1 Lei de Ampère na forma Diferencial

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( I_{Total} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Usando a equação (2.9) e escrevendo  $I_{total}$  em termo da densidade de corrente, temos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( \int \vec{J} \cdot d\vec{a} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (3.0)$$

Usando o teorema de Stokes no lado esquerdo da equação (3.0), temos:

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{a} = \mu_0 \left( \int \vec{J} \cdot d\vec{a} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (3.1)$$

Assim temos que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{forma Diferencial}) \quad (3.2)$$

#### 4. Lei de Faraday na forma Integral

Uma força eletromotriz é induzida na espira quando o número de linhas de campo magnético que atravessa a espira está variando.

O módulo da força eletromotriz  $\mathcal{E}$  induzida em uma espira condutora é igual à taxa de variação com o tempo do fluxo magnético que atravessa a espira, temos que:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (3.3)$$

Considere uma partícula de carga  $q_0$  que se move ao longo de uma circunferência, o trabalho, realizado pelo campo elétrico induzido sobre a partícula é:

$$W = \mathcal{E} \cdot q_0 \quad (3.4)$$

Por definição o trabalho também é dado por:

$$W = \oint \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (3.5)$$

Substituindo as equações (1.0) e (3.4) em (3.5) temos que:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.6)$$

Igualando a equação (3.6) com a lei de Faraday, obtemos uma nova expressão para a lei de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{forma Integral}) \quad (3.7)$$

#### 4.1 Lei de Faraday na forma Diferencial

Partindo da equação (3.7)

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

Se o círculo for um círculo estacionário rígido, a derivada temporal poderá ser tomada dentro da integral, onde se tornará uma derivada temporal parcial, temos:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \left( \int_S \vec{B} \cdot d\vec{a} \right) \quad (3.8)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a} \quad (3.9)$$

Aplicando o teorema de Stokes no lado esquerdo da equação (3.9), temos:

$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{a} = \int_S -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a} \quad (4.0)$$

Se isso for verdadeiro para todas as superfícies fixa S, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Forma Diferencial}) \quad (4.1)$$

## APÊNDICE

## Apêndice A – autores e datas

Thales de MILETUS	(640-550 a.C.)
Alexander NECKMA	(1157-1217)
Petrus PEREGRINUS	(1240 – ?)
Willian Gilbert de COLCHESTER	(1544-1603)
Otto Von GUERICK	(1602-1686)
Walter CHARLETON	(1619-1707)
Stephen GRAY	(1679-1736)
Peter Von MUSSCHENBROEK	(1692-1761)
Benjamim FRANKLIN	(1706-1790)
Ulrich Theodor ÄEPINUS	(1724-1802)
Henry CAVENDISH	(1731-1810)
Charles Augustin de COULOMB	(1735-1806)
Luigi GALVANI	(1737-1798)
Alessandro Giuseppe Antônio Anasta VOLTA	(1745-1827)
Gian Domenico ROMAGNOSI	(1761-1835)
Jean Baptiste BIOT	(1774-1862)
André-Marie AMPÉRE	(1775-1836)
Hans Christian OERSTED	(1777-1851)
Karl Friedrich GAUSS	(1777-1855)
Joseph Louis GAY-LUSSAC	(1778-1850)
Dominique François Jean ARAGO	(1786-1853)
Georg Simon OHM	(1789-1854)
Félix SAVART	(1791-1841)
Michael FARADAY	(1791-1867)
Samuel Finley Breese MORSE	(1791-1872)
Joseph HENRY	(1797-1878)
Heinrich Friedrich Emil LENZ	(1804-1865)
Wilhelm Eduard WEBER	(1804-1891)
Gustav Robert KIRCHHOFF	(1824-1887)
James Clerk MAXWELL	(1831-1879)
John Henry POYNTING	(1852-1914)
Heinrich Rudolf HERTZ	(1857-1894)