



LCSI

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Máquinas, Componentes e
Sistemas Inteligentes
Laboratório de Controle e Sistemas Inteligentes

Contribuições sobre a Gênese da Engenharia Elétrica

Autor: Paulo David Battaglin

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Barreto

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Gilmar Barreto – DMCSI/FEEC/UNICAMP – Presidente

Prof. Dr. José Roberto Cardoso – Diretor da Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho – DENSIS/FEEC/UNICAMP

Campinas, 5 de Agosto de 2010

São Paulo - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B321c Battaglin, Paulo David
Contribuições sobre a gênese da engenharia elétrica /
Paulo David Battaglin. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Gilmar Barreto.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Engenharia elétrica. 2. Gênese. 3. Medidores
elétricos. 4. Engenharia elétrica - História. I. Barreto,
Gilmar. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: Contributions to beginnings of electrical engineering
Palavras-chave em Inglês: Electrical engineering, Beginnings, Electrical
measuring instruments, Electrical engineering -
History

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Roberto Cardoso, Christiano Lyra Filho

Data da defesa: 05/08/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Paulo David Battaglin

Data da Defesa: 5 de agosto de 2010

Título da Tese: "Contribuições sobre a Gênese da Engenharia Elétrica"

Prof. Dr. Gilmar Barreto (Presidente):

Prof. Dr. José Roberto Cardoso:

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho:



The image shows three horizontal lines representing signature lines. The top line has a handwritten signature that appears to be 'G. L. B. - 6'. The middle and bottom lines have more complex, overlapping handwritten signatures that are difficult to decipher.

“A mente que se abre a uma nova idéia, jamais voltará à sua dimensão original”

Albert Einstein

Dedico este trabalho
Ao meu pai David,
À minha mãe Elza,
Ao meu irmão João Marcos,
À minha irmã Elza Priscila (in memoriam),
À minha esposa Cleonice e
Aos filhos Filipe, Renan e Alan.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao meu Criador, por me dar inspiração para viver e me ensinar a olhar sempre para o futuro.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gilmar Barreto, pela oportunidade de receber a sua orientação e ter a sua amizade leal, elementos fundamentais para a realização desta tese.

Ao Prof. Doutor Christiano Lyra Filho, pela sua diplomacia.

Ao Prof. Doutor Yaro Burian Junior, por ter me iniciado no caminho da pesquisa em Engenharia Elétrica.

À Sra. Vilma Angélica P. Padula, Secretária de Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, que me ajudou no levantamento do material curricular.

À Sra. Giane Cristina Sales Geraldo, Secretária do Departamento de Máquinas, Componentes e Sistemas Inteligentes, que me ajudou na obtenção de material bibliográfico.

Aos funcionários da Coordenadoria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, que me deram grande apoio em documentação e procedimentos.

Aos funcionários das Bibliotecas: Central Cesar Lattes, BAE e do Instituto de Física Gleb Wataghin pelo suporte bibliográfico de livros, periódicos e acesso aos sistemas que me deram.

À minha família, que me incentivou de forma especial com seu carinho e compreensão.

Aos amigos, que me ofereceram uma palavra de incentivo e me ajudaram a perseverar.

Resumo

Este trabalho mostra a evolução do conhecimento sobre a Eletricidade e suas aplicações, que com o passar dos séculos foram denominadas de Engenharia Elétrica. As contribuições desta pesquisa evidenciam os fatos principais que revelam os benefícios desta evolução para a sociedade humana, que tem aprendido a utilizar os fenômenos da Eletricidade na natureza.

A Eletricidade está em estado latente na natureza e o seu potencial tem sido descoberto e desenvolvido pelos seres humanos através dos milênios.

A sua utilização nos primórdios pelas civilizações antigas, o desenvolvimento do conhecimento sobre ela e suas aplicações elementares, bem como a descoberta da inter-relação integrada das várias formas de Eletricidade como a Eletrostática, a Corrente elétrica e o Eletromagnetismo constituem fundamentos da Engenharia Elétrica atual.

A medição de grandezas elétricas é um processo fundamental na obtenção de conhecimento. Todavia, estamos apenas iniciando a compreensão deste processo que envolve a interface de medida, conforme explicita o resumo da história dos medidores elétricos a ser apresentada.

A divulgação deste processo de acúmulo de conhecimento tem o objetivo de transmitir aspectos fundamentais sobre a Engenharia Elétrica na Universidade e na sociedade em geral.

Abstract

This project presents the knowledge evolution concerning the Electricity and its applications, as well as it shows evidences they were called Electrical Engineering as time is up through the centuries. The collaboration of this research is the disclosure of some key realities that point out the evolution's benefits to human society, who has learnt through the applications of Electricity phenomena of nature

Electricity has been latent in nature and human beings have discovered and developed its potential through millenniums.

Electricity utilization by ancient civilizations in the beginnings, its knowledge development and its basic applications, the make into a whole interconnection among Electricity's shapes such as Electrostatics, Electrical current and Electromagnetism establish the existing Electrical Engineering's fundamentals.

The measurement of electrical quantities is a key process for getting knowledge of them. However, we have just begun this process comprehension within a measurement interface, as it is presented ahead in electrical instruments history summary.

The well endowed disclosure of this accumulated knowledge has a target to transmit key views on Electrical Engineering in University and to reach the local society.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras..... | xvii |
| Lista de Tabelas..... | xix |
| Prefácio..... | xxi |
| Capítulo 1. Primórdios da Engenharia Elétrica..... | 1 |
| 1.1. Introdução..... | 1 |
| 1.2. Grécia Antiga..... | 7 |
| 1.3. Mesopotâmia..... | 10 |
| 1.4. Do Primeiro Século AD à Idade Média..... | 11 |
| 1.4.1. China..... | 12 |
| 1.4.2. Oriente Médio..... | 12 |
| 1.4.3. Europa..... | 13 |
| 1.4.3.1. França..... | 13 |
| 1.4.3.2. Itália..... | 15 |
| 1.4.3.3. Portugal..... | 16 |
| 1.5. Do Renascimento à Idade Moderna..... | 19 |
| 1600 William Gilbert - Inglaterra..... | 19 |
| 1629 Niccolo Cabeo - Itália..... | 21 |
| 1663 Otto von Guericke - Alemanha..... | 21 |
| 1706 Francis Hawksbee - Inglaterra..... | 22 |
| 1729 Stephen Gray - Inglaterra..... | 22 |
| 1733 Charles-François Dufay - França..... | 24 |
| 1745 Pieter Van Musschenbroek - Holanda..... | 25 |
| 1752 Benjamin Franklin - Estados Unidos..... | 25 |
| 1770 Henry Cavendish - Inglaterra..... | 27 |
| 1.6. Conclusões..... | 27 |
| Capítulo 2. Considerações sobre os Fundamentos da Engenharia Elétrica..... | 31 |
| 2.1. Introdução..... | 31 |

| | |
|--|----|
| 2.2. Descobertas e Invenções desde a Idade Moderna à Atualidade..... | 35 |
| 1780 Luigi Galvani..... | 35 |
| 1802 Humphrey Davy..... | 36 |
| 1811 Simeón Denis Poisson..... | 37 |
| 1821 Thomas Seebach..... | 38 |
| 1827 Jean Baptiste Biot e Felix Savart..... | 39 |
| 1834 Henrich Friedrich Emil Lenz..... | 40 |
| 1845 Gustav Robert Kirchhoff..... | 42 |
| 1855 Jean Bernard Léon Foucault..... | 44 |
| 1868 Charles Wheatstone..... | 45 |
| 1876 Alexander Graham Bell..... | 46 |
| 1878 Thomas Alva Edison..... | 47 |
| 1885 Galileo Ferraris..... | 48 |
| 1906 Lee de Forest e Robert von Lieben..... | 50 |
| 1909 Gugliermo Marconi e Karl Ferdinand Braun..... | 51 |
| 1911 George Westinghouse..... | 51 |
| 1918 Hendrick Antoon Lorentz..... | 53 |
| 1956 John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley..... | 55 |
| 1972 John Bardeen, John Robert Schrieffer e Leon Neil Cooper..... | 56 |
| 2000 Jack Saint Claire Kilby..... | 57 |
| 2008 Leon Chua e Laboratórios Hewlett-Packard..... | 57 |
| 2.3. História dos Parâmetros de Engenharia Elétrica..... | 57 |
| 1785 Charles Augustin Coulomb - Carga Elétrica..... | 57 |
| 1765 James Watt - Potência Elétrica..... | 60 |
| 1800 Alessandro Giuseppe Antonio Anastásio Volta - Diferença de Potencial..... | 61 |
| 1820 Hans Christian Oersted - Campo Magnético..... | 61 |
| 1821 André Marie Ampère - Intensidade de Corrente Elétrica..... | 64 |
| 1826 George Simon Ohm - Resistência Elétrica e Resistividade Elétrica..... | 67 |
| 1830 Joseph Henry - Auto-Indutância e Indutância Mútua..... | 69 |
| 1831 Michael Faraday - Capacitância Elétrica..... | 71 |
| 1833 Wilhelm Edward Weber - Fluxo Magnético..... | 74 |

| | |
|--|------------|
| 1838 Carl Friedrich Gauss - Indução Magnética..... | 75 |
| 1840 James Prescott Joule - Energia e Trabalho..... | 77 |
| 1855 James Clerk Maxwell - Fluxo Magnético..... | 78 |
| 1866 Werner von Siemens - Condutância Elétrica..... | 86 |
| 1888 Heinrich Rudolf Hertz - Frequência Elétrica..... | 87 |
| 1894 Nicolas Tesla - Indução Magnética..... | 89 |
| 2.4. Resumo dos Parâmetros de Engenharia Elétrica..... | 91 |
| 2.5. Conclusões..... | 93 |
| Capítulo 3. Considerações sobre a História dos Medidores de Engenharia Elétrica..... | 97 |
| 3.1. Introdução..... | 97 |
| 3.2. História da Filosofia das Medidas Elétricas..... | 100 |
| 3.2.1. Medição é um Processo Científico de se obter Informação..... | 100 |
| 3.2.2. História dos Métodos de Medidas Elétricas..... | 101 |
| 3.2.3. O Conceito de Qualidade nas Medidas..... | 103 |
| 3.2.4. Teoria das Medidas Elétricas Aplicada à Engenharia Elétrica..... | 104 |
| 3.3. História dos Instrumentos de Medidas Elétricas..... | 104 |
| 3.3.1. Garrafa de Leiden - Medição da Capacitância Elétrica..... | 105 |
| 3.3.2. Klinodógrafo ou Câmara de Lichtenber - Medição de Alta-Tensão..... | 105 |
| 3.3.3. Balança de Torção de Coulomb - Medição de Forças Eletrostáticas..... | 106 |
| 3.3.4. Plano de Prova de Coulomb - Medição da Densidade Superficial de Eletrificação.... | 107 |
| 3.3.5. Galvanômetro Multiplicador de Poggendorff e Schweigger - Medição de Corrente Elétrica e Resistência Elétrica..... | 108 |
| 3.3.6. Medidor de Potencial Elétrico de Thompson e Harris..... | 108 |
| 3.3.7. Galvanômetro de D'Arsonval - Medição de Corrente Elétrica..... | 110 |
| 3.3.8. Bobina de Resistência e Pontes - Medição de Resistência Elétrica..... | 111 |
| 3.3.9. Medições de Corrente Alternada..... | 112 |
| 3.3.10. Padrões de Medidas Elétricas..... | 114 |
| 3.4. Conclusões..... | 115 |
| Capítulo 4. Conclusões e Perspectivas..... | 119 |
| 4.1. Contribuições..... | 119 |
| 4.2. Perspectivas e Pesquisas Futuras..... | 121 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| Trabalhos Publicados..... | 123 |
| Referências Bibliográficas..... | 125 |

Lista de Figuras

Capítulo 1 - Primórdios da Engenharia Elétrica

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Foto de Bússola Chinesa <i>Ssu Nan</i> - dispositivo magnético da antiguidade..... | 3 |
| Figura 1.2 – Bússola <i>Luo Pan</i> Chinesa..... | 4 |
| Figura 1.3 - Atrito de âmbar com pele de carneiro e a atração de corpos leves..... | 7 |
| Figura 1.4 – A magnetita atrai partículas como a limalha de ferro..... | 9 |
| Figura 1.5 – A bateria da antiguidade no museu de Bagdá, Iraque..... | 10 |
| Figura 1.6 – Desenho de corte do interior da bateria de Bagdá, Iraque..... | 11 |
| Figura 1.7 – Pedra de magnetita para cevar ou remagnetizar a agulha da bússola..... | 13 |
| Figura 1.8 – Ímãs com pólos iguais próximos se repelem..... | 14 |
| Figura 1.9 – Ímãs com pólos opostos próximos se atraem..... | 14 |
| Figura 1.10 – Ímã dividido e separado dá origem a outros ímãs..... | 15 |
| Figura 1.11 – Desenho da rosa-dos-ventos com 16 direções..... | 16 |
| Figura 1.12 – Vetores mostrando a Declinação magnética D | 17 |
| Figura 1.13 – Vetores mostrando o desvio magnético δ | 18 |
| Figura 1.14 – Vetores mostrando a Variação V | 18 |
| Figura 1.15 – Espectro magnético: limalha de ferro ao longo das linhas de um ímã..... | 20 |
| Figura 1.16 – Montagem horizontal do dispositivo feito por Gray..... | 24 |

Capítulo 2 - Considerações sobre os Fundamentos da Engenharia Elétrica

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Ilustração da primeira Lei de Kirchhoff..... | 43 |
| Figura 2.2 – Ilustração da segunda Lei de Kirchhoff..... | 43 |
| Figura 2.3 - Forças eletrostáticas entre duas cargas elétricas puntiformes | 58 |
| Figura 2.4 - Linhas de forças de campo elétrico..... | 59 |
| Figura 2.5 – Relação entre o campo magnético e a corrente elétrica: linhas de campo magnético em torno de um condutor retilíneo cilíndrico..... | 62 |
| Figura 2.6 – Relação entre o campo magnético e a corrente elétrica. As linhas de campo magnético circundando um condutor elétrico retilíneo cilíndrico, no qual a corrente | |

| | |
|---|----|
| elétrica está entrando: a) em um condutor, b) em dois condutores paralelos..... | 63 |
| Figura 2.7 – Relação entre o fluxo magnético e a corrente elétrica. Linhas de campo magnético circundando um condutor elétrico cilíndrico mostrado pela disposição da limalha de ferro..... | 64 |
| Figura 2.8 – Lei Circuital de Ampère..... | 65 |
| Figura 2.9 - Ilustração gráfica 1 do Teorema de Ampère..... | 66 |
| Figura 2.10 - Ilustração gráfica 2 do Teorema de Ampère..... | 67 |
| Figura 2.11 - Tela cônica do experimento de Faraday..... | 69 |
| Figura 2.12 – Ilustração dos circuitos 1 e 2 com as indutâncias próprias e mútuas..... | 73 |
| Figura 2.13 - Ilustração da Lei de Faraday representada pela equação de Maxwell..... | 80 |
| Figura 2.14 - Ilustração do Teorema de Gauss aplicado à Eletrostática e representado pela equação de Maxwell..... | 82 |

Capítulo 3 – Considerações sobre a História dos Medidores de Engenharia

Elétrica

| | |
|--|-----|
| Figura 3.1 – Klinodógrafo ou Câmara de Lichtenberg..... | 106 |
| Figura 3.2 - Balança de Torção de Coulomb..... | 107 |
| Figura 3.3 – Eletrômetro de quadrantes de Thompson..... | 109 |
| Figura 3.4 - Ilustração das partes principais do Galvanômetro de d'Arsonval..... | 111 |

Lista de Tabelas

Capítulo 1 - Primórdios da Engenharia Elétrica

Tabela 1.1 – Propriedades Físicas, Ótico-Cristalográficas e Químicas da Magnetita.....9

Capítulo 2 – Considerações sobre os Fundamentos da Engenharia Elétrica

Tabela 2.1 – Parâmetros da Engenharia Elétrica.....92

Prefácio

Com o extraordinário desenvolvimento do uso da Eletricidade a Engenharia Elétrica como conhecemos atualmente, pode ser entendida como um dos ramos do conhecimento que atua em várias áreas ou especialidades como: *sistemas de potência/eletrônica, eletrônica/microeletrônica, telecomunicações, computação e automação/controle:*

eletrônica/microeletrônica, telecomunicações, computação e automação/controle:

Sistemas de Potência/Eletrônica – geração, transmissão, distribuição de energia elétrica, cargas fixas e móveis nos consumidores.

Eletrônica/Microeletrônica – eletrônica integrada, circuitos analógicos, circuitos digitais, sistemas digitais e aplicações de nanotecnologia.

Telecomunicações – linhas de telecomunicações, links direcionais de rádio, rádio, televisão, telefonia fixa – móvel – celular, internet e redes sociais.

Computação – microprocessadores, reconhecimento de padrões, rede de sensores, rede de computadores e supercomputadores: hardware e software.

Automação/Controle – Sistemas de controle não-linear, sistemas de tempo discreto, sistemas com entradas aleatórias, sistemas de controle ótimo, sistemas de controle adaptativo, redes neurais e sistemas biomédicos.

As nossas experiências na atualidade, no dia-a-dia, nos possibilitam ver e usufruir de aparelhos e equipamentos resultantes da interação entre estas áreas, quer nos ambientes doméstico, comercial, industrial, governamental, quer em locais públicos.

Mas, nos primórdios da humanidade era assim?

Esta questão despertou em nós tal motivação, ao ponto de nos inspirar a aceitar o desafio de pesquisar fatos históricos e fazer considerações, que nos mostrem mais claramente como foram construídos os fundamentos da Engenharia Elétrica tal como os conhecemos hoje.

O objetivo deste trabalho é pesquisar fatos históricos e fazer considerações sobre:

- o conceito e o uso da Eletricidade nos primórdios,
- o desenvolvimento do conhecimento sobre a Eletricidade, seus fundamentos e aplicações,
- a história dos medidores elétricos e padrões utilizados na Engenharia Elétrica,
- propostas com vistas ao aperfeiçoamento do ensino da Engenharia Elétrica e a divulgação da História da Engenharia Elétrica na Universidade e na sociedade em geral.

Como não conhecemos nenhum trabalho de tal envergadura, que tenha sido publicado no Brasil e no exterior até o momento, decidimos planejar a elaboração desta pesquisa. A definição da metodologia a ser utilizada considerou a necessidade de escolher uma referência para alicerçar a estruturação deste trabalho, sendo a dimensão temporal a escolhida. Ao seguir a linha de tempo, esta metodologia possibilitou a pesquisa, a compilação e a análise dos documentos disponíveis a nós, em ordem cronológica, os quais estão citados na bibliografia.

O Capítulo 1 está focalizado na busca dos fatos principais relacionados ao conhecimento da Eletricidade nos primórdios tais como: quais povos tinham este conhecimento, que tipo de conhecimento eles possuíam e quais as aplicações que faziam dela naquela época.

O Capítulo 2 faz considerações sobre fundamentos mais recentes da Engenharia Elétrica e está dividido em duas partes, as quais abrangem a Idade Moderna, a Revolução Industrial, o Século XX e a primeira década do Século XXI.

Na primeira parte do capítulo há citações de algumas datas e nomes relacionados às descobertas e invenções, que fazem parte de nosso uso diário como a energia elétrica conduzida pelos fios e cabos elétricos, a lâmpada elétrica, o rádio, o telefone, a televisão, o computador, dentre tantas outras.

Na segunda parte do capítulo são mencionadas as descobertas, as definições e nomeações de parâmetros ou grandezas elétricas reconhecidos por instituições internacionais, que organizaram um conjunto utilizado internacionalmente por esta engenharia.

O Capítulo 3 busca apresentar um conceito de medida elétrica. A seguir buscamos apresentar uma breve história dos medidores utilizados na Engenharia Elétrica e suas aplicações, e faremos considerações que a medida elétrica existe quando certa visão ou idéia aproxima-se de um padrão.

O Capítulo 4 apresentará as conclusões finais do projeto e algumas perspectivas a respeito do futuro. É sugestivo que nós possamos também contribuir de forma relevante nesse processo histórico milenar que desejamos apresentar aqui, para a continuidade do desenvolvimento em benefício das gerações futuras. Assim sendo, consideramos que estas razões justificam a elaboração e a apresentação deste projeto chamado “Considerações sobre a Gênese da Engenharia Elétrica”.

Capítulo 1

Primórdios da Engenharia Elétrica

1.1. Introdução

Neste capítulo buscamos os fatos principais relacionados ao conhecimento da Eletricidade nos primórdios e buscamos responder as questões: quais povos tinham este conhecimento, que tipo de conhecimento os povos possuíam, quais as aplicações que faziam dela naquela época e quais as suas influências?

Registros históricos citados mostram que desde os primeiros tempos, vários séculos aC, os antigos chineses, gregos e mesopotâmios, dentre outros povos, tinham conhecimentos elementares de magnetismo e Eletricidade estática existentes na natureza, bem como alguns conhecimentos sobre corrente elétrica, e que faziam uso destes conhecimentos de formas interessantes como veremos ao longo deste capítulo. (1) (2) (3)

O primeiro texto chinês conhecido escrito em 1080 dC trata sobre a bússola magnética chinesa, um século antes da primeira menção desta na Europa. De acordo com o livro “Ming Xi Bi Tan” escrito pelo cientista astrônomo Shen Kua no século XI, durante a Dinastia Song já existiam vários tipos de agulhas magnéticas utilizadas em bússolas chinesas: a flutuante de ferro em formato de peixe, a colher de magnetita, a seca e a suspensa por fio de seda. O registro da primeira aplicação do magnetismo na bússola, pelo Imperador Huan-Ti da China, refere-se ao ano de 2.637 AC. (4)

A bússola chinesa antiga com agulha em formato de peixe era constituída por um recipiente com água e na sua superfície era colocada esta agulha flutuante. Esta agulha feita de uma lâmina côncava flutuante de ferro tinha aproximadamente cinco centímetros de comprimento e um centímetro de largura, sendo uma de suas extremidades com formato da cabeça de peixe e a outra extremidade com formato da cauda de peixe. Esta agulha era aquecida em fogo produzido por carvão e quando o metal estava vermelho, então era tirado do fogo com uma tenaz e posicionada com o lado da cauda para a direção norte. Nesta posição a agulha era resfriada subitamente em um recipiente com água, de modo que somente o lado da cauda era submerso várias vezes. Após este procedimento, a agulha assim magnetizada era colocada junto com outras agulhas já magnetizadas dentro de uma caixinha, cujo fundo era de magnetita. Influenciada pelo campo

magnético terrestre a agulha flutuante posicionava-se sempre a mesma direção ao longo de um eixo, o qual mais tarde foi designado de eixo norte-sul.

Os chineses encontravam as direções cardeais observando o movimento do Sol durante o dia e da Lua e das estrelas durante a noite, principalmente na direção da Estrela Polar nome utilizado para referir-se à estrela Polaris da constelação Ursa Menor no momento de sua passagem meridional, que está do lado do sul ou austral.

As noções primitivas encontradas no livro clássico de filosofia chinesa Huainanzi e na obra chinesa da antiguidade sobre matemática aplicada à Astronomia chamada Zhoubi descrevem como sendo um quadrado o movimento entre o nascer e o pôr do Sol. (5)

Dessa maneira, considerava-se o Céu como um Círculo e a Terra na forma Quadrada; esse casamento de formas pode ser vista nos sítios arqueológicos da cultura Hongshan (3500 a.C.), no jogo ancestral denominado Liu Bo uma das bases do Xadrez, e no Templo do Céu na cidade de Pequim. Há pelo menos 7.000 anos os chineses desenvolveram Domínios Maiores para separar o Céu – daí a tradição dos Animais Sagrados: Pássaro Vermelho, Dragão Verde, Tigre Branco e Tartaruga Negra. A partir desse rústico estudo foi possível estabelecer as bases dos quatro Pontos Cardeais e das quatro Diagonais, que na posteridade relacionaram-se com as oito Trigramas do Yi Jing.

Embora a agulha magnética seja conhecida na China há mais de 3.000 anos foi no período dos estados litigantes (475-221 a.C.) que foi inventado um tipo de bússola chamada “Ssu-Nan“, que significa “indicação do Sul”.

Esta bússola tinha dois componentes básicos: uma agulha magnética em formato de colher escavada em magnetita e um prato quadrangular de bronze. A agulha tinha este formato para ficar parecida com um urso grande, pois esta agulha magnética apontava para a direção da constelação Ursa Maior, a Estrela Polar. O prato era composto de duas partes: uma parte baixa quadrangular com gravações de vinte e quatro posições da bússola magnética representando a Terra e uma parte alta arredondada no centro simbolizando o Céu. Nas bordas da parte baixa quadrangular estavam esculpidas vinte e oito divisões equatoriais e na parte alta arredondada estava gravada a constelação Ursa Maior. As vinte e quatro posições representando a Terra eram repetidas nas divisões internas do prato. A agulha magnética em formato de colher podia girar sobre a superfície lisa quadrada da base de bronze, conforme a figura 1.1. Foram encontradas bases quadradas de madeira em escavações arqueológicas realizadas na Coréia.



Figura 1.1 – Foto da Bússola Chinesa “Ssu-Nan”, dispositivo magnético da antiguidade

O Norte tinha extrema importância na cultura chinesa e por isso dizia-se que “o imperador estava sentado no trono ao Norte do palácio olhando para Sul”. Durante a Dinastia Han surgiu um desenvolvimento da bússola Ssu-Nan denominada depois por “Shi Pan”, considerada como a bússola mais antiga em funcionamento no mundo.

A introdução da agulha magnética na bússola aumentou a precisão da leitura. Foi nessa época que os chineses introduziram os conceitos de repulsão magnética (*ti*) e de atração magnética (*yin*), que são elementos fundamentais da ciência moderna.

Os chineses descobriram que a bússola magnética além de ser útil para orientação nas direções durante as viagens terrestres e marítimas, não apontava diretamente para o norte e para o sul. A literatura chinesa refere-se a esse fato, e a declinação magnética que foi estudada na Europa durante a época Medieval está gravada na bússola magnética chinesa Luo Pan. Os padrões observados nessa bússola ancestral formaram as bases das bússolas Luo Pan utilizadas hoje.

Esta bússola é constituída por dezoito a vinte e quatro círculos concêntricos tendo no seu centro uma pequena bússola magnética. Partindo do centro desta bússola o primeiro e o quinto anel contém oito trigramas, que são sequências formadas por três linhas compostas pela combinação de linhas contínuas (_) e linhas quebradas (_ _). Os chineses com a ajuda de uma tabela podiam perceber discrepâncias nos anéis citados entre as posições sul e norte, que são as posições sudoeste e noroeste. Estas discrepâncias não afetam o conhecimento sobre a declinação

magnética ou outro assunto de importância científica, todavia do ponto de vista arqueológico é muito interessante, pois sudoeste e noroeste são posições que eram utilizadas pelos chineses no instrumento antecessor à bússola magnética, chamado *shih*.

A bússola Luo Pan é na verdade uma tabela complexa em forma circular contendo uma bússola com agulha magnética no seu centro, a qual era usada para fazer cálculos precisos de tempo e espaço na ciência chinesa, bem como mostrava algumas facilidades em relação às direções e as características do local. A figura 1.2. ilustra esta bússola.

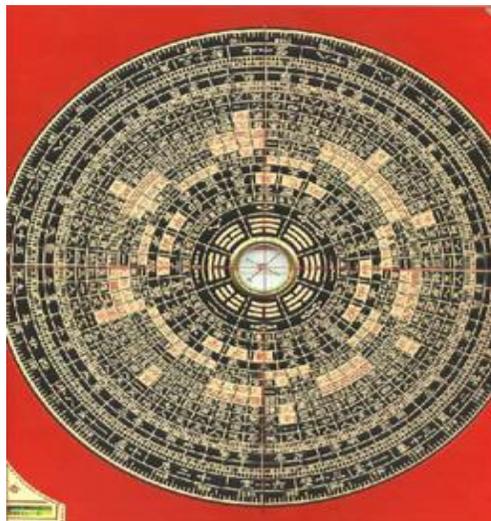


Figura 1.2 – Bússola *Luo Pan* Chinesa

Como a colher utilizada na bússola chinesa era bastante imprecisa, os Chineses começaram a fazer e magnetizar agulhas de modo a ganhar mais precisão.

Com o passar dos anos eles aprenderam a técnica de magnetizar o ferro, friccionando-o com a magnetita, aquecendo-o até uma determinada temperatura e então deixando-o imóvel até esfriar. Aqui está implícita uma descoberta de importância fundamental para a ciência: a indução magnética na agulha de ferro.

A bússola com agulha magnética suspensa por um fio de seda tinha na sua parte central uma gota de cera, a qual fazia a fixação de uma extremidade deste fio à agulha. A outra extremidade do fio era fixada a um suporte mais alto para manter a agulha suspensa. (1) (6) (7)

Os temas deste capítulo estão ilustrados na figura a seguir, que é a *linha de tempo dos acontecimentos*.

1.2. Grécia Antiga

A história da Eletricidade tem raízes também na Grécia Antiga. De acordo com Tales de Mileto 624-558 AC, ao se esfregar âmbar com pele de carneiro, observou-se que pedaços de palha eram atraídos pelo âmbar, figura 1.3. A palavra *eléktron* significa âmbar em grego. (2) Assim o fenômeno da eletrização fora observado naquela época e sabia-se que corpos leves eram atraídos pelo âmbar atritado.

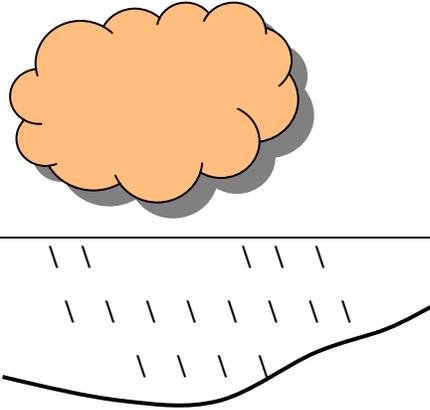


Figura 1.3 - Atrito de âmbar com pele de carneiro e a atração de corpos leves

O que é o âmbar?

As árvores que produziram o âmbar viveram há milhões de anos: nas zonas temperadas do planeta, principalmente os pinheiros; e nas regiões tropicais, várias espécies de leguminosas. As resinas que essas árvores produziam funcionavam como proteção contra as bactérias e contra os insetos que furavam sua madeira. Com o passar do tempo, essa resina foi perdendo água e ar, e as substâncias orgânicas que a constituíam sofreram o que os químicos chamam de polimerização: a resina endureceu e se transformou naquilo que conhecemos como âmbar.

Propriedades do âmbar

Quando o âmbar é esfregado com um pano, ele se torna eletrizado, podendo atrair pedaços de papel e outros corpos leves. A propósito, o nome grego para o âmbar é *elektron*, que originou a palavra Eletricidade. Não é um bom condutor de calor e parece quente ao toque, ao contrário dos minerais, que dão uma sensação de frio. Dependendo do tipo de árvore de que provém, a composição química do âmbar varia muito. As cores também são bastante diversificadas: há âmbar com vários tons de amarelo, laranja, vermelho; ele pode ainda ser branco, marrom, e até

verde e azul. As cores do arco-íris que às vezes se percebem no interior do âmbar são causadas por bolhas de ar nele aprisionadas. Algumas vezes, ainda, o âmbar, geralmente o de cor azul ou amarela, tem a propriedade de fluorescer. É amorfo, tem índice de refração acerca 1.54, gravidade específica de 1.05 a 1.10 e dureza de 2.0 a 2.5 na escala Mohs.

De onde vem o âmbar?

A região do Mar Báltico tem sido, desde a pré-história, a principal fonte de âmbar. Embora não se saiba ao certo quando essa resina foi usada pela primeira vez, ela foi relacionada às populações da Idade da Pedra. Foi encontrado âmbar de origem báltica em túmulos egípcios de 3200 a. C.

A tendência do *filósofo Tales* em buscar a verdade da vida na natureza, o levou também a algumas experiências com magnetismo. Naquele tempo ele observou que certas pedras, achadas na cidade de Magnésia da Ásia Menor, tinham a propriedade de atrair limalhas de ferro. Estas pedras foram denominadas magnetes ou magnetita. Há registros históricos que evidenciam contatos entre gregos e chineses através da Índia no Século V a.C., e que nesta época os chineses já conheciam as propriedades eletrostáticas do âmbar trazido da Birmânia e Malásia. (1) (2) (8)

O que é a Magnetita?

É o minério óxido de ferro magnético natural. É o mais comum mineral fortemente magnético, estando presente em pequenas quantidades em quase todas as rochas e também nos meteoritos. Por ser um mineral resistente acumula-se em sedimentos, como nas areias de praias, onde pode ser reconhecida por sua cor preta e por ser atraída por qualquer ímã. A magnetita, e sua propriedade são conhecidas desde há muito tempo pelos gregos. Pode ser biogenicamente produzida por bactérias, e recentemente foi identificada no meteorito ALH84001, encontrado em 1984 na Antártida, tendo sido um dos argumentos usados pelos pesquisadores, por suspeitar que naquele planeta tivesse havido vida primitiva. A presença de magnetita em lavas vulcânicas que formam o assoalho oceânico permite que se estude o campo magnético terrestre da época de seu resfriamento. Da mesma forma, magnetita biogenicamente produzida é utilizada em estudos paleomagnéticos de sedimentos. Em países onde não ocorre a hematita, a magnetita pode ser uma importante fonte de ferro. (9) Na tabela 1.1 apresentamos algumas propriedades da magnetita.

PROPRIEDADES DA MAGNETITA

| FÍSICAS | | | |
|--|--|--|--|
| Brilho | Metálico em superfície fresca | | |
| Clivagem (a) | Não apresenta | | |
| Cor | Preta | | |
| Fratura | Subconchoidal | | |
| Densidade | 5,1g/cm ³ | | |
| Dureza (b) | 5,5 a 6,0 | | |
| Hábito | Típicos cristais octaédricos e aglomerados maciços | | |
| Traço | Preto | | |
| Transparência | Opaco | | |
| (a) Clivagem é o corte de uma pedra ou cristais em lâminas paralelas | | | |
| (b) Dureza é medida na Escala de Mohs | | | |
| ÓTICAS E CRISTALOGRÁFICAS | | | |
| Sistema Cristalino | Isométrico | | |
| Sob luz polarizada refletida | Isotrópica | | |
| QUÍMICAS | | | |
| Classe | Óxido | | |
| Composição | Óxido de Ferro | | |
| Elementos Químicos | Ferro e Oxigênio | | |
| Fórmula Química | Fe ₃ O ₄ | | |

Tabela 1.1 – Propriedades Físicas, Ótico-Cristalográficas e Químicas da Magnetita

A figura 1.4 a seguir mostra uma foto da magnetita. Este minério ao ser aquecido a uma temperatura superior a 550 °C adquire a estrutura da hematita (Fe₂O₃).



Figura 1.4 – Foto da magnetita que atrai partículas como a limalha de ferro

1.3. Mesopotâmia - Bateria da Antiguidade ou Bateria de Bagdá

No início do século XX, mais precisamente em 1936, durante as escavações em ruínas próximas a uma vila de 2000 anos, nos arredores de Bagdá, arqueólogos descobriram um vaso pequeno especial. O pote era de argila amarela brilhante com 15,2 centímetros de altura, sendo avaliada a sua origem de 2000 anos atrás. Dentro dele havia um cilindro feito com lâmina de cobre de 12,7cm x 3,8cm. A extremidade do cilindro de cobre estava soldada por uma liga de chumbo-estanho, comparável a uma solda feita atualmente. A base do cilindro estava tampada por um disco de cobre e selada com betume ou asfalto por fora. Outra camada de asfalto fechava a parte superior do vaso e também prendia suspensa uma vareta de ferro dentro e no centro do cilindro de cobre. A vareta de ferro tinha várias marcas de corrosão por um agente ácido. O arqueólogo alemão Wilhelm König examinou o objeto e chegou a uma conclusão surpreendente, que o vaso de barro era uma bateria elétrica muito antiga, figura 1.5. (3)



Figura 1.5 – A bateria da antiguidade no museu de Bagdá, Iraque

A Bateria de Bagdá bem como outros objetos encontrados no sítio arqueológico na vila de Khujut Rabu são artefatos criados durante a dinastia iraniana Pártia (século III AC). Este arqueólogo encontrou também vasos de cobre banhados com prata no museu de Bagdá, os quais foram encontrados em um sítio arqueológico Sumério no sul do Iraque. A data deles foi avaliada de 2.500 AC. Após dar-se uma “batidinha suave” nos vasos, uma pátina azul ou película separou-se da superfície deles. Esta é uma característica da prata galvanizada sobre uma base de cobre.

Assim esta descoberta foi considerada uma indicação de que os Pártias herdaram o conhecimento destas baterias de civilizações anteriores a eles. Na figura 1.6 apresentamos um desenho esquemático desta bateria.

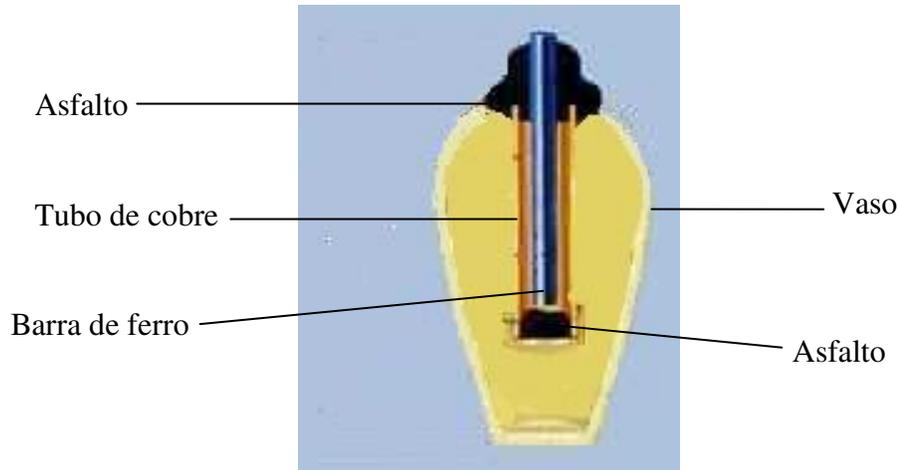


Figura 1.6 – Desenho de corte do interior da bateria de Bagdá, Iraque, Século III AC

Em 1940 o engenheiro Willard F.M. Gray, do Laboratório de Alta Tensão da General Electric em Pittsfield, Massachusetts, Estados Unidos, estudou a teoria do arqueólogo Dr. König e construiu uma réplica da bateria de Bagdá. Ao encher a réplica com uma solução de sulfato de cobre, esta gerou uma tensão elétrica de 0,5 Volt em seus terminais. Em 1970 o Egiptologista Arne Eggebrecht construiu uma réplica da bateria de Bagdá e preencheu-a com suco de uvas espremidas recentemente, baseado na sua hipótese de que os antigos mesopotâmios faziam assim também. A réplica construída gerou uma tensão elétrica de 0,87 Volt, e ele utilizou a corrente elétrica desta para galvanizar prata sobre uma estatueta de ouro. Assim sendo, estas descobertas arqueológicas e os dois experimentos realizados mostraram que baterias elétricas foram construídas e utilizadas no século III a C. (3) (10) (11)

1.4. Do Primeiro Século AD à Idade Média

Na Ásia, no Oriente Médio e na Europa os conhecimentos científicos sobre a Eletricidade foram sendo disseminados e várias invenções foram surgindo durante os séculos. Na China, no Oriente Médio e em várias regiões da Europa antiga como na França, Itália e em Portugal foram aplicados os conhecimentos sobre materiais magnéticos e elétricos, bem como suas propriedades.

Desta forma foram construídos muitos dispositivos magnéticos e elétricos dos interesses e necessidades das sociedades organizadas daquela época, conforme destacaremos a seguir:

1.4.1. China

No final da Dinastia Song a partir de 1127, o desenvolvimento da pesquisa marítima e o aumento da precisão das agulhas abriram margem à formação da bússola San-He. Mas foi durante a Dinastia Ming e Qing (1368) que os anéis da Luo Pan se tornaram detalhados e muito mais complexos. Clássicos como “Qin Ding Luo Jing Jie Ding” foram escritos, e serviram de pilares para compreendermos a Profundidade e Sabedoria contida nas Bússolas de Feng Shui, tanto modernas quanto as ancestrais.

A primeira referencia clara do uso e fabricação de uma bússola encontra-se numa enciclopédia chinesa elaborada no ano de 1040, na qual se observa a descrição da fabricação de agulhas magnéticas para a confecção de bússolas.

O primeiro registro de uso de bússola no mar encontra-se num relatório chinês datado do ano de 1115. A primeira bússola de navegação que se tem conhecimento possuía uma haste em formato de peixe, a qual se equilibrava sobre um eixo vertical. Este instrumento era utilizado apenas em ambiente marinhos calmos.

A primeira pessoa que aparece oficialmente em registros chineses usando a bússola como apoio para a navegação foi o almirante Zheng He, que efetuou oito viagens marítimas entre os anos de 1405 e 1433. (7) (12)

1.4.2. Oriente Médio

Em 751 DC os árabes e chineses encontraram-se durante a batalha do Rio Talas, região do Uzbequistão. No Século IX os árabes e chineses fizeram contatos comerciais nas colônias de Canton e Hangchow. A bússola foi trazida para o Ocidente pelos árabes que a haviam descoberto na China e quando se tornou conhecida como instrumento útil à navegação, os fenômenos magnéticos passaram a ser alvo de pesquisa. Há registros que indicam que a bússola já era conhecida dos árabes quando eles invadiram a Espanha no século XII. Inicialmente estes utilizavam uma bússola composta por uma agulha de ferro magnetizada, que se colocava sobre uma pequena tira de palha flutuando numa vasilha cheia de água, que apontava sempre para o Norte da Terra. Durante as navegações levava-se a bordo dos navios pedras de magnetita para se

cevar ou remagnetizar as agulhas, à medida que estas iam perdendo o seu magnetismo, figura 1.7.
(2) (7) (12)



Figura 1.7 - Pedra de magnetita para cevar ou remagnetizar a agulha da bússola no Século XII

1.4.3. Europa

A primeira referência sobre a bússola na Europa aparece em um documento de 1190, chamado *De Naturis Rerum* escrito por Alexander Neckman, um cientista inglês.

Neckam era interessado nos estudos de gramática e história natural, mas seu nome foi primordialmente associado às ciências náuticas.

O seu documento tornou-se bem conhecido na Europa no final do século XII e este preservou as informações primárias sobre a agulha magnética aplicada à bússola. Fora da China não se tem conhecimento de outro documento tão antigo como este.

Na Europa no final do século XIII, a compreensão sobre a bússola e de seu potencial representaram uma revolução no comércio do Mediterrâneo e deram início à Era das Grandes Navegações. (13) (14)

1.4.3.1. França

No Século XIII o francês Pierre Pèlerin de Maricourt, fez um trabalho científico, a “Epístola de Magnete”, considerando que a orientação da magnetita ocorria de acordo com os pólos Norte e Sul do cosmo. Pedro de Maricourt, também citado como Peter Peregrinus (Inglês) e Petrus Peregrinus de Maharncuria (Latin), foi um estudioso francês do século XIII que realizou experimentos sobre magnetismo e escreveu o primeiro tratado existente sobre as propriedades

dos ímãs. Seu trabalho se destaca ainda pela primeira descrição detalhada de uma bússola. Datado de 8 de agosto de 1269, Pedro escreveu um trabalho chamado *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, militem, de magnete* (Carta sobre o Magneto de Pedro Peregrino de Maricourt para Sygerus de Foucaucourt, Militar), chamada simplesmente *Epístola do Magneto*. A carta é endereçada a Suggestus (Syger, Sygerius), cavaleiro de Foucaucourt, amigo e vizinho do autor. A carta de Pedro de Marincourt explica como identificar os pólos de uma bússola. Também descreve as leis da atração e repulsa magnética, bem como a descrição de bússolas, uma das quais *poderia direcionar seus passos para cidades, ilhas e qualquer lugar do mundo*. Pierre de Maricourt era engenheiro militar francês e descreveu a maioria das experiências elementares sobre magnetismo, que resumidamente são as seguintes:

- Foi ele que denominou de pólo norte **N** e pólo sul **S** às extremidades de um ímã, baseando-se na orientação natural da bússola.
- Observou que a agulha da bússola não apontava exatamente para o Norte Geográfico da Terra.
- Observou que ao aproximar dois ímãs pelos pólos iguais eles se repelem, figura 1.8

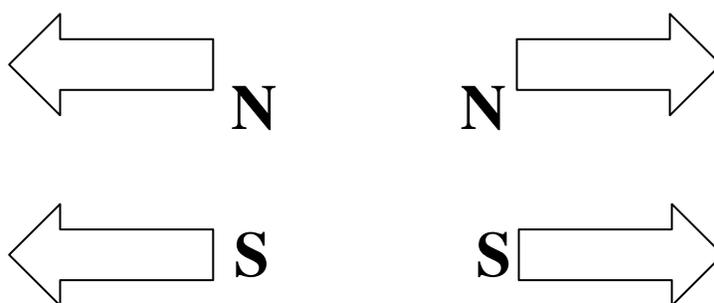


Figura 1.8 – Ilustração de ímãs com pólos iguais próximos, que se repelem

- Se aproximar dois ímãs pelos pólos opostos, eles se atraem, figura 1.9.



Figura 1.9 – Ilustração de ímãs com pólos opostos próximos, que se atraem

-
- Quando um ímã é partido (rachado), mas as partes permanecem juntas, ele mantém a polaridade do ímã original;
 - A divisão de um ímã em duas partes separadas dá origem a dois ímãs, figura 1.10

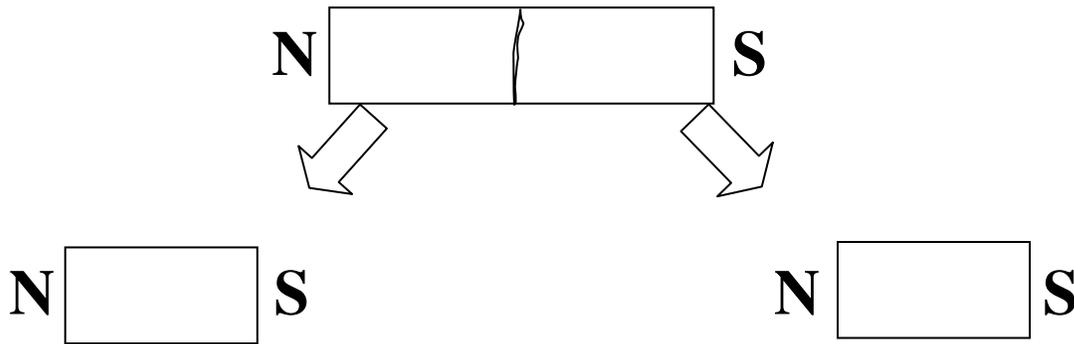


Figura 1.10 – Ilustração de ímã dividido e separado, o qual dá origem a outros ímãs.

- Ele também aprimorou a bússola apoiando a agulha de magnetita sobre um pivô e colocou esta montagem no centro e sobre uma escala circular graduada com as direções geográficas.

O trabalho dele se tornou popular na Idade Média. Seu discípulo Roger Bacon o elogiou como experimentador e técnico em seu trabalho *Opus Majus* (onde era chamado de Petrus de Maharncuria Picardus). Naquela época não eram conhecidas as linhas de força do campo magnético. Suas idéias foram mais elaboradas no século XVI por William Gilbert. (2) (16) (17) (18) (19)

1.4.3.2. Itália

Por volta de 1300, introduziram-se dois aperfeiçoamentos importantes na forma original da bússola embarcada em navios. O primeiro foi implantado por Flávio Gioia, marinheiro e inventor italiano, que consistiu na colocação da bússola em argolas de sustentação. Estas eram compostas de anéis concêntricos de latão, articulados de tal modo que, quando o navio balançava, a bússola permanecia na posição horizontal. A segunda inovação foi a introdução da rosa-dos-ventos, assinalada com quatro pontos cardeais e suas subdivisões. Antes da adoção desse

equipamento, a agulha só podia ser utilizada como simples controle da direção tomada pelo navio. Os rumos ou as direções dos ventos têm origem na Antigüidade. Na Grécia começaram com dois, quatro, oito e doze rumos. No início do século XVI surge rosa-dos-ventos com 16 rumos ou direções.

Cristovão Colombo utilizou a bússola magnética em suas viagens em 1492. Os relâmpagos eram observados na atmosfera pelos povos antigos. Durante as viagens pelo Mar Mediterrâneo, navegadores italianos perceberam emissões de faíscas dos mastros de seus navios durante as noites com tempestades em clima seco. Estas faíscas são conhecidas como fogo de São Elmo e foram mencionadas no diário da segunda viagem de Cristovam Colombo em 1493. (7) (14) (15)

1.4.3.3. Portugal

A Rosa dos Ventos já era utilizada nas embarcações portuguesas no século XVI. Para a orientação, divide-se o horizonte que em quatro direções chamadas pontos cardeais: Norte (N), Sul (L), Leste (L) e Oeste (O), que distam entre si 90 graus. Sabendo um deles, pode-se determinar facilmente os outros três. Nesse caso, a agulha magnética da bússola apontava nitidamente quatro pontos distantes entre si de 90 graus. O norte e o Sul são dirigidos para os dois pólos da Terra, o Norte no alto e o Sul embaixo. O Leste e o Oeste, representados nas bússolas por L (Leste) e O (Oeste) respectivamente, indicam o Oriente (onde o sol nasce) e o Ocidente (onde o sol se põe). Os quatro pontos cardeais são divididos em quatro pontos sub-cardiais ou colaterais totalizando oito direções: Norte (N), Sul (L), Leste (L), Oeste (O), Nordeste (NE), Noroeste (NO), Sudeste (SE) e Sudoeste (SO), que distam entre si 45 graus, figura 1.11.

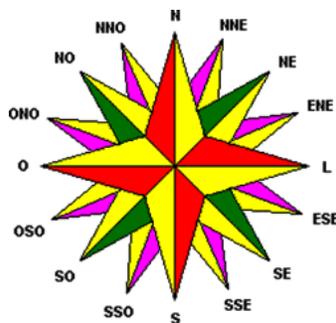


Figura 1.11 – Desenho da rosa-dos-ventos com 16 direções

Os pontos cardeais e colaterais são divididos em oito pontos sub-colaterais: Nor-Nordeste (NNE) entre o norte e o nordeste; Nor-Noroeste (NNO) entre o norte e o noroeste; Sul-Sudeste (SSE) entre o sul e o sudeste; Sul-Sudoeste (SSO) entre o sul e o sudoeste, Este-Nordeste (ENE) entre o leste e o nordeste; Este-Sudeste (ESE) entre o leste e o sudeste; Oeste-Noroeste (ONO) entre o oeste e o noroeste; Oeste-Sudoeste (OSO) entre o oeste e o sudoeste. Os 16 pontos ou direções distam entre si 22,5 graus. Nesse caso, a agulha magnética da bússola apontava nitidamente 16 pontos distantes entre si de 22,5 graus. Todos esses pontos justapostos formam a “rosa-dos-ventos”, que permitiu aos navegantes demarcarem com mais precisão e controlarem continuamente o curso do timoneiro do navio, devido à subdivisão angular que permitiu visualizar ângulos menores e assim ter maior percepção e sensibilidade do posicionamento da agulha magnética. Na época do Infante D. Henrique já se usavam rosas-dos-ventos com 32 rumos nos navios portugueses e Pedro Álvares Cabral usava a bússola em suas viagens no ano de 1500. (12)

Declinação Magnética

Cristovão Colombo em suas viagens marítimas entre a Europa e a América em 1492 notou um desalinhamento crescente entre as direções do Norte magnético e a Estrela Polar: a declinação.(6) O norte magnético para onde a agulha magnética aponta não se situa exatamente no Pólo Norte, definido pelos meridianos da Terra. A maioria dos mapas contém meridianos que são linhas norte-sul. Estas passam pelo Pólo Norte geográfico. A declinação magnética existe porque o pólo norte geográfico e o pólo norte magnético não coincidem. A declinação D é o ângulo compreendido entre o Norte verdadeiro - geográfico N_v e o Norte magnético N_m são mostradas na figura 1.12. A declinação D varia de lentamente com o tempo e local.

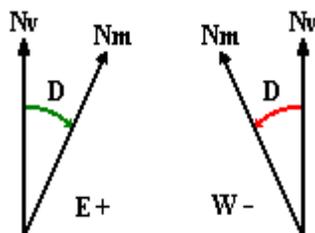


Figura 1.12 – Vetores mostrando a declinação magnética D

Conta-se em graus e toma-se valor positivo (+) quando a partir do norte verdadeiro – geográfico - para o norte magnético desloca-se para **E – Leste**, e negativo quando se desloca para **W - Oeste**. Em certas regiões do Canadá ultrapassa os 40 graus, mas na Escandinávia ela é desprezível.

Desvio

O desvio δ é o ângulo compreendido entre o Norte magnético **Nm** e o Norte indicado pela agulha magnética da bússola **Na**. Tal como a declinação, o desvio é medido em graus sendo positivo para Leste e negativo para Oeste, figura 1.13.

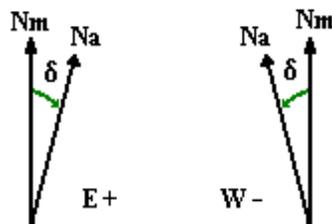


Figura 1.13 – Vetores mostrando o desvio magnético δ

Varição

A Variação V é a soma algébrica da declinação com o desvio. É, portanto o ângulo compreendido entre o Norte verdadeiro **Nv** e o Norte da agulha **Na**, figura 1.14. Mede-se também em graus sendo positivo para Leste e negativo para Oeste.

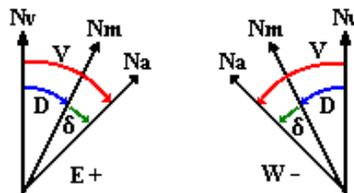


Figura 1.14 – Vetores mostrando a variação V

Ao longo do tempo veio a verificar-se que a declinação variava com o tempo e o lugar. Também foi D. João de Castro o primeiro a descobrir o desvio de uma agulha magnética da bússola, ou seja, o efeito que massas de ferro próximas têm sobre uma bússola. Este efeito obrigou a cuidados com o posicionamento da bússola em relação às de peças da artilharia, âncoras e outros ferros. Esta foi uma das razões para que os morteiros, as caixas que protegem as bússolas,

fossem, no início, de madeira. Durante o século XVI, desde 1537, as bússolas portuguesas tinham um sistema de balança para manter o morteiro horizontal. O morteiro era colocado numa coluna de madeira, mais tarde de metal, a bitácula, foi colocada à frente da roda do leme. A bitácula contém um sistema chamado cardam que permite que o morteiro se mantenha na horizontal apesar das oscilações da embarcação. (1) (6) (20)

Toda essa evolução teve como objetivo obter leitura cada vez mais precisa da agulha magnética da bússola, para a orientação precisa nos diversos tipos de navegação terrestre e marítima. Os conhecimentos sobre Magnetismo, Eletricidade estática e Corrente elétrica acumulados durante a história da humanidade até o final da Idade Média, serviram de base para a ocorrência do fenômeno chamado Renascença ou Renascimento, o qual é difícil de configurar-se como um período, pois passou em países diferentes em momentos diferentes com aspectos específicos. As descobertas e desenvolvimentos ocorridos em tal contexto serão descritos no tópico seguinte.

1.5. Do Renascimento à Idade Moderna

O Renascimento expressa uma das primeiras rupturas com o feudalismo e apresenta uma tendência de pensamento no sentido de renascer, reviver, despertar. Em vários países como a Inglaterra, Alemanha, França, Itália, Escócia, Estados Unidos da América diversos cientistas, físicos, filósofos, engenheiros e médicos buscavam conhecer mais profundamente a natureza da Eletricidade através de processos racionais e experimentais, bem como representá-la. A seguir mencionamos alguns destes cientistas e fatos, que consideramos importantes no surgimento do que chamamos hoje de Engenharia Elétrica.

1600 – William Gilbert: Médico e físico inglês (Colchester, Essex, 1544 – Londres, 1603) Descobriu materiais elétricos e tornou-se o inventor do termo Eletricidade. O principal trabalho de Gilbert é o seu tratado sobre o magnetismo intitulado *De Magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure*, que foi publicado em 1600 em Londres e rapidamente tornou-se um trabalho de referência na Europa acerca dos fenômenos elétricos e magnéticos. Este trabalho contém os resultados de muitos anos de pesquisas e recebeu reconhecimento por seguir metodologia científica de investigação através de experimentos e originalidade do assunto. Conhecia-se pouco sobre a magnetita ou sobre o ferro magnetizado. Ao dedicar-se em especial ao estudo dos fenômenos do magnetismo e da eletrostática ele fez a primeira distinção importante

e clara entre os efeitos magnéticos do ímã e os efeitos eletrostáticos do âmbar (Eletricidade estática). Ele separou em duas categorias as substâncias que friccionadas se eletrizavam: o vidro, as pedras preciosas e similares de um lado, as resinas, o enxofre do outro lado. Estudou os ímãs e a imantação obtendo espectros magnéticos, que são figuras formadas pela disposição de limalha de ferro ao longo de linhas de força produzidas por um ímã, conforme representados na figura 1.15.

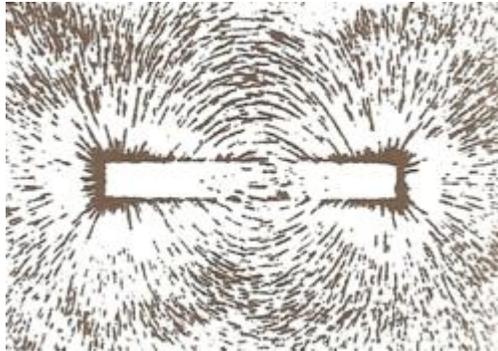


Figura 1.15 – Espectro magnético: limalha de ferro ao longo das linhas de força de um ímã

O seu tratado *De Magnete* é o mais abrangente sobre o assunto após Peter Peregrinus. O tratado é uma revisão compreensiva sobre o que era conhecido sobre a natureza do magnetismo, e o conhecimento obtido através de seus próprios experimentos. Este documento contém uma lista de experimentos realizados por ele com ímãs, corpos magnéticos, atração e repulsão magnéticas, e o conceito que ele formulou sobre a Terra: ela é um grande ímã. Para ele este conceito explicava a direção do alinhamento Norte-Sul da agulha magnética da bússola, bem como a sua declinação. Ele demonstrou que cada ímã tinha uma região invisível ao seu redor e como esta região afetava qualquer corpo de ferro próximo a ela. Também demonstrou como um ímã com forma esférica podia imitar a Terra e utilizando ímãs bem pequenos, demonstrou o comportamento do campo magnético terrestre como é conhecido hoje. Ele comparou a polaridade do ímã à polaridade da Terra e criou uma filosofia magnética completa baseando-se nesta analogia. Na cosmologia tradicional da época a Terra era fixa e era a esfera de estrelas fixas, sustentando os outros céus com ela, e que girava uma volta completa em 24 horas. A cosmologia de Copérnico precisava de uma física nova para apoiá-la e fortalecê-la, e seus seguidores tais como Johannes Kepler e Galileu estavam muito interessados nas pesquisas magnéticas de Gilbert. Diversos trabalhos não concluídos e não publicados por Gilbert foram

divulgados em 1651 pelo seu irmão mais novo sob o título *De mundo nostro sublunari philosophia nova* (Nova Teoria Relativa ao Mundo Sublunar). No antigo Sistema de Unidades CGS a força magneto-motriz (símbolo F) tinha a unidade gilbert (Gb) em homenagem a ele. (2) (19) (21)

1629 - Niccolo Cabeo: Cientista italiano (Ferrara, 1586 - Gênova, 1650). Era professor de Matemática em Parma e Gênova, onde escreveu a obra *Philosophia magnética* em 1629. Contemporâneo de Galileo Galilei ele descobriu que corpos iluminados eram primeiramente atraídos por um corpo carregado de cargas elétricas e após algum tempo eram repelidos por este. (22) (44)

1663 – Otto Von Guericke: Prefeito de Magdeburg, Alemanha (20 Nov de 1602 – 11 maio de 1686) projetou a máquina elétrica para demonstrar o efeito de forças cósmicas. Esta era composta por uma bola de enxofre que é material eletrizável, de uma manivela que gira a bola gerando um movimento de rotação e produz Eletricidade estática. Otto Von Guericke estudou Matemática e Direito na Universidade de Leiden (Holanda). Como físico o seu campo de pesquisa mais conhecido foram os estudos sobre o vácuo. Foi um defensor da idéia de que o vácuo existia. Guericke acreditava que as evidências valiam mais que a argumentação teórica e em 1650, começou a realizar experiências para testar suas idéias. Conseguiu assim demonstrar que no vácuo uma vela não queimava, pequenos animais não sobreviviam e o som de um sino não se propagava. Em 1650, Guericke construiu uma bomba de sucção que esvaziava um barril cheio de água ou removia o ar de um balão de cobre. Em ambos os casos a operação requeria o esforço de dois homens. Com essa bomba Guericke realizou sua experiência mais famosa em 1654. Ele mandou fazer uma esfera oca de metal, de meio metro de diâmetro, formada por dois hemisférios metálicos que se encaixavam perfeitamente. Ao remover o ar do interior da esfera com um pistão dentro de um cilindro (bomba de ar que ele construiu), os hemisférios mantinham-se unidos, não sendo possível separá-los nem com o esforço de diversos cavalos. Foram necessárias oito pares de cavalos para separá-las. Graças aos estudos de Torricelli, com os quais teve contacto, Guericke conseguiu relacionar todos esses fenômenos com a pressão exercida pela atmosfera. Este é o princípio básico da máquina a vapor de Thomas Newcomen (1712). No campo da Eletricidade, criou uma máquina eletrostática constituída por uma esfera revestida de enxofre que podia ser girada por uma manivela. Esse movimento fazia a esfera

acumular Eletricidade estática e que era descarregada na forma de faíscas. O que o levou a criar esse aparelho foram as pesquisas de William Gilbert sobre a eletrização por atrito. (2) (19) (21) (23)

1706 - Francis Hawksbee: Cientista inglês (1666 –1713) – Em 1705 observou a emissão de faíscas elétricas dentro de um tubo de vidro de um barômetro e diagnosticou que estas ocorriam devido ao atrito entre o mercúrio com as paredes de vidro. Inventou a primeira máquina elétrica utilizando duas esferas de vidro concêntricas girando em sentidos opostos. (2) (22) (23)

1729 – Stephen Gray: Cientista inglês (Canterbury, Kent, 1666 –1736) descobriu a condutividade do metal e os efeitos do campo elétrico. As experiências de Gray são ilustradas a seguir, seguindo a metodologia utilizada por ele naquela época. Dispositivos utilizados por Gray: Para suas experiências ele utilizou um tubo de vidro simples de 91centímetros de comprimento e três centímetros de diâmetro. Quando este era friccionado com a mão seca ou papel seco, o vidro adquiria carga elétrica. Este tubo de vidro era comum, fácil de transportar e custava menos do que as máquinas elétricas naquela época. Benjamin Franklin iniciou seus estudos em Eletricidade usando este tipo de tubo também.

- **As experiências de Gray:** Gray estava interessado em saber se o “fluido elétrico” (cientistas da época tinham o conceito que Eletricidade era um fluido) poderia ser transmitido entre objetos carregados eletricamente. Este interesse surgiu como resultado de suas observações, que o “tubo de vidro transmitia luz para os objetos”, pois ele viu faíscas saltando do tubo para objetos colocados próximos a ele. Ele tapou as duas extremidades do tubo de vidro com cortiça, quando este não estava sendo usado nas experiências, para evitar entrada de poeira quando não esta sendo usado. Gray percebeu que o tubo eletrizado e a cortiça atraíram uma penha de ave. Então ele concluiu que a atração exercida pelo tubo foi transferida para a cortiça. A idéia de um eflúvio (exalação) liberado do tubo é o fundamento de seu pensamento à idéia de um efeito, algo similar à atração gravitacional e condução elétrica. Como observador diligente, Gray continuou a examinar até que distância este efeito de atração era transferido para outros objetos. Ele ligou uma esfera de marfim a uma extremidade de uma vara de madeira de 10 centímetros de comprimento e a outra extremidade espetou na à cortiça. Observou que não somente o efeito de atração foi passada

para a esfera, mas que na esfera a pena de ave era atraída com mais intensidade do que na cortiça. Experiência semelhante foi realizada com o efeito de repulsão. O fio metálico é utilizado pela primeira vez: Gray continuou a fazer experiências com outros materiais entre a esfera de marfim e o tubo de vidro com a cortiça, usando fios de ferro e de latão, os quais transmitiram o efeito de atração. Quando a pena de ave era aproximada de qualquer parte do fio esta era atraída por ele, e aproximando-a do tubo observou que havia atração também, mas que não eram tão intensas quanto à atração perto da esfera. Certa vez ele procurou em sua casa objetos que servissem para suas experiências. Ele concentrou-se em metais, primeiramente testou várias moedas, pedaços de estanho e chumbo, uma pá de ferro, uma pinça de ferro, uma chaleira (vazia e depois cheia com água fria, e depois com água quente) e uma canequinha de prata. Ele descobriu que todos estes eram condutores do efeito. Posteriormente ele pesquisou objetos não-metálicos incluindo diversos tipos de pedras e vegetais verdes, os quais ele dependurou amarrando-os com barbante grosso e repetiu a experiência. Observou que todos eles transmitiam o efeito de atração. Durante os dias seguintes Gray aumentou o comprimento dos dispositivos utilizados nas experiências, os quais foram dispostos em posição vertical, de tal forma que varas de madeira, o barbante grosso, fios metálicos foram ligados à esfera de marfim que estava na parte de baixo da montagem, enquanto que o tubo de vidro com a cortiça no topo. Aí ele aumentou ainda mais a distância vertical do dispositivo montado, para fazer as experiências até os 16 metros de altura, altura esta da varanda da sua casa. Ele observou que houve atração da pena de ave de modo semelhante ao observado antes.

- **Montagem horizontal do experimento de Gray:** Antes de ir para Londres onde as construções eram mais altas, Gray foi conversar com seu amigo Granville Wheler, que residia em uma casa grande e era apropriada para testes com dispositivos mais altos e longos. Após várias tentativas bem sucedidas, Wheler sugeriu que ele tentasse um teste com o dispositivo na posição horizontal. Sem conhecer as propriedades de um isolante, Wheler sugeriu que ele suspendesse e prendesse a linha de barbante grosso, que ligava a esfera de marfim ao tubo de vidro com cortiça, utilizando barbante de seda. Gray concordou com a idéia e pensou que haveria pouca dispersão do efeito de atração pelo barbante de seda. Em dois de julho de 1729 ele montou o dispositivo horizontal com postes sustentando mecanicamente a linha de barbante grosso acima do solo. O comprimento total da linha era de 24 metros

aproximadamente. Durante o experimento ele atritou o tubo de vidro de um lado da linha e observou que no outro lado da linha as folhas de latão foram atraídas pela esfera de marfim, figura 1.16. (2) (24) (40)

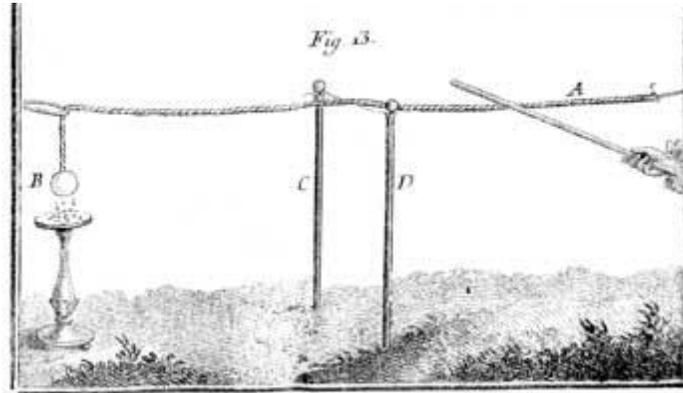


Figura 1.16 – Montagem horizontal do dispositivo feito por Gray.

1733 - Charles-François Du Fay: Químico e físico experimental francês (Paris, 1698 – 1739) que distingue dois diferentes tipos de Eletricidade, a "vítrea" (positiva) e a "resinosa" (negativa), antevendo também a repulsão de cargas iguais e a atração de cargas diferentes. Charles-François Cisternay Du Fay vai retomar estudos anteriores feitos no campo da filosofia natural, particularmente os de Otto Von Guericke, a partir dos quais deduz alguns princípios gerais sobre as propriedades elétricas de vários materiais. Por exemplo, desenvolveu diversos experimentos acerca da condução da Eletricidade observando que um fio de barbante seco era isolante, enquanto que o barbante úmido era condutor. Estudou detalhadamente o fenômeno da repulsão em corpos carregados (1733), descobrindo também que os objetos carregados se atraíam em certas circunstâncias, enquanto que em outras se repeliam. Conclui então que pela existência de duas espécies diferentes de Eletricidade, que designou, conforme o material de referência, por vítrea, a correspondente a hoje carga positiva, e a resinosa, a forma negativa da carga elétrica. Comprovou a existência de dois tipos de força elétrica: uma de atração, já conhecida, e outra de repulsão. Para ele estava definido que a Eletricidade tinha a propriedade de atrair corpos leves. Assim, baseando-se em experiências com várias substâncias, ele foi o primeiro a dividir os corpos em dois grandes grupos, segundo seu comportamento elétrico. A existência de dois tipos de Eletricidade foi também comprovada de forma independente pelo cientista estadunidense Benjamin Franklin (1706-1790), que aparentemente desconhecia os trabalhos desenvolvidos na

Europa. O norte-americano criou o conceito de carga elétrica e atribuiu os sinais positivo e negativo para distinguir os dois tipos. Nessa época, já haviam sido reconhecidas duas classes de materiais: isolantes e condutores. Estas contribuições teóricas permitiram o desenvolvimento da máquina eletrostática, cujos órgãos essenciais eram um mecanismo de arrastamento, o desmultiplicador (conjunto de engrenagens) e uma manivela, um elemento rotativo deslizante entre almofadas produzindo Eletricidade estática, e um acumulador de carga elétrica. Foi nomeado superintendente dos *Jardins Du Roi*, de Paris (1732), e também se destacou em Botânica e no estudo das propriedades ópticas dos cristais, e morreu em Paris, depois de uma breve enfermidade, com pouco mais de 40 anos de idade. (2) (25)

1742 - John Desaguliers: Cientista francês (1683–1744), que introduziu o termo “condutor” no meio científico. (22)

1745 - Pieter Van Musschenbroek: Físico holandês da Universidade de Leiden (1692–1761). Realizou experimentos elétricos com objeto de vidro em forma de vaso, cujas paredes interna e externa foram cobertas por película metálica. Este foi o primeiro condensador elétrico, chamado depois de garrafa de Leiden. Os experimentos mostraram que as faíscas emitidas eram mais intensas quanto mais fina era a parede de vidro entre as películas metálicas. A Eletricidade armazenada em uma garrafa de Leiden era de tal intensidade, que se duas jarras fossem ligadas por um condutor elétrico a descarga elétrica era suficiente para matar um animal. (2) (22)

1752 – Benjamin Franklin: Político americano, escritor e cientista (Boston, Massachusetts, 1706 – Filadélfia, 1790) Franklin começou a estudar na Escola de Gramática onde logo começou a ler e a escrever, mas tinha problemas com aritmética. Então seu pai tirou-o da escola e colocou-o para ajudar no negócio de velas e sabão, mas Franklin não estava feliz ali. Com 12 anos de idade foi trabalhar na oficina de tipografia com seu irmão mais velho James. Além de aprender o ofício, adquire novos conhecimentos lendo os originais dos livros que ele tinha acesso. Certa vez ele leu um livro sobre natação e rapidamente aprendeu os movimentos básicos de como nadar. Ele construiu pás de madeira para as suas mãos e seus pés, a fim de conseguir nadar mais rápido. Ele usou uma pipa (maranhão, papagaio ou quadrado) ao vento para puxá-lo na água e facilitar a sua prática de natação. Franklin tinha em mente algumas questões sobre o relâmpago e o trovão, tais como: observar o relâmpago durante uma tempestade, qual a potência

de um relâmpago, etc. Seu interesse em Eletricidade não estava apenas limitado ao relâmpago. Ele ganhou um tubo eletrostático de seu amigo Peter Collinson e começou a fazer experiências com este objeto. As experiências com o tubo eletrostático ele colhe dados necessários para formular uma teoria baseada no conceito fundamental de que existia uma substância elétrica, fluído elétrico, contida nos corpos em quantidades definidas. Sob determinadas condições esta substância podia variar aumentando, o corpo ficaria com carga positiva e diminuindo o corpo a carga seria negativa. Embora a teoria sobre a existência de um fluído elétrico não seja totalmente exata, à luz dos conhecimentos atuais, o raciocínio e a terminologia dele eram avançados para a sua época. Admitia que o fluído elétrico fosse inerente à matéria, e não gerado apenas no momento de atrito entre dois corpos. Ele suspeitava que o relâmpago fosse uma corrente elétrica e que passaria através de um metal. Decidiu usar uma chave metálica e pensou em uma maneira para colocá-la em um local alto, próxima ao relâmpago. Ele usou uma pipa (brinquedo de criança) para demonstrar que o relâmpago é uma corrente de ar eletrificado ou ionizado, conhecido hoje como plasma. A pipa famosa dele voou em junho de 1752 e permitiu a ele desenvolver muitos termos que usamos atualmente quando conversamos sobre Eletricidade: bateria, condutor, condensador, carga, descarga, descarregado, negativo, menos, mais, choque elétrico e eletricista. Franklin compreendeu que o relâmpago era muito potente e perigoso. Estes conceitos fizeram-no elaborar uma maneira de proteger pessoas e construções (prédios) e então construiu o primeiro *pára-raios*.

Ele também fez experimentos observando se as dimensões ou a massa de um condutor era fator determinante na quantidade de “fluído elétrico” que o corpo possui. Descobriu que o aumento da superfície do corpo torna-o capaz de receber uma quantidade maior de cargas elétricas. Estudou também a distribuição de cargas elétricas sobre uma vasilha metálica (garrafa de Leiden) colocada sobre uma base isolante. Descobriu que as cargas distribuíram-se na superfície externa da vasilha e que não havia cargas no seu interior. Ele também construiu um gerador eletrostático e realizou experimentos com este. Mais tarde cientistas como Michael Faraday e Thomas Alva Edison continuaram a estudar a Eletricidade utilizando muitas idéias de Franklin. Ele esteve na Inglaterra para receber a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa, em 1753. (21) (40) (63)

1760 - Franz Aepinus: Cientista alemão, radicado na Rússia (1724–1802), descobriu a lei da indução eletrostática. (22)

1770 - Henry Cavendish: Físico e químico inglês (1731–1810). No período de 1760 a 1770 realizou experimentos com Eletricidade e descobriu que havia forças de atração e de repulsão entre cargas elétricas antes de outros cientistas como Coulomb e Faraday. Descobriu que as intensidades destas forças variavam com o inverso do quadrado da distância entre elas, mas não conseguiu medi-las. Ele construiu uma série de condensadores e investigou a capacidade deles considerando a “polegada de eletricidade” como unidade de capacidade. Introduziu a noção de capacidade elétrica e inventou o capacitor ajustável. Investigou a capacidade de várias substâncias para conduzir descargas eletrostáticas, descobriu que as cargas elétricas estão concentradas na superfície dos materiais condutores e atribuiu a idéia de potencial elétrico sob o nome de “grau de eletrificação”. (2) (22) (26)

1.6. Conclusões

Os cientistas em cada época foram contemporâneos dos povos daquele período e fizeram contribuições relevantes para a sociedade em que viveram. Essas contribuições foram base e atuaram como mola propulsora para o desenvolvimento dos povos que os sucederam, conforme os exemplos destacados nos três períodos a seguir:

1.6.1. Primórdios - Período AC

Os povos que viveram neste período estavam geograficamente longe entre si e utilizavam meios de transportes terrestres lentos como a caminhada a pé, o cavalo e o camelo. Estes fatores eram grandes obstáculos para o intercâmbio científico entre eles. Há alguns indícios de contatos entre *chineses* e *gregos* nesse período, mais precisamente no século IX AC.

Os *chineses* conheciam a Eletricidade originada na pedra magnetita e construíram agulhas magnéticas aproximadamente em 2637 AC. Construíram também vários tipos de bússolas sendo as mais utilizadas a Si-Nan no período 475-221 AC, a San-He em 1127, e a Luo Pan cujos padrões observados nesta bússola ancestral formam as bases das bússolas Luo Pan utilizadas pelos chineses na atualidade para orientação geográfica. Este povo desenvolveu também a técnica de magnetizar o ferro, que foi utilizada na construção de agulhas magnéticas mais precisas para as bússolas.

Os *sumérios* tinham algum conhecimento sobre a existência da Eletricidade e sobre materiais condutores como o cobre, a prata e o ferro, isto em torno de 2500 AC. Este povo fazia aplicação deste saber para a deposição de prata sobre vasos de cobre, conforme as peças descobertas ao sul do Iraque e analisadas pelo arqueólogo alemão Wilhelm Konig. Estes vasos eram utilizados em rituais sagrados. Estas informações novas sobre a Eletricidade são dignas de registro na literatura especializada de Eletricidade e Engenharia Elétrica, embora a descoberta da eletrodeposição ou galvanização tenha sido atribuída a Galvani somente em 1780 da nossa era, aproximadamente 4.200 anos após os sumérios.

Os *Partias*, dinastia descendente dos sumérios na Mesopotâmia, viveram no período do século III AC. Eles conheciam a Eletricidade, os materiais condutores dela como o ferro e o cobre, os materiais isolantes como o betume e a argila seca e construíram a chamada Bateria de Bagdá, encontrada no sítio arqueológico na vila de Khujut Rabu nos arredores daquela cidade. Esta bateria era utilizada para gerar a Eletricidade. Esta descoberta também foi realizada pelo mesmo arqueólogo citado. Estas informações novas sobre a Eletricidade também são dignas de registro na literatura especializada de Eletricidade e Engenharia Elétrica, embora a invenção da bateria seja atribuída a Volta somente em 1801 da nossa era, aproximadamente 2.100 anos após os Pártias.

Os *gregos* conheciam os ímãs ou a magnetita e construíram a bússola grega no período de 624-558 AC, que era utilizada nas navegações pelo Mar Mediterrâneo. O conhecimento e a aplicação da Eletricidade em forma de magnetismo nestas bússolas eram disseminados entre os chineses e gregos. Também no período de 624-558 AC os gregos conheciam as propriedades da resina vegetal chamada de âmbar, a qual ao ser atritada adquiria a propriedade de atrair corpos leves, conforme os escritos de Tales, um dos sete sábios da Grécia na antiguidade. Desta forma a Eletricidade estática já era conhecida. O conhecimento sobre a Eletricidade adquirido até aqui foi transmitido aos povos no período a seguir.

1.6.2. Período do Primeiro Século DC à Idade Média

Há alguns indícios de contatos entre *árabes* e *chineses* nesse período, mais precisamente nos séculos VIII e IX da nossa era. Houve aumento da população na China, Europa e no Oriente

Médio e, conseqüentemente houve maior ocupação do território geográfico por estes povos. Além disso, a bússola foi aperfeiçoada possibilitando navegações marítimas mais precisas e mais rápidas, que por sua vez incentivaram as grandes navegações. Estes fatores facilitaram o intercâmbio científico e a disseminação mais rápida dos conhecimentos sobre a Eletricidade entre os povos.

Os *árabes* trouxeram a bússola da China para o Oriente Médio e a utilizaram em suas navegações. Eles perceberam que as propriedades da magnetita enfraqueciam com o passar do tempo, à medida que a bússola era usada. Por isso, levavam a bordo dos navios pedras de magnetita para cevar ou remagnetizar as agulhas, à medida que estas perdiam o seu magnetismo. A aplicação deste conhecimento garantiu maior precisão no funcionamento da bússola e sua utilização garantiu melhor precisão nas rotas marítimas. Há registros que indicam que a bússola já era conhecida dos árabes quando eles invadiram a Espanha no século XII. Portanto, vários povos contemporâneos da época foram beneficiados pela invenção da bússola magnética em suas navegações marítimas. Quando a bússola tornou-se conhecida como instrumento útil à navegação, os fenômenos magnéticos passaram pesquisados mais frequentemente em vários países.

Na *França*, em 1269, Pierre Pèlerin de Maricourt fez experimentos com ímãs e escreveu a “Carta sobre o Magneto de Pedro Peregrino de Maricourt para Sygerus de Foucaucourt, Militar”, chamada simplesmente “Epístola do Magneto”. A carta é endereçada a Suggesterius (Syger, Sygerius), cavaleiro de Foucaucourt, amigo e vizinho do autor. Ela explica como identificar os pólos de uma bússola, descreve as leis da atração e repulsão magnéticas, bem como a descrição de bússolas, as quais poderiam direcionar seus passos para cidades, ilhas e qualquer lugar do mundo. A visão que Pièrre tinha e que ele transmitiu ao seu amigo, sobre as possibilidades de utilização da bússola eram extraordinárias para a época. Pièrre também aprimorou a bússola apoiando a agulha de magnetita sobre um pivô e colocou esta montagem no centro e sobre uma escala circular graduada com as direções geográficas. Seu trabalho foi muito divulgado na Idade Média, serviu como base para o aprimoramento da bússola magnética utilizada nas grandes navegações e foi utilizado como base do trabalho sobre magnetismo desenvolvido por William Gilbert no século XVI. Portanto, faz-se necessário salientar que os experimentos realizados por Pièrre bem como a divulgação dos resultados foram tão importantes, que a sua menção deve ser

incluída na literatura especializada de Eletricidade e Engenharia Elétrica, embora estes estudos sejam atribuídos a Gilbert em 1801 aproximadamente 532 anos depois. Na *Itália* e em *Portugal* houve grande desenvolvimento de aplicações da bússola magnética para as grandes navegações marítimas. Destaca-se Flávio Gioia pelos melhoramentos da bússola e a invenção da rosa-dos-ventos por volta do ano 1300.

1.6.3. Período do Renascimento à Idade Moderna

Neste período o desenvolvimento do conhecimento da Eletricidade intensificou-se na Europa. Na *Inglaterra*, William Gilbert, além de ratificar os resultados obtidos por Pièrre, ele também elaborou e desenvolveu o conceito de espectro de campo magnético em 1801. O trabalho de Gilbert foi importante, pois facilitou visualizar a distribuição das linhas magnéticas ao redor dos pólos magnéticos que dão origem a elas. Este resultado serviu de base para os experimentos de Oersted. Em 1729, Stephen Gray descobriu a existência da condutividade elétrica ao comprovar em seus experimentos a possibilidade de produzir o deslocamento da Eletricidade em um cordão condutor. Este resultado serviu de base para os experimentos futuros de Faraday e Ampère. Na *Alemanha*, em 1663, Otto Von Guericke utilizou resultados dos experimentos de Gilbert sobre eletrização por atrito e inventou o gerador eletrostático, mostrando assim a possibilidade de gerar uma diferença de potencial elétrico a partir da movimentação de cargas elétricas e do atrito. Na *França*, em 1733, Charles Du Fay utilizou os resultados obtidos por Otto Von Guericke para comprovar a existência de Eletricidade positiva e negativa, bem como a atração e a repulsão de corpos leves carregados com esses tipos de Eletricidade. Nos *Estados Unidos da América do Norte*, em 1752, Benjamin Franklin fez experimentos com Eletricidade estática utilizando uma pipa voadora, em dias com clima de tempestade. Após muitas observações ele inventou o pára-raios, dispositivo muito utilizado para a proteção contra descargas atmosféricas até os nossos dias. Mais tarde, cientistas como Michael Faraday e Thomas Alva Edison continuaram a estudar a Eletricidade utilizando as idéias de Franklin, conforme veremos no capítulo 2.

Capítulo 2

Considerações sobre os Fundamentos da Engenharia Elétrica

2.1. Introdução

O propósito deste capítulo é pesquisar informações sobre o desenvolvimento do conhecimento da Eletricidade, os fundamentos da Engenharia Elétrica e suas aplicações; e fazer algumas considerações sobre a influência destes na qualidade de vida do ser humano. O período de abrangência deste capítulo é desde a Idade Moderna, passando pela Revolução Industrial, século XX até a atualidade. Os resultados serão apresentados em duas partes: o desenvolvimento geral (descobertas e invenções) e o desenvolvimento focalizado na história dos parâmetros utilizados atualmente. A Engenharia Elétrica engloba a área complexa que estuda fenômenos eletrostáticos, elétricos, magnéticos, eletromagnéticos e as suas utilizações. Esta engenharia intervém e está relacionada direta e indiretamente com outras ciências, dentre as quais estão a física e a química, compreendendo pesquisas, projetos e atividades correlatas, bem como atividades educacionais. Iniciando com as experiências de William Gilbert, nesse período preparatório não havia possibilidade de uma evolução precisa, pois a Eletricidade só começaria a ser empregada amplamente a partir do século XVIII, com as descobertas de Henri Cavendish e Charles Coulomb. Até então não era possível reproduzir continuamente os fenômenos elétricos, apesar da atividade científica e experimental da época. A possibilidade da decomposição eletroquímica assinalou um novo período nesta engenharia, pois quando Alessandro Volta descobriu o princípio que lhe permitiu construir a pilha elétrica, descobriu uma fonte considerável de energia com tensão elétrica relativamente baixa. A pilha foi utilizada como componente básico nos primeiros sistemas de telecomunicações, como o telégrafo e o telefone. Ao mesmo tempo, em lugares diferentes, outros cientistas e inventores realizam estudos e experimentos, tais como os de Christian Oersted e André Marie Ampère, que desenvolviam as aplicações do eletromagnetismo. Surge o telégrafo elétrico e a seguir o telégrafo eletromagnético construído por Charles Wheatstone, cujo código de comunicação foi desenvolvido por Samuel Morse. As descobertas sobre a indução eletromagnética feitas por

Michael Faraday forneceram os fundamentos para a construção de geradores, motores, transformadores elétricos e outros dispositivos e máquinas utilizados pela sociedade.

Os parâmetros utilizados em Engenharia Elétrica são variáveis e são constantes que foram descobertas e ou criadas, para auxiliarem os cientistas e inventores na descrição matemática dos fenômenos elétricos que eles observaram e que nós observamos atualmente. À medida que os parâmetros foram descobertos e nomeados em homenagem aos vários descobridores, foram também classificados em Sistemas de Unidades como os antigos sistemas CGS e MKS e o atual Sistema Internacional que será citado mais adiante.

Os temas deste capítulo estão ilustrados nas duas figuras a seguir, que mostram a *linha de tempo dos acontecimentos*.

2.2. Descobertas e Invenções desde a Idade Moderna até a atualidade

Em continuidade ao capítulo 1 o desenvolvimento de conhecimentos básicos sobre a Eletricidade demonstrados pelas descobertas de fenômenos relacionados ao magnetismo, à eletrostática, corrente elétrica e ao eletromagnetismo continuou através dos séculos XVIII, XIX, XX até os nossos dias. A seguir, citamos em ordem cronológica aquelas descobertas e invenções incipientes que foram publicadas e tiveram notoriedade, bem como os cientistas e inventores tais como Luigi Galvani, Humphrey Davy, Simeón Davis Poisson, Jean Baptiste Biot e Felix Savart, Alexander Graham Bell, Thomas Alva Edison e tantos outros:

1780 – Luigi Galvani: Físico e cientista italiano (Bologna, 1737 – Bologna, 1798). Formou-se na escola de medicina de Bologna e após a sua residência em medicina prática e cirurgia, conduziu pesquisas em fisiologia e foi nomeado professor de anatomia em Bologna e em Pavia. Em 1780 na Universidade de Pavia ele realizou experimentos sobre os efeitos da Eletricidade estática nos nervos e músculos de animais. Ele colocou pernas de rãs sobre uma lâmina de vidro e sobre os seus extremos colocou películas metálicas. Observou contrações musculares em suas pernas, quando eletricidade estática foi aplicada à medula espinhal. Contrações semelhantes foram observadas em pernas de rãs quando em uma das extremidades havia um gancho de latão e na coluna vertebral outro de ferro ligado ao ambiente externo ao laboratório. Os mesmos efeitos foram observados durante dias com tempestades e dias sem tempestades. Galvani interpretou estes resultados como a confirmação da teoria que tecidos de músculos e de nervos animais continham “eletricidade animal” ou um fluído tênue similar ao fluido elétrico. Descobriu que ao usar dois metais em contato com pernas de rã, ocorria uma corrente elétrica entre os metais. Ele descobriu a existência de descargas elétricas nos organismos vivos, descoberta esta que abriu caminho para a Eletroterapia. Os seus experimentos foram publicados em 1791 na obra *De viribus electricitatis in motumusculari commentarius*. Entretanto, Alessandro Volta, mais tarde, demonstrou que a Eletricidade não tinha origem no músculo animal, mas sim nos dois metais diferentes, latão e ferro, que foram interligados através de um meio umidecido. Apesar de as conclusões de Galvani não serem corretas foi notória a atenção que ele chamou para o fenômeno e o trabalho experimental por ele realizado, os quais foram decisivos para o início da geração da corrente elétrica contínua. Usa-se o termo *Eletricidade galvânica* para indicar a *corrente contínua* produzida pelas pilhas e baterias elétricas. O termo galvanização é também muito

conhecido, indicando o processo que consiste em depositar por eletrólise uma camada de metal sobre um suporte, metálico ou não. O nome de Galvani está ligado à descoberta do efeito de contato entre dois metais, interpretado por Volta e que passou a ser conhecido como efeito Volta (2) (21)

1802 – Humphrey Davy: Químico Inglês (Penzance, 1778 – Genebra, 1829)

Ele estava trabalhando como um aprendiz de farmacêutico em Penzance, Cornwall, quando em 1798, pela sua aptidão em química, teve a felicidade de conseguir uma vaga na Instituição Pneumática fundada por Thomas Beddoes em Bristol, uma instituição dedicada à pesquisa de gases para uso medicinal. Davy realizou pesquisas sobre o óxido nitroso e descobriu suas propriedades de anestésico, que foram publicadas em 1800. Esta instituição tinha como objetivo curar doenças como a tuberculose pulmonar, através do uso de vários gases, por isso havia a palavra pneumática em seu nome. Em 1801 ele começou a trabalhar no recém estabelecido “Royal Institution of Great Britain” em Londres, onde prosseguiu com suas pesquisas em química descobrindo as propriedades intoxicantes e anestésicas do óxido nitroso (gás hilariante). Seus experimentos apoiaram-se basicamente no seu trabalho sobre a pilha de Volta ou bateria elétrica. A pilha constituída por um conjunto de placas de zinco e cobre alternadas, imersas em um fluído e separadas por este, gerou uma corrente contínua de Eletricidade. Em 1800 o anúncio que Alessandro Volta fez sobre este invento impressionou o mundo científico da época. Davy e seus colegas em toda a Europa começaram a estudar os usos possíveis desta pilha, como a decomposição de soluções químicas, e a tentar compreender o seu funcionamento. No ano de 1805 Humphrey Davy ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa. Em 1806 e 1807 Davy apresentou suas pesquisas mais brilhantes sobre a pilha e a sua *teoria da eletroquímica*. Davy ganhou o Prêmio Napoleão do *Institut de France* em 1807 e visitou vários cientistas franceses com a permissão de Napoleão Bonaparte.

Através de experimentos rigorosos utilizando a pilha Voltaica como instrumento de pesquisa, ele demonstrou como o processo de decomposição química depende dos estados elétricos dos corpos; ele provou que ácidos e alcalinos que apareceram nos pólos da pilha não foram gerados pela Eletricidade, mas eram meramente produtos de contaminação; e baseando-se em suas descobertas ele fez a suposição que a atração química e Eletricidade são “devido a uma propriedade da matéria e são regidas por uma lei básica”. Em 1807 ele conseguiu isolar e

descobrir os elementos químicos potássio e sódio, bem como o cálcio metálico através de eletrólise; ele aplicou uma corrente elétrica intensa à potassa alcalina e à soda, corrente elétrica esta produzida por três pilhas ligadas entre si totalizando 600 conjuntos de placas. Então apareceram pequenas bolas brilhantes no pólo negativo da pilha. Davy construiu a bateria maior até então conhecida com 2000 conjuntos de placas e utilizou-a para descobrir outros elementos e provar que o *cloro*, como ele o chamou, era um elemento químico e não um ácido. Em 1813, durante uma de suas viagens pelo continente europeu, ele levou consigo seu jovem assistente de laboratório, Michael Faraday. Além de seu trabalho na eletroquímica, Davy inventou em 1815 uma lâmpada segura para iluminar minas de extração de minério e carvão, sem o risco de explosão devido aos gases. Recebeu a honra de cavaleiro em 1812, de barão em 1818 e foi Presidente da Royal Society de 1820 a 1827. (2) (21)

1803 – Vasilli Vladimirovich Petrov: Físico russo (1761–1834). Descobriu e descreveu a descoberta do arco elétrico. (22)

1811 – Simeón Denis Poisson: Matemático francês (Pithiviers, 1781 – Paris, 1840) Poisson foi um exemplo daqueles cientistas cuja atividade intelectual estava intimamente ligada a um número grande de atividades educacionais e a autoridade derivada destas. Foi admitido na École Polytechnique de Paris em 1798, onde seus professores Laplace e Lagrange perceberam rapidamente seu talento para matemática. Lagrange ficou impressionado com as contribuições valiosas que ele dava durante as aulas de funções analíticas. Laplace ficou impressionado com a sua habilidade para aprender assuntos difíceis. Ao escrever sobre diferenças finitas, quando tinha 18 anos de idade, Poisson chamou a atenção de Legendre. Nesta Escola ele também se aprofundou nos estudos de Laplace, pois desejava dar continuidade aos trabalhos iniciados pelo seu professor em física matemática. Foi nomeado professor assistente da Escola Politécnica de Paris em 1802, e catedrático em 1806 ao substituir o professor titular chamado Fourier. Em 1808 passou a trabalhar como astrônomo do *Bureau des Longitudes* e ao ser criada a Faculdade de Ciências foi professor da disciplina de Mecânica Pura. Seus trabalhos foram: em Estatística relacionados às várias contribuições na matemática das perturbações, na análise matemática aplicada à teoria do calor, e em tópicos de probabilidades. Ele apresentou o termo “Lei dos Grandes Números”. Seus trabalhos com Lambert Quételet foram utilizados em várias áreas da

ciência onde os grandes números de observações eram feitas, como em Astronomia a análise do grande número de movimentos das estrelas, como na Medicina o grande número de pacientes que receberam tratamento, como em Genética o grande número de características herdadas. Após a morte de Laplace em 1827, Poisson decidiu continuar os trabalhos científicos de seu mestre. Após o exílio de Cauchy em 1830, ele teve função importante na liderança do desenvolvimento da Matemática na França. Seus trabalhos mais importantes para a Engenharia Elétrica dizem respeito às aplicações da Matemática física, em particular à Eletrostática ao estudar o potencial eletrostático e em relação aos estudos sobre o Magnetismo. Estes trabalhos são tão importantes, que criaram um novo ramo de pesquisa em Física Matemática. Após a morte de Poisson, o seu trabalho inspirou Green a desenvolver algumas de suas formulações como o *Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism* em 1828. Algumas das obras de Poisson são: *Sur les inégalités séculaires des moyens mouvements des planètes* (1809), *Traité de Mécanique* em dois volumes (1811 e 1833), *Sur la théorie du magnétisme em mouvement* (1823-1827), *Mémoires de l'Académie des sciences* (1824), *Théorie Nouvelle de l'Action Capillaire* (1831), *Théorie Mathématique de la Chaleur* (1835). Poisson foi laureado com a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1832, em reconhecimento aos seus trabalhos em Física-Eletricidade, Estatística e Matemática. (2) (36)

1820 - Johann Schweigger: Físico, químico e matemático alemão (1779–1857) e **I. Poggendorff:** Físico e químico alemão, que inventaram um dispositivo de medição elétrica com efeito multiplicador, o galvanômetro multiplicador.

1821-1822 – Thomas Seebeck: Físico da Estônia (Tallinn, 1770 – Berlim,1831). Formou-se médico na Universidade de Göttingen, Alemanha em 1802, porém dedicou-se à pesquisa em ciências naturais. Influenciado por Goethe e sua teoria sobre as cores iniciou suas pesquisas em 1806, com o objetivo de investigar os efeitos químicos e de aquecimento dos raios das cores do espectro solar. Em suas pesquisas descobriu a polarização ótica rotativa em determinados tipos de óleo, a polarização em pedras preciosas e em vidro. Ganhou o prêmio anual da Academia de Ciências de Paris em 1816 pela publicação dos resultados de seus experimentos. Enquanto estudava e fazia experimentos sobre a influência do calor em circuitos galvânicos, ocorreu a ele que o calor poderia criar um magnetismo entre dois metais diferentes (bismuto e

cobre) em contato, de modo a formarem um circuito fechado. Quando foi aplicado calor à junção, a agulha magnética de um ímã próximo moveu-se sob a influência do campo magnético produzido pela corrente elétrica que atravessou a junção. Ele repetiu este experimento com diversos metais e observou o mesmo fenômeno. Então ele designou este efeito de Termomagnestismo, mais tarde chamado de Termo-Eletricidade. (22) (36)

1824 – François Jean Dominique Arago: Físico, matemático e astrônomo francês. Em 1816 trabalhou com Augustin Fresnel e Thomas Young em experimentos sobre a polarização da luz. Descobriu o fenômeno da eletromagnetização através de uma bobina. (2) (22)

1825 – William Sturgeon: Físico inglês (1783 – 1850). Inventou o eletroímã. (22)

1827 –

- **Jean Baptiste Biot:** Físico francês (Paris, 1774 – Paris, 1862) Foi admitido como aluno na *École des Ponts et Chaussées* em 1794 e no ano seguinte transferiu-se para a *École Polytechnique*. Foi Professor de Matemática física no *Collège de France* em 1800 e foi admitido na Academia de Ciências em 1803. Foi colaborador de Laplace, o qual incentivou-o a ler o seu trabalho *Mécanique céleste*. Entrou para o observatório de Paris, para a repartição das longitudes, associando-se aos trabalhos de Arago sobre as propriedades refringentes dos gases (1805-1806). Associou-se também à Gay-Lussac com o qual participou da primeira viagem científica de balão. Iniciou como Professor de Astronomia física na Faculdade de Ciências de Paris em 1809. Suas obras mais notáveis foram as que escreveu sobre Astronomia física, Matemática Física experimental. Em 1800 o anúncio da invenção da pilha voltaica despertou em Biot grande interesse, e em 1801, quando Alessandro Volta esteve em Paris para apresentar sua invenção, Biot foi designado para participar da comissão de análise deste trabalho.
- **Felix Savart:** Médico e físico francês (Mézières, 1791 – Paris, 1841). Estudou Medicina na Universidade de Strasbourg, onde se formou em 1816. Nesta época estava interessado no comportamento físico do violino e assim construiu um instrumento, fez experimentos com ele e apresentou os resultados à Academia de Ciências de Paris em 1819. Biot que era um de seus amigos estava interessado em seu trabalho sobre vibrações e propriedades elásticas das

cordas do violino. Por isso, indicou-o como professor de Física. Em 1827 Savart foi admitido como membro da Academia em substituição à Fresnel, e em 1828 tornou-se professor de Física experimental no Collège de France, onde ensinou acústica. Durante vinte anos Savart realizou experimentos sobre acústica e vibrações. Inventou a roda dentada para produzir sons em ampla faixa de frequências, o sonômetro para medição de vibrações sonoras, e o polariscópio para observação de objetos sob a luz polarizada. Os resultados de seus experimentos sobre vibrações e elasticidade foram considerados relevantes por Poisson, Cauchy e Lamé.

Ambos realizaram experimentos com Eletromagnetismo ao medir as oscilações de um ímã suspenso, que fora posicionado em várias distâncias de um condutor percorrido por corrente elétrica. Baseando-se nos experimentos eles concluíram que a força magnética atua em ângulos retos em relação à perpendicular que liga um ponto do espaço ao condutor elétrico. Esta intensidade de força é inversamente proporcional à distância citada. Eles elaboraram a lei que leva os seus nomes *Lei de Biot-Savart*. Fundamentalmente, esta lei exprime a relação quantitativa entre a corrente elétrica I em um elemento infinitesimal de fio condutor Δl e a indução magnética B (ou a intensidade do campo magnético H), em um ponto P no espaço ao redor deste condutor a uma distância d . O meio ambiente tem permeabilidade magnética μ considerada constante. O ângulo entre d e Δl é α como podem ser vistos nas equações equivalentes (2.1)

$$\Delta B = \frac{\mu I \Delta l \operatorname{sen} \alpha}{4 \pi d^2} \quad \text{ou} \quad \Delta H = \frac{I \Delta l \operatorname{sen} \alpha}{4 \pi d^2} \quad (2.1)$$

Esta lei é baseada nas experiências de Ampère. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a indução magnética B tem a unidade Tesla, e a intensidade de campo magnético H tem a unidade “ampère-espira por metro” (símbolo Ae/m). (27) (36) (54)

1833 – William Ritchie: Físico inglês (1790 -1837)

Construiu um gerador com ímãs permanentes fixos e bobinas girantes.

1834 – Henrich Friedrich Emil Lenz: Físico russo (Dorpat, 1804 – Roma, 1865). Em 1820 foi admitido como aluno na Universidade de Dorpat, Rússia. Em 1828 foi eleito assistente

científico júnior na Academia de Ciências de São Petersburgo, e no período de 1829-1830 participou de uma viagem ao monte Elbrus no Cáucaso para a realização de experimentos magnéticos e medição de sua altitude. Professor da Universidade de São Petersburgo (também conhecida como Leningrado) no período de 1836 a 1865, e diretor da Academia de Ciências desta cidade. Em 1831 iniciou experimentos sobre Eletromagnetismo e em 1833 apresentou à Academia de São Petersburgo um artigo com o resultado de seus experimentos, mostrando a interação do fenômeno de indução eletromagnética com a interação entre correntes elétricas e ímãs apresentados por Oersted e Ampère. Este resultado ficou conhecido em 1834 como a *Lei de Lenz*: "*O sentido da força eletromotriz induzida (E) é sempre tal que, o campo magnético criado pela corrente induzida se opõe à variação de fluxo magnético (Ø) que deu origem a esta força eletromotriz*", conforme expressa a equação (2.2).

$$E = - \frac{d \Phi}{dt} \quad (2.2)$$

O sinal negativo na frente da derivada do fluxo magnético em relação ao tempo significa que a força eletromotriz induzida opõe-se à variação de fluxo magnético que a gerou. Basicamente esta é a Lei de Faraday com o sinal negativo na frente.

Esta lei também inclui o princípio da invertibilidade de motor e gerador elétricos, a qual Lenz demonstrou na máquina magnetoelétrica de Pixii em 1838. A mesma lei explica o fenômeno da reação da armadura na máquina elétrica de Storer.

A expressão matemática para a *força eletromotriz induzida* obtida por Franz Neumann em 1846 e a elaboração da *Lei da Conservação da Energia* para fenômenos eletromagnéticos apresentada por Helmholtz em 1847 estão baseadas na Lei de Lenz.

Em seus experimentos Lenz comprovou o *efeito de Peltier*: "*A passagem de uma corrente elétrica através da junção de dois metais diferentes abaixa ou aumenta a temperatura da junção, de acordo com o sentido da corrente*".

Foi membro honorário da Academia de Ciências de Turin, da Sociedade de Física em Frankfurt e da Sociedade Geográfica de Berlim. Seus trabalhos foram publicados na Suíça, França e Inglaterra. (36) (54)

1838 - Moritz Hermann Von Jacobi: (1801 - 1874) Físico e engenheiro alemão que construiu um barco movido por um motor elétrico. (21)

1845 – Gustav Robert Kirchhoff: Físico alemão (Konigsberg, 1824 – Berlim, 1887). Foi admitido como aluno da universidade na cidade onde nasceu e recebeu influência de Franz Neumann, no que se refere à nova ciência chamada de Eletromagnetismo. Neumann introduziu e desenvolveu na Alemanha as idéias e os métodos da escola francesa de Matemática-física. Graduou-se em 1847 e foi professor de Física em Berlim de 1847 até 1850. Também nomeado professor de física em Breslau em 1850.

Sua grande contribuição à Física foi a descoberta experimental e análise teórica em 1859 sobre uma lei fundamental da radiação eletromagnética: *“Nos corpos materiais, a relação entre as potências absorvida e emitida para uma dada radiação é uma função do comprimento de onda da radiação e da temperatura.”* Esta descoberta aconteceu quando ele estava investigando o espectro ótico de elementos químicos, e juntamente com a colaboração de Bunsen, ele estabeleceu os fundamentos do método de análise espectral em 1860.

Em 1854 foi lecionar Física em Heidelberg, de onde se transferiu para Berlim em 1875.

As primeiras pesquisas em Eletricidade concentraram-se no fenômeno da condutividade elétrica. No período de 1845-1849 Kirchhoff fez experimentos com correntes elétricas, e em 1857 com a propagação de Eletricidade em condutores. Sob a influência dos ensinamentos de Neumann, ele estudou a teoria das correntes elétricas estacionárias, que é a formulação de leis que evidenciam a distribuição de tensões e correntes elétricas em redes formadas por condutores lineares. Ele observou que a elaboração destas leis estava relacionada a simples aplicação da Lei de Ohm generalizada a todos os condutores das redes.

Em 1845 apresentou as leis para circuitos fechados, estendendo-as para as redes gerais (1847) e aos condutores sólidos. A primeira Lei de Kirchhoff diz que *“Em uma malha elétrica, a soma algébrica das correntes elétricas que se encontram em um nó é zero”*, conforme mostra a equação (2.3). Esta lei reflete a conservação de cargas elétricas no circuito. Conforme a figura 2.1 as correntes I_1 e I_2 que convergem para o nó $\mathbf{0}$ têm sinal positivo, pois acrescentam quantidade de Eletricidade a este nó; enquanto que as correntes I_3 e I_4 que saem do nó $\mathbf{0}$ têm sinal negativo, pois reduzem a quantidade de Eletricidade deste nó:

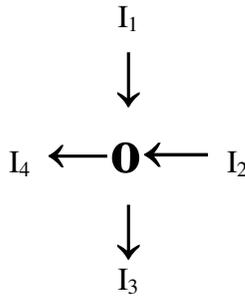


Figura 2.1 – Ilustração da primeira Lei de Kirchhoff

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0 \quad (2.3)$$

A segunda Lei de Kirchhoff diz que *”Em uma malha fechada, a soma algébrica das tensões elétricas em um sentido convencionado é zero”*, conforme a equação (2.4). Esta é uma consequência imediata do campo elétrico ser conservativo. Na malha fechada a força eletromotriz de uma bateria E_b é positiva, pois eleva o potencial elétrico na malha. Nos outros elementos da malha onde há queda de tensão respectivamente E_1 , E_2 e E_3 o sinal é negativo, pois abaixam o potencial elétrico na malha, de acordo com a ilustração na figura 2.2.

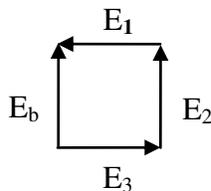


Figura 2.2 – Ilustração da segunda Lei de Kirchhoff

$$E_b - E_1 - E_2 - E_3 = 0 \quad (2.4)$$

Kirchhoff procurou estabelecer uma conexão entre concepções eletrostáticas e eletrodinâmicas de Eletricidade. Outro trabalho importante foi a demonstração de que um distúrbio elétrico é propagado por um fio com a mesma velocidade com que a luz propaga-se no espaço livre. Ganhou a medalha Matteucci da Sociedade Italiana de Ciências em 1877, em reconhecimento às suas descobertas feitas e publicação de seus trabalhos. (2) (36) (54)

1847 – Herman Helmholtz: Físico e médico alemão (1821–1894). Elaborou a *Lei da Conservação da Energia*. Nenhuma forma de energia é destruída, mas pode ser convertida em outra forma. (2) (22)

1851 - Heinrich Daniel Ruhmkorff: Engenheiro mecânico alemão (1803 - 1877) Construiu uma bobina capaz de produzir faíscas de alta tensão. (21)

1854 – Heinrich Goebel: Oftalmologista americano (1818 - 1893) que construiu o bulbo de uma lâmpada a partir de fibras de bambu. (21)

1855 – Jean Bernard Léon Foucault: Físico francês (Paris, 1819 – Paris, 1868) Alfred Donné foi professor de Foucault na disciplina microscopia clínica na École de Médecine e o admitiu como seu assistente, e convidou-o para ser co-autor do livro texto publicado em 1844. Entre 1844 e 1845 escreveu artigos sobre Geometria, Aritmética e Química. Trabalhou em montagens de experimentos no laboratório em sua casa, foi premiado em 1851 pelos experimentos e cálculos realizados sobre a velocidade da luz com um espelho giratório, entre 1851-1852 demonstrou a mecânica do movimento de rotação da Terra por meio de um pêndulo, inventou o giroscópio, recebeu o título *docteur ès sciences physiques* em 1853 pela tese apresentada sobre a comparação da velocidade da luz no ar e na água, e recebeu o cargo de físico no Observatório de Paris de Napoleão III. Em 1853 Foucault estudou a condutividade elétrica em líquidos. Ele demonstrou a conversão de energia mecânica (rotação) em calor através de experimentos com um disco condutor de cobre, o qual se aquecia ao ser girado por uma manivela entre os pólos de um eletroímã. Ele mediu o calor produzido no disco, e concluiu que o aquecimento neste foi causado pela Eletricidade induzida que circulava nele, a qual foi produzida pelo campo magnético do eletroímã e o movimento de rotação. Observou que materiais maciços de determinado volume aqueciam-se rapidamente, quando submetidos a um movimento dentro de um campo magnético intenso. Ele verificou que a resistência elétrica destes materiais era menor do que a resistência dos fios condutores e, portanto concluiu que a corrente elétrica que os percorria era mais intensa e produzia maior aquecimento devido ao efeito Joule. Assim, ele demonstrou a existência de correntes induzidas em corpos maciços condutores de Eletricidade.

Estas correntes são chamadas de *correntes de Foucault, correntes parasitas ou correntes eddy*. Com a morte de Clapeyron em 1865, Foucault foi convidado a substituí-lo como membro na *Académie des Sciences*. Ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1855, em reconhecimento aos resultados de seus experimentos e publicação dos mesmos. (2) (36) (54)

1858 - Lançamento do primeiro cabo transatlântico ligando os Estados Unidos da América à Europa.

1859 – **Gaston Plante:** Físico francês (1834–1889). Inventou a primeira bateria elétrica chumbo-ácido que armazenava Eletricidade.

1860 – **Antonio Pacinotti:** Inventor italiano (1841-1912) que construiu o primeiro transformador elétrico de corrente alternada.

1868 – **Charles Wheatstone:** Físico inglês (Gloucester, 1802 – Paris, 1875). Wheatstone foi um cientista experimental e inventor nas áreas de acústica, ótica, eletricidade e telegrafia. Na sua juventude trabalhou numa loja de instrumentos musicais, os quais passou a fabricar algum tempo depois. Em 1823 publicou um trabalho sobre seus experimentos com acústica e patenteou a *concertina* em 1829 como resultado de seus experimentos com vibrações. Dedicou-se ao estudo e a fazer experimentos sobre a ressonância das colunas de ar e da transmissão sonora através de condutores sólidos. Estas pesquisas culminaram com a invenção do *alto-falante* em 1831. Foi convidado para ser professor de Física no King's College de Londres em 1834. Realizou experiências com óptica, medindo a velocidade da luz com um espelho rotativo. Em 1827 inventou o caleidoscópio fônico e publicou os resultados das experiências acústicas no *Jornal Trimestral de Ciência*. Este invento foi o ponto de partida da acústica óptica. E no ano seguinte inventou o *estereoscópio* e um *telégrafo elétrico de mostrador*. Inventou vários aperfeiçoamentos na telegrafia: introduziu os relés, o telégrafo impressor e um criptógrafo de mensagens.

Em 1834 iniciou experimentos com Eletricidade e mediu a velocidade de descargas elétricas em um fio condutor. Wheatstone teve a idéia de observar os movimentos rápidos de descargas elétricas através de reflexões em espelhos rotativos. Observou os intervalos entre faíscas

produzidas por uma única descarga através de três centelhadores. Os centelhadores estavam colocados lado a lado e interligados por um fio de cobre de aproximadamente 400 metros de comprimento. Considerando o deslocamento da faísca central relativa às outras duas Wheatstone estimou a velocidade da Eletricidade. Arago sugeriu que a técnica do espelho rotativo de Wheatstone fosse utilizada para comparar as velocidades da luz no ar e na água, experimento realizado por Foucault e Fizeau em 1850. A técnica também foi utilizada por Lissajours para estudar vibrações acústicas em 1855. Publicou o trabalho sobre a verificação experimental da Lei de Ohm e desenvolveu novos métodos para medir resistências e correntes elétricas. Inventou um reostato que foi chamado de *Ponte de Wheatstone*, para a medição de resistência elétrica dos condutores em corrente contínua. Inventou também uma resistência variável, o reostato. Ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1868 e foi convidado para ser membro da Academia de Ciências de Paris em 1873, em reconhecimento aos resultados de seus experimentos, invenções e a publicação destes. (36)

1876 – Jablochhoff - Bogen Kerze: Engenheiro elétrico russo (1847 - 1894). Desenvolveu a lâmpada a arco voltaico.

1876 – Alexander Graham Bell: Físico e inventor escocês radicado nos Estados Unidos da América (Edimburgo, 1847 – Baddeck, Canadá, 1922). Era surdo-mudo e foi contemporâneo de James Clerk Maxwell. Ambos nasceram na Escócia e receberam sua educação acadêmica na Inglaterra. Enquanto Maxwell era um matemático teórico, Bell gostava de construir coisas. Por duas gerações, seu pai treinou autoridades em locução e oratória. Em 1870 emigrou com sua família para o Canadá, estabelecendo-se depois em Boston, EUA. Abriu uma escola para formar instrutores de surdos-mudos. Tornou-se professor de fisiologia vocal na Universidade de Boston, onde adquiriu especialização para ensinar os surdos-mudos falarem. No período em que Faraday e Maxwell começavam a estudar e a fazer experimentos com a Eletricidade na Inglaterra, Bell fazia experiências com o propósito de transformar técnicas da fala em sinais elétricos que transmitissem a voz humana. Assim ele iniciou seus primeiros experimentos sobre o telefone em Boston no ano de 1870. Como terapeuta da fala, ela lidava com ondas, ondas de som, e a recepção destas. Estas ondas sonoras não trafegavam distâncias grandes, nem eram muito rápidas. Então ele pensou que, e pudesse transformar os sons da fala humana em oscilações

elétricas, estes sons poderiam ser transmitidos através de fios condutores elétricos e convertidos em ondas sonoras na recepção. Ele imaginou uma teoria para possibilitar a transmissão da fala humana: “achar um modo de criar uma corrente elétrica que variasse a intensidade com precisão, assim como o ar varia de densidade durante a produção da fala humana”. Esta mudança de terapeuta da fala para inventor ajudou a comunicação entre as pessoas. Bell e seu assistente Thomas A. Watson, desenvolveram dispositivos para a transmissão de palavras humanas durante cinco anos. Em 10 de março de 1876, enquanto Bell estava realizando experimentos, derramou uma jarra de ácido. “Senhor Watson”, ele disse. “Venha aqui. Eu preciso de você.” Em uma sala próxima, Watson ouviu as palavras de Bell saindo de um dos dispositivos construídos. Era a voz de Bell. Então ele foi correndo até o local onde estava Bell e disse-lhe: ”Eu pude ouvi-lo. Eu ouvi as palavras”. Bell havia registrado a patente 25 dias antes desta experiência, pois tinha a certeza de que os aperfeiçoamentos feitos até então teriam algum sucesso. *O telefone* foi inventado. Esta patente foi contestada na Corte Suprema dos EUA durante duas décadas. Todavia, foi decidido que a invenção do telefone foi de Graham Bell. O telefone foi uma das invenções que contribuiu muito para o desenvolvimento do rádio. A invenção do rádio adotou o receptor magnético do telefone como seu fone de ouvido, e o microfone teve sua origem na telefonia. Os fios condutores de Eletricidade ajudaram na divulgação do rádio. Bell continuou suas experiências com comunicação e então, inventou o fotofone (transmissão de som através de luz), o grafophone (invenção que se aproximava do gravador de som). Em 1880 ele utilizou o valor do Prêmio Volta que ganhara para criar a Associação Laboratório Volta, que tinha a finalidade de desenvolver dispositivos para auxiliar os surdos-mudos em Washington. Em 1922 quando ele morreu havia mais de 14 milhões de telefones nos EUA. (21) (36)

1878 – Thomas Alva Edison: Inventor americano (Ohio, 1847 – Nova Jersey, 1931). Thomas tinha sete anos de idade quando sua família mudou-se para Huron, Michigan em 1854, e na ocasião ele construiu um laboratório de química na adega de sua casa. Edison iniciou a carreira de operador de telégrafo, após salvar o filho do chefe da estação de trem de cair nos trilhos embaixo de um vagão de carga em movimento. Cheio de gratidão o chefe ensinou-o a nova ciência da telegrafia. Aos dezessete anos de idade ele já era operador de telégrafo. Edison foi para Nova Iorque aos 21 anos de idade com pouco dinheiro. Ao consertar uma máquina telegráfica na Companhia de Telegrafia Gold and Stock, ele conseguiu um trabalho ali como superintendente ganhando 300 dólares por mês. Simultaneamente, ele fez várias invenções,

dentre elas um sistema telegráfico adequado à Bolsa de Valores, que lhe rendeu 40.000 dólares. Com este dinheiro ele montou um laboratório de pesquisas de telégrafos, onde conseguiu montar um sistema de transmissão duplex e quadriplex em Newark, Nova Jersey. Este sistema permitia a transmissão simultânea de várias mensagens pelo mesmo cabo, melhorando assim o desempenho. Na idade de 29 anos ele foi para Menlo Park, Nova Jersey, onde construiu e inaugurou uma pequena cidade industrial com laboratórios, oficinas, escritórios, e ali fez o maior de seus inventos: *a lâmpada elétrica incandescente*. Entre 1876 e 1886 realizou vários inventos como o transmissor de telefone a carvão, o fonógrafo, o dínamo de Edison, e a lâmpada elétrica incandescente. Ele fez várias invenções para adaptá-las ao sistema elétrico existente e assim possibilitar a iluminação da cidade toda. Ao inventar uma peça ou dispositivo ele percebeu que não havia fabricantes para estas, e assim, ele construiu suas próprias fábricas para a construção de seus inventos. Devido à necessidade, ele construiu fábricas em Menlo Park e Nova Iorque. Em 1882 ele iniciou a operação da primeira usina de energia elétrica “Pearl Street”, para iluminar a cidade de Nova Iorque. No início de 1890 ficou evidente o crescimento do uso da Eletricidade e os serviços que ela poderia oferecer à população. Em 1892 foi fundada a General Electric Company, uma fusão das companhias Thompson-Houston e Edison General Electric. Edison participou da diretoria da nova companhia. Entretanto, aos poucos ele foi afastando-se da administração e das atividades de fabricação para retornar ao seu laboratório em “Orange West”, onde aperfeiçoou o fonógrafo, a câmera de filmar e a bateria elétrica. Ganhou a medalha Matteucci da Sociedade Italiana de Ciências em 1877, em reconhecimento às suas descobertas feitas e publicação de seus trabalhos. Os laboratórios de Edison são considerados como os protótipos dos laboratórios industriais modernos, em termos do suporte que estes dão às operações de fabricação. Edison foi eleito membro da Academia Nacional de Ciência dos Estados Unidos. (21) (36)

1885 – Galileo Ferraris: Físico e engenheiro elétrico italiano. (Livorno, 1847 – Turin, 1923). Ferraris frequentou a Universidade e a Scuola d’Applicazione na cidade de Turin completando sua graduação em 1869. Doutorou-se pela universidade em 1872 com a tese *Teoria matematica della propagazione dell’ elettricità nei solidi omogenei*. Foi professor de física técnica no *Regio Museo Industriale* em Turin, e realizou experimentos científicos com ondas de luz e características óticas de telescópios, especialmente a defasagem dentre duas ondas senoidais em movimento. Em 1876 publicou a obra *Proprietà degli strumenti diottrici...*

Foi designado delegado de seu país na Conferência de Paris em 1882 para o estabelecimento de um sistema de unidades elétricas e em 1883 foi designado presidente internacional da Exposição de Eletricidade em Turin, onde conheceu o transformador de corrente alternada construído por Gaulard e Gibbs. Em 1885 Ferraris apresentou à Academia de Ciências de Turin um trabalho sobre as inter-relações de forças elétricas e magnéticas nos circuitos primário e secundário de um transformador de corrente alternada, a partir de analogias com ondas de luz polarizadas. Ao desenvolver este conceito ele visualizou e construiu dois eletroímãs posicionados de 90° entre si, alimentou cada um deles com corrente alternada, que por sua vez estavam defasadas de 90° elétricos entre si. Assim Ferraris obteve um campo magnético bifásico girante. Uma das bobinas foi alimentada por um pequeno alternador Siemens e a outra foi alimentada por um transformador de corrente alternada de Gaulard-Gibbs. Ao inverter uma das correntes elétricas ocorreu inversão no sentido de rotação do motor, chamado de motor de indução sem comutador e escovas. Este princípio de funcionamento deu origem à construção do motor de indução de corrente alternada com campo girante em seu estator e no rotor tipo gaiola. Este princípio foi utilizado também na construção de medidores de energia elétrica tipo indução em 1885. Este resultado foi apresentado à sua classe na universidade e em laboratório, todavia Ferraris não registrou a patente de seu invento. Ele declarou: “Acima do valor industrial eu considero a importância científica, acima do uso material, o uso intelectual.” Ferraris apresentou sua descoberta à Academia de Ciências de Turin em 18 de março de 1888. Outros cientistas como Deprez e Nikola Tesla reclamaram para si a descoberta do campo girante produzido por corrente alternada polifásica, todavia demandas judiciais em tribunais da Europa e Estados Unidos entre 1895 e 1900 deram ganho de causa a Ferraris. Ele representou o seu país e foi eleito vice-presidente da Exposição Elétrica de Chicago em 1893, quando foram estabelecidos os padrões e as respectivas unidades para as medições de indutância (henry), energia-trabalho (joule) e potência elétrica (watt). (36) (47)

1890 - Entra em funcionamento, em Londres, a primeira ferrovia subterrânea com locomotiva elétrica.

1890 - **Aleksandr Nikolaevich Lodygin**: Inventor e engenheiro elétrico russo. (1847 – 1923). Construiu a primeira lâmpada elétrica com filamento de carbono e a lâmpada com filamento de materiais refratários.

1891 – Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolskii: Inventor e engenheiro elétrico russo (1862–1919). Inventou o sistema de correntes trifásicas e o motor assíncrono trifásico.

1893 – Friedrich Wilhelm Schindler-Jenny apresenta a primeira cozinha com eletrodomésticos na feira de Chicago, Illinois, Estados Unidos da América.

1896 – Aleksandr Stepanovich Popov: Físico russo (1859 – 1906). Demonstrou a propagação de ondas eletromagnéticas e a recepção de um texto na distância de 250 metros na Rússia. Fundador da radio física. (22)

1898 - A companhia AEG fabrica lâmpadas incandescentes com bulbo a vácuo e com aterramento, para serem usadas ao ar livre.

1899 - Entra em funcionamento, na Europa, a primeira ferrovia operada eletricamente de Burdorf na Alemanha para Thun na Suíça, com 40 km de extensão, tensão elétrica de 750 V e frequência de 40 ciclos por segundo.

1899 – Petr Lebedev: Físico russo (1866–1912). Descobriu a existência de massa no campo eletromagnético. (22)

1900 - Alemão proprietário de terras a serem arrendadas, calculou que o uso da Eletricidade podia economizar 66% do trabalho que era executado por cavalos.

1903 - A companhia Landis & Gyr fabrica o primeiro medidor elétrico para duas tarifas.

1906 - Lee De Forest, Físico e engenheiro americano especializado em rádio (Iowa, 1873 – Califórnia, 1961) e **Robert Von Lieben,** físico austríaco (Viena, 1878 - Viena, 1913) inventam a válvula eletrônica a vácuo, possibilitando a construção de amplificadores. Nos Estados Unidos da América a transmissão de som ou a transmissão de programação via rádio iniciou quando Lee De Forest inventou a *válvula Audion* e esta invenção mudou os hábitos de milhões de pessoas. Aos dezesseis anos de idade ele inventou vários dispositivos mecânicos. Uma bolsa de estudos possibilitou-lhe os estudos na Escola Científica Sheffield na Universidade de Yale, onde estudou e obteve o grau em Doutor em Filosofia (PhD) em 1899. Trabalhou em vários locais e ao mesmo tempo dedicava-se aos experimentos científicos. De Forest estava pensando sobre o feito

de Marconi, que transmitiu pelo ar, através de ondas de rádio, os sinais telegráficos codificados por “pontos-traços”, mas que ninguém havia conseguido ainda um modo de transmitir música ou a fala humana. Ao fazer experiências com a válvula a vácuo de Fleming, De Forest introduziu uma *grade* entre o filamento e a placa. Ele patenteou esta invenção como válvula Audion em 1907 e fez a transmissão ao vivo da ópera cantada por Enrico Caruso em 1910 do teatro Metropolitano de Ópera. Assim, iniciou-se a transmissão de programas de rádio, mas o público em geral não estava interessado nisso. Então, ele vendeu a sua patente para uma companhia de telefone. Nos anos seguintes ele fez invenções e registrou mais de 300 patentes relativas ao rádio e dispositivos eletrônicos. Outra invenção que ele fez foi o *fonofilme*, o precursor do filme com trilha sonora. Em 1923 ele fez a primeira apresentação pública de um filme falado e então foi reconhecido amplamente pelo seu trabalho científico e pelos resultados apresentados. Na Europa Robert Von Lieben fez descobertas semelhantes e patenteou-as também. As descobertas do fonógrafo eletro-químico e a polarização dos raios X em 1903, bem como a aquisição de uma fábrica de telefones em Olomouc, Morávia, em 1904, incentivaram Von Lieben a desenvolver um amplificador para o telefone através de radiação catódica (radiação eletrônica) conhecido como relé telefônico. Em 1906 ele registrou a patente do *relé de raios catódicos*: ele patenteou a influência de um campo magnético sobre a deflexão um raio eletrônico. Em 1910 melhorou o projeto acrescentando uma *grade de controle*, com a qual a densidade de corrente poderia ser controlada e conseqüentemente, poderia ser controlada a amplificação da válvula. Ele patenteou esta invenção também. De Forest e Von Lieben verificaram traços de vapor de mercúrio em suas válvulas e descobriram que os íons de mercúrio interferiam no funcionamento destas. Todavia, o problema foi resolvido por Irving Langmuir em 1913, quando construiu uma válvula com alto vácuo. (21)

1909 – Guglielmo Marconi: Físico italiano (1874 – 1937) e **Karl Ferdinand Braun,** Físico alemão (1850 – 1918) que ganharam juntos o Prêmio Nobel de Física em reconhecimento às contribuições para o desenvolvimento do *telégrafo sem fio*.

1910 - É construído e colocado em funcionamento o primeiro refrigerador elétrico.

1911 – George Westinghouse – Inventor Norte Americano (Central Bridge, NY, 1846 – New York, 1914). Seu pai era fabricante de implementos agrícolas. George serviu o exército e a

marinha durante a guerra civil americana. Após completar o serviço militar matriculou-se na Faculdade Union em Schenectady, NY onde permaneceu durante alguns meses antes de sair para trabalhar na loja de seu pai. George registrou sua primeira patente em outubro de 1865 de um dispositivo girante a vapor e algum tempo depois, patenteou um guindaste ferroviário para recolocar vagões nos trilhos. Em abril de 1869 patenteou o freio a ar para vagões, que é um dispositivo que possibilita a redução da velocidade e a parada total de um trem rapidamente. No final do mesmo ano fundou a indústria *Westinghouse Air brake Company* para produzir e comercializar seu invento. Sua iniciação na aplicação da Eletricidade foi a criação de métodos para aprimorar a segurança de ferrovias, os quais foram patenteados e em 1882, ele fundou a Union Switch and Signal Company em Pittsburgh, PA, para fabricar e comercializar suas invenções. Tinha interesse na tecnologia de gás natural utilizado basicamente para iluminação e suas experiências com as técnicas de transmissão de gases em alta pressão e então a redução para a distribuição, influenciaram a adoção de métodos similares para a transmissão e distribuição da Eletricidade. Foi o pioneiro na construção de linha de transmissão e distribuição de corrente alternada no ano de 1880. George Westinghouse tornou-se um pioneiro inovador na introdução da *transmissão e distribuição em corrente alternada* nos Estados Unidos. Em 1885 quando ele soube que o transformador de corrente alternada estava sendo desenvolvido por Lucien Gaulard e John Gibbs na Europa, logo adquiriu os direitos de fabricá-lo e comercializá-lo em seu país. Contratou o engenheiro William Stanley para aprimorar este transformador, ao incluir funções como elevação e abaixamento de voltagem, bem como melhoramentos em sua regulação. A primeira usina experimental de geração de energia elétrica em corrente alternada, nos Estados Unidos, foi construída em Great Barrington, Estado de Massachusetts, e testada com sucesso em 1886. Uma usina hidrelétrica de grande porte foi construída na cidade de Niagara Falls, Estado de Nova Iorque, sendo considerado um resultado extraordinário do século XIX. Esta usina foi a primeira a ter um sistema bifásico de corrente alternada, sendo constituída por 10 alternadores de 5000 HP cada, totalizando a potência instalada de 50.000 HP ou aproximadamente 37 MW (megawatt). A operação da usina iniciou em 1895 com três geradores. Os engenheiros Lewis B. Stillwell, Benjamin G. Lamme e Charles F. Scott tiveram grande participação no projeto elétrico desta usina. A quantidade de energia elétrica gerada de era enorme e a custo relativamente baixo, atraindo várias indústrias para a localidade. Mesmo com o aumento do consumo devido às indústrias havia sobra de energia elétrica e foi então, que engenheiros

elétricos da companhia Westinghouse tiveram a idéia de projetar e construir a primeira linha de transmissão trifásica de corrente alternada ligando a usina até a cidade próxima de Buffalo, NY. Patenteou aproximadamente 400 invenções durante sua vida, fundou várias empresas dentre elas a de fabricação de produtos elétrico que tem o seu nome.

Em 1911 George Westinghouse recebeu a Medalha Edison do American Institute of Electrical Engineers (AIEE), pelas contribuições importantes para o desenvolvimento dos sistemas de corrente alternada e iluminação. (37)

1913 – Heike Kamerlingh Onnes – Físico dos Países Baixos (1853 – 1926) ganhou o prêmio Nobel de Física pela descoberta da supercondutividade.

1918 – Hendrik Antoon Lorentz: Físico holandês (Arnhem, 1853 – Haarlem, 1928). Ao ingressar na Universidade de Leiden em 1870, Lorentz logo demonstrou grande interesse por Física e Matemática. Doutorou-se em 1875 aos 21 anos de idade, sendo o tema da dissertação sobre Física-ótica abordada sob o ponto de vista de Maxwell. Publicou seu primeiro trabalho sobre reflexão e refração da luz por dielétricos e metais em 1875. Estudou na Universidade de Leiden, onde em 1878 tornou-se professor de Física teórica e Matemática. Realizou experimentos aplicando a teoria eletromagnética de Maxwell a um meio constituído por moléculas isoladas, que foi um trabalho sobre a relação entre a densidade do meio e o índice de refração. O centro de suas investigações consistiu na busca de uma teoria que englobasse, numa estrutura consistente, os fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos. Em Leiden Lorentz desenvolveu a sua contribuição mais original à Física teórica, a teoria do elétron. Recebeu em 1902, juntamente com P. Zeeman, o Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos sobre a *Influência do Campo Magnético sobre as Radiações*. Uma das características de Lorentz foi a sua receptividade incomum às novas idéias. Introduziu em 1904 a concepção de tempo local, que associava à chamada contração de Fitzgerald. Desenvolvendo seu trabalho chegou às *transformações de Lorentz*, que desempenharam um papel importante na Teoria da Relatividade, elaborada por Albert Einstein no ano de 1905. Lorentz trouxe a Física clássica a um estado de desenvolvimento tal, que evidenciou a necessidade de uma reformulação de seus princípios fundamentais aos seus sucessores. Em 1912 iniciou como diretor do Instituto Tayler, em Haarlem na Holanda. Em 1918 ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa pelos trabalhos e resultados publicados. (36)

1920 – Instalação do primeiro sistema de telefonia automática na União Soviética. (22)

1920-1924 – Louis de Broglie: Físico e matemático francês (1892–1987). Estabeleceu a nova escola científica da *Mecânica Quântica* e descobriu a natureza ondulatória do elétron.

1922 – Neils Bohr: Físico dinamarquês (Copenhagem, 1885 – Copenhagem, 1962) --- Ganhou o prêmio Nobel de Física em 1922 pelas investigações sobre a estrutura do átomo e a idealização do chamado Modelo atômico de Bohr.

1923 - É colocada em operação a primeira linha de transmissão de energia elétrica de 220 kV nos Estados Unidos da América.

1925 – John Logie Baird: Engenheiro e cientista escocês (1888 – 1946) que inventou a televisão analógica.

1936 - A lâmpada fluorescente é construída pela companhia Osram e apresentada na Feira Mundial em Paris.

1937 - A primeira turbina geradora de energia elétrica de 100 MW, e refrigerada a hidrogênio, é colocada em operação nos Estados Unidos da América.

1947 - O computador de grande porte ENIAC construído com 14.468 válvulas eletrônicas é colocado em operação nos Estados Unidos da América.

1948 - A IBM apresenta o primeiro computador eletrônico SSEC, construído com 12.500 válvulas eletrônicas e 21.400 relês.

1951 - Fundação da Associação Internacional para a Coordenação da Geração e Distribuição de Eletricidade – UCPTE.

1953 - Há a primeira transmissão estável de um programa de Televisão.

1954 - São desenvolvidas as primeiras linguagens de programação para computadores.

1954 - É inventada a célula solar na companhia Bell Laboratories.

1954 - Os primeiros reatores nucleares para produção de Eletricidade são embarcados nos submarinos Nautilus (americano) e Obninsk (URSS).

1955 - Inaugurada a primeira usina nuclear de geração de energia elétrica com 9 MW de potência.

1956 - **John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley** - Físicos americanos que fizeram pesquisas sobre *semicondutores e inventam o transistor*. Esta invenção permitiu o desenvolvimento de nova tecnologia eletrônica, a miniaturização de componentes, dispositivos e equipamentos elétricos e eletrônicos. Ganham o prêmio Nobel de Física em 1956.

1956 - A IBM anuncia o Computador 305 RAMAC com memória de disco magnético.

1960 - **Theodore Harold Maiman** – físico americano projeta um laser rubi e produz pela primeira vez a luz laser.

1965 - **Francia** – Professor italiano que a partir de espelhos produziu vapor com o aquecimento da água pela luz solar, e colocou em funcionamento uma turbina a vapor.

1965 - Interrupção no fornecimento de energia elétrica deixa a cidade de Nova Iorque 13 horas no escuro em 9 de novembro, devido à tempestade e queda de raio em uma linha de transmissão de 345 kV.

1967 - A primeira usina geradora de energia elétrica movida pela maré, com potência de 240 MW, é colocada em funcionamento em Rance na França, sendo ligada ao sistema elétrico.

1970 - **Louis Eugène Felix Néel** – Físico francês (Lyon, 1904 – Brive-la-Gaillarde, 2000) que fez descobertas referentes ao ferro magnetismo, antiferromagnetismo e suas aplicações na física do estado sólido. Ganhou o Prêmio Nobel de Física pelas descobertas que possibilitaram o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas na fabricação de discos rígidos.

1971 - A companhia Intel fabrica o microprocessador 4004 com 2300 transistores, memória ROM de 256 Bytes e memória RAM de 32 bits.

1972 – John Bardeen, John Robert Schrieffer e Leon Neil Cooper: Físicos americanos que desenvolveram em conjunto a teoria da supercondutividade, também conhecida como Teoria BCS. Ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1972. John Bardeen é o único cientista a ganhar o Prêmio Nobel duas vezes até o momento.

1973 - Boicote e redução na produção de petróleo evidenciam uma situação de crise de energia e a partir daí, há reorientação mundial da política de produção energética.

1974 – Tem início a era dos computadores pessoais – Microprocessador Intel 8080.

1976 - Energia é produzida em turbina a vapor, a partir de aquecimento de água com energia solar.

1978 - Acidente com usina geradora de energia elétrica nuclear em Three Mile Island, Harrisburg, Estados Unidos da América.

1980 – Construído um turbogerador criogênico com a potência nominal de 20 MW na União Soviética. (22)

1981 - A usina geradora de energia elétrica movida por energia solar (sistema torre), “Eurelios” de grande porte, com potência de 1 MW foi colocada em operação.

1982 - Construído e colocado em operação um sistema de geração de energia elétrica foto-voltaico, com a potência de 1 MW em Hesperia, Califórnia, Estados Unidos da América.

Construído e colocado em operação o maior sistema foto-voltaico da Europa, em Lugano, Suíça, com 15 kW.

1983 - Construído o primeiro sistema de geração de energia elétrica eólica de grande porte, tendo a lâmina do rotor 100 metros de diâmetro. Desativado em 1986 devido a problemas com materiais.

1986 – Georg Bednorz e Carl Muller: Físicos alemães que descobriram a supercondutividade em materiais cerâmicos.

1986 - Acidente com usina geradora de energia elétrica nuclear em Tschernobyl, Rússia.

1992 - Construída a usina geradora de energia elétrica movida à energia solar, com a potência de 500 kW, no Monte Soleil, na Bélgica.

2000 – **Jack Saint Claire Kilby**: Físico e engenheiro elétrico americano (Texas, 1923 – Texas, 2005). Foi pioneiro nas pesquisas do circuito integrado e participou da sua invenção. Ganhou o Prêmio Nobel de Física pelas descobertas que possibilitaram o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à miniaturização de circuitos, fabricação de calculadoras eletrônicas de bolso, microcomputadores e diversos aparelhos elétricos e eletrônicos da atualidade.

2008 – Os laboratórios da Hewlett-Packard anunciaram a construção de um *memristor* usando técnicas de nanotecnologia. Um memristor "memory resistor" é um componente eletrônico passivo de dois terminais, que mantém uma função não-linear entre tensão e corrente. O memristor é considerado o quarto componente passivo de um circuito. Da mesma forma que para o resistor, o capacitor e o indutor, a definição do memristor pode ser dada por variáveis fundamentais da Engenharia Elétrica, tais como corrente, tensão, carga elétrica e fluxo magnético. A *teoria do memristor* foi formulada *Leon Chua* em 1971. (39)

2.3. História dos Parâmetros da Engenharia Elétrica

As descobertas e invenções referentes à Eletricidade nas áreas da eletrostática, corrente elétrica, magnetismo e eletromagnetismo, bem como cientistas e inventores tais como Charles Augustin de Coulomb, James Watt, Alessandro Volta, Michael Faraday, André Marie Ampère, George Simon Ohm e tantos outros estão registrados na história da Engenharia Elétrica. Citamos aqui em ordem cronológica aquelas descobertas e invenções que foram publicadas e tiveram notoriedade, bem como os seus inventores ganharam prêmios e são reconhecidos internacionalmente. Os sobrenomes destes descobridores foram atribuídos às unidades de medidas dos parâmetros de Engenharia Elétrica, conforme decisões de institutos internacionais.

1785 - Charles Augustin de Coulomb: Físico francês e tenente-coronel (Angoulême, 1736 – Paris, 1806) viveu 7 anos nas Índias Ocidentais, onde construiu fortificações ao mesmo tempo em que continuava seus estudos de mecânica aplicada. Voltou para a França, onde escreveu entre outras obras, a “Théorie des Machines Simples, en Ayant Égard au Frottement de leurs Parties et

à la Roideur de Cordages”, que lhe valeu a nomeação para a Academia de Ciências em 1784. No mesmo ano foi nomeado intendente---geral das Águas e Fontes, cargo que ocupou até 1792. A partir desta data, integrou uma comissão encarregada de estabelecer um novo sistema de pesos e medidas, baseado no sistema métrico decimal. Foi um dos pioneiros da *Eletrostática* e da física experimental na França e tornou-se conhecido quando enunciou a lei de atração e repulsão eletrostática. Para verificar esta lei, inventou a balança de torção que leva o seu nome. Ele fez experiências com uma barra isolante tendo na sua extremidade inferior duas esferas metálicas pequenas **a** e **b** e suspensa pela extremidade superior por um fio de prata. Esta barra foi colocada dentro de uma câmara de vidro isolada com uma escala gravada nela. Outra barra isolante, com uma esfera metálica **c** na sua extremidade inferior carregada elêtricamente, foi introduzida pelo orifício superior da câmara. As esferas **a** e **c** foram colocadas em contato e **a** foi eletrizada com carga de mesmo sinal de **c**. Estas esferas repeliram-se causando a torção do fio de prata. A intensidade da força eletrostática era proporcional ao ângulo de torção. Ele mediu o ângulo de torção para diferentes distâncias entre **a** e **c**, estabelecendo a lei do inverso do quadrado da distância **d**. Ao manter a distância entre as esferas ele alterou as intensidades das cargas elétricas **Q** e estabeleceu que a intensidade da força eletrostática é diretamente proporcional ao produto das cargas. Coulomb apresentou esta experiência à Academia Francesa de Ciências em 1785. Esta *lei de Coulomb* aplica-se às forças eletrostáticas de atração ou repulsão entre cargas elétricas puntiformes. Assim, a intensidade da força **F** que a carga **Q₁** localizada no ponto **P₁**, exerce sobre a carga **Q₂** localizada no ponto **P₂**; e a intensidade da força **F** que a carga **Q₂** localizada no ponto **P₂**, exerce sobre a carga **Q₁** localizada no ponto **P₁** são mostradas a seguir, figura 2.3.

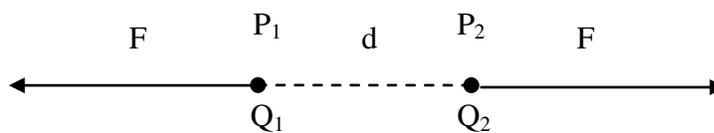


Figura 2.3 - Forças eletrostáticas entre duas cargas elétricas puntiformes

A intensidade da força eletrostática **F** pode ser calculada pela expressão (2.5) a seguir

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \pi \epsilon_0 d^2} \quad (2.5)$$

Q_1 e Q_2 são medidas em Coulomb, d é a distância constante entre as cargas elétricas medida em metros, F é a intensidade da força entre as cargas elétricas medida em Newton, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ medida em farad por metro. A permissividade elétrica indica como o campo elétrico afeta o meio, e como é afetado pelo meio também. Coulomb também observou que cargas elétricas de mesmo sinal repelem-se, e cargas elétricas de sinais diferentes atraem-se. Ele percebeu que a região ao redor da carga elétrica exercia interações com outras cargas elétricas e assim, chamou esta região de campo elétrico ou campo eletrostático. A intensidade do campo elétrico ou eletrostático no ponto P_1 , devido a uma carga elétrica puntiforme fixa Q , localizada em P_2 é calculada pela equação (2.6)

$$E = \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0 d^2} \quad \text{ou} \quad E = F / Q \quad (2.6)$$

E é a intensidade de campo elétrico medida em newton por coulomb.



Figura 2.4 – Representação das linhas de forças de campo elétrico

A representação gráfica de um campo elétrico é feita por linhas de forças tangentes ao vetor campo elétrico E em cada um de seus pontos. Elas são orientadas no sentido deste vetor. As linhas de força do campo elétrico saem da carga elétrica positiva puntiforme $Q > 0$, e as linhas de campo elétrico entram na carga elétrica negativa puntiforme $Q < 0$, conforme a Figura 2.4. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a medida da quantidade de Eletricidade ou carga elétrica Q foi chamada de “Coulomb” (símbolo C) em sua homenagem. Estudou também as diversas substâncias isolantes, constatando que a melhor entre estas era a goma-laca. Seus trabalhos sobre a Eletricidade e o magnetismo estão em “Mémoires sur l’Électricité et sur le Magnetisme”, 1785-1789. Suas experiências serviram de base para as teorias matemáticas de Poisson. (2) (27) (36) (54)

1765 – James Watt: Engenheiro escocês e inventor (Greenock, 1736 – Heathfield, 1819). Aos 19 anos foi para Londres, onde começou a trabalhar como aprendiz em uma fábrica de instrumentos matemáticos. Um ano depois, voltou para casa e tentou montar um negócio próprio em Glasgow, mas sofreu a oposição das grandes empresas da época que não reconheciam quem não tivesse completado seu aprendizado. Watt então recebeu apoio da Universidade de Glasgow e em 1757, recebeu o título de fabricante de instrumentos matemáticos. Dois anos depois se associou a John Craig e em 1763, inventou um dispositivo de perspectiva para desenhar objetos em três dimensões. Na Universidade ele conheceu o químico e físico Joseph Black, e familiarizou-se com suas idéias sobre o estudo do calor. Nessa época começou a interessar-se pelo aperfeiçoamento da máquina a vapor. Em 1764 ao consertar uma máquina a vapor da universidade, observou que o problema principal era o enorme consumo de vapor. Após estudos sobre as propriedades do vapor ele projetou um condensador em separado para a máquina a vapor, o qual evitou as grandes perdas deste no cilindro da máquina e intensificou o vácuo. Esta foi a primeira patente de Watt relativa ao *condensador de vapor*. Esta invenção foi o resultado direto do trabalho teórico de Black sobre o calor. Associou-se a Matthew Boulton em 1768, quando construiu a sua própria máquina a vapor e conseguiu registrar a patente dela em 1769. Esta aplicação de estudos teóricos sobre o calor na construção desta máquina foi de grande importância histórica, pois foi uma inovação na conversão de energia. Inventou um mecanismo centrífugo, que controlava a velocidade da máquina a vapor automaticamente ao ligar a sua saída à entrada, incorporando o princípio da retroalimentação de um servo mecanismo, que é o conceito básico da automação. Ele patenteou outras invenções importantes, incluindo a máquina rotativa; a máquina a vapor de dupla ação, na qual o vapor entra pelas duas extremidades do cilindro e no indicador de vapor, que registra a pressão na máquina. Logo as suas máquinas mostraram-se econômicas e começaram a substituir as outras, que consumiram quatro vezes mais combustível. Seu uso em larga escala possibilitou às máquinas serem afastadas das proximidades das quedas d’água e riachos, até então a fonte primária de energia para elas. A aplicação do *motor de Watt* na drenagem das minas de minérios e carvão possibilitou a recuperação de muitas máquinas, abandonadas pela impossibilidade de drenagem econômica. Em 1800 transferiu o negócio de máquinas para seus filhos e retirou-se para Heathfield, onde continuou suas pesquisas e invenções. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a medida de potência elétrica P foi chamada de “watt” (símbolo W) em sua homenagem. (2) (21) (27)

1800 - Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta: Físico italiano (Como, 1745 – Como, 1827). Cedo se interessou por física e aos 24 anos publicava o seu primeiro trabalho científico, *Da Força Magnética do Fogo Elétrico e dos Fenômenos daí Dependentes*. Mais tarde sustentou uma polêmica com Luigi Galvani sobre a teoria deste a respeito da Eletricidade animal, um fluido existente nos animais. Volta observou que a Eletricidade gerada era devido aos dois metais diferentes, no caso latão e ferro, em um ambiente úmido. Ele era professor de física experimental na Universidade de Bologna nesta época. Provou também ser esta Eletricidade idêntica à gerada em materiais inertes. Volta foi professor de física e diretor da Escola Real de Como (1774-1778) e catedrático de física da Universidade de Pávia (1779-1815). Entre 1777 e 1782 realizou viagens à Suíça, França, Alemanha, Holanda e Inglaterra mantendo contato com os cientistas mais importantes da época. Em 1792 e 1793 ele publicou na *Royal Society's Philosophical Transactions* trabalhos com a convicção que metais utilizados em seus experimentos, quando aplicados em corpos úmidos de animais podem excitar e mover o fluido elétrico. Em 1794 recebeu a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa e em 1801 viajou para Paris a convite de Napoleão Bonaparte, a fim de demonstrar seus experimentos de geração de Eletricidade. Ali ele foi condecorado como Conde. Em 1815 recebeu o cargo de diretor da Faculdade de Filosofia da Universidade de Pádua. Em 1775 ele inventou o *eletróforo*, um dispositivo que se torna eletricamente carregado ao ser friccionado, e que podia transferir carga elétrica para outros objetos. Entre 1776 e 1778 ele descobriu e isolou o gás metano. Quando as experiências de Luigi Galvani com “Eletricidade animal” foram publicadas (1791), Volta iniciou experiências que o levaram à teoria que tecido animal não era apropriado para ser condutor de Eletricidade. A prova desta teoria de Volta foi a invenção da *bateria ou pilha elétrica* em 1800, que foi construída com discos de cobre e zinco separados por uma massa de papelão. Esta foi a invenção de uma fonte contínua de eletricidade e suas implicações como fonte de eletricidade e questões teóricas levantadas foram muitas. Foram levantados problemas químicos que serviram de ligação entre a Eletricidade e o estudos de várias substâncias, e assim abriu-se uma nova dimensão de pesquisas no Século XIX (Ver Bateria de Bagdá no Capítulo 1). No Sistema Internacional de Unidades a medida de potencial U, a diferença de potencial ou tensão elétrica, e a força eletromotriz foram chamadas de “Volt” (símbolo V) em sua homenagem. (2) (21) (27)

1820 – Hans Christian Oersted: Físico e químico dinamarquês (Rudkjæbing, 1777 – 1851, Copenhague). Hans começou a estudar Filosofia natural e os cursos que mais influenciaram o

seu desenvolvimento foram os baseados nos trabalhos de Kant e a Filosofia crítica. Estes agentes delinearão o seu desenvolvimento. Na Universidade de Copenhagem ele estudou astronomia, física, matemática, química e farmácia, em 1797 graduou-se em farmácia e em 1799 doutorou-se tendo apresentado a tese “Dissertatio de forma metaphysices elementaris naturae externae”. Fez uma viagem científica em 1801 em busca de informações sobre a pilha voltaica, pesquisou a relação desta invenção com as idéias de Galvani e estudou a relação destas com a química. Na Alemanha ele teve contato com publicações sobre *os efeitos químicos da corrente de eletricidade*, e na França teve acesso à obra intitulado *Annales de chimie et de physique*. Retornou à Dinamarca em 1804 onde começou a fazer palestras públicas, que o tornaram tão popular ao ponto de ser convidado para ser professor na Universidade de Copenhagem em 1806. Ali iniciou seus experimentos científicos observando forças químicas, a seguir dedicou-se ao eletromagnetismo, e à compressibilidade de fluidos e gases. Em 1820 descobriu os efeitos da corrente elétrica sobre a bússola magnética e foi o pioneiro no estudo do Eletromagnetismo. Fez experiências e escreveu sobre vários elementos químicos, propriedades dos líquidos e ácidos. São famosas suas experiências sobre compressão de líquidos e para isso ele inventou o piezômetro. Os seus estudos sobre eletromagnetismo estão contidos na obra “Experimentos Acerca da Ação de Descargas Elétricas sobre uma Agulha Magnética” de 1820. Seus trabalhos de destaque foram o estabelecimento das correlações entre a Eletricidade, as correntes galvânicas e o Magnetismo, figuras 2.5 e 2.6.

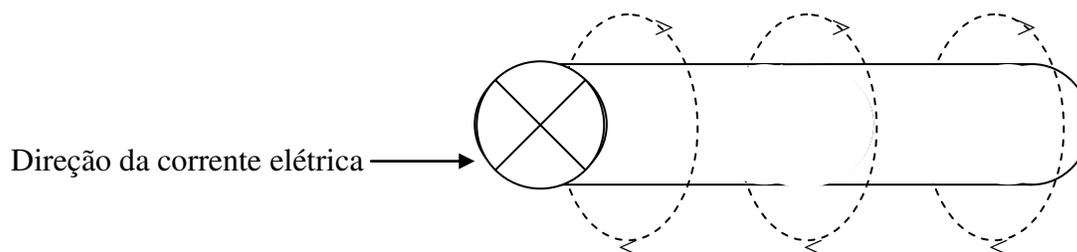


Figura 2.5 – Relação entre o campo magnético e a corrente elétrica: linhas de campo magnético em torno de um condutor retilíneo cilíndrico.

Em 1820 Oersted demonstrou que quando se aproxima uma bússola de um condutor que está sendo atravessado por corrente elétrica, a agulha magnética sofre um desvio, denunciando a

presença de um campo magnético. Observou ainda que a tendência da agulha magnética seja para situar-se em uma posição perpendicular à direção da corrente elétrica. No caso da corrente elétrica do condutor ter sua direção invertida, também a agulha magnética inverte o sentido para o qual aponta, o que demonstra que a orientação do campo magnético depende diretamente do sentido da corrente elétrica que percorre o condutor.

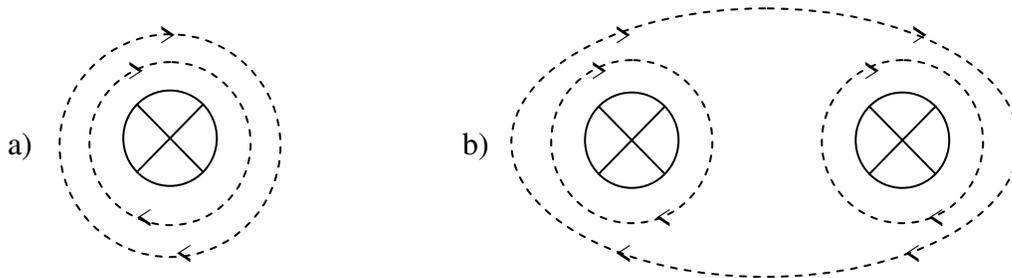


Figura 2.6 – Relação entre o campo magnético e a corrente elétrica. As linhas de campo magnético circundando um condutor elétrico retilíneo cilíndrico, no qual a corrente elétrica está entrando: a) em um condutor, b) em dois condutores paralelos.

Outro experimento que ele realizou mostra a interdependência existente entre o fluxo magnético e a corrente elétrica. Um condutor cilíndrico retilíneo percorrido por uma corrente elétrica é enfiado em um papelão de modo a atravessá-lo na perpendicular ao seu plano. A limalha de ferro que for espalhada sobre o papelão, dispõe-se em circunferências concêntricas, sendo que o centro é o eixo do fio percorrido pela corrente elétrica, figura 2.7. Se uma bússola for colocada sobre o papelão a uma distância constante do fio, a sua agulha magnética se posicionará tangente à linha de campo magnético naquele ponto. Se a bússola for mantida a distância fixa do fio e movimentada ao redor deste lentamente, observa-se que a posição da agulha magnética mostrará que as linhas de força do campo magnético são circunferências. Há uma unidade no trabalho científico de Oersted que pode ser visualizada através das áreas das pesquisas feitas iniciando com as forças químicas, o eletromagnetismo, a compressibilidade de fluidos e gases, até o fenômeno chamado diamagnetismo.

Ampère e Faraday seguiram as idéias de Oersted, e ampliaram o conhecimento sobre a Eletricidade ao descobrirem a Eletrodinâmica em suas pesquisas experimentais.

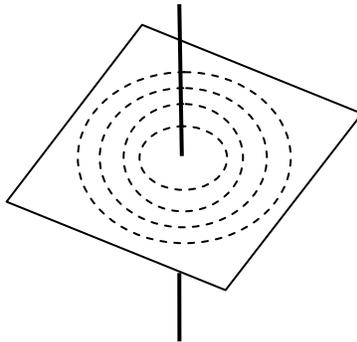


Figura 2.7 – Relação entre o fluxo magnético e a corrente elétrica. Linhas de campo magnético circundando um condutor elétrico cilíndrico mostrado pela disposição da limalha de ferro.

Foi condecorado com a medalha Copley pela Sociedade Real Inglesa em 1820, pelas pesquisas realizadas e os seus resultados. No antigo Sistema de Unidades CGS a intensidade de campo magnético (símbolo H) tinha a unidade oersted (Oe) em sua homenagem. (2) (21) (36) (54)

1821 – André Marie Ampère: Físico, matemático e químico francês (Lyon, 1775 – Marselha, 1836). Ampère fez um estudo completo sobre a relação entre correntes elétricas e seus efeitos sobre ímãs, e os efeitos de ímãs sobre correntes elétricas. Tais pesquisas levaram-no a sugerir que o ímã é composto de “moléculas magnéticas”, nas quais há correntes elétricas circulantes sempre. Ampère deduziu a fórmula da força produzida por duas correntes elétricas, lei de Ampère. Ele lançou os fundamentos da ciência da Eletrodinâmica através da sua demonstração, que correntes elétricas produzem campos magnéticos e através de suas investigações sobre a relação entre estes dois fenômenos. Ele era autodidata e se auto-educou através de estudos na biblioteca da família. Aos dezoito anos leu a obra recém editada “Mecânica Analítica” de Lagrange, refazendo sozinho todos os cálculos do texto. Ele sobreviveu à revolução francesa e tornou-se professor de química, matemática e línguas em Lyon. Transferiu-se para Bourg onde lecionou física e publicou sua primeira obra de matemática “Ensaio sobre a Teoria Matemática dos Jogos”. Foi admitido na Ecole Polytechnique e em 1808 tornou-se inspetor geral do sistema da universidade em Paris. Em 1824 começou a ensinar física no College de France e filosofia na

Faculte des Lettres. Foi afetado muitíssimo pela morte de seu pai, na guilhotina, durante a Revolução Francesa e também pela morte prematura de sua esposa.

As realizações mais notáveis de Ampère foram sobre a determinação independente da lei de Avogadro (1814) e o seu trabalho baseado na descoberta de Oersted em 1820, que a agulha magnética move-se na vizinhança de um condutor percorrido por corrente elétrica, estabelecendo assim a teoria do Eletromagnetismo. Ele teve sucesso na explanação que a corrente elétrica é capaz de excitar um campo magnético, apresentou uma teoria de como o ferro torna-se magnetizado e demonstrou que a direção de um campo magnético é determinada pela direção da corrente elétrica. Desenvolveu uma relação quantitativa para a intensidade de um campo magnético em relação à corrente elétrica que o produziu, a *Lei Circuital de Ampère*: “A circulação l do vetor \mathbf{B} em um circuito (percurso) fechado, é proporcional à soma algébrica das correntes elétricas I_i envolvidas pelo circuito”, conforme vemos na equação (2.9) e representada na figura 2.8.

$$B.l = \mu \cdot \sum I_i \quad \text{ou} \quad H.l = \sum I_i \quad (2.9)$$

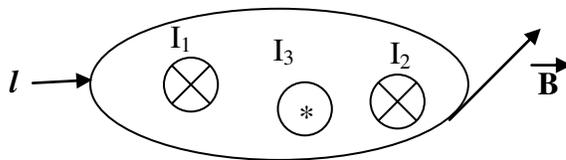
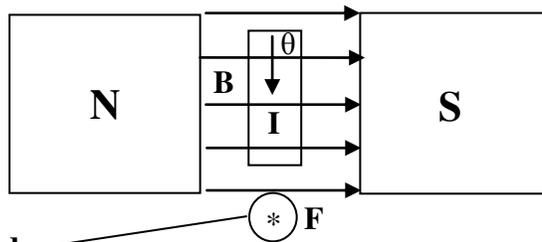


Figura 2.8 – Ilustração da Lei Circuital de Ampère

l é a circulação de $\vec{\mathbf{B}}$ e igual ao comprimento do percurso medido em metros, $\vec{\mathbf{B}}$ é o vetor de indução magnética e a sua intensidade é medida em tesla, I_1 , I_2 e I_3 são as intensidades das correntes envolvidas pela circulação medidas em ampère, μ é a permeabilidade magnética do meio medida em tesla.ampère por metro, H é a intensidade de campo magnético medida em ampère-espira por metro. Ao aplicar esta lei consideram-se como positivas as correntes elétricas que atravessam o plano da circulação, saindo no sentido normal ao plano, e negativas as correntes elétricas que entram no sentido normal ao plano.

Ampère também determinou uma regra para a determinação de força de interação entre dois condutores percorridos por correntes elétricas, o *Teorema de Ampère*. Ele colocou um condutor elétrico retilíneo de comprimento l percorrido por uma corrente elétrica I , posicionado entre os pólos magnéticos Norte e Sul de um ímã permanente, de modo que o ângulo formado entre o condutor e as linhas de força do fluxo magnético ou da indução magnética \mathbf{B} é θ . Experimentalmente observou que o condutor ficou sujeito a uma força \mathbf{F} na direção mostrada na figura 2.9 a seguir,



Direção da força \mathbf{F} saindo

Figura 2.9 - Ilustração gráfica 1 do Teorema de Ampère

A expressão vetorial (2.10) utilizada para o cálculo desta força é consequência do *Teorema de Ampère*, sendo mostrada a seguir

$$\vec{\mathbf{F}} = I \cdot l \times \vec{\mathbf{B}} \quad (2.10)$$

\mathbf{F} é o vetor força aplicada ao condutor elétrico medida em Newton, $I\vec{\mathbf{l}}$ é o vetor de intensidade I na direção de \mathbf{l} medida em ampère, $\vec{\mathbf{B}}$ é o vetor de indução magnética medido em tesla cujas linhas de força saem do pólo Norte \mathbf{N} e entram pelo pólo Sul \mathbf{S} .

A intensidade desta força pode ser calculada pela expressão: $\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot I \cdot l \cdot \text{sen}\theta$, onde \mathbf{F} é a intensidade da força aplicada ao condutor elétrico medida em Newton, \mathbf{B} é a intensidade da indução magnética medida em tesla, \mathbf{I} é a intensidade de corrente elétrica medida em ampère e \mathbf{l} é o comprimento do condutor elétrico medido em metros.

Ampère também fez experimentos para dois condutores percorridos por correntes elétricas e posicionados próximos entre si. Ampère descobriu que as forças entre eles foram de atração quando percorridos por correntes no mesmo sentido e quando percorridos por correntes em sentidos opostos as forças entre eles eram de repulsão, conforme a figura 2.10.

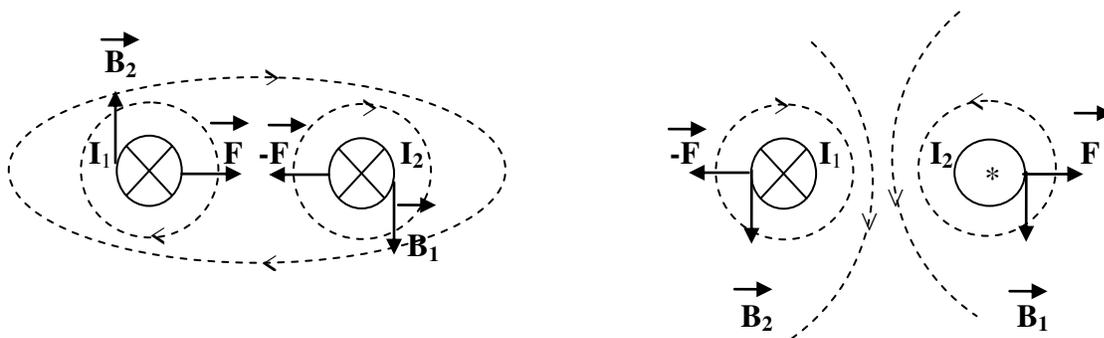


Figura 2.10 - Ilustração gráfica 2 do Teorema de Ampère

Ampère deixou várias obras destacando-se “Sobre a Expressão Matemática da Atração e da Repulsão Elétricas” (1823) e “Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos, Deduzida Unicamente da Experiência” (1827). No Sistema Internacional (SI) a intensidade de corrente elétrica I tem a unidade “ampère” (símbolo A) em sua homenagem. (2) (21) (27) (34) (54)

1826 – George Simon Ohm: Físico e matemático alemão (Erlangen, 1789 – Munique, 1854). Ohm demonstrou curiosidade para o estudo das ciências, conseguindo entrar na Universidade de Erlangen em 1803. Em 1817 foi nomeado professor de matemática e física numa escola em Colônia. Em 1821 o Professor alemão George Ohm fez experimentos relacionados à tensão elétrica produzida pela pilha voltaica e o fluxo de Eletricidade através de condutores metálicos. Ele utilizou diversos fios condutores com a mesma espessura, mas com comprimentos diferentes, e fez os experimentos utilizando um tipo de balança de torção semelhante à utilizada por Charles Coulomb. Ele descobriu que a resistência elétrica do fio era independente da quantidade de eletricidade que passava através dele. Ohm continuou suas pesquisas e em 1826 formulou uma teoria para explicar os resultados obtidos. Ele sugeriu que a Eletricidade passava pelo fio de partícula para partícula e poderia ser calculada, de modo que o seu movimento era causado por uma tensão elétrica ou potencial elétrico, semelhantemente à diferença de temperatura que cauda um fluxo de calor. Este conceito de tensão elétrica veio a ser chamado de força eletromotriz com unidade volt. Já em 1826 publicara a lei que leva o seu nome, *Lei de Ohm*, quando definiu a *resistência elétrica* como a relação entre tensão elétrica e a corrente elétrica. Entretanto, somente em 1841 Pouillet e alguns físicos ingleses mostraram como a sua teoria permitia a distinção entre intensidade e quantidade de Eletricidade. No mesmo ano Ohm ganhou a medalha

Copley da Sociedade Real Inglesa em reconhecimento aos trabalhos apresentados sobre Eletricidade. Sua descoberta diz que um circuito elétrico fechado possui três quantidades fundamentais: a força eletromotriz e a intensidade de corrente elétrica I que passa por ele, e a resistência total do circuito R . A corrente elétrica é proporcional à força eletromotriz e esta proporcionalidade é a resistência elétrica. A equação (2.11) que foi apresentada por ele é conhecida como a *primeira lei de Ohm*.

$$E = R \cdot I \quad \text{logo} \quad I = E / R \quad . (2.11)$$

Os cientistas contemporâneos de Ohm demoraram a reconhecer a descoberta, pois não perceberam quão precisas eram as conclusões dele sobre o trabalho experimental, e especialmente não perceberam como a descoberta esclareceu uma vasta gama de dados experimentais disponíveis na época. Após isto, em 1852, ele recebeu o convite para ensinar física na Universidade de Munique. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a resistência elétrica R tem a unidade “ohm” (símbolo Ω) em sua homenagem, por decisão do Congresso Mundial Elétrico reunido, em Chicago, em 1893. Examinando mais detalhadamente a resistência elétrica dos materiais, Ohm percebeu que esta aumentava com o aumento do comprimento l do fio e diminuía com o aumento da área A da secção reta do fio condutor atravessado pela corrente elétrica. Ele também percebeu que a resistência elétrica depende do tipo de material condutor e da temperatura; assim ele definiu a resistividade elétrica ρ e a equação (2.12) apresentada por ele é conhecida como a *segunda lei de Ohm*

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.12)$$

R é a resistência elétrica medida em ohm, l é o comprimento do condutor elétrico medido em metros, A é a área da secção reta do fio condutor medida em metros quadrados, ρ é a resistividade elétrica do material medida em ohm.metro.

Em 1933, ano do Centenário da entrada de Ohm no Instituto Politécnico da Baviera, este passou a

designar-se “Instituto Politécnico Ohm de Nuremberg”. Em 1983 foi dado, pelo Parlamento da Baviera, o nome de "Escola Superior Georg Simon Ohm de Nuremberg" (*Fachhochschule Georg-Simon-Ohm Nürnberg*). (2) (21) (27) (54)

1830 – Joseph Henry: Cientista norte-americano (Albany, NY, 1797 – Washington, 1878). Henry matriculou-se na Academia de Albany em 1819, onde estudou matemática, química e filosofia natural, e permaneceu ali até 1822. Na Academia tornou-se professor de Matemática e Filosofia Natural em 1826, onde também iniciou experimentos com Eletromagnetismo até 1832. Henry foi convidado para ser professor no College of New Jersey, mais tarde denominada Universidade de Princeton. Ele realizou as primeiras pesquisas em Química em colaboração com os irmãos Beck. Ao familiarizar-se com as pesquisas experimentais de Humphrey Davy, Michael Faraday, Ampère e Biot-Savart, Henry reiniciou experimentos com Eletricidade e Magnetismo em Princeton em 1827. Em suas palestras em Princeton fazia referências aos experimentos em Albany com o Eletromagnetismo, o desenvolvimento de eletroímãs grandes e a descoberta da indução eletromagnética como aplicação das teorias de Ampère. Em 1830, enquanto construía eletroímãs descobriu o fenômeno eletromagnético chamado indução eletromagnética. Notou que a variação da corrente elétrica no circuito de seus experimentos, causava variação no campo magnético do próprio circuito. Daí ocorria a indução de uma força eletromotriz no próprio circuito e esta precisava ser levada em consideração na determinação da corrente elétrica. Henry afirmou que o circuito com este comportamento tinha uma *auto-indutância*. Em outros experimentos Henry descobriu que, quando um circuito elétrico percorrido por uma corrente elétrica estava próximo a um segundo circuito e que uma variação na corrente elétrica neste segundo circuito provocava uma alteração no fluxo magnético comum aos dois circuitos, ele afirmou que havia uma *indutância mútua* entre os dois circuitos, conforme mostram as expressões (2.13). O seu trabalho foi desenvolvido independentemente de Michael Faraday, mas é a este último que se atribui a honra da descoberta da indução eletromagnética, por ter publicado primeiro as suas conclusões.

$$L_1 = \frac{\Phi_1}{I_1} \quad L_2 = \frac{\Phi_2}{I_2} \quad M_{12} = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (2.13)$$

L_1 é a auto-indutância do circuito 1, L_2 é a auto-indutância do circuito 2, M_{12} é a indutância mútua entre os circuitos 1 e 2 medidas em Henry e k é o coeficiente de acoplamento que depende da geometria e posição relativa dos circuitos 1 e 2 entre si. Figura 2.12

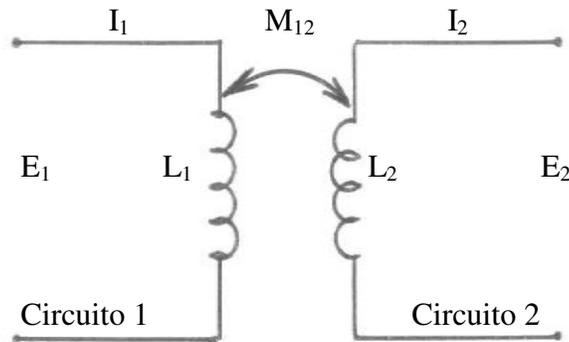


Figura 2.12 - Ilustração dos circuitos 1 e 2 com as indutâncias próprias e mútuas

Quando Faraday encontrou-se com Henry em 1837, ele convidou o seu colega Americano para fazer uma conferência sobre a Teoria Matemática do Eletromagnetismo no Royal Institution.

À semelhança de Faraday, Henry tinha constatado experimentalmente a Lei de Ohm em 1830 e estava realizando experimentos com o que chamamos hoje de *casamento de impedâncias*. Enquanto estava em Albany, ele projetou eletroímãs para fazer demonstrações da obtenção de grandes efeitos magnéticos a partir de pequenas excitações, em sala de aulas para os alunos. Assim ele desenvolveu procedimentos para salientar a ampliação de pequenos fenômenos eletromagnéticos. Os estudos de Henry acerca do relê eletromagnético foram base do telégrafo elétrico, aperfeiçoado por Morse e Wheatstone. Mais tarde Henry provou que as correntes elétricas podem ser induzidas à distância, magnetizando uma agulha com a ajuda de um relâmpago a 13 quilômetros de distância. Teve participação ativa no estabelecimento da Associação Americana para os Avanços em Ciências em 1848. Após a morte de Henry em 1878, a unidade de auto-indutância L e indutância mútua M no Sistema Internacional de Unidades (SI) têm a unidade “henry” (símbolo H) em reconhecimento ao seu trabalho e às publicações feitas. Em 1846 foi nomeado secretário da Instituição Smithsonian e posteriormente foi um dos fundadores da Academia Nacional de Ciências. (27) (28) (36)

1831 – Michael Faraday: Químico e Físico inglês (Newington, 1791 – Hampton Court, 1867). Em 1810 Faraday teve acesso ao artigo sobre a Eletricidade escrito por James Tyler, o qual descreveu seus efeitos como sendo um fluido contendo vários modos como a luz, o calor e fenômenos elétricos. Em Londres Faraday assistiu a uma série de conferências feitas pelo físico Humphry Davy no “Royal Institution”, e após ter feito as anotações reuniu-as às ilustrações e encadernando tudo enviou para Davy. Devido a um acidente no laboratório Davy ficou com a vista parcialmente prejudicada e então recomendou que Faraday fosse seu assistente-preparador, o qual em 1813 foi indicado como seu secretário-assistente. Trabalhou junto com Davy na invenção da lâmpada para mineração. Ali Faraday aprofundou seus estudos em química tornando-se analista de química. Em 1823 ele descobriu que o *cloro* podia ser liquefeito e em 1825 descobriu a substância conhecida hoje como *benzeno*. Entretanto, seu trabalho de destaque foi sobre a Eletricidade. Em 1821, logo após o químico dinamarquês Hans Oersted descobrir o fenômeno do eletromagnetismo, Faraday construiu dois dispositivos para fazer o que ele chamou de rotação eletromagnética, que é um movimento contínuo circular causado por força magnética circular ao redor de um fio. Em 1831 ele iniciou uma primeira série de descobertas que o levaram a descobrir a indução eletromagnética, que é o fundamento da tecnologia eletromagnética moderna. Faraday fez experimentos com Eletromagnetismo considerando que se a Eletricidade que atravessa um condutor produz efeitos magnéticos, como Oersted e Ampère tinham demonstrado, então um campo magnético deveria gerar uma corrente elétrica em um condutor. Utilizando um anel de indução, Faraday fez experimentos que comprovaram esta hipótese e fez então outra grande descoberta: *há indução ou a geração de Eletricidade em um condutor através do efeito eletromagnético de uma corrente elétrica em outro condutor*. O anel de indução é o princípio de funcionamento do primeiro transformador elétrico. Ao iniciar a segunda série de descobertas ele descobriu a *indução magnetoelétrica*: a geração de corrente elétrica constante. Para fazer isto ele ligou dois fios em um contato deslizante de um disco de cobre. Ao girar o disco entre os pólos magnéticos de um ímã permanente em formato de ferradura, ele obteve corrente contínua. Este é o princípio de funcionamento do primeiro *gerador elétrico de corrente contínua*. Embora os dispositivos inventados por ele não tenham utilidade prática hoje, contribuíram para aumentar sem medida a compreensão teórica da Eletricidade e produziram resultados práticos como o desenvolvimento de geradores elétricos, motores elétricos, trens elétricos, bondes elétricos e a implantação de um sistema público de

fornecimento de energia elétrica. Ele descreveu estes experimentos em dois artigos apresentados na “Royal Society” em 1831 e 1832. Estas foram a primeira e a segunda parte das “Pesquisas experimentais sobre Eletricidade”, onde ele apresentou a “lei que direciona a evolução da Eletricidade por indução magnetoelétrica”. Ao ler estes artigos, o francês Hippolyte Pixii construiu um gerador elétrico que utilizava o movimento de rotação de uma bobina em relação a um ímã permanente. Os geradores de energia elétrica nas usinas de geração hoje são descendentes diretos do gerador desenvolvido por Pixii, a partir dos princípios descobertos por Faraday. Ele continuou suas experiências e em 1832 demonstrou que a Eletricidade induzida por um ímã permanente, a Eletricidade voltaica produzida por uma bateria e a Eletricidade estática eram todas da mesma natureza. Faraday ao estudar e fazer experimentos com baterias passou a suspeitar que o líquido entre as placas passava por uma decomposição química, cuja taxa dependia da corrente elétrica que passava por ele e não dos metais que eram feitas as placas. Ele chamou este líquido de *eletrólito* e de *íons* os átomos carregados positivamente que circulam pelo eletrólito na bateria. Realizou um trabalho significativo em eletroquímica elaborando a primeira e a segunda *Lei da Eletrólise*, fundamentos da indústria eletroquímica moderna. A primeira lei estabelece que “*o peso dos produtos da eletrólise é proporcional à quantidade de Eletricidade que passou pelo eletrólito*”, como pode ser visto na equação (2.7) a seguir.

$$w = \varepsilon \cdot q = \varepsilon i t \quad (2.7)$$

w é o peso dos produtos da eletrólise em quilogramas, ε é o equivalente eletroquímico da substância eletrólito, q é a quantidade de Eletricidade em Coulomb, i é a corrente elétrica em ampère e t é o intervalo de tempo em segundos. A segunda lei diz que “*para uma dada quantidade de Eletricidade, o peso dos produtos da eletrólise é proporcional aos seus equivalentes eletroquímicos*”. Ele estabeleceu que fosse possível medir uma quantidade de Eletricidade por sua ação de decomposição química, e então para fazê-la inventou o *voltâmetro*. Em 1833 ele foi convidado para ser professor de química, em 1835 estudou as relações entre a Eletricidade estática e a corrente elétrica, ao realizar experiências da distribuição de cargas elétricas em excesso na superfície externa de um condutor. Ele construiu uma tela cônica feita de linho, um material que conduz Eletricidade bem relativamente. Eletrizando a tela, Faraday constatou com o auxílio de um eletroscópio a presença de cargas elétricas na superfície externa do cone somente. Depois ele puxou o barbante preso ao vértice do cone e virou-o ao avesso sem

tocá-lo. Mais uma vez foi constatada a presença de cargas elétricas na superfície externa somente. Ele concluiu que as *cargas elétricas em excesso de um condutor em equilíbrio eletrostático não se localizam no seu interior, mas se distribuem pela superfície externa*, conforme a figura 2.11.

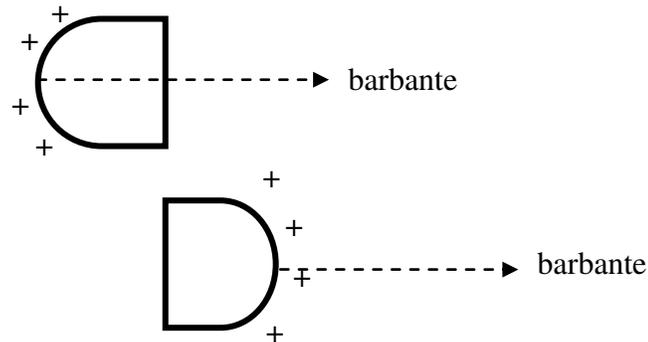


Figura 2.11 - Tela cônica do experimento de Faraday

Faraday fez experiências com um cilindro condutor oco, que estava carregado eletricamente e em equilíbrio eletrostático. Ele colocou duas bolinhas de material leve unidas em seu interior e duas bolinhas de material leve unidas dependuradas próximo da superfície externa do cilindro. Observou que as bolinhas no interior do cilindro permaneceram unidas, enquanto que as bolinhas no exterior separaram-se. Ele concluiu que o campo elétrico nos pontos internos do condutor em equilíbrio eletrostático é nulo, porém não é no exterior do condutor. Elaborou a lei da indução eletromagnética: “*Sempre que em um condutor em forma de um percurso fechado, percorrido por corrente elétrica, o fluxo de indução magnética concatenado variar $d\Phi$ com o tempo dt , aparece no condutor uma força eletromotriz e que é igual à taxa de variação de fluxo por unidade de tempo.*” A equação (2.8) expressa esta relação

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.8)$$

Faraday também ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1832 e 1838 em reconhecimento aos trabalhos apresentados sobre Eletricidade. Ele também descreveu a teoria de linhas de força que se movem entre corpos com propriedades elétricas e magnéticas, a qual

possibilitou a Maxwell formular uma teoria matemática sobre propagação de ondas eletromagnéticas. Em 1865 Maxwell demonstrou matematicamente que o fenômeno eletromagnético se propaga como ondas através do espaço com a velocidade da luz; isto lançou os fundamentos da comunicação por rádio e confirmada experimentalmente por Hertz em 1888 e desenvolvido para uso prático por Marconi na virada do século. Seus trabalhos sobre fenômenos de diamagnetismo (diamagnetismo é a propriedade das substâncias cuja imantação induzida é de sentido oposto à do campo indutor. Diamagnético é o material que apresenta susceptibilidade negativa, e que é repelido por um ímã) levaram-no a estudar a ação mútua entre a Eletricidade e a gravitação. A última pesquisa feita por ele relacionava-se com as modificações da refratibilidade da luz sob a ação de um campo magnético. Ele foi o maior conferencista de seus dias e fez grandes esforços para a publicação das grandes descobertas da ciência e tecnologia no século XIX, através de seus artigos, correspondências e discursos no “Royal Institution”. As conferências nesta casa, para crianças, foram iniciadas por Faraday e continuam até o dia de hoje. No Sistema Internacional de Unidades a capacidade **C** de um capacitor elétrico tem a unidade “farad” (símbolo F) em homenagem a ele. (2) (21) (27) (33) (54)

1833 – Wilhelm Eduard Weber: Físico alemão (Wittenberg, 1804 – Göttingen, 1891). Quando as Universidades de Halle e Wittenberg se uniram em uma só em 1817, Weber iniciou seu primeiro trabalho científico fazendo experimentos com ondas sonoras na água, como colaborador de Ernst Heinrich. A publicação do resultado no artigo *Wellenlehre, auf Experimente gegründet* em 1825 introduziu o nome dele no meio científico. Weber apresentou em 1827 a sua tese de doutorado, sob a orientação de Schweigger, abordando a teoria de órgãos de tubos como osciladores sonoros acoplados. A partir daí tornou-se Professor Assistente da Universidade de Halle em 1828. Em 1831 Gauss convidou-o para ser Professor de Física na Universidade de Göttingen e realizar pesquisas com ele sobre geomagnetismo, o que aconteceu até 1837. Gauss e Weber fundaram juntos o Observatório Astronômico Magnético de Göttingen como o primeiro de uma rede de observatórios e correlacionar os resultados de suas medições.

Estabeleceu a unidade de fluxo magnético ou fluxo de indução magnética, investigou a relação entre as unidades de intensidade dos campos eletrostático (volt por metro) e eletromagnético (ampère-espira por metro); inventou o telégrafo eletromagnético alimentado por bateria (1833), o qual interligava o Observatório e o Laboratório de Física na Universidade distantes de aproximadamente 2.700 metros, e inventou o primeiro eletrodinômetro (1846) para verificar

experimentalmente a teoria de Ampère sobre forças entre condutores percorridos por correntes elétricas. Prosseguindo com seus estudos, examinou também as forças entre as cargas elétricas. Junto com seu irmão Ernst fez experimentos que resultaram na chamada *Lei de Weber*, equação (2.14), que descreve a interação dos campos eletromagnéticos de cargas elétricas em movimento e possibilita calcular as forças entre as cargas. Para compreender esta lei é necessário lembrar de que a lei de Coulomb aplicada à Eletrostática considera constante a distância entre duas cargas elétricas puntiformes. Quando a distância entre duas cargas elétricas, em estudo, varia com o tempo tem-se a lei de Weber, que possibilita calcular as forças que atuam entre elas. Então, conclui-se que a lei de Coulomb é um caso particular da lei de Weber.

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \pi \epsilon_0 d^2} \left[1 - \frac{\dot{d}}{2 C^2} + \frac{\ddot{d} \cdot d}{C^2} \right] \quad (2.14)$$

Q_1 e Q_2 são as cargas elétricas em movimento medidas em Coulomb, d é a distância entre as cargas elétricas medida em metros, d *ponto* é a derivada primeira da distância em relação ao tempo medida em metros por segundo, d *dois pontos* é a derivada segunda da distância em relação ao tempo medida em metros por segundo ao quadrado.

$C = (\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{-1/2} = 3 \cdot 10^8$ metros por segundo.

Ele ganhou a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1859, em reconhecimento aos trabalhos apresentados sobre Eletrostática e Eletromagnetismo. Na reunião da Comissão Internacional de Eletrotécnica em Bruxelas, em 1935, foi adotada para compor o Sistema Internacional de Unidades a unidade “weber” (símbolo Wb), para o fluxo magnético ou fluxo de indução magnética \emptyset em homenagem a ele. (27) (29) (36)

1838 – Carl Friedrich Gauss: Físico, matemático e astrônomo alemão (Brunswick, 1777 – Göttingen, 1855). Aprendeu a ler e a escrever com três anos de idade, e na escola demonstrou grande facilidade com matemática. Enfrentou dificuldades financeiras até ser apresentado ao Duque de Brunswick, que ao perceber a inteligência do jovem decidiu custear-lhe os estudos. Gauss aprendeu também grego e latim, mas decidiu orientar seus estudos pela matemática e em 1796 ficou animado com a descoberta que fez com o compasso ao construir um polígono de dezessete lados. Em diversos períodos ocupou-se com diferentes disciplinas, acrescentando

alguma contribuição a cada uma delas. Na Aritmética e na Álgebra descobriu que toda equação algébrica possui pelo menos uma raiz. Formulou a teoria da divisibilidade dos números. Na Geometria estudou as superfícies do espaço, o conceito de curvatura total e as maneiras de representar as superfícies no plano. Estudou Geometrias não-Euclidianas e concluiu que elas podem existir. Publicou 155 volumes sobre seus estudos matemáticos. Na Estatística elaborou a curva de distribuição normal ou gaussiana, que é um resultado importante e mostra matematicamente e graficamente a distribuição normal de variáveis. Na Astronomia dedicou-se ao estudo dos corpos celestes de formato não-esférico e ao cálculo das órbitas dos planetas utilizando o *Método dos Mínimos Quadrados*. Na Matemática Física estudou o problema da forma que toma um corpo fluído no estado de equilíbrio, quando solicitado por forças externas. Pesquisou sobre o Magnetismo terrestre e sobre a propagação das ondas luminosas. Em seus estudos sobre Eletricidade na área da Eletrostática, elaborou o teorema que ficou conhecido pelo seu nome *Teorema de Gauss aplicado à Eletrostática*: “O fluxo eletrostático Φ_e produzido por um Campo Elétrico E numa superfície fechada é igual à soma das cargas envolvidas pela superfície Q , dividida pela permissividade do meio ϵ ”, conforme a equação (2.15). Este fluxo será positivo quando for emergente, sendo o campo elétrico resultante de dentro para fora da superfície fechada. O campo assim constituído foi chamado por ele de campo de repulsão. Caso contrário, o fluxo será negativo e o campo será de atração.

$$\Phi_e = \frac{\sum Q}{\epsilon} \quad (2.15)$$

Interessou-se muito sobre o magnetismo terrestre e em colaboração com Weber inventou novos aparelhos para a medição de magnetismo, como o magnetômetro para medir intensidade de campo magnético. Em 1833 com a cooperação de Weber erigiu o Observatório Magnético em Göttingen, onde fizeram observações sobre o magnetismo terrestre. Elaborou o teorema que ficou conhecido pelo seu nome *Teorema de Gauss aplicado à Magnetostática*: “O fluxo total Φ_m de linhas de campo magnético em qualquer superfície fechada é nulo”, conforme vemos na equação (2.16)

$$\Phi_m = \sum B \cdot S = 0 \quad (2.16)$$

B é a intensidade de indução magnética e S a área limite da superfície fechada.

Como não existem cargas magnéticas isoladas, as linhas de campo magnético formam circuitos fechados. Assim, o número de linhas de fluxo do campo magnetostático que sai da superfície fechada, chamada Gaussiana, é igual ao número das linhas que entra nela. Em 1833 Gauss apresentou à Academia o artigo *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*, que propunha um sistema de unidades absoluto (comprimento, massa e tempo) para a medição de quantidades não mecânicas. O artigo também apresentou várias descobertas relativas às grandezas estáticas, térmicas e eletrostáticas que não foram publicadas na ocasião, porque o seu interesse estava concentrado em geomagnetismo. Dentre suas invenções destacam-se o telégrafo óptico e o telégrafo com fio em 1833. Gauss recebeu a medalha Copley da Sociedade Real Inglesa em 1838 em reconhecimento aos experimentos e publicação dos resultados. No antigo Sistema de Unidades CGS a indução magnética B tem a unidade “Gauss” (símbolo G) em homenagem a ele. $1 \text{ G} = (10)^{-4} \text{ T}$. (2) (27) (32) (36) (54)

1840 – James Prescott Joule: Físico inglês (Salford, 1818 – Sale, 1889). Estudou sob a orientação de do físico inglês John Dalton na Universidade de Manchester em 1835, onde iniciou seus experimentos sobre a constituição dos gases. Ele estudou o trabalho realizado por um gás em expansão e o calor gerado quando um gás é comprimido. Joule era autodidata em ciência e atribuía grande importância à mensurabilidade. Assim a obtenção de dados quantitativamente exatos tornou-se característica de suas pesquisas sobre a relação entre os efeitos elétricos, mecânicos e químicos. Dessas experiências resultou a *Teoria Mecânica do Calor*, sua grande contribuição à ciência. Estabeleceu que as várias formas de energia: mecânica, elétrica e calor é basicamente energia e podem ser convertidas de um tipo em outro tipo. Assim ele definiu o fundamento da *lei da conservação da energia*, a primeira lei da Termodinâmica. Ao descrever a lei que leva o seu nome, a “*lei de Joule*” em um artigo – A Produção de Calor por Eletricidade Voltaica (1840) – ele afirmou que o calor produzido em um fio condutor percorrido por corrente elétrica I é proporcional ao produto da sua resistência elétrica R pelo quadrado da intensidade dessa corrente, equação (2.17).

$$\text{Calor produzido} \sim R \cdot I^2 \quad (2.17)$$

Em 1840, Joule apresentou à Sociedade Real Inglesa o estudo “Sobre a Produção do Calor por Eletricidade Voltaica”, que foi publicado na Revista Filosófica um ano depois. Em 1843 ele publicou o seu valor para uma quantidade de trabalho necessária a produzir uma unidade de calor, chamado o “mecânico equivalente do calor”. Ele utilizou quatro métodos precisos para a determinação deste valor. Usando materiais diferentes, ele estabeleceu que o calor fosse uma forma de energia para qualquer substância que era aquecida. O valor do equivalente mecânico do calor é representado pela letra “J”. Em 1845 escreveu para a Associação Britânica o trabalho “Sobre os efeitos Caloríficos da Eletricidade e sobre o Valor Mecânico do Calor”, no qual abordou pela primeira vez a equivalência mecânica do calor. A importância de Joule para a ciência liga-se também à primeira estimativa da velocidade das moléculas de gás, em 1848. No ano de 1849 ele anunciou o trabalho “Sobre o Equivalente Mecânico do Calor”, o qual foi apresentado à Sociedade Real Inglesa. A partir de 1852 passou a trabalhar junto com William Thompson (Lord Kelvin) e a realizar uma série de experimentos novos sobre a nova ciência da Termodinâmica. Houve experimentos realizados por Lord Kelvin e Rudolf J. E. Clausius também, com base na teoria mecânica do calor apresentada por Joule e no Teorema da Sadi Carnot. Dessas experiências resultou o *efeito Joule-Thompson*. Em 1870 a Sociedade Real Inglesa condecorou Joule com a medalha Copley e o elegeu como seu membro, como reconhecimento das experiências realizadas e pelos resultados apresentados. No Sistema Internacional de Unidades o equivalente mecânico do calor J, a energia e o trabalho T têm a mesma unidade “joule” (símbolo J) em homenagem a ele. (2) (21) (27)

1855 – James Clerk Maxwell: Físico e professor escocês (Edimburgo, 1831 – Glenlair, 1879). Em 1841 Maxwell entrou na Academia de Edimburgo, onde desenvolveu seu interesse pela matemática. Aos quatorze anos escreveu um artigo sobre a construção de curvas ovais perfeitas e por isso foi premiado com uma medalha da Academia. Dois anos depois, seus artigos “*Sobre a Teoria das Curvas Ovais e Sobre o Equilíbrio dos Sólidos Elásticos*” foram lidos na Sociedade Real Inglesa e publicados na revista *Philosophical Transactions of Royal Society* daquela entidade. Realizou trabalho revolucionário sobre o Eletromagnetismo e a teoria cinética de gases. Após a sua graduação em matemática pelo Trinity College, Cambridge (1854), ele iniciou-se no magistério no Marischal College em Aberdeen (1856) e no King's College em Londres (1860); tornou-se o primeiro professor de Física do Laboratório Cavendish em

Cambridge, 1871. Uma enorme contribuição de Maxwell para a ciência foi seu estudo sobre os anéis do planeta Saturno, sendo a natureza destes muito debatida na época. Maxwell afirmou que a estabilidade era conseguida somente se os anéis fossem constituídos por muitas partículas sólidas, o que foi aceito na época. A seguir ele examinou moléculas de gases em movimento rápido e baseando-se em sua análise estatística formulou em 1866, independentemente de Ludwig Boltzmann, a *teoria cinética dos gases*, hoje conhecida como Maxwell-Boltzmann. Esta teoria demonstrou que temperatura e calor envolviam somente movimentação molecular. Filosoficamente, esta teoria significa uma mudança no conceito da certeza. A teoria proposta afirmava que “o calor era visto como um fluxo de moléculas com altas temperaturas (moléculas quentes), as quais tinham alta probabilidade de moverem-se, em direção às moléculas com temperaturas mais baixas (moléculas frias)”. Este novo conceito introduzido não rejeitou os estudos anteriores sobre termodinâmica, antes, porém, utilizou a melhor teoria fundamental da termodinâmica existente na época para explicar as suas observações experimentais.

Ao fazer considerações sobre a Eletricidade e o conceito de linhas de força, Faraday sugeriu que o espaço deveria estar preenchido com estas linhas e que talvez a luz e o calor radiante fossem ondas que se propagavam neste espaço. Estas idéias precisavam de uma análise matemática profunda para a sua comprovação e Maxwell aceitou este desafio. Em suas pesquisas realizadas entre 1864 e 1873, Maxwell mostrou que através de quatro equações matemáticas relativamente simples era possível representar o comportamento dos campos elétrico e magnético, e as suas naturezas inter-relacionadas. Em outras palavras: uma carga elétrica em movimento de oscilação produz um campo eletromagnético. As quatro equações diferenciais parciais desenvolvidas da Eletricidade e do Magnetismo foram apresentadas por ele em 1873, nas suas obras “A Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético” e “Tratado Sobre Eletricidade e Magnetismo”. Estas são consideradas como um dos grandes resultados da ciência física do século XIX.

A Lei de Faraday-Lenz da equação (2.2) é representada na forma integral pela equação (2.18) de Maxwell

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \qquad \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \qquad (2.18)$$

\mathcal{E} é a força eletromotriz induzida em um condutor percorrido por corrente elétrica em forma de percurso fechado, devido à taxa de variação de fluxo magnético concatenado por unidade de tempo. O fluxo magnético concatenado é aquele que atravessa uma superfície, cujo contorno é um percurso fechado. A força eletromotriz é a energia por unidade de carga fornecida às cargas da corrente elétrica, que é calculada pela integral de linha no percurso fechado, figura 2.13.

\vec{E} é o vetor campo elétrico produzido pelas cargas elétricas em movimento no condutor em forma de percurso fechado.

$d\vec{l}$ é o vetor elemento infinitesimal da circuitação do campo elétrico sobre o percurso fechado.

\vec{B} é o vetor indução magnética que atravessa a área S cujo contorno é o percurso fechado I . A indução magnética variável com o tempo troca energia com cada carga elétrica em movimento.

$d\vec{S}$ é o vetor elemento infinitesimal da área S envolvida pela circuitação. Este vetor é normal ao elemento de área dS . A integral dupla calcula o fluxo magnético Φ que atravessa a superfície de área S .

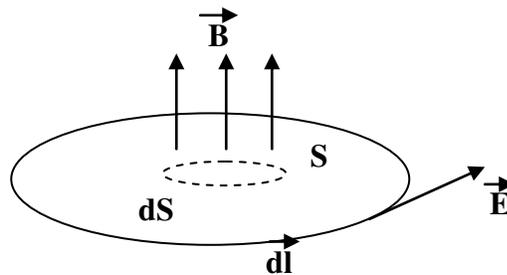


Figura 2.13 - Ilustração da Lei de Faraday representada pela equação de Maxwell

A forma diferencial desta equação de Maxwell (2.19) é obtida a partir da aplicação do *Teorema de Stokes* ao primeiro membro da forma integral anterior. O teorema afirma “Seja S uma superfície orientada, lisa por trechos, cuja fronteira é formada por uma curva C simples, fechada, lisa por trechos, com orientação positiva. Seja E um campo vetorial cujos componentes tem derivadas parciais contínuas na região aberta de \mathbf{R}^3 que contém S ”. Então,

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint_S \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad \Rightarrow \quad \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.19)$$

$\text{rot } \vec{E}$ é o operador rotacional aplicado ao vetor campo elétrico sobre uma superfície que tem uma curva fechada como seu contorno.

$\partial \vec{B} / \partial t$ é a taxa de variação parcial do vetor indução magnética por unidade de tempo.

O operador derivada parcial é aplicável, pois poderá ocorrer variação do vetor \vec{B} em relação ao meio (permeabilidade magnética do meio pode não ser constante) e variação em relação à área variação de área atravessada pelo fluxo magnético). As formas integral e diferencial desta equação de Maxwell são aplicáveis à *Eletrodinâmica*.

O Teorema de Gauss aplicado à Eletrostática, equação (2.15), é representado na forma integral pela equação (2.20) de Maxwell e está ilustrado na figura 2.14.

$$\phi_e = \frac{\sum Q}{\epsilon} \quad \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q = \iiint \rho \cdot dV \quad (2.20)$$

\vec{D} é o vetor densidade superficial de fluxo do campo elétrico ou vetor Deslocamento.

$d\vec{S}$ é o vetor elemento infinitesimal de área da superfície fechada atravessada pelo fluxo, medido em metro quadrado. Este vetor é normal ao elemento de área dS .

Q é a carga elétrica total que dá origem ao fluxo do campo elétrico, sendo envolvida pela superfície S . Q resulta de uma distribuição volumétrica de cargas ρ medida em C/m^3 . O interior da superfície é um meio dielétrico com permissividade ϵ .

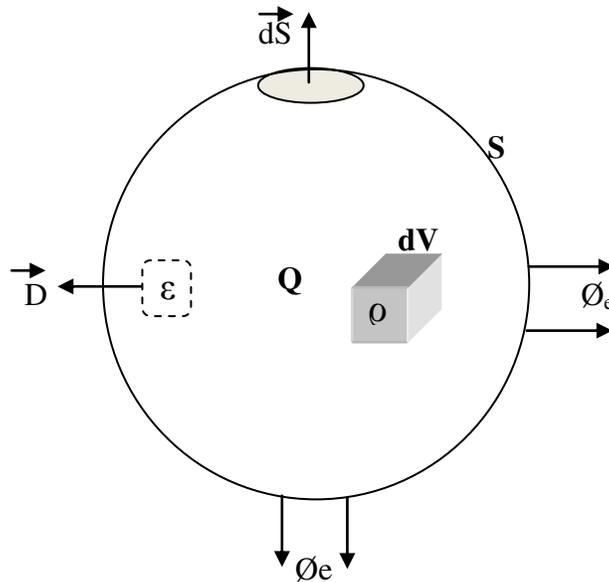


Figura 2.14 - Ilustração do Teorema de Gauss aplicado à Eletrostática e representado pela equação de Maxwell

A forma diferencial desta equação de Maxwell é obtida a partir da aplicação do *Teorema de Gauss ou Teorema da divergência* à forma integral anterior. O teorema afirma “*Seja V uma região sólida simples e seja S a superfície fronteira do sólido orientada positivamente para fora. Seja D um campo vetorial cujas componentes tem derivadas parciais contínuas, em uma região aberta contida na superfície fronteira do sólido V simples.*” Então,

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \text{div } \vec{D} \cdot d\vec{V} \Rightarrow \text{div } \vec{D} = \rho \quad (2.21)$$

$\text{div } \vec{D}$ é o operador divergência aplicado ao vetor deslocamento \vec{D} ou fluxo do campo elétrico através da superfície fechada S. Este vetor é normal ao elemento de área dS. Divergência positiva significa que as linhas de fluxo do campo elétrico atravessam a superfície fechada saindo do sólido, $\rho > 0$. Divergência negativa significa que as linhas de fluxo do campo elétrico atravessam a superfície fechada entrando no sólido, $\rho < 0$.

$d\vec{V}$ é o vetor elemento infinitesimal de volume do sólido contido na superfície fechada de área S atravessada pelo fluxo do campo elétrico. A integral tripla calcula a carga elétrica total no sólido.

A lei Circuital de Ampère, equação 2.9, é representada na forma integral pela equação 2.22 de Maxwell

$$\mathbf{B}.l = \mu. \sum I_i \quad \text{ou} \quad \mathbf{H}.l = \sum I_i \qquad \oint_C \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint (\vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}) \cdot d\vec{\mathbf{S}} \quad (2.22)$$

$\vec{\mathbf{H}}$ é o vetor campo magnético produzido pela corrente elétrica da circuitação.

$d\vec{\mathbf{l}}$ é vetor elemento de comprimento infinitesimal da circuitação.

$\vec{\mathbf{J}}$ é vetor densidade de corrente elétrica de condução tangente à circuitação, medido em A

$\frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$ é vetor corrente de deslocamento tangente à circuitação, medido em A

$d\vec{\mathbf{S}}$ é o vetor elemento infinitesimal da área S envolvida pela circuitação ou curva fechada, perpendicular à superfície dS. A integral dupla calcula a corrente total que circula na curva fechada.

A forma diferencial desta equação de Maxwell é obtida a partir da aplicação do *Teorema de Stokes* ao primeiro membro da forma integral anterior. Portanto, resulta a equação (2.23)

$$\oint_C \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint \text{rot } \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} \quad \Rightarrow \quad \text{rot } \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad (2.23)$$

$\text{rot } \vec{\mathbf{H}}$ é o operador rotacional aplicado ao vetor campo magnético, sendo perpendicular ao plano contido na circuitação. O vetor campo magnético tem como origem o vetor corrente total (densidade de corrente de condução e corrente de deslocamento) que circula pelo caminho fechado ou circuitação.

O Teorema de Gauss aplicado à Magnetostática, equação (2.16) é representado na forma integral pela equação (2.24) de Maxwell

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.24)$$

A integral dupla de uma superfície fechada, fronteira de um sólido simples, possibilita o cálculo do volume contido dentro desta superfície. Fisicamente, significa que a soma do fluxo magnético total que atravessa a superfície fechada é igual a zero.

\vec{B} é o vetor campo de indução magnetostática ou densidade de fluxo magnetostático produzido por um ímã permanente com dois pólos N e S, ou produzido por uma bobina percorrida por corrente elétrica com intensidade constante.

$d\vec{S}$ é o vetor elemento infinitesimal de área da superfície fechada, atravessado pelo campo de indução magnetostática.

Geometricamente o significado deste resultado pode ser entendido lembrando-se que as linhas de campo elétrico saem, ou chegam nas cargas elétricas. Como não existem cargas magnéticas isoladas, as linhas de campo magnético formam circuitos fechados. Assim, o número de linhas de fluxo do campo magnetostático que sai da superfície fechada S é igual ao número das linhas que entra nela; isto implica que o fluxo total de linhas de campo magnético em qualquer superfície fechada ou superfície gaussiana é nulo.

A forma diferencial desta equação de Maxwell é obtida a partir da aplicação do *Teorema de Gauss ou Teorema da divergência* à forma integral anterior. Este teorema já foi enunciado aqui e possibilita escrever a equação (2.25)

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.25)$$

Este resultado do teorema de Gauss exprime o fato de que cargas magnéticas isoladas nunca foram encontradas na natureza.

Equações de Poisson e de Laplace em decorrência das equações de Maxwell.

Para calcular-se a distribuição volumétrica de cargas elétricas, no interior de uma superfície fechada S, que cria um campo elétrico \vec{E} afastado da superfície, podemos utilizar a equação (2.21) reescrita na forma a seguir

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{ou} \quad \rho = \epsilon \cdot \operatorname{div} \vec{E}$$

Se em vez de conhecer o campo elétrico \vec{E} for dada a lei de variação do potencial U, poderemos então calcular o campo elétrico através de $\vec{E} = - \operatorname{grad} U$ e em seguida calcularmos a distribuição volumétrica de cargas elétricas.

Uma solução alternativa é calcularmos diretamente de U através da *Equação de Poisson* (2.26)

$$\nabla^2 U = - \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{ou} \quad \rho = - \epsilon \cdot \nabla^2 U \quad (2.26)$$

∇^2 é o operador Laplaciano que tem em coordenadas cartesianas a expressão (2.27)

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (2.27)$$

Se não houver cargas elétricas na região onde se está calculando o potencial U, a equação (2.27) assume a forma da equação (2.28) conhecida como Equação de Laplace

$$\nabla^2 U = 0 \quad (2.28)$$

Maxwell calculou a velocidade de propagação de um campo eletromagnético como sendo aproximadamente a velocidade da luz e propôs que o fenômeno da luz é um fenômeno eletromagnético. Devido às cargas elétricas poderem oscilar em qualquer frequência, Maxwell concluiu que a luz visível é simplesmente uma parte de todo o espectro das possíveis radiações eletromagnéticas. De 1855 a 1872 publicou uma série de investigações sobre a *percepção da cor*

e o daltonismo, pelas quais receberia a medalha Rumford da Royal Society em 1860. Em 1859 recebeu o prêmio Adams por um artigo sobre a *estabilidade dos anéis de Saturno*. Recebeu um prêmio da Universidade de Cambridge como autor da *teoria cinética dos gases*. No antigo Sistema de Unidades CGS o fluxo de indução magnética Φ tem a unidade “maxwell” (símbolo Mx) em homenagem a ele. $1 \text{ Mx} = (10)^{-8} \text{ Wb}$. (2) (21) (27) (30) (32) (35) (40) (54)

1866 – Ernst Werner Von Siemens: Engenheiro elétrico (Lenthe, Prússia: atualmente Alemanha, 1816 – Berlim, 1892). Realizou um papel importante no desenvolvimento da indústria do telégrafo. Após estudar gramática na escola em Lübeck, aos 17 anos Siemens candidatou-se a oficial do exército da Prússia e à Escola de Engenharia em Berlim. Entre 1835 e 1838 ele estudou matemática, química e física com instrutores que eram professores na Universidade. Esteve na prisão em Magdeburg onde fez experiências com Química e realizou melhorias no processo de eletrodeposição ou galvanoplastia, cuja patente foi vendida na Inglaterra por seu irmão Wilhelm. Ao ser promovido no Exército teve acesso a Gustav Magnus professor de física na Universidade de Berlim, que lhe apresentou seus amigos Du Bois-Reymond, Clausius e Helmholtz. A sua participação na feira de artilharia em Berlim foi a oportunidade que teve para realizar pesquisas e direcionar seu trabalho. Quando Siemens viu pela primeira vez um telégrafo elétrico inventado por Charles Wheatstone em 1837, ele percebeu a possibilidade de realizar comunicação internacional e assim inventou melhorias para este equipamento. Como especialista em telégrafo elétrico ele construiu uma linha telegráfica subterrânea para o exército da Prússia em 1847, e ao mesmo tempo fez uma sociedade com Johann Georg Halske. Halske era um construtor de instrumentos científicos da Universidade de Berlim e juntos montaram uma fábrica de telégrafos na cidade de Berlim. Em 1848, durante as hostilidades com a Dinamarca, ele construiu uma linha telegráfica para o governo entre Berlim e a Assembléia Nacional em Frankfurt, e supervisionou a construção de linhas semelhantes para outras regiões da Alemanha. Em 1849 ele pediu desligamento do exército para ser fabricante de telégrafos. A empresa Telegraphenbauanstalt Siemens & Halske expandiu-se rapidamente, realizando grandes projetos de telegrafia e em outras áreas da Eletricidade, que lhe possibilitaram abrir subsidiárias em Londres, São Petersburgo, Viena e Paris. Na Rússia a empresa construiu uma linha telegráfica entre São Petersburgo e a Criméia, a qual foi utilizada durante a guerra na Criméia em 1850. Siemens continuou a fazer pesquisas e suas invenções em Engenharia Elétrica resultaram em muitos produtos. Em 1848 ele utilizou a “gota-percha” (resina isolante

extraída de plantas) para isolar cabos telegráficos e protegê-los da umidade. Esta invenção foi amplamente usada em cabos elétricos de iluminação e também na construção da primeira linha telegráfica submarina internacional. Sob sua supervisão a sua empresa Siemens & Halske construiu linhas telegráficas ligando países do Mar Mediterrâneo, e linhas da Europa desde Londres, passando por Berlim, Odessa, Teerã e até Calcutá na Índia (1870). Em 1866 ele inventou o gerador com auto-excitação, um dínamo que era acionado pelo magnetismo residual de seu poderoso eletroímã, trabalho apresentado por ele na Academia de Ciências de Berlim em 1867. Sua empresa desenvolveu e construiu bondes elétricos para transporte público e também locomotivas elétricas para aplicações em mineração. Durante sua vida, Siemens recebeu numerosas honras em reconhecimento aos serviços prestados à ciência e à sociedade, como o título honorário de doutorado concedido pela Faculdade da Filosofia da Universidade de Berlim (1860), a nomeação para a Real Academia Prussiana de Ciências em Berlim (1873), e a investidura como cavaleiro da ordem de Pour Le Mérite em razão de suas realizações pela ciência. Em 1888 ele ganhou o título de nobreza do imperador Friedrich III. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a condutância elétrica G , a susceptância B e a admitância Y tem a unidade “siemens” (símbolo S) em homenagem a ele. (21) (27) (36)

1888 – Heinrich Rudolf Hertz: Físico alemão (Hamburgo, 1857 – Bonn, 1894).

Em 1875 ele foi para Frankfurt a fim de preparar-se para o curso de Engenharia, todavia foi servir o exército em 1876 no regimento de ferrovias. Ao sair do exército mudou-se para Munique em 1877 e matriculou-se na Universidade daquela cidade. Nesta Universidade Hertz estudou os trabalhos de Lagrange, Laplace e Poisson com o objetivo de aprofundar seus conhecimentos em matemática para aplicá-los em seus estudos de física. Atraído por experiências em óptica e mecânica Hertz transferiu-se para o Instituto de Física de Berlim em 1878, onde conheceu o professor Hermann von Helmholtz o qual apresentou-o aos seus amigos e influenciou muito a sua carreira. Nas horas de folga Hertz costumava assistir as palestras de Kirchhoff. Sob a orientação de Helmholtz preparou a sua tese de doutorado sobre indução eletromagnética em condutores girantes, a qual foi apresentada e aprovada em 1880. Foi convidado por Helmholtz para ser seu assistente com quem trabalhou durante três anos, e neste período Hertz escreveu quinze publicações científicas sobre a indução eletromagnética, a inércia da Eletricidade, cargas residuais em dielétricos e raios catódicos. Estas publicações fizeram crescer sua reputação no meio científico na Alemanha. Hertz almejava ser professor e quando surgiu uma oportunidade,

desta vez na Universidade de Kiel, ele transferiu-se para lá em 1883 com a recomendação de Kirchhoff. Ele permaneceu ali durante dois anos como professor, pesquisador e conferencista. Neste período a Universidade ofereceu-lhe o cargo de professor assistente, mas ele não aceitou a oferta. Então resolveu mudar-se para a Universidade de Karlsruhe que lhe oferecera o cargo de Professor de Física em 1885, onde passou a dar aulas e desenvolver seu trabalho principal sobre ondas eletromagnéticas longas, que não podiam ser visualizadas, mas podiam ser detectadas eletricamente. Hertz permaneceu nesta Universidade durante quatro anos. Em 1889 o ministério da cultura da Prússia ofereceu-lhe uma oportunidade para ser professor na Universidade de Bonn, e então ele e sua família transferiram-se para lá onde sucedeu R. J. E. Clausius como Professor de Física. Nesta Universidade Hertz teve vários assistentes que trabalhavam com ele em suas idéias eletromagnéticas, e assim ele dedicou-se mais aos experimentos científicos do que às aulas de Física. Em 1888 ele construiu um dispositivo excitador capaz de gerar ondas eletromagnéticas. Hertz demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas, empregando o equipamento que mais tarde comporia os primeiros transmissores de ondas de rádio: uma bobina de indução, um faiscador acoplado a um circuito sintonizado com uma bobina e um capacitor.

A bobina era alimentada por pilhas ou bateria que gerava faíscas no faiscador, e este por sua vez gerava ondas eletromagnéticas de formato senoidal com vários comprimentos de onda. A detecção destas ondas era realizada por uma antena e seu circuito de acoplamento, que captavam as ondas de comprimento correspondente ao comprimento de onda para o qual estava sintonizada, sendo que, as ondas com outros comprimentos eram atenuadas. Hertz foi o descobridor das ondas de rádio; conseguiu produzir em laboratório ondas eletromagnéticas, mostrando a propagação retilínea das mesmas, verificando fenômenos de reflexão, refração e polarização análogos aos das ondas luminosas, e mostrando o caráter das ondas eletromagnéticas da luz. Fez estudos para compreender a relação entre os campos da óptica e da Eletricidade. Esses resultados obtidos tiveram significado científico e transformaram-no no pioneiro da comunicação por ondas de rádio. Ganhou a medalha Matteucci da Sociedade Italiana de Ciências em 1888, em reconhecimento às suas descobertas e publicação de seus trabalhos. Em 1890 Hertz apresentou trabalhos teóricos afirmando que o fenômeno eletromagnético era causado pela polarização em um meio dielétrico que ocupava um espaço. Esta afirmação fez com que fosse abandonado o conceito de fluido elétrico associado à Eletricidade. No Sistema

Internacional de Unidades a frequência elétrica tem a unidade “hertz” (símbolo Hz) em sua homenagem. (2) (27) (36)

1889 – Foram definidas as unidades dos vários tipos de potência elétrica: ativa, reativa e aparente; e as unidades dos fenômenos eletromagnéticos e óticos. (22)

1894 – **Nikola Tesla:** Engenheiro croata (Smiljan, Croácia, 1856 – Nova Iorque, EUA, 1943). Tesla estudou Engenharia Eletrotécnica no Politécnico Austríaco de Graz em 1875 e depois foi para Maribor (atual Eslovênia), onde conseguiu um primeiro emprego como Engenheiro assistente durante um ano. Mais tarde, persuadido pelo seu pai, passou a frequentar a Universidade Carolina em Praga, Tchecoslováquia, onde estudou na durante o Verão de 1880. Ali foi influenciado por Ernst Mach. Dedicou-se à leitura memorizando livros inteiros, tendo supostamente uma memória fotográfica. Tesla podia visualizar uma invenção no seu cérebro na sua forma precisa antes de avançar para a fase da construção, uma técnica por vezes conhecida como pensamento visual. Em 1880 mudou-se para Budapeste para trabalhar com Tivadar Puskás na Companhia Nacional de Telefones. Enquanto esteve ali, conheceu Nebojša Petrović, um jovem inventor sérvio que vivia na Áustria. Embora o encontro de ambos fosse breve, trabalharam em conjunto num projeto que utilizava turbinas gêmeas para criar energia continuamente. Quando iniciaram as comunicações telefônicas em Budapeste em 1881, Tesla tornou-se o electricista-chefe da companhia, e mais tarde Engenheiro do primeiro sistema telefônico do país. Desenvolveu um dispositivo que era um repetidor ou amplificador de telefone. Em Budapeste ele elaborou o princípio do campo magnético girante, o qual foi patenteado em 1888 e implementado em motores elétricos polifásicos. Em 1882 foi para Paris, França, para trabalhar como Engenheiro na Continental Edison Company, desenhando aperfeiçoamentos de equipamentos elétricos. Ao ser enviado para a fábrica de Strasburgo ali Tesla construiu o primeiro protótipo de um motor de indução polifásico com campo girante produzido por corrente alternada sem comutador. Tesla mudou-se para os Estados Unidos da América em 1884, estabelecendo-se em Nova Iorque e tornando-se um assistente do famoso cientista da época Thomas Alva Edison. Nos Estados Unidos ele começou a divulgar o seu motor de indução. Após um sério desentendimento com Edison por não haver recebido um bônus prometido por algumas de suas aplicações, aprimoramentos e descobertas (1885), Tesla

perdeu o emprego e passou por um período difícil. Em 1887, conseguiu um contrato com George Westinghouse. Tesla por sua vez convenceu o governo americano a adotar o modelo-padrão de corrente alternada como meio mais eficiente para a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, contrariando interesses de seu antigo empregador Thomas Alva Edison. Em 1888 Tesla obteve as patentes de um sistema polifásico completo constituído por geradores, transformadores e motores de corrente alternada, as quais foram vendidas para o investidor Westinghouse. Nos Estados Unidos foi construída a primeira usina de geração de energia elétrica em corrente alternada na cidade de Niagara Falls, Estado de Nova Iorque, para alimentar as indústrias que vieram para a região; ali foi construída a primeira linha de transmissão trifásica para enviar o excedente de energia elétrica até a cidade de Buffalo e os primeiros sistemas de distribuição em corrente alternada. Começara a batalha entre os defensores da corrente contínua e os defensores da corrente alternada. Ao viajar pelos Estados Unidos e Europa, a partir de 1891, apresentou novos ensaios científicos, detalhando aplicações sobre a corrente alternada em alta frequência e várias outras descobertas. Desenvolveu, a partir desse período, um conjunto extenso de inventos para produção e usos da Eletricidade. Registrou outra centena de patentes, como o acoplamento de dois circuitos por indução mútua, princípio adotado nos primeiros geradores industriais eletromagnéticos, o princípio e metodologia de criar energia em forma de corrente alternada através de campo magnético rotativo. O *efeito Tesla* da transmissão sem-fio de energia elétrica para aparelhos eletrônicos foi demonstrado por Tesla numa escala menor (em lâmpadas elétricas) em 1893. Ele aspirava usá-lo para a transmissão intercontinental de níveis industriais de energia elétrica no seu projeto inacabado da Wardenclyffe Tower (1901-1917), também conhecida como torre de Tesla. A idéia era construir uma torre de aproximadamente 50 metros de altura e instalar sobre ela uma antena de telecomunicações sem fio, projetada para a telefonia comercial transatlântica, radiodifusão e demonstrar a transmissão de energia elétrica sem a utilização de cabos elétricos. O projeto não foi completado por problemas financeiros. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a densidade de fluxo magnético ou indução magnética **B** tem a unidade “tesla” (símbolo T) em homenagem a ele. Esta honra foi concedida a ele na *Conférence Générale des Poids et Mesures* em Paris em 1960. O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), do qual Tesla foi vice-presidente, também criou um prêmio em homenagem a ele. Designado por “*IEEE Nikola Tesla Award*” é atribuído a um indivíduo ou

equipe que tenha contribuído de um modo extraordinário para a geração ou utilização de energia elétrica. Tesla recebeu da Checoslováquia a mais alta ordem do Leão Branco. (27) (31) (36)

2.4. Resumo dos Parâmetros da Engenharia Elétrica

A adoção do Sistema Internacional de Unidades pela maioria dos países do mundo é finalmente, após duzentos e vinte anos, a coroação da expressão usada pelos membros da Academia de Ciências de Paris em 1790, quando propuseram um sistema de medidas “*pour tous les temps à tous les peuples*”. O SI é um sistema de unidades coerente baseado no antigo sistema MKS racionalizado. É um sistema prático no sentido de conter mais unidades definidas por padrões que o número mínimo necessário e estabelece os símbolos que devem ser usados. É evidente que a existência de aparelhos importados há algum tempo, bem como a existência de tabelas ou de outra literatura mais antiga, justifique que os alunos sejam informados de eventuais unidades estranhas ao SI. Quanto à pesquisa científica entende-se que podem existir situações muito particulares nas quais se justifique ainda o uso de outros sistemas de unidades, na procura de simplificações ou simetrias das equações. São porém situações excepcionais e o uso é feito em um nível de conhecimento mais restrito. Sempre que possível, porém, deve-se procurar usar unicamente o SI. (27)

A seguir apresentamos um resumo dos parâmetros citados neste capítulo, conforme a tabela 2.1 considerando data, nome do cientista, parâmetro, unidade de medida e símbolo.

| Data | Cientista | Grandeza ou Parâmetro | Representação do Parâmetro | Unidade | Representação da Unidade |
|------|------------|--|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1736 | C. Coulomb | Carga elétrica ou quantidade de Eletricidade | Q | coulomb | C |
| | | Intensidade de campo elétrico | E | volt/m | V/m |
| | | Permissividade elétrica | ϵ | farad/m | F/m |
| | | Permissividade elétrica vácuo | ϵ_0 | farad/m | F/m |
| | | Permissividade elétrica relativa | ϵ_r | farad/m | F/m |
| 1765 | J. Watt | Potência elétrica | P | watt | W |
| 1801 | A. Volta | Diferença de potencial, Tensão Elétrica e Força Eletromotriz | U ou V | volt | V |
| 1820 | H. Oersted | Campo magnético | H | oersted | Oe CGS |
| 1821 | M. Faraday | Capacitância Elétrica | C | farad | F |
| 1822 | A. Ampère | Corrente elétrica | I | ampère | A |
| | | Campo magnético | H | ampère-espira/m | Ae/m |
| 1826 | G. Ohm | Resistência elétrica | R | ohm | Ω |
| | | Resistividade elétrica | ρ | ohm.m | $\Omega.m$ |
| 1830 | J. Henry | Indutância Elétrica | L | henry | H |
| | | Permeabilidade magnética | μ | henry/m | H/m |
| | | Permeabilidade magnética vácuo | μ_0 | henry/m | H/m |
| | | Permeabilidade magnética relativa | μ_r | henry/m | H/m |
| 1833 | W. Weber | Fluxo de indução magnética | Φ | weber | Wb |
| | | Força magneto-motriz | F | ampère-espira | Ae |
| | | Relutância magnética | R | ampère-espira/Wb | Ae/Wb |
| 1838 | C. Gauss | Indução magnética | B | gauss | G CGS |
| 1842 | J. Joule | Trabalho e energia | T, E | joule | J |
| 1855 | J. Maxwell | Fluxo de indução magnética | Φ | maxwell | Mx CGS |
| 1866 | W. Siemens | Condutância | G | siemens | S |
| | | Condutividade | σ | siemens/m | S/m |
| 1888 | H.R. Hertz | Frequência elétrica | f | hertz | Hz |
| 1889 | | Potência aparente | Pap | volt.ampère | VA |
| | | Potência reativa | Q | volt.ampère reativo | Var |
| 1894 | N. Tesla | Indução Magnética | B | Tesla | T |
| | | Densidade de energia elétrica | | watt/m ² | W/m ² |

Tabela 2.1 – Parâmetros da Engenharia Elétrica

2.5. Conclusões

Durante o período de tempo que abrange os Séculos XVIII e XIX os cientistas e inventores da Europa e América do Norte estavam mais próximos geograficamente e tinham meios de comunicações mais rápidos em relação aos séculos anteriores, como o navio com a bússola aperfeiçoada, o telégrafo e o telefone. Eles utilizaram-se destes meios para divulgar os resultados de seus experimentos e invenções mais rapidamente nos ambientes científicos daquela época, nos países como a Alemanha, Croácia, Dinamarca, Escócia, Estados Unidos, França, Inglaterra, Itália e Rússia. Em consequência destes dois fatores importantes aconteceu um desenvolvimento mais veloz do conhecimento sobre a Eletricidade e suas aplicações, para o benefício dos povos contemporâneos neste período. As informações obtidas sobre o desenvolvimento geral da Eletricidade evidenciou grande expansão do volume de conhecimento e suas aplicações, bem como o aprofundamento e a especialização deste conhecimento nas áreas da eletrostática, eletrodinâmica, magnetismo (magnetostática) e eletromagnetismo. Estes são *Fundamentos da Engenharia Elétrica* atual.

As invenções de destaque no período citado, em nossa visão, foram o gerador de corrente contínua, o telégrafo, a lâmpada elétrica, o rádio, o telefone e o sistema de corrente alternada. As invenções lâmpada elétrica e gerador de corrente alternada ocorreram em um contexto de conflitos entre os inventores Edison e Tesla, e seus adeptos. Edison na defesa do uso da energia elétrica em forma de corrente contínua para todas as aplicações da época e Tesla ao inventar o sistema de corrente alternada ampliou o espectro de aplicações e advogou o seu uso. Os resultados deste conflito demonstraram ser benéficos pelo grande desenvolvimento da Engenharia Elétrica ocorrido no Século XX, e pelo usufruto crescente que a sociedade tem feito dos benefícios de ambas as formas de energia elétrica até os dias de hoje.

O consumo dos novos dispositivos e aparelhos elétricos como a lâmpada elétrica, o rádio, o telefone, o gramofone, os motores elétricos, etc. pelas famílias aumentou o conforto delas. Por outro lado, aumentou também a complexidade do manuseio destes utensílios domésticos e o consumo residencial de energia elétrica. Portanto, aumentaram as despesas das famílias. O consumo de novos dispositivos e equipamentos elétricos aumentaram a produtividade industrial, todavia a mão-de-obra humana foi substituída por motores elétricos aplicados em acionamentos de esteiras rolantes em alguns processos de fabricação. A mecanização foi reduzindo

gradualmente a demanda por artesãos habilidosos, pois seu trabalho foi substituído por máquinas que exigiam menos habilidades manuais para funcionar.

A iluminação pública melhorou consideravelmente com a utilização da lâmpada elétrica em corrente contínua primeiro e depois em corrente alternada, pois as cidades foram alcançadas por estas duas tecnologias.

Houve também grande desenvolvimento na modelagem matemática e computacional dos fenômenos abordados pela Engenharia Elétrica, *Descrição dos seus Fundamentos*, conforme evidenciam as equações de Maxwell.

As invenções de destaque do século XX, em nossa ótica, foram a válvula eletrônica, o semicondutor, o circuito integrado, a televisão e o computador eletrônico.

Segundo Nicholas Carr (38) “...o rápido crescimento do tamanho das fábricas de sua força de trabalho, ajudou a distribuir uma quantidade maior de lucros entre os proprietários e os operários. Mesmo exigindo menos qualificação manual, as fábricas começaram a pagar salários mais altos. E isso ajudou a estimular um dos processos sociais mais importantes do século XX: a criação de uma vasta e próspera classe média nos Estados Unidos da América do Norte e na Europa. À medida que as companhias foram expandindo-se os novos empregos nos escritórios pagavam bem, de acordo com os padrões históricos. Isto causou o aumento das compras de aparelhos e equipamentos elétricos. Daí concluímos que houve a continuidade de aumento do consumo de energia elétrica, mais geração e distribuição desta, o que levou a economias de escala maiores para as companhias de serviços públicos, possibilitando a baixar os seus preços”.

As informações obtidas sobre o desenvolvimento da história dos parâmetros utilizados pela Engenharia Elétrica e a nomeação destes em homenagem aos seus descobridores, mostram-nos um desenvolvimento gradual, que usa descobertas e invenções anteriores como fundamentos e mola propulsora para descobertas e invenções futuras. Instituições internacionais, constituídas por representantes de vários setores da Engenharia Elétrica, agruparam estes parâmetros e ao conjunto assim formado e suas unidades respectivas, denominaram o que conhecemos hoje por Sistema Internacional de Unidades ou SI. Estes são também *Fundamentos da Engenharia Elétrica* atual. Estes fundamentos foram ampliados e aprofundados no período de abrangência considerado por este capítulo, em situações de muito esforço pessoal, dedicação nas pesquisas, conflitos de idéias, demandas judiciais, etc. novos descobrimentos e invenções que resultaram no que conhecemos como hoje como o *estado da arte*.

“Se a eletrificação ajudara a promover o desenvolvimento de uma classe média, também ajudara neste mesmo sentido a classe operária, pois todos gastavam seus salários em novos aparelhos elétricos produzidos pelas fábricas eletrificadas que os empregavam. Esse crescimento da demanda levou as fábricas a atingirem economias de escalas maiores, reduzindo os preços dos produtos elétricos e gerando mais vendas”. (38)

Concluimos que este desenvolvimento contribuiu para o aumento da qualidade de vida nas residências, nos setores públicos das cidades iluminadas e nas companhias eletrificadas.

Neste período também houve invenções e desenvolvimento de instrumentos para realizarem medições dos parâmetros ou grandezas utilizadas pela Engenharia Elétrica, por isso será abordada a história destes instrumentos no capítulo 3.

Capítulo 3

Considerações sobre a História dos Medidores de Engenharia Elétrica

3.1. Introdução

Embora *medidas elétricas* seja uma disciplina que necessita de desenvolvimento percebeu-se rapidamente que ela é apropriada para ser utilizada em muitas áreas onde há medições. Determinados tipos de instrumentos são construídos sem a necessidade de usar princípios elétricos, como o microscópio, o micrômetro, medidores de vazão de água e tantos outros. Entretanto, se uma aplicação necessita de processamento de informação extensiva, transmissão de sinal em distâncias grandes, uniformidade de fabricação a baixo custo, então as técnicas de medidas elétricas irão contribuir para ter-se uma solução melhor de projeto.

Há algumas poucas décadas a tecnologia de estado sólido foi descoberta e começou a ser utilizada em circuitos de instrumentos de medidas, o que possibilitou um aprimoramento sem precedentes destes instrumentos quanto às suas características de detecção e processamento de sinais, bem como a redução de custo.

Há muitas aplicações onde o uso de medidas elétricas não é o principal, mas pode auxiliar atuando em conjunto com outros regimes. Apesar de parecer que os métodos de medidas elétricas são úteis em todos os casos de medidas e processamento de dados, é preciso lembrar de que a natureza é o sistema que interage com o ser humano através de diferentes interfaces; e que o mundo natural não tem os formatos de manifestação física como têm os sistemas de medidas elétricas.

Os dispositivos utilizados nos instrumentos de medidas elétricas foram, no início, parcialmente substituídos pelos circuitos eletrônicos, que utilizavam as válvulas termiônicas naquela ocasião. Posteriormente, estes dispositivos foram sendo substituídos pela eletrônica gradativamente, a qual proporcionou melhorias consideráveis nos circuitos destes instrumentos.

Com o passar do tempo, os métodos eletrônicos de medidas demonstraram ser precisos e úteis em medidas que antes só eram realizadas por instrumentos elétricos. Em 1970, com a descoberta dos semicondutores, novas tecnologias foram incorporadas aos instrumentos de medidas

elétricas, principalmente aos sensores que fazem a detecção do sinal a ser medido. Atualmente ambos os métodos e instrumentos são amplamente utilizados em muitas áreas. (41)

Os temas deste capítulo estão ilustrados na figura a seguir, que mostra a *linha de tempo dos acontecimentos*.

3.2. História da Filosofia das Medidas Elétricas

Medição é um processo fundamental na obtenção de conhecimento e no controle de sistemas. Surpreendentemente, estamos apenas iniciando a compreensão do processo que ocorre com a interface de medida, que pode ser descrito em forma de modelo matemático. Formalização usando a matemática possibilita que um tema seja materializado através das mãos do ser humano, como aconteceu com a *Álgebra de Boole* no século XIX, a qual levou à construção dos computadores digitais de hoje. A seguir será descrito o que é medida e os tipos de eventos que são mensuráveis atualmente.

3.2.1. Medição é um Processo Científico para obter Informação

Medição é o processo empírico e objetivo de atribuir números às propriedades de objetos e eventos observados no dia a dia, de modo que possamos descrevê-los. Medida é o método mais fundamental da ciência. Primeiramente, a ciência visa à descrição empírica objetiva do universo e, portanto, a medida do observado é a meta que impulsiona e direciona a investigação científica. *Galileo Galilei* expressou isto quando afirmou: “Calcule aquilo que é calculável, meça o que é mensurável e o que não é mensurável, faça com que seja mensurável”. A Medida possibilita que as leis e teorias da ciência possam ser expressas em linguagem matemática precisa e concisa. A descrição matemática do conhecimento tem sido chamada de carimbo oficial da verdadeira ciência. Esta visão foi expressa através da declaração de *Lord Kelvin*: “Tenho dito com frequência que quando alguém consegue medir aquilo que está falando, e expressa isto em números, então esta pessoa sabe alguma coisa sobre o assunto”. Esta afirmação específica sobre a essência da medida é comumente discutida pelas pessoas envolvidas nos vários ramos da ciência. Também podemos avaliar se as ciências físicas, que são totalmente baseadas em medidas e no formalismo matemático, contêm paradigmas adequados a serem utilizados em outros ramos do conhecimento. Entretanto, a importância universal da medida não deve ser questionada.

Quando a propriedade de um objeto ou evento é caracterizada por um número, este número contém a informação da propriedade. A tecnologia moderna tem feito enorme progresso no desenvolvimento de dispositivos, para a aquisição de informação de objetos e eventos físicos. A informação é então codificada na forma de sinal físico, que pode ser processado por uma variedade de sistemas de informação. Esta informação pode ser disponibilizada em formato

numérico que representa a medida, ou pode ser utilizada para decisão, ou para controle. Este meio de *aquisição e processamento de informação* constitui a inteligência de uma imensa variedade de sistemas químicos, de geração de energia elétrica, sistemas aeronáuticos e espaciais e tantos outros. Assim a necessidade de medida é universal. O significado prático da teoria das medidas pode ser compreendido, quando fazemos uma analogia com o desenvolvimento da compreensão dos fundamentos da matemática e da lógica, ciências que no passado eram baseadas em fundamentos vagos e empíricos. *A história da filosofia das medidas* pode ser visualizada como parte deste desenvolvimento. (42)

3.2.2. História dos Métodos de Medidas Elétricas

A origem do conhecimento sobre a Eletricidade pode ser identificada entre os gregos, chineses e mesopotâmios (ver capítulo 1). Estes povos deram uma contribuição ainda que pequena quando comparada com o desenvolvimento iniciado no século XVII. O interesse mais profundo e as aplicações em larga escala iniciaram com os trabalhos sobre *Eletrostática*, como a detecção de cargas elétricas, a construção do gerador eletrostático, o motor eletrostático. O conhecimento sobre a carga elétrica, sua quantidade, seu armazenamento, sua transmissão de um local para outro através de fios isolados e o telégrafo elétrico, foram alguns dos destaques do século XVIII, que forneceram ferramentas para a continuação deste desenvolvimento no século seguinte. O conhecimento sobre a Eletricidade na forma estática levou aos conhecimentos sobre potencial elétrico e às cargas elétricas na formas positiva e negativa.

As experiências com a Eletricidade estática associadas ao desenvolvimento de técnicas com dispositivos a vácuo, gradualmente levaram ao conhecimento dos efeitos de descargas elétricas em gases. A compreensão sobre o comportamento das cargas elétricas levou à prova científica da existência do elétron como entidade discreta, conforme experiências de J. J. Thompson em 1899. Embora tenha havido muitas pesquisas na busca de conhecimento sobre a natureza da Eletricidade, houve progresso significativo quando foi inventada a primeira bateria, como a conhecemos hoje.

Antes desta descoberta os cientistas faziam experimentos com fontes de alta tensão, como a *garrafa de Leiden* que a partir de 1745 gerou uma alta tensão elétrica, da ordem de quilovolts. Devido aos riscos da alta tensão elétrica, os descobridores tinham muita cautela ao manusear estes dispositivos em suas aplicações práticas. Em 1801, a disponibilidade da bateria primária,

inventada por Volta, tornou-se grande e foi adotada em larga escala pelos experimentadores. A sua baixa impedância de saída, razoável tempo de operação, baixa tensão elétrica e a facilidade de construção foram características que atraíram os cientistas daquela época. Durante o século XIX foram formuladas as leis para os circuitos de corrente contínua e de corrente alternada, que ao serem divulgadas publicamente estimularam a construção de dispositivos com novas tecnologias. Como exemplo, o conhecimento sobre a relação entre a corrente elétrica e o magnetismo foi descoberto no chamado efeito motor por volta de 1820, que possibilitou a construção de indicadores e atuadores magnéticos. Indicadores de quantidades elétricas foram aprimorados e possibilitaram a formulação de outras leis para intensidades menores. As leis do eletromagnetismo foram enunciadas e em 1888, Hertz demonstrou experimentalmente que estas leis estavam corretas e no final do século Marconi construiu o primeiro rádio utilizando os componentes elétricos disponíveis na época. Edison construiu um dispositivo termo-iônico e descobriu que este fazia a retificação elétrica da forma corrente alternada, o *efeito Edison*. No início do século XX os construtores do telégrafo, telefone e de comunicações de rádio demandavam novas tecnologias para a amplificação de um sinal elétrico de pequena intensidade, a retificação de sinais de rádio frequência e a geração de correntes elétricas de rádio frequência. A válvula termo iônica foi inventada utilizando o efeito Edison, e este diodo possibilitou a retificação e a geração requeridas. A seguir foi inventado triôdo com as funções de amplificação, retificação e a geração de sinal requerida. Em 1920 este dispositivo termoiônico começou a ser utilizados em instrumentos de medidas elétricas. A computação utilizou a tecnologia das válvulas termo iônicas no início, mas as válvulas consumiam muita potência, aqueciam-se e aumentavam muito a temperatura interna dos computadores, ocupavam muito espaço à medida que os computadores tornaram-se grandes e tinham um custo elevado. Na década de 1940 foi inventado o transistor nos laboratórios da Bell, o qual foi aprimorado como dispositivo de estado sólido usando a nova tecnologia de semicondutor e utilizado em instrumentos de medidas elétricas. Na década de 1960 surgiram novas tecnologias de integração, produzindo a miniaturização de componentes, com menor custo e menor consumo de energia elétrica. Nesta época foram fabricados os contadores digitais utilizando transistores integrados e os visores digitais de medidas. Por conseguinte, os projetos dos instrumentos de medidas elétricas foram aperfeiçoados possibilitando à inclusão de funções novas, o aumento da precisão das medidas, a redução de tamanho e do consumo de energia da instrumentação. (41)

3.2.3. O Conceito de Qualidade nas Medidas

A medida pressupõe que exista alguma grandeza a ser medida. No desenvolvimento histórico e na estrutura lógica do conhecimento científico, a formulação do conceito de qualidade precede o desenvolvimento dos procedimentos de medida e suas escalas. Por exemplo, a formulação do conceito teórico de “intensidade de corrente elétrica”, requer a formulação do conceito de cargas elétricas, antes de se fazer o projeto e a construção de um amperímetro. De forma similar, primeiramente deve-se definir claramente o conceito teórico de corrente elétrica e como esta produz campo magnético, antes de se definir uma escala para a medida da intensidade deste campo. A formação do conceito de qualidade na ciência empírica (Hempel, 1952) é um tema muito importante. A observação de um conjunto de eventos no mundo real nos direciona a identificar relações empíricas entre os elementos deste conjunto. Exemplos destas relações são as semelhanças e as diferenças que observamos entre os elementos. Como resultado, o conceito de qualidade é formado como uma regra objetiva para a classificação das semelhanças e diferenças destes elementos no conjunto. O sistema formado por estas relações é *qualidade* e cada evento do conjunto é manifestação desta qualidade. Assim, pode-se definir qualidade como o conjunto Q com todas as manifestações q, conforme a expressão (3.1) a seguir

$$Q = \{q\} \quad (3.1)$$

Este é um conceito recente para definição de qualidade. Quando existe qualidade assim definida, pode-se encontrar um conjunto de relações simbólicas de seus elementos que a representa e definir-se uma escala de medida. Usualmente, quando existe um nível de qualidade requerido e uma escala de medida, baseados no conceito apresentado acima, os dados obtidos a partir de medidas esclarecem o conceito de qualidade e leva-nos a reavaliá-lo. Isto nos conduz ao aprimoramento da escala de medida que é um processo contínuo. Um exemplo deste processo é a história do desenvolvimento das medidas de grandezas elétricas, desde os medidores mais simples até os mais sofisticados que existem na atualidade, que será apresentada no tópico 3.5 adiante. (42)

3.2.4. Teoria das Medidas aplicada à Engenharia Elétrica

A teoria clássica das medidas (Helmholtz, 1887 e Campbell, 1920) foi desenvolvida para possibilitar o registro das medidas de grandezas nas ciências físicas, e dentre elas está a Engenharia Elétrica. Medidas em Engenharia Elétrica estão baseadas no estabelecimento de unidades de medida de quantidades físicas básicas, que formam um *sistema de unidades base ou unidades de medidas diretas*. As unidades para todas as outras quantidades físicas a serem medidas são derivadas destas e formam as *unidades de medidas indiretas*. Por exemplo, o SI tem sete quantidades físicas básicas: comprimento (m), massa (kg), tempo (s), corrente elétrica (A), temperatura (°C), quantidade de matéria (mol) e intensidade luminosa (cd). A unidade básica de corrente elétrica é definida como a corrente elétrica invariável, que percorre dois condutores elétricos retilíneos paralelos de comprimento infinito, área da secção reta desprezível, situados no vácuo e posicionados a um metro de distância um do outro, produz entre os condutores uma força igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton por metro de comprimento desses condutores. Esta situação envolve primeiramente as unidades básicas de medidas como comprimento e força. Depois envolve a teoria da interação de forças eletromecânicas, que é a lei das forças entre dois condutores elétricos percorridos por corrente elétrica, o *Teorema de Ampère*. Não é possível ter-se dois condutores de comprimento infinito, e assim, o exemplo escolhido nos dá uma idéia das limitações que a teoria clássica de medidas tem aplicada à Engenharia Elétrica. Esta situação nos faz lembrar que as ciências físicas estão baseadas em axiomas teóricos como a geometria Euclidiana, a mecânica clássica, a termodinâmica, o eletromagnetismo, e assim por diante. As unidades de medidas da física clássica estão baseadas na aceitação destes axiomas teóricos como representativos do mundo real e na definição do sistema de unidades baseado neles. Desta maneira fica evidente que há necessidade de um grande desenvolvimento da *Teoria de Medidas* aplicada à Engenharia Elétrica. (42)

3.3. História dos Instrumentos de Medidas Elétricas

Os registros mais antigos relacionados à medição da Eletricidade referem-se à Musschenbroek (1745), a Lichtenberg (1777), a Coulomb (1785), a Poggendorff e Schweigger (1820) dentre outros, os quais descobriram formas quantitativas de medição de grandezas elétricas. Apresentamos a seguir um resumo desta história:

3.3.1. A Garrafa de Leiden - Medição da Capacidade Elétrica

Um acumulador ou condensador é um dispositivo constituído por duas superfícies condutoras separadas por um meio dielétrico isolante. A garrafa de Leiden inventada por Musschenbroek em 1745 na Universidade de Leiden é um acumulador, no qual a película condutora interna está separada da película condutora externa pelo vidro utilizado na construção da garrafa. A superfície externa de qualquer condutor isolado pode ser considerada como uma das superfícies do acumulador e a outra superfície poderá ser o solo (terra) ou uma parede de uma sala, e o ar do ambiente o meio dielétrico. A capacidade de um condensador assim constituído pode ser medida pela quantidade de Eletricidade que a superfície interna pode ser carregada, a fim de gerar uma diferença de potencial entre as superfícies. O potencial elétrico é a relação entre a quantidade de Eletricidade e a distância em relação a um ponto, e esta relação tem distribuição linear. Então a capacidade Eletrostática é uma quantidade linear que pode ser medida em unidades de comprimento sem ambigüidade. Nos experimentos elétricos os condensadores são utilizados com dois propósitos principais: receber e reter grandes quantidades de Eletricidade, e medição de quantidades definitivas de Eletricidade através do potencial elétrico existente. Para a retenção de Eletricidade o melhor dispositivo disponível é a garrafa de Leiden. Há perdas de Eletricidade através de fuga que ocorre na superfície úmida não isolada do vidro da garrafa. Isto pode ser verificado ao secar o ar dentro da garrafa artificialmente e pode ser reduzida ao passar verniz isolante sobre a superfície de vidro que está exposta à atmosfera. (40)

3.3.2. Klinodógrafo ou Câmara de Lichtenberg – Medição de Alta-Tensão

Em 1777 o Dr. G. C. Lichtenberg descobriu que figuras poderiam ser impressas em pó de enxofre por um campo eletrostático intenso de um eletrodo metálico eletricamente carregado e próximo. J. F. Peters estudou este princípio e em 1924 inventou um instrumento chamado Klidonógrafo para medir a tensão elétrica gerada por um campo eletrostático intenso, como o de uma descarga atmosférica ou um relâmpago. O instrumento utilizava um filme fotográfico sobre uma placa, em vez do pó de enxofre, para obter as figuras chamadas de klidonogramas. Peters percebeu que as figuras assim obtidas eram funções da intensidade, polaridade e forma de onda de alta tensão elétrica gerada pelo campo eletrostático intenso no eletrodo. A figura 3.1 a seguir ilustra o medidor com um filme fotográfico apoiado sobre um eletrodo metálico plano e em contato com o

outro eletrodo na parte superior, o qual por sua vez está ligado ao circuito elétrico onde ocorrem as sobretensões. (43) (44)

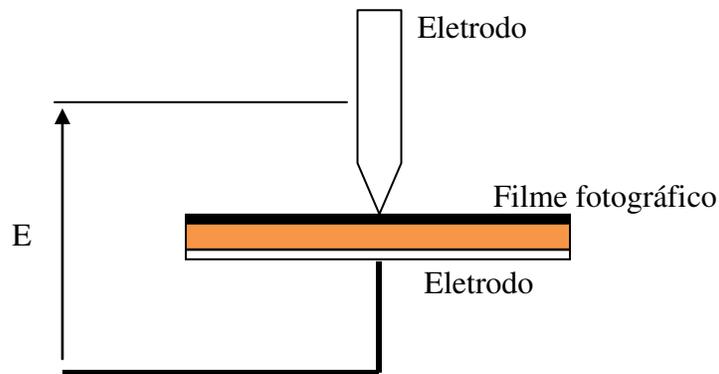


Figura 3.1 – O Klinodógrafo ou Câmara de Lichtenberg

3.3.3. Balança de Torsão de Coulomb – Medição de Forças Eletrostáticas

A grande quantidade de experimentos que Coulomb utilizou para enunciar leis fundamentais da Eletricidade em 1785 foi realizada pela medição da força entre duas esferas pequenas carregadas com cargas elétricas, sendo uma das esferas fixa e a outra mantida em equilíbrio por duas forças: a eletrostática entre as esferas e a de torção de um fio metálico.

A balança de torção consistia de uma haste horizontal de goma-laca suspensa por um fio fino, tendo em uma de suas extremidades uma esfera pequena de material leve com a superfície dourada. O fio era fixado acima do eixo vertical da haste, o qual podia mover-se ao longo de uma superfície de círculo horizontal graduada. A haste podia produzir um movimento de torção na parte superior do fio. Este dispositivo fora colocado dentro de uma cuba.

Outra esfera pequena foi fixada em outra haste isolada de modo a poder ser carregada com Eletricidade, e ser introduzida dentro da cuba através de uma abertura, e ser posicionada de modo que o seu centro estivesse alinhado com o centro da outra esfera suspensa. A posição da esfera suspensa é determinada por meio de uma escala gravada na cuba do instrumento. Considerando que as duas esferas estivessem completamente carregadas e que a esfera suspensa estivesse em uma posição de equilíbrio, a força eletrostática produzia uma torção na haste mantendo-a na posição de equilíbrio, e assim era determinada a força entre as esferas.

Considerando agora que as duas esferas estivessem completamente descarregadas e o braço de torção estivesse em uma posição de equilíbrio, após girar um determinado ângulo. Então a força de torção do braço deveria ser igual ao momento de torção elástica aplicada ao fio. Assim Coulomb comprovou a existência de forças eletrostáticas entre as esferas e conseguiu realizar uma análise quantitativa destas. (40) Na figura 3.2 a seguir vemos uma ilustração esquemática desta balança de torção.

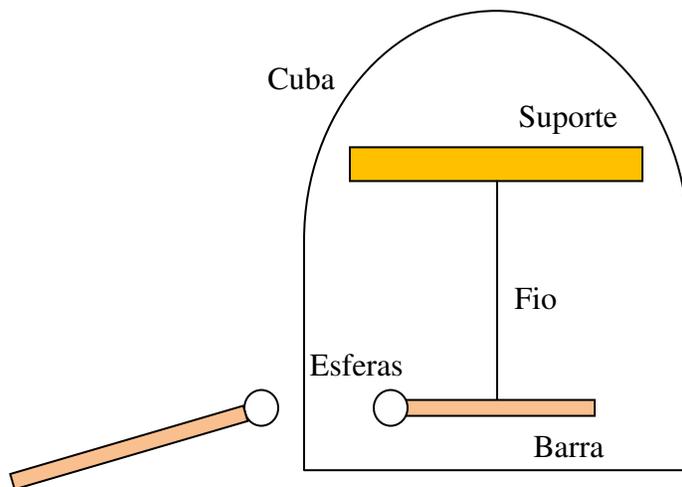


Figura 3.2 – Ilustração da Balança de Torção de Coulomb

3.3.4. Plano de Prova de Coulomb - Medição da Densidade Superficial de Eletrificação

Ao avaliar os resultados da matemática da teoria de distribuição de Eletricidade na superfície de condutores, verifica-se que há necessidade de medir a densidade superficial em diferentes pontos do condutor. Com este propósito Coulomb utilizou um disco de papel coberto por uma película de ouro e que estava fixo sobre uma haste isolante de goma-laca. Ele colocou este disco em contato com vários pontos da superfície do condutor. A seguir ele removeu o disco segurando a haste isolante e mediu a carga elétrica nele com o seu eletrômetro. Como a superfície do disco foi colocada em contato com a superfície do condutor ele concluiu que a densidade superficial de eletrificação na superfície externa do disco era aproximadamente igual àquela na superfície do condutor naquela área de contato. Ele concluiu também que, ao ser removido o disco, este

continha carga elétrica em um lado com um valor aproximadamente igual à carga elétrica na superfície de contato do condutor. Este disco foi denominado Disco de prova de Coulomb. (47)

3.3.5. Galvanômetro Multiplicador de Poggendorff e Schweigger

Em 1820 Poggendorff e Schweigger inventaram o galvanômetro multiplicador com tal sensibilidade, que este indicava as medidas de corrente elétrica em uma escala com espelho. O medidor foi apresentado para a Naturforschende Gesellschaft de Halle no mesmo ano. Este medidor era constituído por oito bobinas de fio e permitiu a comprovação que o campo magnético produzido por uma bobina tem dois pólos magnéticos. Poggendorff aperfeiçoou este medidor acrescentando um circuito compensador, a fim de possibilitar a medição da força eletromotriz em circuitos em regimes estacionários. Fez também outros aperfeiçoamentos que possibilitaram ao galvanômetro realizar medidas de resistência elétrica, cujo medidor ele chamou de Reocord. O *galvanômetro* é um dos mais antigos instrumentos de indicação eletromecânicos de bobina móvel que se tem conhecimento. É útil para detectar quantidades de Eletricidade como carga elétrica, corrente elétrica e tensão elétrica muito pequena em *corrente contínua*, como também para medir estas grandezas elétricas através da deflexão de um ponteiro numa escala. Este dispositivo foi utilizado por Gauss em suas observações do magnetismo terrestre. Os experimentos e invenções de Schweigger foram publicados no periódico *Journal für Chemie und Physik* a partir de 1811, e os de Poggendorff foram publicados no periódico *Annalen der Physik und Chemie* a partir de 1824. (36)

3.3.6. Medidor de Potencial Elétrico de Harris e Thompson

O dispositivo utilizado por Coulomb não era adequado para a medição de potencial elétrico, devido à pequena intensidade das forças entre as esferas a uma determinada distância, quando a diferença de potencial era pequena. Em 1834 Sir W. Snow Harris construiu um eletrômetro de discos que se atraíam, uma forma conveniente para medir o potencial elétrico. Ele apresentou este medidor e os resultados de seus experimentos na Royal Society na Inglaterra. Sir W. Thompson aperfeiçoou este eletrômetro e descreveu o seu princípio de funcionamento com precisão em 1867. Quando os discos com potenciais elétricos diferentes eram colocados frente a frente com um pequeno espaço entre eles, ocorria uma distribuição quase-uniforme da eletrificação em suas faces opostas. A carga elétrica no disco positivo era aproximadamente

proporcional à sua área, e proporcional à diferença de potencial entre os discos, e era inversamente proporcional à distância entre eles. Portanto, ao fazer discos com área grande e ao manter uma pequena distância entre eles, era possível medir pequenas diferenças de potencial elétrico a partir de pequenas forças de atração entre as placas.

Este eletrômetro tinha o inconveniente de não ser auto-ajustável, pois requeria que em cada observação fosse feito um ajuste da distância entre as placas com um parafuso micrômetro. Esta limitação impedia um auto-ajuste entre as placas para a posição de equilíbrio e a auto-indicação da medida realizada pelo instrumento. Para resolver esta dificuldade, Thompson inventou um eletrômetro de quadrantes conforme ilustrado na figura 3.3 a seguir

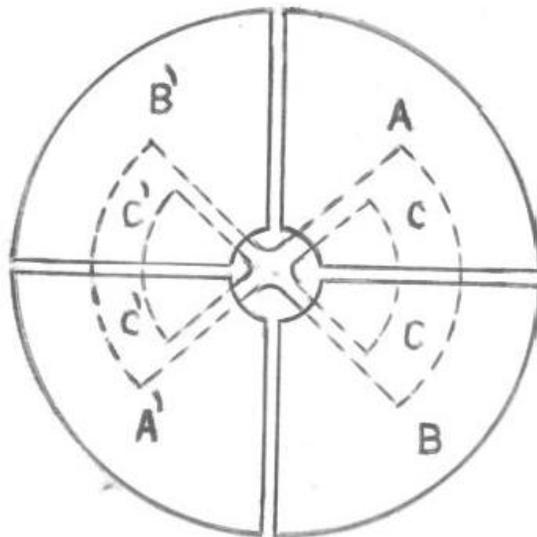


Figura 3.3 - Ilustração do Eletrômetro de quadrantes de Thompson

No eletrômetro de quadrantes de Thompson os condutores A e B são de forma cilíndrica e estão divididos em quatro quadrantes isolados eletricamente entre si. Os quadrantes opostos A e A' estão interligados por um fio, assim como os quadrantes opostos B e B'. O condutor C em formato de número oito está apoiado em um eixo vertical de modo a poder girar em torno deste, e constitui dois arcos planos opostos em formato de quadrantes. Na situação de equilíbrio estes quadrantes ficam parcialmente próximos a A e B, de modo que o condutor C posiciona-se no centro dos quadrantes A e B. O condutor C é conectado ao potencial elétrico maior através de

um fio à camada interna de uma garrafa de Leiden, que forma a cuba do instrumento de medida. O quadrante B é ligado a terra e o quadrante A é ligado ao corpo cujo potencial elétrico deseja-se medir. (40) Este instrumento contém os fundamentos do princípio de funcionamento dos medidores eletrostáticos.

3.3.7. Galvanômetro de D'Arsonval – Medição de Corrente Elétrica

Arsène D'Arsonval trabalhou com Deprez e em 1882, juntos construíram um galvanômetro de bobina móvel de alta sensibilidade, a fim de utilizá-los em suas pesquisas sobre biologia e aplicações tecnológicas da Eletricidade. Este medidor que passou a ser chamado de *galvanômetro de d'Arsonval* consiste de uma *bobina móvel* feita com fio elétrico muito fino com núcleo de ferro, suspensa por *lâminas* de metal condutor de Eletricidade entre os pólos magnéticos de ferro do instrumento. A bobina tem um eixo e a este está preso um *ponteiro*. Por um lado da bobina, uma das lâminas alimenta-a com corrente contínua I e pelo outro lado ocorre a saída da corrente através da outra lâmina. As duas lâminas condutoras também produzem o *torque de controle* que atua no equilíbrio para obter a deflexão estática do ponteiro, bem como para levar a bobina móvel à sua posição “zero” depois de cessada a medida. A entrada e a saída da corrente contínua na bobina móvel também podem ocorrer através de duas *molas em espiral* de fio muito fino, as quais produzem um torque que interfere muito pouco no torque de controle. O *ímã permanente* e os *pólos de ferro* são montados ao redor da bobina móvel, a qual se situa no centro do galvanômetro. A forma das peças polares Norte e Sul de ferro é tal que, produz um campo magnético radial uniforme no espaço onde a bobina se move e um fluxo magnético que atravessa as espiras da bobina. A interação entre o fluxo magnético produzido pelo dispositivo ímã permanente-pólos de ferro e a corrente elétrica contínua que circula na bobina móvel produz o *torque de deflexão*. Este torque produzido por efeito eletromagnético produz movimentos angulares α da bobina, que são indicados por deslocamentos correspondentes do ponteiro na escala de leitura do instrumento. A figura 3.4 é um diagrama que ilustra as partes principais deste instrumento.

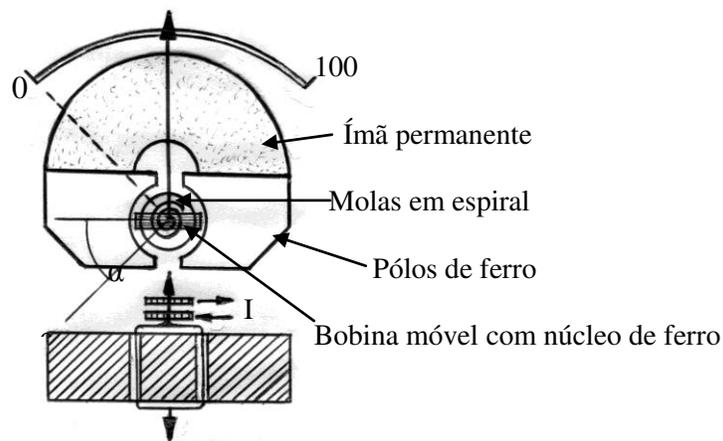


Figura 3.4 - Ilustração das partes principais do Galvanômetro de d'Arsonval

Uma das vantagens deste instrumento é a sua flexibilidade podendo ser utilizado para medir corrente, tensão elétrica e resistência em corrente contínua, pela adição apropriada de resistências elétricas ao seu circuito. (36) (41) Este instrumento contém os fundamentos do princípio de funcionamento dos medidores de bobina móvel..

3.3.8. Bobinas de Resistência e Pontes – Medição de Resistência Elétrica

No estado da ciência elétrica no início do Século XIX a determinação da resistência elétrica de um condutor podia ser considerada uma ação primordial em Eletricidade, no mesmo sentido que a determinação de pesos é primordial em Química. A razão disto é que a determinação da medida absoluta de outras magnitudes elétricas, tais como quantidades de Eletricidade, forças eletromotrizes, correntes elétricas, etc., requerem em cada caso uma série de operações complexas envolvendo medições que dependem do tempo, medições de distâncias, determinação de momentos de inércia. E estas operações devem ser repetidas a cada novo experimento, pois é impossível preservar uma unidade de Eletricidade, ou de força eletromotriz, ou de corrente elétrica em um estado imutável, e a assim, estar disponível para fazer comparação direta.

Quando a resistência elétrica de um condutor elétrico com forma e dimensões definidas, de um material específico foi determinada, foi observado também que esta resistência permanece constante na mesma temperatura. E assim, este condutor elétrico pode ser considerado como um padrão de resistência elétrica e pode ser utilizado para a comparação com outros condutores, e a operação de comparação requer precisão extrema. Ao ser determinada a *unidade de resistência*

elétrica, cópias materiais desta resistência em forma de bobina são preparadas para a utilização dos eletricitistas de todo o mundo, de modo que cada local do mundo possa ter uma cópia deste padrão e as medições de resistência sejam expressas na mesma unidade. Esta unidade deve ser definida com referência aos sistemas de unidades Eletrostáticas ou Eletromagnéticas. Todavia, para ligar esta unidade ao nome do descobridor das leis da resistência elétrica, ela é chamada de Ohm. As bobinas de resistência construídas para representar a unidade Ohm eram feitas de uma liga com duas partes de prata e uma de platina em forma de fios de 0.5 a 0.8 milímetros de diâmetro e de um a dois metros de comprimento. Em 1844 Charles Wheatstone inventou um medidor de resistência elétrica em formato de ponte, o qual apresentou grande precisão nas medidas em corrente contínua. Em 1852 William Thompson (Lord Kelvin) inventou um medidor de resistência elétrica em formato de ponte para valores muito pequenos da ordem de microohms.

Até 1870 a Eletricidade em corrente contínua tinha pouca utilização além do telefone e do telégrafo, como a alimentação de lâmpadas elétricas a arco voltaico ligadas em série. Como a corrente elétrica era constante e a tensão elétrica para cada lâmpada era conhecida, assim todas as lâmpadas eram controladas por uma única chave, e era adequado medir somente o tempo de fornecimento de corrente elétrica ao circuito de iluminação. Assim foi estabelecida a unidade de medida *lâmpada-hora*.

Em 1872 Samuel Gardiner registrou a sua primeira patente de um medidor elétrico deste tipo. Era um medidor de lâmpada-hora em corrente contínua, que basicamente tinha um relógio acionado por um eletroímã o qual ligava e desligava o instrumento e fazia a medição do consumo das lâmpadas a arco voltaico.

Em 1882 Thomas A. Edison desenvolveu um medidor lâmpada-hora químico. Este medidor era constituído por uma cuba pequena contendo duas placas de zinco, que estavam ligadas ao consumidor através de uma resistência paralela. Mensalmente os eletrodos eram pesados e a conta de Eletricidade para o consumidor era proporcional à variação deste peso. (40) (41) (53)

3.3.9. Medidores de Corrente Alternada – Tensão, corrente, potência, energia e Impedância elétrica.

Como vimos no Capítulo 2 a descoberta da corrente alternada ocorreu no final do século XIX. Em 1878 J. B. Fuller registrou a sua patente de um medidor lâmpada-hora em corrente alternada.

Este medidor era constituído por uma armadura que vibrava entre duas bobinas alimentadas por corrente alternada, e assim fazia-se a medição do consumo de lâmpadas a arco voltaico.

Os primeiros voltímetros para aplicação industrial foram construídos na década de 1880 para medir a tensão elétrica em corrente alternada sobre resistores.

Galileo Ferraris de Turin, Itália, fez uma descoberta importante em 1885 ao demonstrar que dois campos magnéticos produzidos por corrente alternada bifásica, podiam fazer o rotor de um motor elétrico girar. Esta descoberta alavancou a desenvolvimento do motor de indução e o desenvolvimento do medidor de energia elétrica de indução.

Em 1886 foi projetado e construído pelo engenheiro Oliver Shallenberger o voltímetro de corrente alternada do tipo de indução. Alguns anos depois surgiram os instrumentos de medida de corrente alternada dos tipos de bobina móvel e ferro móvel. Vários dispositivos foram inventados no final do século XIX e início do século XX com a finalidade de medir impedâncias de circuitos elétricos e de seus componentes principais: a resistência, a indutância e a capacitância em corrente alternada. Dentre eles citamos as pontes de Maxwell-Wien, de Hay, de Schering e de Weston que eram ajustadas manualmente para obter o equilíbrio, e a tensão de saída indicar valor zero. Uma aplicação industrial destas pontes era na inspeção de qualidade de fabricação de capacitores. A ponte de Maxwell-Wien pela sua precisão tem sido utilizada em laboratórios internacionais e nacionais de padronização de medidas. Empresas elétricas construíram wattímetros para corrente contínua e para corrente alternada neste período.

Os frequencímetros utilizados no início do século XX tinham uma bobina externa com a finalidade de produzir fluxo magnético no entreferro do medidor. Além da alta relutância no circuito magnético inerente a este tipo de construção, a bobina externa causava problemas em aplicações onde havia limitação de espaço. Também havia dificuldades para compensar a diferença entre as temperaturas externa da bobina e interna deste instrumento. Além disto, havia dificuldades no manuseio e transporte do instrumento. Todavia, em 1941 foi apresentado um frequencímetro para aplicações comerciais com várias melhorias tais como: a eliminação da bobina externa e a sua substituição por uma bobina fixa interna com núcleo de ferro laminado, o aumento da precisão do instrumento através de compensações especiais e, a estabilidade da temperatura interna para todos os componentes. Como consequência houve redução da relutância no entreferro para as bobinas móveis, redução da força magneto-motriz necessária para

produzir o fluxo eletromagnético adequado no entreferro, e redução da potência interna consumida para um terço do valor inicial.

Em 1925 George Wigginton construiu um dispositivo para testar e calibrar voltímetros, e após 1945 surgiram os primeiros multímetros para corrente contínua e corrente alternada. Nesta ocasião foram construídos os primeiros voltímetros para visualização de sinais elétricos: os osciloscópios.

Em 1947 foi inventada uma ponte auto-ajustada para medir capacitância elétrica com ajuste rápido (2 segundos), maior precisão e escala única para uma ampla faixa de valores de 0,1 a 100 microfarad.

Os componentes eletrônicos têm sido incluídos nos instrumentos de medição de sinais elétricos gradualmente por diversas razões: redução do consumo interno, faixa ampla de frequências elétricas de operação, amplificação dos sinais medidos e conexão com computadores. (47) (49) (50) (51) (52) (53)

3.3.10. Padrões de Medidas Elétricas

Houve várias tentativas para estabelecer um padrão de medida da tensão elétrica como a *célula de Daniel* em 1836 e a *célula de Clark* em 1872, todavia não tiveram sucesso, pois estas tinham duração de apenas algumas semanas. Em 1892 a *célula de Weston* foi estabelecida como padrão de medida da tensão elétrica pela sua precisão (1,0186 Volt na temperatura de 20 °C) e pela sua duração de vários anos.

Houve também tentativas para estabelecer um padrão de medida da resistência elétrica, o padrão Ohm; todavia somente em 1930 foi denominado para tal o *Padrão Thomas* de medida da resistência pela sua precisão (1 ohm temperado a 550 °C e mantido em ambiente inerte) obtida com a resistência de manganina, uma liga que passou a ser utilizada mais tarde pelos laboratórios nacionais de padronização.

No Brasil, o Laboratório de Resistência Elétrica do Inmetro (Lares) possui seus padrões bem estabelecidos e promove a conservação do padrão internacional de resistência por meio de resistores padrão de valores nominais 1 Ω (Tipo Thomas) e 10 k Ω (ESI-SR-104).

A implantação do *sistema de resistência Hall quantizada* no Lares, além de estabelecer uma referência padrão independente em território nacional, colocou o Inmetro no mesmo patamar dos grandes institutos internacionais no âmbito da medição de resistência elétrica, e viabilizou a

pesquisa e desenvolvimento em outras vertentes da metrologia elétrica. O *padrão de frequência elétrica* é determinado pela frequência de um oscilador de quartzo operando em 100 kHz, que utiliza o efeito piezométrico. Este tipo de oscilador existe nos laboratórios internacionais de medidas de precisão, sendo guardado dentro de um bulbo de vidro termicamente estável, que nestas condições resulta na estabilidade da frequência da ordem de 1.10^{-10} num intervalo de tempo especificado, usualmente meses.

Os instrumentos de medidas foram padronizados utilizando-se normas internacionais e mediante esta padronização foram classificados em dois grupos: instrumentos absolutos e instrumentos secundários.

Os *instrumentos absolutos ou primários* proporcionam o valor da quantidade elétrica a ser medida em termos das suas constantes e da deflexão de seu ponteiro, não sendo necessária a comparação com outro tipo de instrumento. Por exemplo, o *galvanômetro tangencial* proporciona o valor da corrente elétrica a ser medida em termos da tangente do ângulo de deflexão produzido por esta corrente, do raio e do número de espiras da bobina do galvanômetro, e em termos da componente horizontal do campo magnético terrestre local. Estes instrumentos são usualmente utilizados em *laboratórios internacionais de padronização de medidas* e instituições similares associadas em vários países. A precisão destes instrumentos situa-se na faixa de 0,05 a 0,2% do valor de fundo de escala. Os instrumentos secundários são construídos de tal forma que o valor da tensão, corrente, potência, frequência, fator de potência e outras quantidades elétricas a serem indicadas pela deflexão dos instrumentos, terão significado em relação à quantidade medida, somente se estes instrumentos tiverem sido calibrados em relação a um instrumento absoluto.

No Brasil o INMETRO é o instituto responsável pela padronização de medidas e calibração de instrumentos de medidas. (27) (42) (45) (48) (56)

3.4. Conclusões

O conceito de medida utilizado em Engenharia Elétrica é filosófico e científico.

É *filosófico*, pois constitui um conjunto de considerações que reúne uma ordem determinada de conhecimentos, que limita o seu campo de medidas às grandezas eletrostáticas, elétricas, magnéticas e eletromagnéticas. Estes conhecimentos são princípios que servem de fundamentos e delimitam o seu alcance.

É *científico* porque utiliza métodos da ciência para realizar as medidas e assim procura evidenciar as grandezas medidas como elas são.

A partir do Século XVIII houve desenvolvimento de métodos de medidas, do conceito de qualidade nas medidas e da teoria de medidas elétricas, que foram incorporados aos instrumentos. Os instrumentos de medidas elétricas construídos no século XVIII eram chamados de eletrômetros e eletroscópios. Estes foram projetados e construídos por cientistas como Musschenbroek (garrafa de Leiden), Lichtenberg (câmara de Lichtenberg) e Coulomb (balança de torção e o plano de prova), os quais evidenciaram que seus estudos estavam concentrados na área de conhecimento da Eletrostática. Estes personagens conseguiram fazer experimentos quantitativos da Eletricidade com seus efeitos sobre corpos carregados eletricamente e estabelecer unidades de medidas eletrostáticas. Como exemplo foi estabelecida a unidade de medida de carga elétrica chamada algum tempo depois de Coulomb.

Já os instrumentos de medidas elétricas construídos no século XIX por Poggendorf e Schweigger (galvanômetro multiplicador), Thompson e Harris (medidor de potencial elétrico), D'Arsonval e Deprez (galvanômetro de bobina móvel), Ohm (bobina de resistência elétrica), Wheatstone e Thompson (ponte de resistências) evidenciaram que os estudos destes cientistas estavam concentrados na área do conhecimento da Corrente Elétrica. Através de seus experimentos conseguiram medir a quantidade de Eletricidade que fluía por condutores elétricos, estabelecer uma escala de intensidade de medidas para o medidor deste fluxo de Eletricidade, bem como medir a dificuldade que o condutor oferecia à passagem deste, a resistência elétrica e estabelecer unidades de medidas. Como exemplo, a unidade de medida de resistência elétrica foi estabelecida e chamada algum tempo depois de Ohm.

Com a descoberta da corrente alternada no final do século XIX, as atenções dos cientistas concentraram-se no desenvolvimento e construção de instrumentos de medidas elétricas neste período e no início do século XX. Destacam-se Oliver Shallenberger (voltímetro para corrente alternada), e Maxwell e Wien (ponte de impedâncias com resistência, indutância e capacitância), Galileo Ferraris (medidor de energia elétrica para corrente alternada), Wattímetros e frequencímetros. Estes instrumentos de medidas passaram a ser utilizados nos laboratórios de padronização de unidades de medidas e nas indústrias.

Desde o Século XVIII notamos a preocupação dos cientistas com a precisão dos instrumentos de medidas elétricas utilizados em seus experimentos, pois eles buscavam obter a medida real das

grandezas observadas. A invenção de instrumentos com melhorias, o estabelecimento de padrões de medidas, a invenção de instrumentos calibradores e a criação do Sistema Internacional de unidades, que passou a ser utilizado internacionalmente (ver o capítulo 2), foram ações importantes em resposta à busca desta precisão nas medidas.

Os componentes eletrônicos têm sido incluídos gradualmente nos instrumentos de medidas elétricas, os quais tornaram estes mais precisos, rápidos e flexíveis.

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas

Neste capítulo são apresentadas as principais contribuições desta tese que originaram dois trabalhos e são propostas algumas perspectivas para possíveis trabalhos no futuro.

4.1. Contribuições

Notamos que fatos históricos relativos à Engenharia Elétrica têm sido registrados na literatura especializada com âmbito restrito e regional até o momento, pois estes registros referem-se apenas aos acontecimentos no país onde o autor do texto está vivendo ou trabalhando. Outras vezes, observamos que são registrados fatos importantes que ocorreram em um determinado continente, apenas em um curto período de tempo.

A primeira contribuição apresentada por este trabalho, nesse sentido, é demonstrar o nosso propósito de registrar os fatos históricos importantes de toda a história da Engenharia Elétrica, que foram identificados nos documentos disponíveis, os quais aconteceram em vários continentes do planeta onde vivemos. Portanto, a contribuição é apresentar aspectos fundamentais da Engenharia Elétrica com uma visão mundial. A extensão desta contribuição poderá acontecer quando este trabalho estiver disponível ao público em geral.

A segunda contribuição é citar a existência do conhecimento sobre a Eletricidade na natureza e suas aplicações por povos que viveram há milênios antes de nós. Queremos também refletir sobre alguns nomes de povos, cientistas e inventores considerados como referências na atualidade, conforme mostrados na figura da *linha de tempo* no Capítulo 1:

- Registros *Chineses* evidenciam que eles conheciam a Eletricidade originada da pedra magnetita e construíram agulhas magnéticas e bússolas em 2637 AC aproximadamente, isto durante o mandato do Imperador Huan-Ti. Isto significa que este conhecimento já existia entre eles há 2000 anos antes dos gregos.

- Os *Sumérios* tinham conhecimento da Eletricidade e de materiais condutores como o cobre, a prata e o ferro, isto em 2.500 AC aproximadamente. Este povo fazia aplicação deste saber para a deposição de prata sobre vasos de cobre e estes vasos eram utilizados em rituais sagrados.

Estas informações evidenciam que tal conhecimento já existia há 4.200 anos antes de Luigi Galvani (1780), embora a este seja atribuída a descoberta da eletrodeposição ou galvanização.

- Os *Partias*, dinastia descendente dos sumérios na Mesopotâmia, viveram no século III AC. Eles conheciam a Eletricidade, os materiais condutores dela como o ferro e o cobre, os materiais isolantes como o betume e a argila seca, e construíram a chamada Bateria de Bagdá. Estes conhecimentos foram herdados dos seus antecessores *Sumérios* e eram aplicados para gerar a Eletricidade. Estas informações evidenciam que tal conhecimento já existia antes de Alessandro Volta, embora a invenção da bateria seja atribuída a este no ano de 1801 da nossa era, aproximadamente 2.100 anos após os Pártias.

- Na *França*, em 1269, Pièrre Pèlerin de Maricourt fez experimentos com ímãs e escreveu a “Carta sobre o Magneto de Pedro Peregrino de Maricourt para Sygerus de Foucaucourt, Militar”, chamada simplesmente “Epístola do Magneto”. A carta explica como identificar os pólos magnéticos de uma bússola, descreve as leis da atração e repulsão magnéticas, bem como a descrição da bússola. Estes estudos e descobertas explicitam que tais conhecimentos sobre o ímã já haviam sido adquiridos há 532 anos antes de William Gilbert (1801).

Nossa reflexão é sobre a consideração científica que se deve dar aos Chineses, aos Sumérios, aos Partias e à Pièrre Pèlerin de Maricourt por suas contribuições significativas às sociedades em que viveram. Assim sendo, nossa proposição é incluí-los nos registros da história da Engenharia Elétrica.

A terceira contribuição é mostrar que cientistas, inventores e empreendedores de países da América do Norte (Estados Unidos), Ásia (Rússia) e Europa (Alemanha, Croácia, Dinamarca, Escócia, Estônia, França, Holanda, Inglaterra, Itália) participaram da construção dos *Fundamentos Teóricos e Práticos da Engenharia Elétrica* simultaneamente, e devem por isso serem reconhecidos com a inclusão de seus nomes na história da Engenharia Elétrica, conforme aparecem nas figuras da *linha de tempo* do Capítulo 2.

A quarta contribuição é evidenciar que o conceito de medida utilizado em Engenharia Elétrica é filosófico e científico, conforme apresentado no Capítulo 3.

É filosófico, pois constitui um conjunto de considerações que reúne uma ordem determinada de conhecimentos, que limita o seu campo de medidas às grandezas eletrostáticas, elétricas, magnéticas e eletromagnéticas. Estes conhecimentos são princípios que servem de fundamentos e limitam o seu alcance.

É científico porque utiliza métodos da ciência para realizar as medidas e assim procura evidenciar as grandezas medidas como elas são.

4.2. Perspectivas e Pesquisas Futuras

O trabalho desenvolvido durante a preparação desta tese possibilita pesquisas e trabalhos futuros sobre a Engenharia Elétrica em várias vertentes:

4.2.1. Pesquisa 1: Ampliação do Conhecimento sobre a Engenharia Elétrica nos Primórdios

O método utilizado nesta pesquisa utilizou a *linha de tempo* para a identificação e classificação dos fatos históricos sobre a Engenharia Elétrica. A adoção de outros métodos poderá ser feita para ampliação do processo de busca de dados e informações sobre desenvolvimento e aplicações:

- ✓ Que aconteceram no período do primeiro milênio da nossa era,
- ✓ Além do novo limite de data pesquisado neste trabalho, o século XXVII antes de Cristo.

4.2.2. Pesquisa 2: Melhoria da Exatidão das Medidas Elétricas dos Instrumentos Comerciais Nacionais.

A verificação da possibilidade de estabelecer-se uma parceria com o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), a fim de iniciar uma linha de pesquisa conjunta sobre “A qualidade de medidas elétricas no Brasil”. Este é um projeto inovador a nosso ver, que irá contribuir para a melhoria da exatidão nas medidas elétricas e para a melhoria da confiabilidade destes instrumentos fabricados em território nacional.

4.2.3. Trabalho Futuro 1: “Criação de uma disciplina que poderá ser chamada História da Engenharia Elétrica e sua inserção no currículo de graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.”

A disciplina poderá ter um programa que capacite os estudantes a compreenderem o processo histórico de construção da Engenharia Elétrica, e incentivá-los a atuarem no futuro como

construtores de caminhos para esta ciência. Sugerimos que o conteúdo programático desta disciplina considere como referência o texto de dissertação desta tese.

4.2.4. Trabalho Futuro 2: “Criação de um Museu da Engenharia Elétrica no campus da UNICAMP”.

A inspiração da proposta é criar um local destinado a preservar, estudar e apresentar aos estudantes de Engenharia Elétrica coleções de obras, bens culturais e científicos relacionados com a história desta Engenharia.

Esta historicidade irá contribuir para a formação pessoal e profissional dos Engenheiros Elétricos e também poderá contribuir em outras especialidades da Engenharia no Brasil. O museu poderá também ser aberto para a sociedade em geral para visitação e oferecimento de palestras sobre temas afins para crianças que estão matriculadas no ensino Fundamental.

Trabalhos Publicados

- Battaglin, Paulo David; Barreto, Gilmar; “Contribuições sobre a Gênese, o Presente e o Futuro da Engenharia Elétrica”, COBENGE 2010, Fortaleza, Ceará, Brasil, 12-15 de Setembro de 2010.
- Battaglin, Paulo David; Barreto, Gilmar; “Contributions Concerning to Beginnings, Present and Future of the Electrical Engineering, Atılım University, International Engineering Education Conference (IEEC 2010), Antalya, Turkey, November 4-6, 2010.

Referências Bibliográficas

- (1) Needham, Joseph; Wang Ling, Science and Civilization in China, Volume 4, Part 1, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 1962.
- (2) Ronan, Colin A.; The Cambridge Illustrated History of the World's Science, Cambridge University Press, Great Britain, 1983.
- (3) Jarvis, C. Mackechnie; An early electric Cell, Journal of the Institute of Electrical Engineers, June, pp. 356-357, 1960.
- (4) Kuo-Sheng Cheng, Ph.D.; Historical Review of Electrical Engineering Development, Institute of Biomedical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan city, Republic of China or Taiwan, 2010.
- (5) Zhoubi - Encyclopedia Britannica Online, Academic Version, article 66.037, December 2009.
- (6) Campbell, Wallace Hall; Earth Magnetism – A guided Tour through Magnetic Fields, Harcourt Science and Technology Company/Academic Press, Burlington, Massachusetts, USA, 2000.
- (7) Correa, Iran Carlos Stalliviere; Origem da bússola, A Mira, Edição Ano XVII, Número 141, Setembro/Outubro 2007, Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- (8) Mc-Graw Hill Encyclopedia of Science and Technology, Volume 1, Mc-Graw Hill Book Company, New York, USA, 1971.
- (9) Roberts, W. L.; Rapp Jr, G. R.; Weber, J.; Encyclopedia of Minerals; Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1974.
- (10) Kanani, Nasser; The Parthian Battery: Electric Current 2000 years Ago? Fachzeitschrift des VINI, Eugen Gahname Leuze Verlag, Saul/Würt, Germany, 2004.
- (11) British Broadcasting Corporation News, Riddle of Baghdad's Batteries, February 27-2003, London, UK.
- (12) Krentz, Barbara M.; Mediterranean Contributions to the Medieval Mariner's Compass, Technology and Culture, Volume 14, Number 3, July 1973, pp. 367-383.
- (13) The Encyclopaedia Britannica, Volume 16, Alexander Neckman, *De Naturis Rerum*, William Benton Publisher, Chicago, IL, USA, 1964.

-
- (14) Aczel, Amir D.; The riddle of the Compass, Harcourt Publishers, NY, USA, 2001.
- (15) El-Hawary, Mohamed E.; Principles of Electrical Machines with Power Electronic Applications, IEEE Series on Power Engineering, IEEE Press & John Wiley, NJ, USA, 2002.
- (16) Petrus Peregrinus de Maharcuria, Encyclopaedia Britannica Online, Academic Version, article 9.059.211, December 2009.
- (17) Locker, Anne; Peter the Pilgrim, IET Communications Engineer – From the Archives, August/September 2006, UTC from IEEE.
- (18) Columbia Electronic Encyclopedia, Sixth Edition 2003, Columbia University Press, Licensed from Columbia University Press, All rights reserved. <http://www.cc.columbia.edu/cu/cup/>, December 2009.
- (19) Encyclopedia Britannica Inc., Volume 10 - William Gilbert – Otto Von Guericke, William Benton Publisher, Chicago, IL, USA, 1964.
- (20) Barber, G. W.; Arrott, A.S.; History and Magnetics of Compass Adjusting, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 24, Number 6, November 1988.
- (21) Baumgartner, Patrick; Burtscher, Martin; Gschwend, Mario; The History of Electrical Engineering ; Microsoft Encarta, Data Becker Lexikon, NOK and Siemens, 1999.
- (22) Valivach, P. E. ; Basic Stages of the History of Electrical Engineering and Possible Prospects for its Developments, Russian Electrical Engineering, Volume 80, Number 6, pp. 350-358, Allerton Press Inc., 2009
- (23) Otto von Guericke, Charles Augustin de Coulomb, Encyclopaedia Britannica Inc., Volumes 8 and 10 - Electrostatic generator, William Benton Publisher, Chicago, USA, 1964.
- (24) Gray, Stephen; Conduction and Insulation, Philosophical Transactions of the Royal Society - 1729, number 37, p. 1731 – 1732, London, UK.
- (25) Charles François DuFay, Encyclopaedia Britannica Inc., Volume 8 – Electrostatic, William Benton Publisher, Chicago, USA, 1964.
- (26) Henry Cavendish, Encyclopaedia Britannica Inc., Volume 5 – William Benton Publisher, Chicago, USA, 1964.
- (27) INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; Sistema Internacional de Unidades, 8ª. Edição, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- (28) Joseph Henry, Encyclopaedia Britannica Online, Academic Version, article 9.040.056

-
- (29) Thober, Dario S.; Instituto de Física Gleb Wataghin, Tese de Mestrado: “Lei de Weber e Indução de Correntes”, UNICAMP, Campinas, SP, Setembro de 1993.
- (30) Orsini, L. Q.; Camargo, J. B.; Eletromagnetismo, EPUSP, São Paulo, SP, 2003.
- (31) Nicolas Tesla, Encyclopaedia Britannica Online, Academic Version, article 9.071.814
- (32) Wilner, Eduardo; Eletrostática, Livraria Nobel S.A., São Paulo, SP, 1973.
- (33) Wilner, Eduardo; Magnetismo, Livraria Nobel S.A., São Paulo, SP, 1973.
- (34) Nasar, Syed A.; Electric Machines and Electromechanics, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1981.
- (35) Stewart, James; Calculus – Early Transcendentals, Books-Cole Publication Inc., Thompson Learning, 1995.
- (36) Gillispie, Charles Coulston; Dictionary of Scientific Biography, Volumes 1-15, Supplement I, Charles Scribner’s Sons, New York, USA, 1970.
- (37) Brittain, James E.; Scanning Our Past-Electrical Engineering Hall of Fame: George Westinghouse, Proceedings of IEEE, Volume 92, Number 8, August 2004.
- (38) Carr, Nicholas; A Grande Mudança – Reconnectando o mundo de Thomas Edison ao Google, Editora Landscape, 2009.
- (39) Chua, Leon O.; Senior Member IEEE, Memristor – The Missing Circuit Element, IEEE Transaction on Circuit Theory, Volume CT-18, Number 5, September 1971.
- (40) Maxwell, James Clerk; Treatise on Electricity and Magnetism, Volumes 1 and 2, Dover Publications Inc., New York, NY, USA, 1954.
- (41) Sydenham, P.H.; Handbook of Measurement Science, Practical Fundamentals, Volume 2, School of Electronic Engineering-South Australian Institute of Technology, John Wiley & Sons Edited, Chichester, England, 1986.
- (42) Sydenham, P.H.; Handbook of Measurement Science, Theoretical Fundamentals, Volume 1, School of Electronic Engineering-South Australian Institute of Technology, John Wiley & Sons Edited, Chichester, England, 1986.
- (43) Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Pittsburg, Pennsylvania, United States, 1964.
- (44) Jay, Frank; IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, Published by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 1977.

-
- (45) Fink, Donald G.; Carrol, John M.; Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw-Hill Book Company and Kogakusha Company Ltd, Tokyo, Japan, 1968.
- (46) The Encyclopaedia Britannica, volume 12, Electrical Instruments, William Benton Publisher, Chicago, USA, 1964.
- (47) Golding, E. W.; Widds, F.C.; Electrical Measurements and Measuring Instruments, Isaac Pitman & Sons Ltd., London, UK, 1968.
- (48) Fernandes, Janice de Brito; Carvalho, Zulmara Virgínia de; Schechter, Hélio; Do Clássico ao Quântico – Os Padrões de Resistência Elétrica do INMETRO, VII Seminário Internacional de Metrologia Elétrica, 2008.
- (49) Floyd II, H. Landis; Nenninger, Brian J., Personnel Safety and Plant Reliability Considerations in the Selection and Use of Voltage Test Instruments, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 33, number 2, March/April 1997.
- (50) Kostenko, M.; Piotrovsky, L.; Electrical Machines, Volume I, Mir Publishers, Moscow, 1977.
- (51) Foley, A. H.; Associate AIEE, A Self-balancing Capacitance Bridge, AIEE Transactions, Volume 66, page 797, 1947.
- (52) Knudsen, K. J. ; Member AIEE, An Improved Frequency Meter for Commercial Power Frequencies, Electrical Engineering Transactions, volume 60, pages 866-868, September 1941.
- (53) Wales, Stephen P.; A brief History of meter companies and meter evolution, The Old Brewery Works, Torquay, United Kingdom.
- (54) Lobkowicz, Frederick; Melissinos, Adrian C.; Physics for Scientists and Engineers, Volume II, W.B. Saunders Company, Philadelphia, PA, USA, 1975.
- (55) Finn, S. Bernard; Franklin as Electrician, Proceedings of IEEE, Volume 69, Number 9, September 1976.
- (56) Von Koch, Helge; Ljungberg, Gregory; Reio, Vera; Proceedings of the Fifth International Instruments and Measurements Conference, Volume 2, Stockholm, Sweden; Academic Press Publishers, London, 1961.
- (57) Battaglin, Paulo David; Barreto, Gilmar; “Contribuições sobre a Gênese, o Presente e o Futuro da Engenharia Elétrica”, COBENGE 2010, Fortaleza, Ceará, de 12 a 15 de Setembro de 2010.

(58) Battaglin, Paulo David; Barreto, Gilmar; “Contributions Concerning to Beginnings, Present and Future of the Electrical Engineering, Atılım University, International Engineering Education Conference (IEEC 2010), Antalya, Turkey, November 4-6, 2010.