



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE  
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA  
Curso de Graduação em Licenciatura em Física

Tiago Queiroz de Araújo

**Da Eletrônica à Fotônica e outras Aplicações**

Cuité-PB

2015

Tiago Queiroz de Araújo

## Da Eletrônica à Fotônica e outras Aplicações

TCC apresentado ao curso Graduação em Licenciatura em Física do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências do Componente Curricular Trabalho de Conclusão de Curso, para obtenção do grau de Graduado em Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

Cuité-PB

2015



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE  
Responsabilidade Msc. Jesiel Ferreira Gomes – CRB 15 – 256

A663e      Araújo, Tiago Queiroz de.

Da eletrônica à fotônica e outras aplicações. / Tiago Queiroz de Araújo. – Cuité: CES, 2015.

93 fl.

Monografia (Curso de Licenciatura em Física) – Centro de Educação e Saúde / UFEG, 2015.

Orientador: Dr. Fábio Ferreira de Medeiros.

1. Eletrônica. 2. Fotônica. 3. V.BG. I. Título.

CDU 53

Tiago Queiroz de Araújo

## Da Eletrônica à Fotônica e outras Aplicações

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso submetida à banca examinadora como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Graduação em Licenciatura em Física.

A citação de qualquer trecho deste trabalho é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas de ética científica.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aprovado em 21 de Julho de 2015.

### BANCA EXAMINADORA



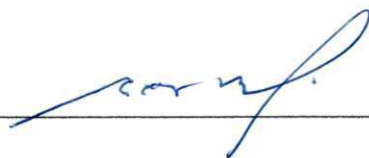
Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros - Orientador



Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas - Titular



Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde - Titular



Prof. Dr. Luiz Alberto Terrazos Javier - Suplente

A Deus, a meu saudoso pai, à minha mãe e à minha irmã...

## Agradecimentos

Agradeço...

Primeiramente a Deus, por me dar força e coragem para não ter desistido em todas as adversidades que passei e por não me ter deixado morrer nos desertos da vida. Todas as palavras seriam poucas para expressar todo o amor que sinto pelo tão grande Abba Pai.

À minha família de casa, especialmente aos meus dois guerreiros eternos: à minha mãe Alice, que apesar de toda a sua limitação e frágil saúde nunca nos deixou desamparados e nem nos pediu para desistir, pelo contrário, É por ela que eu continuo lutando; a meu pai Francisco(*in memoriam*), não mais presente, mas que me deixou um legado para toda a vida: sermos simples, servos, mansos, humildes, sempre valentes, faltando as vezes muita coisa, mas nunca deixando faltar um puro coração. À minha irmã Rute, pelo jeito diferenciado de amar e de querer bem, unidos por um laço familiar que nem sempre se encaixa, mas que fortalece um ao outro para sempre. Aos meus irmãos, que de longe sempre desejaram sucesso e oraram por mim.

Ao meu orientador, um amigo, Prof. Fábio Ferreira de Medeiros, pela paciência, instrução, entendimento, ajuda, compreensão e apoio diante de dificuldades que não envolviam apenas o universo acadêmico e por todo conhecimento adquirido que levarei adiante.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Física e Matemática, aqueles que tive o privilégio de ser instruindo, em especial a Prof<sup>a</sup>. Maria de Jesus, Prof. Joseclécio Dantas, Prof. José de Miranda e Prof. Danyel Judson, responsáveis pelo meu amadurecimento acadêmico.

Aos meus colegas pibidianos passados e presentes pelas experiências marcantes, destacando o Coord. Prof. João Batista, e meu supervisor Prof. Jabes da Silva que durante todos esses anos de projeto me ensinaram a amar a docência.

Aos amigos mais que especiais, responsáveis pelos melhores anos da minha vida e quando precisei de ajuda eles estavam lá para me acolher e me ouvir, são eles: Francielly Macedo, Thiago Reis, Wellington Santos, Alessandra de Jesus, Jaqueline Ferreira, Ricardo Maia, Ecione Soares, Maria José, Rita de Cássia, Silmara Queiroz, Talita Antunes, Ricardo Fernandes, Irene Dantas, Luis Paulo e Yara Gomes.

Aos companheiros e amigos residentes: Amigos de quarto(Pedro e Clésio), Johnyeferson, Carlos Alexandre, Edvalcilia, Helinalda, Adenilza, Margarida, Milena's, Maria, Fátima, Marcinha, Roberto, Leonardo, Isaac, Elisandra, Charles, Rafael e Verônica por tantas risadas, conversas paralelas e desenvolvimento da convivência. Aos amigos e colegas sosseguenses: Maria Ionéris, Elenilda, Anciélío, Andrea, Delmiro, Gizele, Raabe, Junior, Marcinha, Daniele, Veronilda, Crisaldo, Luana, Daniel, Audiene, Rosane, Jaqueline, Jucimery, Raquel, Rodrigo, Jéssica, Geovânia, Geilson, Ailton, Núbia, Ana Paula, Elda, Túlio, Lívia e Isaías pela zoeira e diversão. Aos amigos e companheiros universitários: Marina, Thalyta, Graciete, Anderson, Brunna Luana e Wênia, pelo destaque como pessoas na minha vida.

Aos meus pastores Valdemir e Fátima e sua família pelo apoio espiritual, aos irmãos da UEC-Sossego, Pais de EJC(Carlos e Fabiana), pelas orações, intercessões e por serem família em Cristo.

*“O deserto é uma escola, ninguém passa porque cola, os seus testes são difíceis demais. Não existe uma fórmula, cada um tem que viver sua própria experiência para escrever a sua história. Mas, se Deus está conosco, o deserto vale ouro.”*

Ludmila Ferber.



## Resumo

Neste trabalho estudamos o desenvolvimento da Eletrônica até a Fotônica. Ele tem caráter histórico e descritivo sobre as principais conquistas e avanços das tecnologias atuais. A Eletrônica domina todas as tecnologias presentes na nossa vida, embora os limites da miniaturização tenham chegado, ela continua sendo referência na produção de novas tecnologias.

A Fotônica por sua vez é mais recente, embora já faça parte dos grandes avanços mundiais em pesquisa e aplicação. Diversas partes do mundo a usam em seus equipamentos. No entanto, os diversos componentes, tanto da Eletrônica, como da Fotônica com a miniaturização, deram lugar a nanotecnologia que é responsável por essa nova moldagem de equipamentos.

Por outro lado a busca pelo espaço e flexibilidade abre as portas para a utilização de componentes orgânicos que possuem propriedades condutoras. Eles têm ganhado cada vez mais espaço na Eletrônica, bem como a necessidade de dispositivos que suportem condições extremas de temperatura e tensão abra espaço para o estudo dos semicondutores WBG, que são os semicondutores de gap longo.

**Palavras-chave:** Eletrônica. Fotônica. WBG.

## Abstract

In this work, we study the development of Electronics to Photonics. It has historical and descriptive about the main achievements and progress of actual technologies. The Electronic dominates all technologies present in our lives, although the miniaturization limits have arrived, it is still a reference in the production of new technologies.

The Photonics in turn is more recent, but already part of the great global advances in research and application. All over the world use it in their equipment. However, the various components of both Electronics, such as the Photonics with miniaturization, gave way to nanotechnology that is responsible for this new molding equipment.

On the other hand, the quest for space and flexibility opens the door for the use of organic compounds that have conductive properties. They have gained more and more space in Electronics, as well as the need for devices that support extreme conditions of temperature and voltage open space for the study of WBG semiconductors.

**Keywords:** Eletronics. Photonics. WBG.

# Sumário

Introdução	10
<b>1 Eletrônica</b>	<b>13</b>
1.1 Histórico e Evolução	14
1.2 Componentes e Dispositivos	19
1.2.1 As Válvulas	19
1.2.2 Transistores	21
1.2.3 Circuitos Integrados - CIs	22
1.3 Eletrônica Analógica	25
1.3.1 O Objetivo da Eletrônica Analógica	27
1.3.2 Grandezas Físicas e Elétricas	28
1.3.3 Instrumentos	31
1.3.4 Semicondutores	33
1.3.5 Semicondutor Intrínseco	34
1.3.6 Semicondutor Extrínseco	35
1.4 Eletrônica Digital	35
1.4.1 Sistemas Numéricos	36
1.4.2 Álgebra Booleana	37
1.4.3 Circuitos Combinatórios	40
1.4.4 Circuitos Sequenciais	41
1.4.5 Sistemas Microprocessados	42
1.5 Spintrônica	42
1.5.1 O Spin	43
1.5.2 O Experimento de Stern-Gerlach	45
1.5.3 Magnetorresistência Gigante (MRG)	46

	9
1.5.4 Junções de Tunelamento Magnético (MRAM) . . . . .	47
<b>2 Fotônica</b>	<b>49</b>
2.1 Introdução . . . . .	49
2.2 Optoeletrônica . . . . .	56
2.2.1 Dispositivos Optoeletrônicos . . . . .	58
2.3 Nanoeletrônica . . . . .	61
2.3.1 Nanoeletrônica . . . . .	64
2.3.2 Nanofotônica . . . . .	66
<b>3 Avanços e Outras Aplicações Futuras</b>	<b>69</b>
3.1 Organoeletrônica . . . . .	69
3.1.1 Dispositivos Eletrônicos Orgânicos e Aplicações . . . . .	71
3.2 WBG-Eletrônica . . . . .	72
<b>Conclusão</b>	<b>75</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>78</b>

# Introdução

## Motivação e Objetivos

Dispositivos Eletrônicos podem emitir sons, enviar mensagens, mostrar imagens, lembrar, calcular, controlar e tantas outras características. Durante a história, a Eletricidade começou a mudar o modo de vida das pessoas. A medida que passava os anos, atividades arcaicas iam sendo deixadas de lado, como por exemplo, a substituição de cartas que eram levadas por navios ou por animais pelo telégrafo. Outras máquinas que auxiliavam a vida das pessoas já existiam na época dos primórdios da modernidade e do descobrimento da Eletrônica, como por exemplo, a calculadora antiga. Mas essas máquinas funcionavam lentamente, e pouco tempo depois acabavam se quebrando. É interessante lembrar que antigamente, pessoas que estivessem perdidas em uma mata à noite, bastariam acender uma fogueira ou apagá-la como um sinal de “sim” e “não”, sem nem imaginar que esse mesmo código de duas possibilidades sobrevivesse até os dias de hoje em sistemas digitais. Nesse sentido a descoberta do elétron foi algo impressionante; desde os primórdios da Eletricidade o homem buscava entender os mistérios dos fenômenos elétricos [1][3][6].

Nesse trabalho, pretendemos estudar o contexto histórico e relatar as tantas ferramentas e conquistas que muitos homens, ao longo dos anos, pesquisaram e produziram através de inúmeras experiências. O Capítulo 1 abre essa discussão histórica, trazendo fatos relevantes e apresentando pessoas que, no intuito de simplificar a vida e torná-la mais completa, fizeram novas descobertas que mudaram completamente a história da humanidade. A busca pelo conhecimento gera soluções de problemas e empecilhos, trazendo a era da Eletrônica. É possível ver nesse trabalho que, apesar de descobertas fascinantes, que serviram de soluções novas para o homem, o contentamento não existia, e sempre era possível evoluir o que já existia trazendo um novo desenvolvimento. O surgimento

do computador trouxe uma revolução para os cálculos extensos e pesados, embora em seus primórdios, eles fossem enormes e difíceis de serem operados por pessoas que não possuísem a qualificação necessária na época do seu surgimento. A Eletrônica Analógica e a Eletrônica Digital governaram absolutas por muito tempo, sendo a base de tudo que conhecemos hoje em termos de equipamentos e instrumentos, permitindo a descoberta dos semicondutores, que são a chave da Eletrônica Moderna. No Capítulo 1 é possível ter uma noção dos componentes iniciais da Eletrônica que, com o tempo, ao serem aprimorados, permitiam novos avanços. A era da miniaturização proporcionou o avanço em escalas de espaço e custos, o que fez dos computadores um meio eletrônico mais presente na vida do homem. Desde a sua descoberta, o elétron se tornou a chave da Eletrônica, sendo a base para a Spintrônica, que explora a natureza quântica dos elétrons para fins da Eletrônica. Os limites bateram a porta da Eletrônica e assim foi possível chegar em um momento que necessitasse de mais um revolução [9][28][33][39].

Por outro lado, a luz é algo que sempre fascinou o homem e intrigou com seu comportamento tanto de onda como de partícula. Ela despertou o interesse pelas propriedades para uso na tecnologia. No capítulo 2, destacamos a Fotônica, como proposta não só do presente, mas do futuro. Abordá-la é necessário, pois na década em que estamos a luz e as tecnologias ópticas têm sido aclamadas e discutidas por todo o mundo. Desde o início, a preocupação com o tamanho dos dispositivos e os custos altos dos mesmos, permeou os pesquisadores. Esse tempo, mais do que nunca, tem sido o tempo da miniaturização. Toda a Eletrônica e a Fotônica hoje são trabalhadas na forma de economia de espaço, custo e energia. Parecendo que a Eletrônica tenha encontrado seus limites, a Fotônica chega pra alavancar mais as pesquisas em tecnologia, não deixando a Eletrônica de lado, mas caminhando juntas na disseminação dos meios tecnológicos. A Fotônica é a ciência e a tecnologia que gera, controla e detecta os fótons, que agora ocupa o lugar principal, que são partículas de luz. A Fotônica serve de base para tecnologias que são utilizadas no cotidiano, que vão de *smartphones* e *laptops*, até a internet, aparelhos médicos e tecnologias de iluminação. O século XXI dependerá da Fotônica, assim como o século XX dependeu da Eletrônica [52][60][71]-[73][76].

O Capítulo 3 encerra esse trabalho trazendo novas perspectivas de futuro. Agora a Eletrônica torna-se flexível, enfrenta e suporta novos desafios. O homem busca sempre sua comodidade; se antes queria menos espaço, agora quer mais flexibilidade. Vemos

nesse capítulo que não só materiais metálicos podem oferecer propriedades condutoras, mas certos dispositivos plásticos com características específicas podem assumir também esse papel. Denominada de Eletrônica Orgânica, ela se baseia na utilização de materiais orgânicos, os polímeros, para criar circuitos e dispositivos eletrônicos. Esses circuitos eletrônicos orgânicos podem ser fabricados por impressão e normalmente são finos, flexíveis e até transparentes. Há também os semicondutores de material de *gap* longo, os WBG, países de primeiro mundo, como os EUA (Estados Unidos da América), estão investindo pesados recursos e pesquisas nesses materiais, já que os benefícios que podem ser alcançados prometem mudanças significativas tanto na economia como na estruturação da Eletrônica no país. Esses materiais proporcionam revoluções no processo de fabricação de equipamentos eletrônicos que suportem condições extremas de temperatura e tensão [124]-[127][129]-[131].

Por fim, esse trabalho não só remonta o passado e o presente, mas a um futuro proeminente, como também deixa uma indagação sobre o que mais pode evoluir e como será a nossa reação a sermos confrontados com mais uma inovação.

# Capítulo 1

## Eletrônica

Hoje em dia, podemos afirmar que estamos cercados de uma interminável parafernália eletrônica, que vão desde pequenos eletroeletrônicos como os celulares até os tantos equipamentos de transmissão, como os rádios e as antenas transmissoras e receptoras. Não podem passar despercebidos, sem nem ao menos despertar em nós a curiosidade e a vontade de saber, como era antes quando nada disso existia, e como era a tecnologia que culminou no que hoje é a Eletrônica. Nossa vida atualmente com a Eletrônica ganhou mais facilidade e acessibilidade. No início da Eletrônica, seus equipamentos e funcionamento eram tão complexos que somente profissionais habilitados a poderiam usar. Agora, a Eletrônica é bem disseminada na sociedade, pois o conhecimento não para em apenas uma descoberta, ele evolui buscando uma próxima. A busca por materiais e equipamentos mais acessíveis, rápidos e com menos custos proporcionou as grandes evoluções na Eletrônica, que estão fincadas na história da humanidade [1][2][3][4]. Neste capítulo, iremos abordar um pouco sobre como tudo aconteceu, quais foram as mudanças, quem são os nomes responsáveis por elas e depois entraremos na Eletrônica, uma área que gera fascínio por décadas, desde o seus primórdios. Sabemos, é claro, que não podemos expor tudo aqui; existe uma infinidade de nomes, experiências, erros, acertos, componentes, recursos e invenções. Mas de uma coisa temos certeza: a cada dia que se passa, a Eletrônica vem ganhando mais espaço, pessoas têm se dedicado a continuá-la levando mais a frente, trazendo à tona o que ainda não foi descoberto e podemos esperar que grandes evoluções ainda virão, assim como foi no princípio da Eletrônica e durante toda a sua história [5][6][7][8].



## 1.1 Histórico e Evolução

A Eletrônica é a ciência que estuda a forma de controlar a energia elétrica onde o elétron ocupa o papel fundamental. A Eletrônica se divide em: Eletrônica Analógica e Eletrônica Digital [9]. Mais a frente, explanaremos um pouco sobre o que é cada uma delas. De uma forma mais geral, nós entendemos que a Eletrônica é uma ciência que estuda o uso dos mais diversos circuitos formados por componentes elétricos e eletrônicos, esses componentes têm o objetivo de representar, armazenar, transmitir ou processar as mais diversas informações. Podemos, dessa forma, citar alguns exemplos desses componentes: os circuitos internos de computadores (os quais são responsáveis pelo armazenamento e processamento de informações). Temos também os mais diversos sistemas de telecomunicação (estes responsáveis pela transmissão de informações) e temos ainda os sensores e transdutores<sup>1</sup>(estes são responsáveis por representar as grandezas físicas sob a forma de sinais elétricos). Em meio a essas definições, pode-se acrescentar a Eletrotécnica, que é um ramo da ciência que estuda o uso de circuitos formados por componentes elétricos ou eletrônicos que agora são responsáveis pelo armazenamento, processamento e transmissão da energia elétrica. Nesse sentido, podemos citar, as usinas hidrelétricas, termelétricas e eólicas, e também os transformadores, retificadores e inversores (esses responsáveis pelo processamento da energia) e, por fim, as baterias (estas que são responsáveis pelo armazenamento da energia) [10]. Existem vários ramos que abrangem a Eletrotécnica. Destacamos aqui um, o ramo na qual a Eletrotécnica estuda a transmissão de correntes no vácuo e nos semicondutores, que é um dos objetos de estudo da Eletrônica. A Eletrotécnica é também um ramo da Eletricidade, por sua vez a Eletricidade é um ramo da Física, na qual se estudam os fenômenos elétricos, ou seja, as propriedades e o comportamento dos elétrons e das ondas eletromagnéticas, entre outras partículas carregadas.

As primeiras observações acerca da Eletricidade estão na Grécia Antiga, quando o filósofo Tales de Mileto<sup>2</sup>observou que um pedaço de âmbar depois de atritado era capaz de atrair pequenos objetos. Depois, a Eletricidade começou a ganhar forma com as

---

<sup>1</sup>Um transdutor é um dispositivo que recebe um sinal e o retransmite, independentemente de conversão de energia.

<sup>2</sup>Tales de Mileto (624 a.C. Mileto, Turquia - 546 a.C. Mileto, Turquia) foi um filósofo, matemático, engenheiro, homem de negócios e astrônomo da Grécia Antiga, o primeiro filósofo ocidental de que se tem notícia.

teorias propostas por Benjamin Franklin<sup>3</sup>, pois o mesmo considerava que a Eletricidade era um fluido invisível que escorria de um corpo para outro. Em seguida, Charles Coulomb<sup>4</sup> aperfeiçoou os conceitos sobre cargas elétricas em meados do século XVIII. Antes de entrarmos na concepção da Eletrônica e de seus componentes, é interessante abranger o contexto histórico e sua evolução até chegar nos primeiros indícios do início da Eletrônica. A revolução da Eletrônica se deu de forma lenta no início, mas, com o passar do tempo, foi avançando mais rápido. De acordo com os registros históricos, as informações que foram colhidas dos séculos XVII, XVIII e XIX são dispersas e aleatórias [11][12][13][14]. O dispositivo eletrônico mais antigo do qual se tem ideia, é a célula fotovoltaica, construída em 1839 por Becquerel<sup>5</sup>, que foi apenas mostrada como curiosidade científica [15]. Em 1850, a Física-Química passou a ter interesse nos fenômenos do comportamento dos gases sob alta tensão: Julius Plücker<sup>6</sup> realizou um experimento no qual ele conectou uma tensão elétrica elevada em dois eletrodos inseridos numa ampola de vidro com atmosfera rarefeita. Dessa forma ele mostrou o fenômeno da descarga dos gases, sendo observado durante o experimento, um efeito de eletroluminescência de cor púrpura nas paredes do vidro. Em 1861, foi descoberto o efeito fotovoltaico do selênio<sup>7</sup>[16][17]. Em seguida, em

---

<sup>3</sup>Benjamin Franklin (Boston, 17 de janeiro de 1706 — Filadélfia, 17 de abril de 1790) foi um jornalista, editor, autor, filantropo, abolicionista, funcionário público, cientista, diplomata, inventor e enxadrista estadunidense.

<sup>4</sup>Charles Augustin de Coulomb (Angoulême, 14 de junho de 1736 — Paris, 23 de agosto de 1806) foi um físico francês.

<sup>5</sup>Antoine César Becquerel (Châtillon-Coligny, 7 de março de 1788 — Châtillon-sur-Loing, 18 de janeiro de 1878) foi um físico francês. Descobridor da célula fotovoltaica (1839), é considerado o pai da Eletroquímica.

<sup>6</sup>Julius Plücker (Elberfeld, 16 de julho de 1801 — Bonn, 22 de maio de 1868) foi um físico e matemático alemão. Estudou a espectrometria de gases rarefeitos. Desenvolveu métodos para estudo do desvio dos raios catódicos que passavam através de campos magnéticos, o que contribuiu para a descoberta do elétron.

<sup>7</sup>O selênio é um elemento químico de símbolo Se, número atômico 34 (34 prótons e 34 elétrons) e com massa atômica de 78 u. Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o selênio encontra-se no estado sólido. É um não metal do grupo dos calcogênio (16 ou VIA) da Classificação Periódica dos Elementos.

1873, Willoughby Smith<sup>8</sup>, investigou esse efeito, o que resultou nas primeiras leis da fotocondutividade. Em 1873, temos os primórdios da válvula termiônica, concebido quando Guthrie<sup>9</sup> aqueceu uma esfera metálica e a aproximou de um eletroscópio carregado. Ao fazer isso ele observou que o dispositivo se descarregava [18]. Braun<sup>10</sup> descobriu o efeito semicondutor no ano de 1874, ao observar os sulfetos de chumbo e ferro [19]. Alexander Graham Bell<sup>11</sup> e Charles Sumner Tainter<sup>12</sup> em 1878, utilizaram a célula de selênio para realizar experiências com um telefone sem fio, utilizando ondas luminosas [20]. David Edward Hughes<sup>13</sup> descobriu como gerar ondas eletromagnéticas em 1874. O que ele queria era detectar ondas através de dispositivos semicondutores, neste caso, o diodo. Julius Elster<sup>14</sup> e Hans Geitel<sup>15</sup>, em 1880, encerraram um filamento de uma lâmpada incandescente e uma placa metálica numa ampola com vácuo, foi observado um efeito: uma corrente elétrica que flui do filamento à placa através do vácuo. Fleming<sup>16</sup>, que nessa época trabalhava para Thomas Edison<sup>17</sup> investigou o porquê do escurecimento de uma lâmpada de filamento, inserindo uma placa metálica e fazendo uma ligação externa ao

---

<sup>8</sup>Willoughby Smith (06 de abril de 1828, Great Yarmouth, Norfolk - 17 de julho de 1891, Eastbourne, Sussex) foi um engenheiro elétrico inglês que descobriu a fotocondutividade do elemento selênio. Esta descoberta levou à invenção de células fotoelétricas, incluindo os utilizados nos sistemas de televisão mais antigos.

<sup>9</sup>Francis Guthrie (Londres, 22 de Janeiro de 1831 - Claremont, Cape Town, 19 de outubro de 1899) foi um matemático e botânico sul-africano.

<sup>10</sup>Karl Ferdinand Braun (Fulda, 6 de junho de 1850 — Nova Iorque, 20 de abril de 1918) foi um físico alemão. Compartilhou o Nobel de Física de 1909 com Guglielmo Marconi, pelo seu serviço no desenvolvimento da telegrafia sem fios.

<sup>11</sup>Alexander Graham Bell (Edimburgo, 3 de Março de 1847 — Nova Escócia, 2 de Agosto de 1922) foi um cientista, inventor e fundador da companhia telefônica Bell.

<sup>12</sup>Charles Sumner Tainter (Watertown, 25 de abril de 1854 — San Diego, 20 de abril de 1940) foi um engenheiro e inventor estadunidense.

<sup>13</sup>David Edward Hughes (Londres, 16 de maio de 1831 — Londres, 22 de janeiro de 1900) foi um industrial, músico e inventor estadunidense nascido britânico.

<sup>14</sup>Julius Elster (Blankenburg, 24 de dezembro de 1854 - Wolfenbüttel, 6 de abril de 1920) foi um físico alemão que, juntamente com Hans Geitel, construiu em 1904 a primeira fotocélula.

<sup>15</sup>Hans Friedrich Geitel (Braunschweig, 16 de julho de 1855 — Wolfenbüttel, 15 de agosto de 1923) foi um físico alemão.

<sup>16</sup>John Ambrose Fleming (Lancaster, 29 de novembro de 1849 — Sidmouth, Devon, 18 de abril de 1945) foi um engenheiro eletrônico e físico britânico.

<sup>17</sup>Thomas Alva Edison (Milan, Ohio, 11 de Fevereiro de 1847 — West Orange, Nova Jérsei, 18 de Outubro de 1931) foi um empresário dos Estados Unidos que patenteou e financiou o desenvolvimento de muitos dispositivos importantes de grande interesse industrial.

dispositivo. Ele observou que quando se aplicava um potencial a placa em relação ao filamento, uma corrente elétrica fluía pelo vácuo, se invertesse a polaridade a corrente não fluía, esse fenômeno foi chamado de Efeito Edison<sup>18</sup>. Em 1887, Hertz<sup>19</sup> observou o efeito fotoemissivo, que foi aprimorado em 1890 por Wilhelm Hallwachs<sup>20</sup> e Wiedemann<sup>21</sup>. Em 1890, Julius Elster e Hans Geitel desenvolveram a primeira válvula eletrônica fotoemissiva. Lodge, em 1894, preparou um tubo que continha limalhas de ferro, seguindo o que Branly<sup>22</sup> tinha realizado, descobrindo que esse método serviria para tornar possível a detecção de ondas hertzianas [21]. Esse dispositivo recebeu o nome de coesor, já que as ondas eletromagnéticas passavam por si, as limalhas se juntavam e precisavam serem tiradas antes que fosse emitida outra radiofrequência. Em 1850, com as experiências de Julius Plücker sobre a eletroluminescência, William Crookes<sup>23</sup> e Eugen Goldstein<sup>24</sup> deram início a uma investigação dos efeitos de Alta Tensão. Crooke inseriu um eletrodo em forma de cruz de malta em um tubo de vidro, observando que o brilho produzido pelos raios invisíveis era aceleração de algum tipo de partícula ou raio que vinha do eletrodo negativo para o positivo, o nome dado a esse fenômeno foi raios catódicos, pois acreditava-se que a carga era negativa, depois, essa experiência foi confirmada por Hallwachs. Em 1897, Thomson<sup>25</sup> estudou o efeito e deu o nome de elétrons as partículas aceleradas no tubo de

---

<sup>18</sup>O Efeito Edison ou emissão termoiônica é o processo pelo qual os elétrons atingem energia suficiente, por meio do calor, para escapar da superfície do elemento metálico emissor, descoberto pelo inventor americano Thomas Alva Edison.

<sup>19</sup>Heinrich Rudolf Hertz (Hamburgo, 22 de Fevereiro de 1857 — Bonn, 1 de Janeiro de 1894 ) foi um físico alemão. Hertz demonstrou a existência da radiação eletromagnética, criando aparelhos emissores e detectores de ondas de rádio.

<sup>20</sup>Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs (Darmstadt, 9 de julho de 1859 — Dresden, 20 de junho de 1922) foi um físico alemão.

<sup>21</sup>Gustav Heinrich Wiedemann (02 de outubro de 1826 - 24 de março de 1899) foi um físico alemão conhecido principalmente por seu trabalho literário.

<sup>22</sup>Édouard Branly (Amiens, 23 de outubro de 1844 — Paris, 24 de março de 1940) foi um físico francês.

<sup>23</sup>William Crookes, OM , PRS (Londres, 17 de junho de 1832 — Londres, 4 de abril de 1919) foi um químico e físico inglês. Frequentou o *Royal College of Chemistry* em Londres, trabalhando em espectroscopia.

<sup>24</sup>Gotthilf-Eugen Goldstein (Gleiwitz, 5 de setembro de 1850 — Berlim, 25 de dezembro de 1930) foi um físico alemão que desempenhou fundamental papel nos estudos sobre raios X.

<sup>25</sup>Sir Joseph John Thomson, também conhecido por J. J. Thomson, OM, PRS (Manchester, 18 de dezembro de 1856 — Cambridge, 30 de agosto de 1940) foi um físico britânico que descobriu o elétron. Pela descoberta dos elétrons, J.J. Thomson recebeu o Nobel de Física de 1906.

raios catódicos. O Padre Roberto Landell de Moura<sup>26</sup> em 1893, inciou as experiências com o telefone sem fio utilizando a radiofrequência, sendo que no dia 3 de junho de 1900, ele fez uma demonstração pública. Em 1901, Marconi<sup>27</sup> recebeu os primeiros sinais de rádio através do Atlântico, para isso, ele usou um detector, um retificador de glóbulo de ferro mercúrio, idêntico ao inventado por Hughes em 1874. As descobertas do século XIX só vieram a ser condensadas, no início do século XX, quando a utilização se tornou prática para a emissão termiônica, dada pela utilização de diodo termiônico, triodo termiônico, tetrodos<sup>28</sup>, pentodos<sup>29</sup> e outros, iniciando assim a era da eletrônica termiônica. Nesse tempo, Fleming utilizou esses efeitos para a amplificação de sinais [22].

## A origem do nome Elétron

Como vimos anteriormente, o primeiro contato que tivemos sobre eletricidade foi com o âmbar, um tipo de resina que era estudada pelos gregos. Dessa forma, a palavra elétron deriva da palavra âmbar, devido as experiências feitas com esse tipo de material. William Gilbert<sup>30</sup>, no final do século XVI, descobriu que outros materiais apresentavam as mesmas características elétricas do âmbar. Foi então que com os experimentos de Benjamim Franklin, o conceito de carga elétrica teve início. Para Franklin, se um objeto tivesse excesso de carga ele era um objeto eletricamente positivo; caso contrário, se fosse um objeto com carência de carga ele seria um objeto eletricamente negativo [5]. Segundo as experiências de Franklin, a eletricidade não se restringe a apenas objetos sólidos, mas também poderiam se mover através de um gás. Foi a partir dessas experiências que outros pesquisadores realizaram outros experimentos usando gases, como vimos anteriormente. Thomson mostrou que o tubo de raios catódicos era formado por partículas que seriam menores e mais leves que os átomos; a partir disso ele começou a medir os desvios na

---

<sup>26</sup>Roberto Landell de Moura (Porto Alegre, 21 de janeiro de 1861 — Porto Alegre, 30 de junho de 1928) foi um padre católico, cientista e inventor brasileiro, considerado o Patrono dos Radioamadores do Brasil. Também é considerado, no Brasil, o pioneiro do rádio.

<sup>27</sup>Guglielmo Marconi (Bolonha, 25 de abril de 1874 — Roma, 20 de julho de 1937) foi um físico e inventor italiano.

<sup>28</sup>Válvula termiônica que consiste de quatro eletrodos: cátodo, ânodo e duas placas.

<sup>29</sup>Válvula termiônica que compreende cinco eletrodos.

<sup>30</sup>William Gilbert (ou William Gylberde) (Colchester, 24 de Maio de 1544 — Londres, 10 de Dezembro de 1603) foi um físico e médico inglês de Elizabeth I e James I e pesquisador no campo do magnetismo e eletricidade.

presença de campos elétricos ou magnéticos, e concluiu que esse desvio estaria relacionado com a massa das partículas, com a velocidade delas e com a sua carga. A partícula de raio catódico foi chamada de elétron, e depois Thomson conseguiu calcular a razão carga/massa do elétron. Em seguida Robert Millikan<sup>31</sup> calculou o valor numérico para a carga elétrica do elétron, e juntamente com o resultado da razão carga/massa do elétron obtida por Thomson, Millikan obteve a massa do elétron. Hoje, sabemos que são os elétrons que se movem de um corpo para o outro, daí a eletrização de um objeto que inicialmente está neutro é devido a falta ou excesso de elétrons.

## 1.2 Componentes e Dispositivos

A Eletrônica do século XX possuía três componentes principais, são eles:

- As Válvulas;
- Os Transistores;
- Os Circuitos Integrados.

A partir do histórico que já foi apresentado, podemos também considerar outras características sobre cada um desses componentes, e é o que faremos a seguir.

### 1.2.1 As Válvulas

As válvulas são dispositivos eletrônicos formados por uma ampola de vidro com vácuo, contendo vários elementos metálicos, tais como, o filamento que aquece o cátodo e emite os elétrons, o cátodo que é o emissor de elétrons, a placa conhecida como ânodo que é o receptor de elétrons, a grade de controle que a partir de sua polarização aumenta ou diminui o fluxo de elétrons, e dentre outros componentes [23]. Observe a Figura 1.1<sup>32</sup>. As válvulas são retificadoras, ou seja, transformam correntes alternadas em correntes contínuas. A válvula para funcionar precisa estar quente, assim ela é ligada a uma outra fonte de energia elétrica [24].

---

<sup>31</sup>Robert Andrews Millikan (Morrison, 22 de março de 1868 — San Marino, 19 de dezembro de 1953) foi um físico estadunidense. Recebeu o Nobel de Física de 1923, por trabalhos sobre cargas elétricas elementares e o efeito fotoelétrico.

<sup>32</sup>Disponível em: <<http://producao.virtual.ufpb.br/books/camyle/introducao-a-computacao-livro/livro/livro.chunked/ch01s02.html>>. Acesso em 15 jun. 2015.

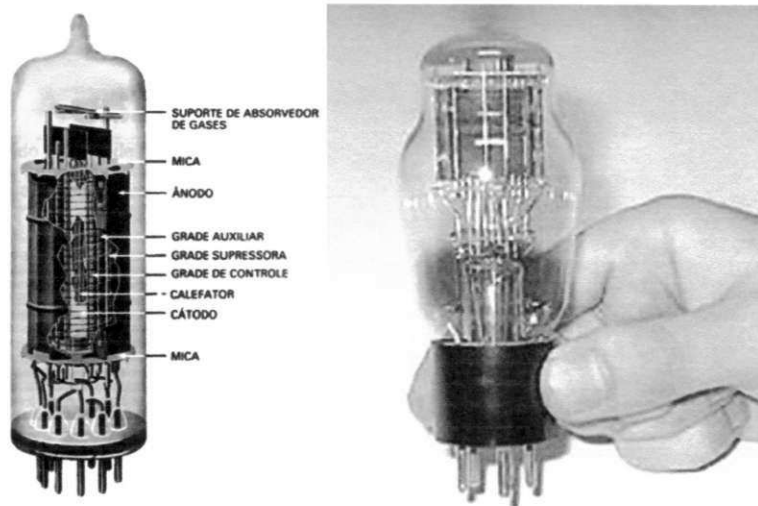


Figura 1.1: Válvula da primeira geração de computadores. Fonte: Produção Virtual UFPB.

Em 1883, Thomas Edison descobriu o que chamamos de Efeito Edison, que consiste nos elétrons fluírem de um metal para outro. Assim, seguindo a trajetória, nós temos Fleming que aplicou esse efeito e criou assim o diodo. A partir da ideia de Fleming, Lee de Forest criou o triodo. As válvulas em suma, manipularam primeiro os sinais elétricos, e foi a partir disso que os sinais puderam ser amplificados e transmitidos. Entres as aplicações para as válvulas nós podemos destacar as seguintes:

- **Rádio-Comunicação.**

- Em 1896, houve a invenção do telégrafo sem fio;
- Em 1901, foi possível realizar a rádio-comunicação à distância;
- Em 1918, surgiu o receptor super heterodino<sup>33</sup>;
- Em 1935, surgiu o modulador FM.

- **Televisão.**

<sup>33</sup>Inventado pelo engenheiro norte-americano Edwin Howard Armstrong em 1918 durante a 1ª Guerra Mundial, usa mistura de frequências ou heterodino para converter um sinal recebido numa frequência fixa intermédia (IF), que pode ser mais convenientemente processada do que a frequência rádio portadora original. O receptor super-heteródino foi criado com o objetivo de reduzir os problemas do receptor AM-DSB padrão, no caso o receptor de Rádio-Frequência Sintonizada. Praticamente todos os recetores rádio modernos usam o princípio de super-heteródino.

- Tubos de raios catódicos;
- Radar (tubos de raios catódicos);
- Primeiros computadores (tubos de raios catódicos).

Depois da Segunda Guerra Mundial houve a fabricação dos primeiros computadores, mas havia um problema, esses computadores eram gigantes, o que dificultava seu acesso, se tornando inviável. Aos poucos as válvulas foram substituídas pelos transistores, já que além de serem muito grandes, as válvulas esquentavam muito, se queimavam mais rápido e gastavam muita energia elétrica.

### 1.2.2 Transistores

Os transistores são componentes constituídos de uma pastilha monocristalina de material semiconductor como o germânio ou o silício, com regiões dopadas com impurezas do tipo N e do Tipo P. Os transistores dependendo do fim a que se destina, pode funcionar como amplificador de corrente, amplificador de sinal e chave eletrônica. Observe a Figura 1.2<sup>34</sup>.

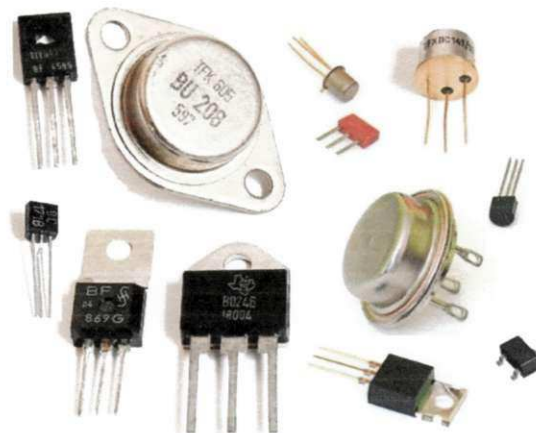


Figura 1.2: Transistores. Fonte: Wikipédia.

Em 1947, tivemos a invenção dos transistores, por John Bardeen<sup>35</sup>, Walter Brat-

<sup>34</sup>Disponível em: <<http://diq.wikipedia.org/wiki/Transistor>> Acesso em 15 jun. 2015.

<sup>35</sup>John Bardeen (Madison, 23 de outubro de 1908 — Boston, 30 de janeiro de 1991) foi um físico estadunidense.



tain<sup>36</sup> e Willian Shockley<sup>37</sup>. Essa descoberta se tornou uma das mais importantes invenções, principalmente pelo modo como resolveu dificuldades que existiam quanto ao tamanho e os custos das válvulas. O Prêmio Nobel de Física de 1956 foi atribuído conjuntamente a William Bradford Shockley, John Bardeen e Walter Houser Brattain, para suas pesquisas sobre semicondutores e sua descoberta do transistor de efeito. Assim como as válvulas, os transistores amplificavam os sinais, no entanto, as válvulas estavam relacionadas com a tensão e os transistores com a corrente. Havia inúmeras vantagens em relação ao uso dos transistores; são elas, por exemplo, os mesmos seriam pequenos, leves, possuíam baixo consumo de energia elétrica, baixo custo e tinham alta confiabilidade, sendo assim mais modernos que as válvulas. Mas, ele era muito frágil, o seu contato se fragilizava devido a umidade do ar e o ruído interno que o mesmo emitia era muito grande [25][26].

### 1.2.3 Circuitos Integrados - CIs

Um circuito integrado é um circuito eletrônico miniaturizado, composto principalmente por dispositivos semicondutores, sobre um substrato fino de material semicondutor. Os circuitos integrados são usados em quase todos os equipamentos eletrônicos usados hoje e revolucionaram o mundo da eletrônica [27][28]. Observe a Figura 1.3<sup>38</sup>

Os circuitos integrados foram propostos pela primeira vez em 1952 por G.W.A. Dummer<sup>39</sup>, sendo que na década de 50 os mesmos seriam produzidos em larga escala. Na década de 70, foram criados os primeiros TBJs(transistores bipolares de junção) e CIs analógicos, seguidos depois pelos CIs digitais, LSI<sup>40</sup> e os VLSI<sup>41</sup>, sendo que este último

---

<sup>36</sup>Walter Houser Brattain (Xiamen, 10 de fevereiro de 1902 — Seattle, 13 de outubro de 1987) foi um físico estadunidense.

<sup>37</sup>William Bradford Shockley (Londres, 13 de fevereiro de 1910 — Stanford, 12 de agosto de 1989) foi um físico e inventor estadunidense.

<sup>38</sup>Disponível em:<<http://infotec-moutinho.blogspot.com.br/2009/04/o-que-e-um-encapsulamento-de-circuitos.html>>. Acesso em 15 jun. 2015.

<sup>39</sup>Geoffrey William Arnold Dummer((25 Fevereiro 1909 – 9 Setembro 2002), foi um engenheiro eletrônico inglês e consultor, que é creditado como sendo a primeira pessoa a propor e construir um protótipo do circuito integrado, comumente chamado de microchip, no final dos anos 1940 e início dos anos 1950.

<sup>40</sup>“Large Scale Integration”Refere-se a uma das técnicas existentes de fabricação de circuitos integrados, estes circuitos têm grande escala de integração, geralmente contendo mais de 10.000 transistores em uma única cápsula.

<sup>41</sup>“Very Large Scale Integration”É a integração em escala muito grande de sistemas de circuitos baseados

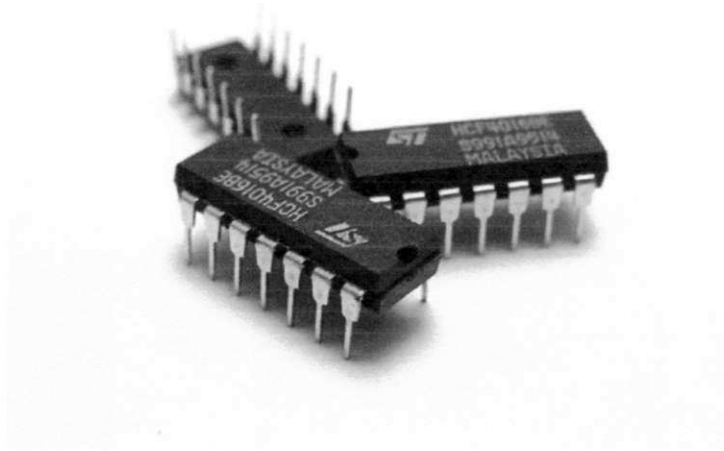


Figura 1.3: Circuitos Integrados. Fonte: Blog Info Tec.

são milhões de transistores em um único chip<sup>42</sup>[29].

Com o passar do tempo, a Eletrônica começou a desenvolver outros tipos de circuitos eletrônicos e assim outros componentes foram surgindo, tais como, os diodos, fotocélulas, capacitores, indutores e os resistores. É assim que entramos na chamada miniaturização, uma tecnologia que deu vazão para o desenvolvimento dos circuitos integrados, como vimos anteriormente, e os microprocessadores. Os dispositivos eletrônicos são combinações que usam o circuito básico de forma repetitiva, junto com seus componentes que assim se organizam e formam blocos, e depois esses blocos juntos formam outros circuitos, só que agora mais complexos e seguindo essa linha os mesmos conseguem fazer funcionar os diversos tipos de equipamentos. O funcionamento desses circuitos eletrônicos está baseado em controle de tensão e da intensidade de corrente elétrica.

## Componentes Passivos em Eletrônica

Faremos agora uma breve descrição dos componentes passivos da eletrônica muito usados hoje em dia, são eles:

- **Resistores:** são responsáveis por dar uma resistência à passagem da corrente elétrica pelo circuito. São componentes utilizados que tem como principal função conver-

---

em transistores em circuitos integrados.

<sup>42</sup>É um dispositivo microeletrônico que consiste de muitos transistores e outros componentes interligados capazes de desempenhar muitas funções.

ter energia elétrica em energia térmica e também dar limite a corrente elétrica no circuito, sendo assim, são usados como aquecedores ou como dissipadores de eletricidade [30]. Ver Figura 1.4<sup>43</sup>.



Figura 1.4: Resistores. Fonte: Google Imagens.

- **Capacitores:** constituídos por duas placas metálicas separadas por um isolante (dielétrico). Ao aplicar uma diferença de potencial a esse capacitor, uma de suas placas fica com cargas negativas e a outra com cargas positivas, acumulando dessa forma uma certa quantidade de carga. Ele bloqueia correntes contínuas, mas permite a passagem das correntes alternadas, por isso seu uso é frequente no isolamento de um circuito que necessita que suas partes mantenham voltagens diferentes. É um componente que armazena cargas elétricas num circuito, acumulando um desequilíbrio interno de carga elétrica [31]. Ver Figura 1.5<sup>44</sup>
- **Indutores:** é um bobina de fio metálico, eles armazenam energia de forma magnética ao serem submetidos a corrente elétrica. Seu papel como um dispositivo elétrico passivo é armazenar energia na forma de campo magnético [32]. Ver Figura 1.6<sup>45</sup>.

<sup>43</sup>Disponível em: <<http://www.clickgratis.com.br/fotos-imagens/resistores/?PageSpeed=noscript>>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>44</sup>Disponível em: <<http://obaricentrodamente.blogspot.com.br/2013/08/um-pouco-sobre-capacitores.html>>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>45</sup>Disponível em: <[http://www.alibaba.com/product-detail/Filter-inductor-series-inductor\\_343124012.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Filter-inductor-series-inductor_343124012.html)>. Acesso em 13 jul. 2015.



Figura 1.5: Capacitores. Fonte: O Baricentro da Mente.



Figura 1.6: Indutores. Fonte: Google Imagens.

### 1.3 Eletrônica Analógica

Na época do descobrimento do átomo, os cientistas acreditavam que esta seria a menor partícula, e portanto, seria indivisível. Quando estamos estudando eletricidade, sabemos que o átomo está dividido em núcleo e eletrosfera, vejamos a Figura 1.7. O núcleo do átomo é formado por partículas positivas, os prótons, e por partículas neutras, os nêutrons. O orbital de elétrons, ao qual se dá o nome de eletrosfera possui os próprios elétrons, partículas carregadas negativamente. Desse modo o que diferencia um material condutor de um material isolante é exatamente essa eletrosfera.

Vejamos, se um material é isolante, isso significa que os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo, assim não temos elétrons livres na estrutura desse material. Para que seja possível arrancar esses elétrons é preciso que haja uma força muito forte. Assim, quanto mais perto o elétron estiver do núcleo, mais forte será essa força de atração e conseqüentemente melhor isolante esse material é. Para o material condutor, os elétrons

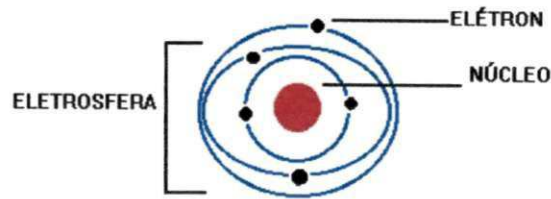


Figura 1.7: Esquema básico de um átomo.

nas camadas superiores de energia possuem níveis mais altos de energia, dessa forma, eles se desprendem com mais facilidade do núcleo. Nos metais, os elétrons que estão na última camada de valência são os responsáveis pelas propriedades condutoras do material. Se por um lado, no material isolante os elétrons quanto mais fortemente ligados ao núcleo melhor isolante é, nos materiais condutores quando mais fracamente ligados os elétrons estiverem do núcleo melhor condutor o material é. Em todos os materiais sólidos, essa distância que os elétrons assumem em relação ao núcleo são denominadas de bandas de energia. Dentro de um sólido as energias possíveis dos elétrons estão agrupadas em bandas permitidas separadas por bandas proibidas devido à periodicidade do potencial criado por íons em sólidos. A Figura 1.8 mostra a representação das bandas de energia em um material. As bandas de energia mais profundas completamente ocupadas por elétrons são chamadas de bandas de valência, essas são inertes do ponto de vista elétrico e térmico. Correspondem aos níveis atômicos de energia mais baixa apenas levemente afetados pela presença de outros átomos no cristal. A banda parcialmente preenchida é chamada de banda de condução.

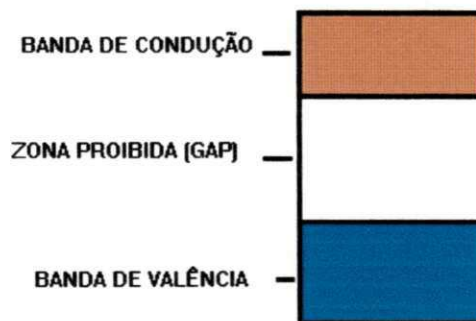


Figura 1.8: Exemplo de um material arbitrário.

Observando a figura anterior, percebemos que as bandas de energia podem assumir dois níveis. O nível superior é onde os elétrons podem se mover livremente e assim o

material se torna condutor. O nível inferior é onde o elétron está preso ao núcleo. Entre essas duas bandas existe uma região onde o elétron não se encontra, essa região é chamada de zona proibida(GAP), a palavra GAP significa afastamento, separação, lacuna ou vácuo, quanto maior for essa zona, menor a possibilidade do material ser um condutor. Observe a Figura 1.9.

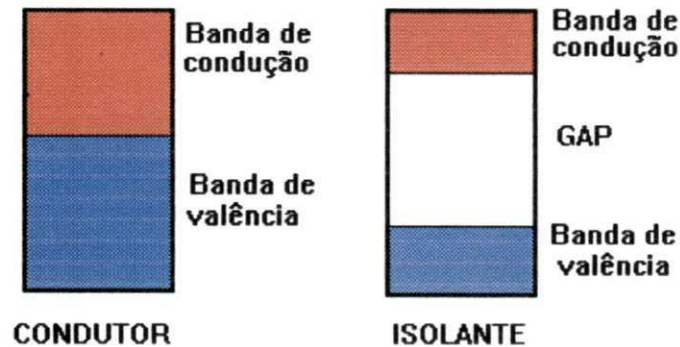


Figura 1.9: Exemplo de um material isolante e de um material condutor.

Na Figura 1.9 é possível vermos algumas diferenças entre os condutores e os isolantes, onde o condutor não possui um GAP, é como se as bandas de energia se confundissem, já nos isolantes o GAP é muito grande e para que os elétrons passem da banda de valência para a banda de condução seria preciso atravessar um obstáculo muito grande de energia.

### 1.3.1 O Objetivo da Eletrônica Analógica

A eletrônica analógica desenvolveu-se para controlar as grandezas físicas, sejam elas variáveis ou não, que desenvolvem oscilações de baixa e alta frequência e que são utilizadas nos mais diversos equipamentos para a manipulação de tensões e correntes em um circuito. Com a criação de circuitos que amplificavam sinais houve a diversificação das formas de comunicação, pois antes só havia o trabalho realizado com modulações dos sinais. Entre os componentes da eletrônica analógica, estão os transistores, resistores, capacitores, bobinas, potenciômetros, circuitos integrados, cristais e etc [33][34][35]. A eletrônica analógica tem suas bases nos princípios da lei de Ohm. Para se falar em Eletrônica, precisamos de alguns conceitos da Física relacionados com as grandezas, pois as mesmas fazem parte tanto da teoria como da prática da Eletrônica. Assim, iremos dedicar uma sessão para a abordagem das grandezas físicas e elétricas.

### 1.3.2 Grandezas Físicas e Elétricas

Grandeza é tudo aquilo que pode-se atribuir quantidade e dessa forma pode ser medida. Nesses termos, são exemplos de grandeza:

- Velocidade;
- Aceleração;
- Pressão;
- Intensidade de Luz
- Calor.

A todas essas grandezas é associada uma unidade, como por exemplo, a velocidade é medida em metros por segundo (m/s). Existem inúmeras grandezas físicas, as que trataremos neste trabalho são relacionadas com as grandezas elétricas fundamentais. Dessa forma, as grandezas elétricas que são abrangidas pela eletricidade podem ser listadas como:

- Tensão Elétrica (Símbolo: **U**, medida em: **volts(V)**) é a diferença de potencial entre dois pontos distintos;
  - **Tensão Alternada**: É aquela que varia com o tempo.
  - **Tensão Contínua**: Aquela que não varia ao longo do tempo.
- Corrente Elétrica (Símbolo: **I**, medida em: **ampères(A)**). Os significados de corrente alternada e contínua são os mesmos atribuídos para a tensão;
- Resistência Elétrica (Símbolo: **R**, medida em: **ohm( $\Omega$ )**) é o obstáculo à passagem da corrente elétrica oferecido por um circuito;
  - **Associação de resistências em série**: é feita com o intuito de que o fim de uma resistência fique ligada ao começo de outra.
  - **Associação de resistência em paralelo**: é feita com o intuito de que todas fiquem ligadas ao mesmo ponto.
- Potência Elétrica (Símbolo: **P**, medida em: **Watt(W)**) é a energia consumida ou liberada em um intervalo de tempo.

## A Lei de OHM

O enunciado da lei de Ohm diz o seguinte:

**“Em um circuito elétrico aberto ou fechado, a intensidade da corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão aplicada ao circuito e inversamente proporcional à resistência do mesmo.”**[35]

George Simon Ohm<sup>46</sup> verificou que, para vários materiais, existia uma proporcionalidade entre a diferença de potencial e a corrente elétrica. Isso significa, que ao dobrarmos a voltagem aplicada a esse material, a intensidade de corrente elétrica também dobraria. Portanto:

$$\frac{U}{I} = \text{constante}, \quad (1.1)$$

onde,  $U$  é a voltagem e  $I$  é a corrente elétrica. Graficamente, isso pode ser expresso através de uma reta, veja a Figura 1.10:

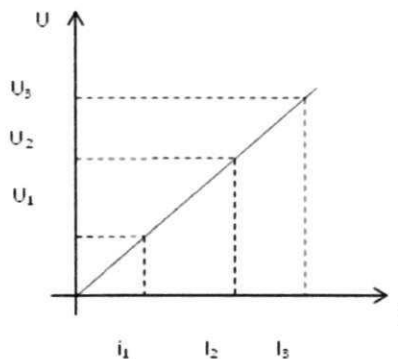


Figura 1.10: Gráfico da Lei de Ohm.

## As Leis de Kirchoff

As leis de Kirchoff dão fundamento aos princípios básicos da eletrônica, para que seja possível entender e analisar qualquer circuito. Elas juntamente com a Lei de Ohm são indispensáveis. Essas leis foram desenvolvidas pelo físico alemão Gustav Robert Kir-

---

<sup>46</sup>Georg Simon Ohm (Erlangen, 16 de março de 1789 — Munique, 6 de julho de 1854) foi um físico e matemático alemão. Irmão do matemático Martin Ohm.



choff<sup>47</sup>. Para enunciar tais leis, usaremos alguns termos. Dessa forma, um “nó” é um ponto onde ocorre a união de dois ou mais condutores. Já a “malha”, é qualquer caminho condutor fechado. As leis de Kirchoff, se escrevem a partir dessas duas regras:

**Primeira Lei de Kirchoff ou Lei dos nós de Kirchoff:** *a soma algébrica de todas as correntes que entram ou saem de um nó é igual a zero, ou seja,*

$$\sum I = 0 \quad (1.2)$$

(lei dos nós, válida para qualquer nó)

A primeira lei está baseada na lei de conservação das cargas; dessa forma a carga total que entra por um nó deve ser igual a carga total que sai do nó por unidade de tempo, ou seja, a corrente. Observe a Figura 1.11<sup>48</sup>.

## LEI DOS NÓS

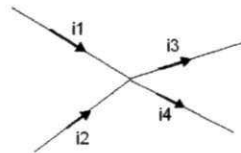


Figura 1.11: Primeira Lei de Kirchoff. Fonte: Slider Player: Circuitos Elétricos.

$$\sum I_{chegam} = \sum I_{saem} \quad (1.3)$$

**Segunda Lei de Kirchoff ou Lei das malhas de Kirchoff:** *a soma algébrica de todas as diferenças de potencial através de uma malha deve ser nula, ou seja,*

$$\sum V = 0 \quad (1.4)$$

(lei das malhas, válida para qualquer malha)

<sup>47</sup>Gustav Robert Kirchhoff (Königsberg, 12 de março de 1824 — Berlim, 17 de outubro de 1887) foi um físico alemão.

<sup>48</sup>Disponível em <<http://slideplayer.com.br/slide/295420/>>. Acesso em 12 mai. 2015.

A segunda lei está baseada na conservação da energia. Caso percorrêssemos toda uma malha e calculássemos em cada ponto o potencial pelos elementos do circuito, quando voltássemos ao ponto de partida a soma de todas as diferenças de potencial seria igual a zero. Observe a Figura 1.12<sup>49</sup>.

## LEI DAS MALHAS

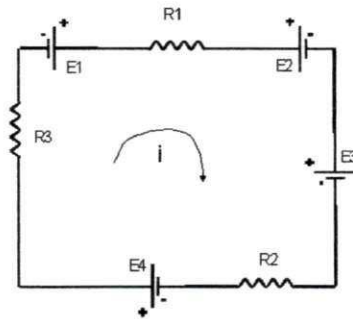


Figura 1.12: Segunda Lei de Kirchoff. Fonte: Slider Share: Geradores e Receptores Elétricos.

$$\sum (U_{geradores} + U_{receptores} + U_{resistores}) = 0 \quad (1.5)$$

### 1.3.3 Instrumentos

Entre os diversos instrumentos usados na Eletrônica Analógica, destacaremos aqui três, que são frequentemente utilizados, são eles:

- **Osciloscópio Analógico:** é um instrumento utilizado na observação e na medida das formas de ondas de tensão. Através dele é possível realizar análises de forma qualitativa ou quantitativa dos componentes eletrônicos. Há vários tipos de osciloscópios, sendo que os modelos mais simples possuem um tubo de raios catódicos com uma tela transparente coberta por material fluorescente. Quando um feixe de elétrons incide na superfície desse material, ele deixa um ponto luminoso na parte externa da tela do tubo; essa trajetória do elétron pode ser alterada antes que a

<sup>49</sup>Disponível em <<http://pt.slideshare.net/BrunoDeSiqueiraCosta/02-geradores-e-receptores-eletricos>>. Acesso em 15 jun. 2015.

mesma possa atingir a tela, para isso é preciso aplicar tensões entre placas dispostas de forma horizontal e vertical. Ver Figura 1.13<sup>50</sup>.



Figura 1.13: Osciloscópio Analógico. Fonte: Politerm.

- **Gerador de Funções:** é um instrumento utilizado para gerar diversas formas de onda de tensão (senoidal, quadrada, triangular), com diferentes frequências e amplitudes variadas. Ver Figura 1.14<sup>51</sup>.
- **Multímetro:** é um instrumento muito usado na eletrônica, podendo ser analógico ou digital. O analógico possui um ponteiro que se desloca sobre um painel, onde existem escalas do tipo graduadas para que seja possível a leitura da medida. Já no digital, a medida aparece no *display digital*. Os multímetros analógicos são usados para medir as três grandezas principais, que são a tensão, corrente e resistência elétrica, efetuando testes em transistores. Os multímetros digitais permitem realizar as mesmas medidas que os analógicos e outras como: capacitância, indutância, frequência, temperatura e etc. Ver Figura 1.15<sup>52</sup>.

<sup>50</sup>Disponível em: <<http://www.politerm.com.br/Produto-PRODUTOS-Osciloscopios-Osciloscopio-Analogico-30MHz-2-Canais-POL-15A-versao-80-80.aspx>>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>51</sup>Disponível em: <<http://www.tempoonline.com/aparelhos-de-medicao/572-osciloscopio-analogico-kaise-6502.html>>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>52</sup>Disponível em: <<http://www.mundomax.com.br/multimetro-analogico-yx360tr-e-b-preto-hyx>>. Acesso em 13 jul. 2015.

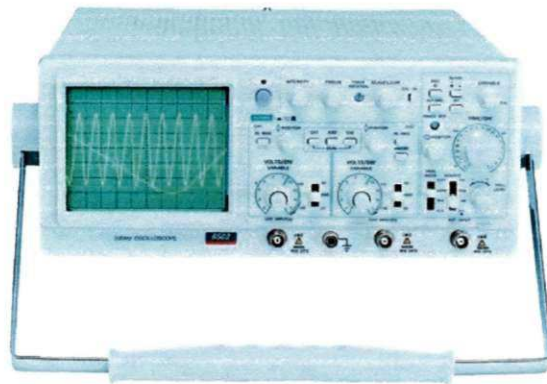


Figura 1.14: Gerador de Funções. Fonte: Tempoel.

### 1.3.4 Semicondutores

Os materiais são classificados conforme o comportamento elétrico, podendo ser divididos em condutores e isolantes. Os condutores são materiais que permitem a passagem de corrente elétrica em seu interior, quando os mesmos são submetidos a qualquer diferença de potencial, já que possuem elétrons livres em seu interior. Já os isolantes são materiais que não permitem a passagem de corrente elétrica, logicamente eles não possuem elétrons livres. Mas, há um material que apresenta tanto características de isolante como de um condutor, são os chamados semicondutores. O seu uso pela eletrônica vem sendo feito desde meados da década de 50, principalmente na construção de componentes elétricos e de circuitos integrados [7][23][27]. Os principais semicondutores que são utilizados, são o de silício e o de germânio. Há uma classificação dos materiais quanto a sua condutividade ou resistividade, podemos ver isso na Figura 1.16<sup>53</sup> um exemplo de classificação dos materiais segundo sua condutividade. Os dispositivos que se baseiam nos semicondutores são os transistores, os diodos, as células fotovoltaicas e entre outros. Quando se adiciona impurezas aos semicondutores, processo conhecido como dopagem, é possível alterar o modo como o mesmo conduz corrente, são criadas estruturas sólidas

<sup>53</sup>Disponível em <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=35613>>. Acesso em 15 jun. 2015.



Figura 1.15: Multímetro Analógico. Fonte: Mundomax.

e os elétrons podem ser controlados eletricamente. As impurezas são átomos diferentes dos que compõem o cristal puro, sendo que na dopagem é possível fazer com o número de elétrons seja maior que o número de buracos ou vice-versa. O método mais comum de dopagem de semicondutores, é a difusão em alta temperatura: os átomos da impureza desejada são provenientes de um gás e difundem para o interior do material através de sua superfície.

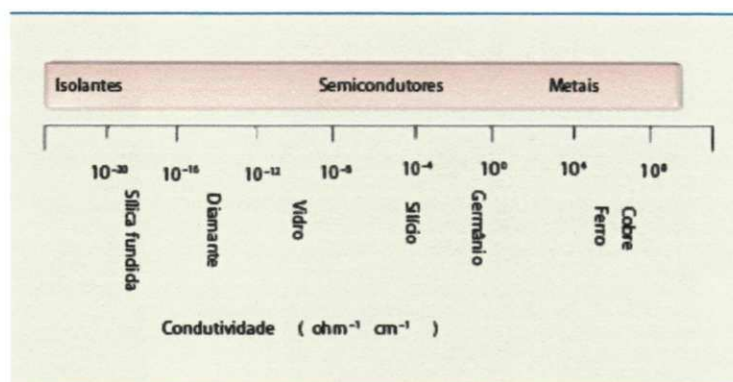


Figura 1.16: Classificação materiais segundo a sua condutividade. Fonte: Portal do Professor.

### 1.3.5 Semicondutor Intrínseco

Um semicondutor intrínseco é aquele que está em seu estado puro, sendo que nesse estado ele possui pouca utilidade, isso devido entre outras razões, o fato de sua

condutividade ser pequena e muito dependente da temperatura. Quando estudamos os semicondutores, nós estudamos em duas vertentes, a primeira é pelas bandas de energia e a segunda é pela ligação covalente [36].

### 1.3.6 Semicondutor Extrínseco

Um semicondutor extrínseco é obtido com a adição de impurezas, que são tipos de átomos, para que seja possível alterar as propriedades elétricas do mesmo, com destaque para a resistividade com relação ao fluxo de elétrons. Os semicondutores extrínsecos, são aqueles que são dopados por impurezas, eles tem a condutividade que varia pouco com a temperatura e o valor da condutividade é controlado pela quantidade de impurezas. Para os semicondutores extrínsecos, há dois tipos, o material N e o material P [37].

- **Semicondutor tipo N:** esse tipo de condutor é obtido a partir da adição de um material pentavalente<sup>54</sup> ao cristal puro, um exemplo de material mais usado é o fósforo (P). Esse tipo de semicondutor possui predominância de elétrons.
- **Semicondutor tipo P:** esse tipo de condutor é obtido quando adicionado quantidades controladas de impureza trivalente<sup>55</sup> ao material puro, um exemplo de material mais usado é o boro (B). Esse tipo de semicondutor possui maior concentração de buracos, ou seja, falta de elétrons.
- **Junção PN:** Quando uma barra de material P é ligada metalurgicamente a uma barra de material N, temos assim uma junção PN, as características das mesmas permitem a produção dos dispositivos eletrônicos [38].
- **Diodo de Junção:** é um componente de uma junção PN, ele permite a passagem da corrente em apenas um sentido quando sofre uma polarização direta e impede a corrente quando sofre uma polarização reversa [33].

## 1.4 Eletrônica Digital

Como já vimos na seção anterior, existem diversas grandezas que podem ser quantizadas, ou seja, não apresentam valores contínuos e que assim ao longo do tempo evoluem.

<sup>54</sup>Material que possuem cinco elétrons em sua camada de valência.

<sup>55</sup>Material que possui três elétrons em sua camada de valência.

Podemos chamar essas grandezas de sinais, isso para qualquer fenômeno. Sabemos que o sinal de saída depende do sinal de entrada. O mundo em si funciona de modo analógico, onde o sinal analógico é aquele que é contínuo no tempo, já o sinal digital pode ser descrito como uma sequência discreta, descontínua no tempo e em amplitude. Um sinal digital só é definido para determinados instantes de tempo e o conjunto de valores que pode assumir é finito. Nos circuitos analógicos, como visto anteriormente, a variação contínua de tensão de entrada produz também uma variação contínua de tensão de saída, tendo portanto inúmeros valores possíveis. Já nos circuitos digitais a variação de tensão de saída só assume dois valores, alto ou baixo. Os sinais analógicos podem sofrer diversas modificações principalmente por causa de distorções, já o sinal digital terá dificilmente mudança em suas informações quando o mesmo é transmitido. Devido a todo o desenvolvimento da tecnologia, diversos circuitos com tecnologia digital estão sendo produzidos, estes cada vez mais complexos, miniaturizados e podendo processar informações com grandes velocidades. Os sistemas digitais processam as informações de modo numérico. É possível encontrar equipamentos que possuam os dois tipos de circuitos, tanto o analógico como o digital [39][40][41].

### 1.4.1 Sistemas Numéricos

A partir da necessidade de desenvolver a contagem para quantidades maiores, o homem começou a desenvolver seu método de contagem, e assim na história da civilização diversos sistemas de numeração foram inventados. Estabelecia-se assim, um sistema de representações e regras, que definia a forma de contagem, a quantidade e a enunciação. Para se chegar ao sistema numérico de hoje foi preciso estabelecer um significado para o número, bem como sua representação.

- **Sistema Numérico Decimal:** O sistema decimal é formado por dez algarismos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9). A partir dele podemos formar outros números, e pelas posições dos números, podemos identificar quais são as unidades, dezenas e centenas.
- **Sistema Numérico Hexadecimal:** O sistema hexadecimal é formado por 16 símbolos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E e F).

- **Sistema Numérico Octal:** O sistema numérico octal é representado pelos símbolos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.
- **Sistema Numérico Binário:** O sistema binário é representado pelos algarismos 0 e 1; esses algarismos podem ser chamados de dígitos, sendo que cada dígito pode ser denominado de *bit*. Esse sistema é utilizado na eletrônica digital, computação, telecomunicação e etc. Isso significa que o mesmo é utilizado em circuitos digitais que só tem como entrada e saída os valores 0 e 1. O sistema binário é a base para a Álgebra Booleana, que será explanada na próxima subseção.
- **Funções Lógicas:** A Eletrônica digital baseia-se no sistema matemático criado por George Boole (1815-1864). Ele criou a Álgebra Booleana e partir dela foi possível desenvolver funções lógicas muito usadas na eletrônica digital. A teoria de Boole dizia que só existem dois estados para tudo no universo.
- **Portas lógicas:** são circuitos eletrônicos lógicos, que possui uma ou mais entradas e apenas uma saída. A essas entradas e saídas, podemos associar os valores 0 e 1. O exemplo mais simples de porta lógica é a inversora, onde a saída é igual ao complemento de entrada.

### 1.4.2 Álgebra Booleana

A lógica booleana, diz que ao se estudar os circuitos, só consideramos dois valores, 0 e 1, aberto ou fechado e por aí vai. Na álgebra booleana, as variáveis só representam apenas 0 ou 1 e os operadores retornam apenas 0 ou 1. Na Eletrônica Digital partimos justamente do fato de que um circuito só pode trabalhar com dois estados possíveis, ou seja, encontraremos presença do sinal ou a ausência do sinal, o que se adapta perfeitamente aos princípios da Álgebra de Boole. Os teoremas e propriedades da álgebra booleana permitem a simplificação de circuitos lógicos, objetivo final de todo projeto de circuitos digitais. As variáveis utilizadas nos circuitos são representadas pelas letras A, B, C, ..., N. As funções booleanas apresentam resultados fornecidos pelas combinações possíveis por causa das suas variáveis. Esses resultados são representados em forma de tabela. Uma barra sobre uma variável booleana significa que seu valor sofrerá inversão. A porta "OU" possui duas ou mais entradas, a saída sempre será igual a "1" quando uma das entradas for igual a "1"; a saída será "0" somente se todas as entradas forem "0". O símbolo "+"



representa “OU lógico” e não significa uma soma aritmética, pois “0” e “1” não são números, mas estados lógicos das variáveis. A porta “NOU” corresponde à uma porta “OU” com a saída invertida, a saída será “1” se todas as entradas forem “0”. O símbolo “.” nega a saída, isso é equivalente à barra na expressão booleana, indicando que a porta “NOU” tem uma saída que corresponde ao complemento da saída da porta “OU”. A porta “E” possui uma ou mais entradas e sua saída será “1” somente quando todas as entradas forem iguais a “1”. A porta “NE” corresponde a uma porta “E” com a saída invertida, a saída será “0” somente se todas as entradas forem “1”. A porta “OU EXCLUSIVO” possui uma ou mais entradas e fornecerá uma saída igual a “1” somente quando as entradas forem diferentes. A porta “NOU EXCLUSIVO”, é uma porta com saída invertida, a saída será “1” se as entradas forem iguais. A álgebra booleana possui propriedades e teoremas, a seguir listaremos as propriedades mais importantes:

- **Propriedade de intersecção** (relacionada com as portas lógicas). Demonstração dos casos possíveis:

$$A \cdot 1 = A \quad (1.6)$$

$$A \cdot 0 = 0 \quad (1.7)$$

- **Propriedade da união** (relacionada com as portas). Exemplificação da propriedade que se divide em dois casos:

$$B + (1) = 1 \quad (1.8)$$

$$B + (0) = B \quad (1.9)$$

- **Propriedade da tautologia** (válida para as portas E e OU). Casos verificados:

$$A \cdot A = A \quad (1.10)$$

$$A + A = A \quad (1.11)$$

- **Propriedades dos complementos** (quando aplicamos um sinal lógico e o complemento a uma porta lógica a saída será 0 ou 1).

$$A \cdot \bar{A} = 0 \quad (1.12)$$

$$A + \bar{A} = 1 \quad (1.13)$$

- **Propriedade da dupla negação** (o complemento do complemento de uma variável é ela própria).

$$\bar{\bar{A}} = A \quad (1.14)$$

- **Propriedade comutativa.**

$$A \cdot B = B \cdot A \quad (1.15)$$

$$A + B = B + A \quad (1.16)$$

- **Propriedade associativa.**

$$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) = A \cdot B \cdot C \quad (1.17)$$

- **Propriedade distributiva.**

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C \quad (1.18)$$

$$A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C) \quad (1.19)$$

- **Propriedade de absorção.** Casos mais elementares:

$$A + A \cdot B = A \quad (1.20)$$

$$A + A \cdot B = A + B \quad (1.21)$$

$$(A + B) \cdot B = A \cdot B \quad (1.22)$$

1º Teorema de De Morgan<sup>56</sup>:

“O complemento do produto é igual à soma dos complementos.”

Exemplo:

$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \quad (1.23)$$

2º Teorema de De Morgan:

“O complemento da soma é igual ao produto dos complementos.”

Exemplo:

$$\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B} \quad (1.24)$$

### 1.4.3 Circuitos Combinatórios

Os circuitos combinatórios dependem dos valores de entrada em um determinado instante. Falaremos dos mais importantes:

- **Codificadores/Decodificadores:** os sistemas digitais trabalham com os *bits*; como existem diversidades de códigos é preciso que haja circuitos capazes de converter um código em outro, assim, um codificador é um circuito lógico que converte sinais de entrada em algum outro código determinado, sendo que esse possa ser identificado durante o processamento digital. Já o decodificador, que possui  $n$  entradas, é usado para habilitar apenas uma dessas saídas por vez, quando se aplica uma combinação binária.

---

<sup>56</sup>Augustus De Morgan (Madura, Índia, 27 de junho de 1806 — Londres, 18 de março de 1871) foi um matemático e lógico britânico. Formulou as Leis de De Morgan e foi o primeiro a introduzir o termo e tornar rigorosa a ideia da indução matemática.

- **Multiplexadores/Demultiplexadores:** o multiplexador é um dispositivo que tem como função selecionar informações de duas ou mais fontes e as envia a um único canal. Já o demultiplexador realiza o inverso, recebe a informação de uma única entrada e envia para várias saídas.

#### 1.4.4 Circuitos Sequenciais

Os circuitos sequenciais decodificam, somam, subtraem ou comparam circuitos mais complexos, tais como os que dependem do tempo. Nesse tipo de circuito, os valores que saem dependem tanto da variação de entrada como das anteriores, por isso o uso de dispositivos de memória para armazenar as variáveis de entrada e saída, para isso temos os elementos de memória, os contadores e os registradores.

- **Elementos de Memória:** O *latch* RS é um dispositivo de memória com capacidade de armazenamento de 1 bit.
- **Contadores:** geram determinadas sequências de estados comandados por um sinal de *clock*, e estão divididos em assíncronos e síncronos, que são:
  - **Assíncronos:** não possuem o sinal de *clock*, sendo que o primeiro sinal é o primeiro estágio e os próximos serão o sinal do estágio anterior.
  - **Síncronos:** o sinal de *clock* é comum e assim os estágios são sincronizados todos de uma vez.
- **Registradores de deslocamento:** são circuitos formados por interligações de *flip flops*, que armazenam informações binárias. Convertem informações de série em paralelo através de operações aritméticas, que significam:
  - **Informação em série:** os bits se apresentam em sequência, precisam de apenas uma direção de transporte.
  - **Informação paralela:** os bits se apresentam simultaneamente, a transferência de informação é dada num único tempo.

### 1.4.5 Sistemas Microprocessados

O computador é uma máquina capaz de armazenar e processar informações; o micro-processador por sua vez é um chip<sup>57</sup> que substitui a unidade central de processamento do computador e esse chip determina as características do computador. O micro-computador é um chip que reúne tanto a central de processamento do computador, como as memórias RAM<sup>58</sup> e ROM<sup>59</sup>, além de outros componentes. Juntos, eles formam as unidades de processamento do computador. Para que isso seja possível, é preciso que haja um programação, em que o caminho a ser seguido é descrito em forma de passos, descritos inicialmente em um fluxograma que é a sequência para as tarefas ocorrerem e que por sua vez trabalham transformando essas informações em comandos sob a forma de linguagem de programação. Essas linguagens de programação são descritas nas formas binárias, dispostas de maneira pré-definida, de modo que o microcontrolador possa processá-las [39].

## 1.5 Spintrônica

A invenção do transistor foi uma grande revolução na era tecnológica; desse modo, os transistores possuem um papel vital nos microprocessadores dos computadores. A velocidade e a quantidade de informações que podem ser processadas pelo computador depende do número de transistores que estão integrados nos microprocessadores. A grande indústria da tecnologia busca construir transistores cada vez mais rápidos e menores, com o objetivo de poder integrar mais transistores de uma só vez sem precisar aumentar o tamanho dos microprocessadores [42]. Existem duas relevâncias importantes quando se trata do aumento do número de resistores em um microprocessador, a primeira se refere a potência que é dissipada por unidade de área no microprocessador, e a segunda está relacionada com os efeitos quânticos que acontecem a medida que o tamanho dos transis-

---

<sup>57</sup>Pequena lâmina miniaturizada (em geral de silício), us. na construção de transistores, díodos ou outros semicondutores, capaz de realizar diversas funções mais ou menos complexas.

<sup>58</sup>A Memória de acesso aleatório (do inglês Random Access Memory, frequentemente abreviado para RAM) é um tipo de memória que permite a leitura e a escrita, utilizada como memória primária em sistemas eletrônicos digitais.

<sup>59</sup>A memória somente de leitura (acrônimo ROM (em inglês)) é um tipo de memória que permite apenas a leitura, ou seja, as suas informações são gravadas pelo fabricante uma única vez e após isso não podem ser alteradas ou apagadas, somente acessadas.

tores diminuí, e isso influencia o desempenho do dispositivo [42]. Para tentar solucionar essas questões, é preciso explorar a natureza quântica dos elétrons, sendo assim, agora ao invés dos transistores usarem a corrente elétrica, eles passariam a usar o momento angular intrínseco do elétron, o *spin*. O *spin* é uma propriedade física do elétron puramente quântica, o *spin* pode apresentar duas orientações, o *spin para baixo* e o *spin para cima*. Dessa forma, o uso convencional do *spin*, está ligado as razões binárias, como na eletrônica, onde o *spin* apresenta dois estados: 0 e 1, chamados de **bits quânticos spintrônicos** [42]. Isso permite a construção de dispositivos muito menores com um consumo de energia mais baixo, possuindo capacidades de desempenho muito maior que os usados na eletrônica. A spintrônica, também conhecida como magnetoeletrônica, é uma tecnologia que possui como base o *spin* do elétron, dentro dos seus mais diversos ramos podemos destacar alguns; a fabricação de novas nanoestruturas que possuam outros tipos de materiais, tais como filmes finos e heteroestruturas; a pesquisa sobre o controle do magnetismo e do *spin* em nanoestruturas magnéticas, efeitos de tunelamento e injeção de *spin*, transporte de *spin* e detecção de magnetismo; dispositivos magnetoeletrônicos empregando a magnetorresistência gigante (Giant Magneto-resistance, GMR), dispositivos de tunelamento, heteroestruturas semicondutoras para injeção de *spin*, transporte e detecção de *spin*; propriedades magnetoópticas, entre muitas outras [42].

### 1.5.1 O Spin

O átomo possui algumas propriedades de grande importância. Sabemos que alguns átomos são estáveis; isso quer dizer que eles não sofrem nenhuma mudança, isso em bilhões de anos e também sabemos que os átomos se unem para formar moléculas e sólidos; através da física quântica é possível explicar as propriedades dos átomos [43]. Vejamos algumas:

- Os átomos podem ser agrupados em famílias:

A partir das propriedades periódicas com o número atômico, percebemos semelhanças das propriedades físicas e químicas dos elementos pertencentes à mesma coluna da tabela periódica, o que nos faz indicar que os átomos podem ser agrupados em famílias [43].

- Os átomos emitem e absorvem luz:

Os átomos só podem existir em determinados estados discretos de energia, assim um átomo pode sofrer uma transição de um estado a outro emitindo luz, passando dessa forma para um estado de menor energia  $E_{baixa}$  ou absorvendo luz, passando dessa forma para um estado de maior energia  $E_{alta}$  [43]. A luz é emitida ou absorvida na forma de um fóton, e a energia é dada por:

$$hf = E_{alta} - E_{baixa} \quad (1.25)$$

As frequências da luz emitida ou absorvida por um átomo podem ser determinadas se conseguirmos determinar as energias dos estados quânticos do átomo.

- Os átomos possuem Momento Angular e Magnético:

Uma partícula em órbita possui um momento angular  $\vec{L}$  e um momento magnético  $\vec{\mu}$ . Esses vetores são perpendiculares ao plano da órbita e, como a carga do elétron é negativa, os mesmos possuem sentidos opostos. Na física quântica, as órbitas eletrônicas são substituídas por densidade de probabilidade, mas mesmo assim, cada estado de um elétron possui um momento angular  $\vec{L}$  e um momento magnético  $\vec{\mu}$  com orientação de sentidos opostos [43].

Não importa se no interior de um átomo o elétron esteja ou não confinado, ele vai possuir um momento angular intrínseco,  $\vec{S}$ , o *spin*. O termo intrínseco remota que o *spin* é uma propriedade fundamental do elétron, assim como sua carga e sua massa [41]. O módulo do momento angular orbital,  $\vec{L}$ , é dado por:

$$L = \sqrt{\ell(\ell + 1)\hbar}, \quad (1.26)$$

onde  $\ell$  é o número quântico orbital e  $\hbar$  é constante de Planck dividida por  $2\pi$ . O momento magnético orbital associado ao momento angular orbital  $\vec{L}$  é dado por:

$$\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m} \vec{L}. \quad (1.27)$$

Esse sinal negativo, indica que os momentos possuem sentidos contrários. Todo elétron possui um momento angular de spin, ou simplesmente, spin,  $\vec{S}$ ; o módulo é dado por:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar, \quad (1.28)$$

onde  $s$  é o número quântico de spin do elétron. O número quântico de spin do elétron só pode ter os valores  $1/2$  ou  $-1/2$ . O momento magnético de spin associado ao momento angular de spin,  $\vec{S}$ , é dado por:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{S} \quad (1.29)$$

### 1.5.2 O Experimento de Stern-Gerlach

Em 1922, Otto Stern<sup>60</sup> e Walther Gerlach<sup>61</sup>, da Universidade de Hamburgo, na Alemanha, mostraram através de um experimento que o momento magnético dos átomos de prata é quantizado [44]. No experimento, uma amostra de prata é vaporizada em um forno e alguns dos átomos do vapor passavam por uma fenda estreita na parede do forno, e passavam para um tubo de vácuo, e outros átomos passavam por uma outra fenda, que estava em paralelo com a primeira, formando assim um feixe de átomos. Esse feixe passava entre os pólos de um eletroímã e atingia uma placa de vidro, formando um depósito de prata. Quando o eletroímã é desligado, esse depósito de prata forma uma mancha estreita paralela as fendas, se o eletroímã fosse ligado, essa mancha cresceria verticalmente, devido ao comportamento de dipolo magnético dos átomos de prata, sofrendo uma força magnética quando passava pelos pólos do eletroímã. Essa força poderia desviar o átomo para baixo ou para cima, dependendo do dipolo e do campo magnético do eletroímã. Ao fazer a análise no depósito de prata, é possível determinar a deflexão que o campo magnético produziu nos átomos de prata. Stern e Gerlach observaram que os átomos de prata formaram duas manchas separadas na placa de vidro, ao invés de apenas uma, isso queria dizer que a componente do momento magnético dos átomos de prata só podiam ter dois valores, uma para cada mancha no vidro [44]. Ver Figura 1.17<sup>62</sup>

<sup>60</sup>Otto Stern (Sory, 17 de fevereiro de 1888 — Berkeley, 7 de agosto de 1969) foi um físico estadunidense nascido na Alemanha.

<sup>61</sup>Walther Gerlach (Biebrich, 1 de agosto de 1889 — Munique, 10 de agosto de 1979) foi um físico alemão.

<sup>62</sup>Disponível em <[http://www.dracruz.com/Chemistry\\_Electrons.html](http://www.dracruz.com/Chemistry_Electrons.html)>. Acesso em 13 jul. 2015.



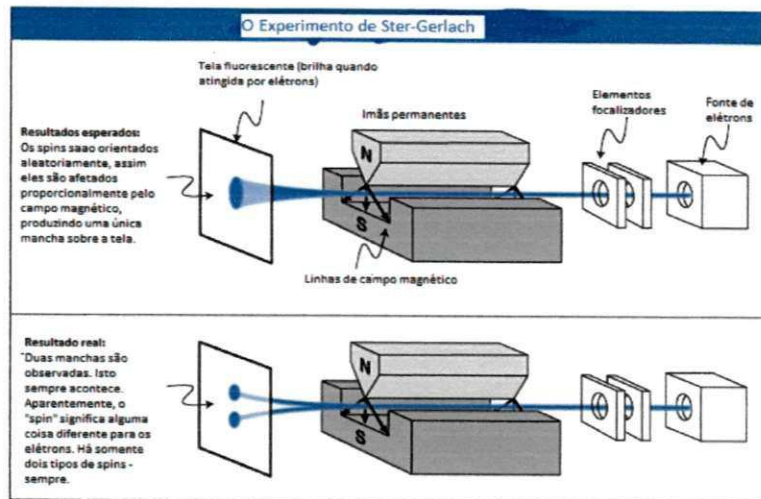


Figura 1.17: Experimento de Stern-Gerlach. Fonte: Xaktlay.

### 1.5.3 Magnetorresistência Gigante (MRG)

A resistência é a capacidade que o material tem de dificultar a passagem da corrente elétrica, quando é aplicado um campo magnético externo há uma mudança de resistência em um condutor, isso tem origem na força de Lorentz [45]. A MRG é um efeito mecânico quântico, do tipo de efeito da magnetorresistência, sendo essa a propriedade que alguns materiais apresentam de alterar o valor de sua resistência elétrica quando é aplicado um campo magnético externo [46]. O efeito da MRG acontece quando a resistividade elétrica decai quando aplicado um campo magnético externo, se o campo é nulo as camadas ferromagnéticas adjacentes possuem uma magnetização anti-paralela, com o efeito do campo, as magnetizações das camadas se alinham e a resistência cai brutalmente [46].

### Aplicações da MRG

- Válvula de spin:
  - É um dispositivo baseado na MRG. Uma válvula de spin consiste essencialmente no dispositivo em tri-camada, sendo duas camadas magnéticas e uma não magnética. Na válvula de spin o ordenamento de uma camada é invertido sob a ação de um campo externo, e assim a resistividade do dispositivo para spins pode ser controlada, conseguindo assim “fixar” rigidamente a orientação da magnetização numa das camadas magnéticas das válvulas de spin.

Há hoje uma grande variedade de válvulas de spin com importantes aplicações tecnológicas, como em tecnologia de leitura dos discos de computadores e em sensores com enorme potencial de aplicação em Medicina, instrumentação, indústria automível, e mecânica de precisão [47].

- Discos Rígidos:

- É a parte do computador onde são armazenados os dados, é um dispositivo não volátil, ou seja, as informações não são perdidas quando o computador é desligado. No disco rígido, a informação é gravada no modo binário, cada domínio é magnetizado em um determinado sentido. A magnetização do domínio produz um campo magnético, como se fosse um ímã. Quando o cabeçote passa sobre a trilha do disco, a camada livre orienta sua magnetização no mesmo sentido do bit gravado no disco. Se o bit estiver no mesmo sentido da magnetização da camada fixa no cabeçote, a resistência é mínima, se não, a resistência é máxima. Como a sensibilidade da válvula de spin é muito alta, basta que uma pequena região do disco esteja magnetizada para ser percebida pelo cabeçote, isso implica que podemos colocar uma grande quantidade de bits em uma pequena área [48].

#### 1.5.4 Junções de Tunelamento Magnético (MRAM)

A MRAM é uma memória de computador não volátil, é a chave para a criação de novas gerações de equipamentos móveis que possuam alto desempenho. O desenvolvimento dessa tecnologia está baseada na criação de células de memória, que reduzem o consumo de energia pela metade, possuindo alta velocidade e grande desempenho[49]. Desenvolvem-se então, dispositivos de alta densidade que estão baseados na tecnologia magneto-resistiva. Existem duas propostas principais para as estruturas MRAM, a primeira diz respeito a acoplação das células aos transistores, o que causaria menos leitura, mas que aumentaria o tamanho da célula, a segunda proposta é retirar o transistor da célula individual, o que diminuiria o tamanho da célula, mas aumentaria o tempo de leitura e os erros, já que muitas correntes se dirigiam para as células não desejadas [50].

**A evolução continua...**

Podemos afirmar depois do que vimos, que a Eletrônica está presente onde quer que haja fenômenos físicos atuando em algum dispositivo. Dessa forma, a Eletrônica é a base da nossa tecnologia moderna e de tudo que a envolve, e sem ela nada do que temos hoje em nossos sistemas funcionaria. Mas, é sabido que a Eletrônica vem se fundido a outros ramos, e a partir disso outras novas tecnologias vem surgindo, inclusive como propostas para o futuro. Em nosso mundo contemporâneo, a partir do desenvolvimento de tantas pessoas e colaboradores, em sua maioria desconhecidas pelo mundo, a Eletrônica entra na era da nanotecnologia, abrindo novos formatos e possibilidades para o mundo moderno, e é o que veremos no próximo capítulo.

# Capítulo 2

## Fotônica

Há alguns anos atrás, foi proclamado em uma Assembleia das Nações Unidas, que o ano de 2015 seria o ano da Luz, assim como o ano das tecnologias baseadas nela. Essa proclamação destaca a importância elevada da luz e das suas tecnologias ópticas na vida do homem, bem como no futuro e nas sociedades de todo o mundo. As tecnologias baseadas na luz promovem o desenvolvimento sustentável e fornecem soluções aos desafios existentes atualmente nas mais diversas áreas. Nesse capítulo será feita uma abordagem sobre a luz para assim ser possível compreender um pouco sobre a Fotônica e sua atuação na Eletrônica, que veio somar à tecnologia já existente, proporcionando novas descobertas e superação de desafios que antes pareciam serem impossíveis de resolver.

### 2.1 Introdução

Algo que estamos acostumados em nosso dia-a-dia é a luz; nós a percebemos em toda a parte. Uma pergunta fica em nossa cabeça: o que é a luz? A luz pode se originar do movimento acelerado dos elétrons, ela é um fenômeno eletromagnético. Sabemos que as cargas elétricas em movimento constituem uma corrente elétrica e ao redor dessa corrente existe um campo magnético. Os campos elétrico e magnético são oscilantes, e juntos formam as ondas eletromagnéticas<sup>1</sup>. Maxwell através de suas pesquisas descobriu que a luz é simplesmente radiação eletromagnética. No vácuo, as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma rapidez, embora apresentem diferenças quanto a suas frequências;

---

<sup>1</sup>Uma onda que transporta energia, emitida por uma carga oscilante (frequentemente elétrons), que é composta por campos elétrico e magnético oscilantes que constantemente regeneram um ao outro.

isso leva a uma classificação das ondas eletromagnéticas devido a frequência, formando assim o espectro eletromagnético<sup>2</sup>, ver figura 2.1<sup>3</sup>.

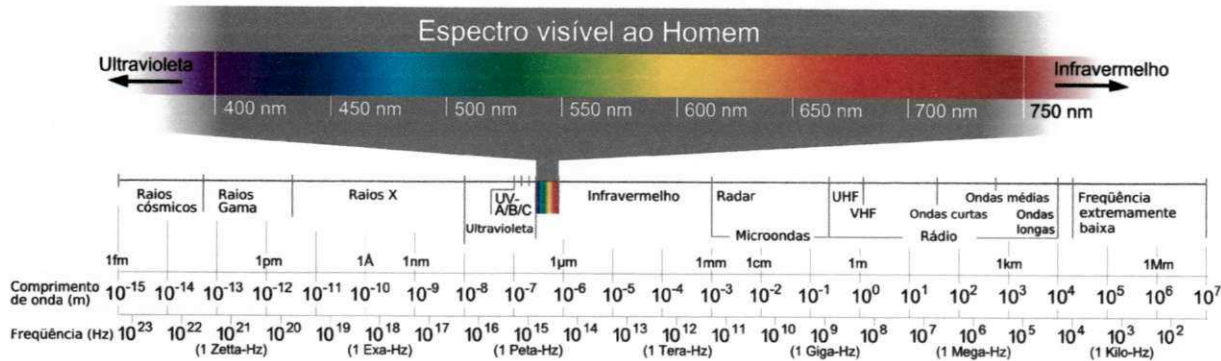


Figura 2.1: Espectro Eletromagnético. Fonte: SBFísica.

Existem alguns tipos de materiais que permitem a passagem da luz, eles são chamados de **meios transparentes**; já outros não permitem a passagem da luz, eles absorvem a luz e não a reemitem, esses são chamados de **opacos** [51][52]. A cor é outro aspecto muito importante da luz, ela é uma sensação que acontece no cérebro do espectador ao ser incidida na retina do olho humano. As cores que estamos acostumados a ver dependem da frequência da luz que incide. No entanto, a maior parte dos objetos que estão ao nosso redor, refletem luz. As chamadas cores primárias, são o vermelho, azul e o verde, elas são chamadas assim porque quando misturadas em determinadas proporções, podem produzir qualquer outra cor na parte visível do espectro eletromagnético, ou se misturadas em igual produzem o branco. Temos também as cores complementares, que são duas cores que, quando adicionadas, produzem a cor branca e ainda temos as cores subtrativas primárias, três cores (magenta, ciano e amarelo), que quando são misturadas podem refletir qualquer outra cor na parte visível do espectro eletromagnético [53][54][55]. Dois fenômenos relacionados com a luz são a reflexão e a refração. Na reflexão a luz retorna ao meio de onde veio, sabemos que a luz normalmente se propaga em linha reta, quando a luz parte de um lugar para outro, ela escolhe o caminho mais curto, segundo o princípio de Fermat<sup>4</sup>

<sup>2</sup>A faixa de frequência das ondas eletromagnéticas, que se estende desde as frequências de rádio até a dos raios gama.

<sup>3</sup>Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>4</sup>Pierre de Fermat (Beaumont-de-Lomagne, nascido na primeira década do século XVII — Castres, 12 de janeiro de 1665) foi um matemático e cientista francês.

do mínimo tempo que diz: A luz segue a trajetória que requer o mínimo tempo para ir de um lugar a outro. A reflexão do raio de luz, possui uma lei fundamental, chamada de Lei da Reflexão, que diz que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Outro comportamento da luz é a refração, que é o desvio sofrido por um raio luminoso de forma oblíqua quando passa de um meio transparente para outro, ela ocorre toda vez que a luz tem sua velocidade alterada quando passa de um meio transparente para outro. Um aspecto importante da luz, é a reflexão interna total, onde a luz incide de um meio com densidade maior para outro com densidade menor e o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico<sup>5</sup> [56][57]. Veja a Figura 2.2<sup>6</sup>.

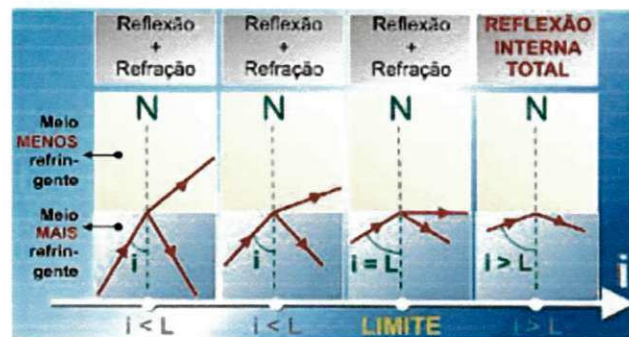


Figura 2.2: Fenômenos da Luz. Fonte: Blog Física Moderna.

Como já vimos, a luz é uma onda, segundo o Princípio de Huygens<sup>7</sup> cada ponto de uma frente de onda pode ser visto como uma nova fonte de pequenas ondas, que juntas formam outra frente de onda, onde existem outros pontos que formam outras frentes de onda e assim por diante. Os fenômenos de onda são aplicados a luz também, como é o caso da difração, que é o desvio da luz que passa ao redor de um obstáculo ou por uma fenda estreita que faz com que a luz se espalhe. Temos também a interferência que, nesse caso, é o resultado da superposição de ondas diferentes, quase sempre com o mesmo comprimento de onda. Temos a interferência construtiva que é o reforço de crista com crista, e temos a interferência destrutiva, que resulta do cancelamento entre cristas e vales. Os fenômenos de difração e interferência são as maiores evidências de que a luz é uma onda. Sabemos que as ondas podem ser longitudinais ou transversais. As ondas luminosas são transversais,

<sup>5</sup>O mínimo ângulo de incidência dentro de um meio, para o qual o raio luminoso é totalmente refletido.

<sup>6</sup>Disponível em: <[http://fisicamoderna.blog.uol.com.br/arch2007-05-20\\_2007-05-26.html](http://fisicamoderna.blog.uol.com.br/arch2007-05-20_2007-05-26.html)>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>7</sup>Christiaan Huygens (Haia, 14 de abril de 1629 — Haia, 8 de julho de 1695) foi um físico, matemático, astrônomo e horologista neerlandês.

pelo fato das mesmas poderem ser polarizadas, isso significa que as ondas luminosas da radiação eletromagnética podem ser alinhadas para uma determinada direção [58][59].

## Emissão de Luz

Um elétron que está mais afastado do núcleo possui energia potencial elétrica menor do que um outro elétron que esteja mais ligado ao núcleo, dizemos assim que o elétron está em um estado de maior energia. Quando um elétron é promovido a um nível de energia mais alto, dizemos que o átomo está excitado, essa posição do elétron é momentânea, depois de um tempo ele volta ao seu estado de baixa energia, e com isso, o átomo emite um fóton indo para um nível mais baixo de energia. Assim, esse átomo sofreu um processo de excitação seguido por um processo de relaxação. Os elétrons que passam de um nível mais alto de energia para um nível mais baixo, emitem cada um, um pulso oscilante de radiação eletromagnética, que chamamos de **fóton**, a frequência desse pulso depende do salto dado pelo elétron ao passar de um estado de energia para outro. A definição de fóton ainda é hoje um pouco difícil de ser compreendida; dessa forma, vamos pensar no fóton como sendo um corpúsculo localizado de pura energia que é ejetado pelo átomo [60]. A frequência do fóton é diretamente proporcional a sua energia:

$$E \sim f \quad (2.1)$$

Adicionando uma constante de proporcionalidade  $h$ , nós temos a equação:

$$E = hf \quad (2.2)$$

Essa constante  $h$ , é a constante de Planck, que tem como valor  $h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$ . Cada elemento químico tem seu padrão de níveis de energia que o caracterizam, e assim, cada um emite luz de acordo com seu padrão de frequência que o caracteriza, isso é o que chamamos de espectro de emissão [61]. A luz pode ser emitida como um resultado da alta temperatura, é o que chamamos de incandescência, causado pela agitação dos elétrons dentro de dimensões que sejam maiores que os átomos, os quais emitem energia radiante durante esse processo. Quando observamos a luz branca que vem de uma fonte incandescente vemos um espectro contínuo formado pelas cores do arco-íris,

mas se for colocado um gás entre a fonte não teremos um espectro contínuo, mas sim um espectro interrompido por linhas escuras, por causa da absorção da luz em determinadas frequências, isso é chamado de espectro de absorção [61]. Quando um átomo é levado a um estado de excitação e perde sua energia em dois ou mais saltos para estados de energia mais baixa, algumas substâncias absorvem radiação de uma dada frequência e reemitem radiação com frequência mais baixa. Ver Figura 2.3<sup>8</sup>

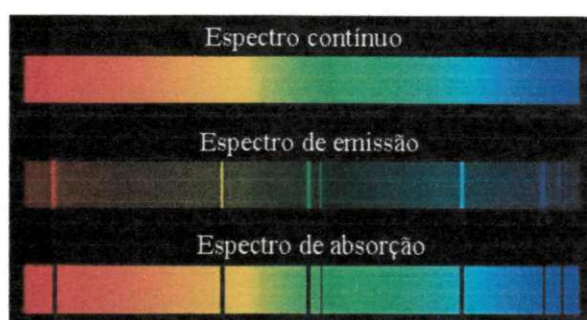


Figura 2.3: Espectros. Fonte: Scielo.

Dependendo da forma como a luz é emitida ela apresenta algumas propriedades, como já vimos, se a luz é emitida como um resultado de alta temperatura, ela adquire a propriedade de incandescência, onde essa luz é uma radiação térmica. Outra propriedade é a fluorescência, que está relacionada com o fato de algumas substâncias poderem absorver radiação de uma dada frequência, e reemitirem radiação com frequência mais baixa. A fosforescência é uma emissão luminosa assim como a fluorescência, mas há um retardo entre a excitação e a relaxação, causando assim um brilho remanescente, esse retardo se dá ao fato dos átomos excitados demorarem um pouco para cair à níveis de energia mais baixos. Esses fenômenos de excitação, fluorescência e fosforescência são a base do funcionamento do *laser* [62][63][64].

A teoria quântica descreve o mundo atômico, onde muitas quantidades são granuladas; são chamadas de quanta, essas não são contínuas, e os corpúsculos de luz, os fótons, e as partículas de matéria, os elétrons, apresentam tanto características de onda como de corpúsculo [65]. No final do século XIX, muitos pesquisadores notaram que a luz era capaz de ejetar elétrons de diversas superfícies metálicas, isso é chamado de efeito fotoelétrico. A interação entre fótons e elétrons faz com que isso aconteça, essa emissão

<sup>8</sup>Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchhoff.html>>. Acesso em 13 jul. 2015.



obedece a seguinte equação:

$$hf = K_{mx} + \Phi, \quad (2.3)$$

onde,  $hf$  é a energia dos fótons,  $K_{mx}$  é a energia cinética máxima dos elétrons emitidos e  $\Phi$  é a função trabalho do material de que é feito o alvo, a energia mínima que um elétron deve ter para poder escapar do material. Se  $hf < \Phi$  o efeito fotoelétrico não é observado. Observar algo tão pequeno como o elétron pode sondar o mesmo, isso pode causar uma incerteza quanto ao seu momento e sua posição. No estudo da Mecânica Newtoniana, notamos que sabendo a posição inicial e o momento de todas as partículas pertencentes a um sistema, podemos calcular suas interações e prever como elas se comportarão. Porém, para a mecânica Quântica, esse processo é um pouco mais complexo. O princípio da incerteza foi formulado por Heisenberg<sup>9</sup>; de acordo com esse princípio, não podemos determinar com precisão e simultaneamente a posição e o momento de uma partícula. Segundo Heisenberg, a constante de Planck estabelece um limite de precisão para medições. De acordo com esse princípio, é impossível medir de forma simultânea a posição e o momento de uma partícula com precisão absoluta, assim como a energia e o tempo que aquela partícula possui a energia. Este princípio é fundamental para a mecânica quântica. Heisenberg descobriu que quando acontece a multiplicação das incertezas existentes nas medidas de posição e momento de uma partícula, o resultado deve ser igual ou maior que a constante de Planck,  $h$ , dividida por  $2\pi$ , uma constante representada por  $\hbar$  [66][67][68]. As indeterminações dessas grandezas devem satisfazer as seguintes desigualdades:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar \quad (2.4)$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar \quad (2.5)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar \quad (2.6)$$

Tanto a luz como os elétrons apresentam características de onda e de partícula, as ondas luminosas são capazes de produzir interferência e sofrem difração, entregando

---

<sup>9</sup>Werner Karl Heisenberg (Würzburg, 5 de dezembro de 1901 — Munique, 1 de fevereiro de 1976) foi um físico teórico alemão que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1932 "pela criação da mecânica quântica, cujas aplicações levaram à descoberta, entre outras, das formas alotrópicas do hidrogênio".

sua energia em pacotes corpusculares. Os elétrons, ao se deslocar pelo espaço em linha reta sofrem colisões como se fossem partículas, com isso eles se espalham pelo espaço formando padrões de interferência como se fossem ondas. Esse comportamento de luz e elétrons parece de certa forma confuso, pois a luz e os elétrons apresentam características de onda e de partícula. Niels Bohr enunciou um princípio segundo o qual os aspectos ondulatórios e corpusculares da matéria e da radiação são partes necessárias e que se complementam, é o que ele chama de princípio da complementaridade.

O termo fotônica, vem da palavra “photons” que significa luz. Assim, ela surgiu quando eram realizadas pesquisas sobre uma forma da luz executar as ações que antes cabiam apenas à eletrônica. Para a eletrônica, o papel fundamental cabe ao elétron, para a fotônica o papel fundamental cabe ao fóton. Esse termo, Fotônica, remota a ideia que os fótons apresentam tanto característica de onda, como característica de partícula, contemplando assim, as mais diversas faces de estudo da luz, como a geração, emissão, transmissão, modulação, processamento de sinal, chaveamento, amplificação e a detecção, isso para o espectro visível e infravermelho próximo, mas podendo se estender a outras regiões do espectro [69]. Em caráter histórico, a Fotônica surgiu como um resultado dos primeiros semicondutores emissores de luz, principalmente com a invenção do laser em 1960 e posteriormente com a invenção do laser de diodo em 1970 [70][71][72]. A partir dessas invenções começaram a surgir as fibras ópticas para a transmissão de informações e amplificação. Tais invenções foram uma evolução para as telecomunicações do século XX, principalmente para os computadores. A Fotônica, em suma, manipula as partículas de luz (fótons) para a partir disso ser possível fabricar dispositivos de processamento. Em meados dos anos 2000, a Fotônica focava principalmente na telecomunicação, como por exemplo, na distribuição de fibra óptica transoceânica, mas hoje ela abrange uma área muito mais significativa e grande, possuindo assim inúmeras aplicações na ciência e na tecnologia, como cartões de memória, código de barras, CDs, DVDs e Blu-Ray, aplicações industriais, Medicina e Biologia (estas em equipamentos e cirurgia à laser, por exemplo), células fotovoltaicas e circuitos ópticos [73][74]. A Fotônica abrange assim as propriedades da partícula de luz, para a partir delas criar os dispositivos responsáveis por processamentos de sinais tendo os fótons como papel principal. Em seus ramos, a Fotônica está intimamente relacionada com a então crescente ciência da informação quântica, já que a mesma emprega métodos fotônicos, assim como a Eletrônica no seu auge promoveu

grandes transformações entre as quais podemos destacar a invenção dos transistores que fizeram a Eletrônica crescer assombrosamente. Novas aplicações da Fotônica surgem e grandes resultados com elas aparecem. O estudo da fotônica abrange o uso de fontes de semicondutores de luz; seus meios de transmissão são as fibras de vidro. Podemos assim estudar a investigação e a fabricação de estruturas e materiais com propriedades ópticas específicas. Acrescenta-se também o estudo da amplificação de sinais e a detecção através de fotodetectores e assim ser possível estudar os mais diversos tipos de comunicação óptica [75][76].

## 2.2 Optoeletrônica

A Optoeletrônica combina elementos de tecnologia ótica e eletrônica, ela é o estudo e a aplicação de aparelhos eletrônicos que fornecem, detectam e controlam a luz. É considerada um ramo da Fotônica. A luz nesse caso apresenta formas invisíveis de radiação: raios gama, raios X, ultravioleta e infravermelho, junto com a luz visível [77]. Vejamos uma descrição rápida sobre essas formas invisíveis da luz:

- Raios Gama ( $\gamma$ ): é uma radiação eletromagnética produzida na maioria das vezes por elementos radioativos. Os raios gama possuem altas energias, constituindo assim uma radiação ionizante<sup>10</sup> que pode penetrar na matéria muito mais profundamente que uma radiação alfa<sup>11</sup> ou beta<sup>12</sup>, podendo causar danos aos núcleos das células. Os raios gama são produzidos na passagem de um núcleo de um nível excitado para o nível de menor energia e também na desintegração de isótopos radioativos e estão associados a energia nuclear. Foram descobertos em 1900 por Paul Ulrich Villard<sup>13</sup>,

---

<sup>10</sup>é uma a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas. A energia mínima típica da radiação ionizante é de cerca de 10 eV, podendo danificar células e afetar o material genético (DNA), causando doenças graves (por exemplo: câncer), levando até a morte

<sup>11</sup>é uma forma de decaimento radioativo que ocorre quando um núcleo atômico instável emite uma partícula alfa( $\alpha$ ) transformando-se em outro núcleo atômico com número atômico duas unidades menor e número de massa 4 unidades menor

<sup>12</sup>é uma forma de radiação ionizante emitida por certos tipos de núcleos radiativos. Esta radiação ocorre na forma de partículas beta( $\beta$ ), que são elétrons de alta energia emitidos de núcleos atômicos num processo conhecido como decaimento beta

<sup>13</sup>Paul Ulrich Villard (Lyon , 28 de setembro de 1860 — Bayonne, 13 de janeiro de 1934) foi um físico e químico francês.

enquanto ele estudava as propriedades químicas do urânio<sup>14</sup> e rádio<sup>15</sup>. Hoje em dia, essa radiação é muito usada na radioterapia no tratamento do câncer e em cirurgias sem corte para eliminação de tumores [78].

- Raios-X: são emissões eletromagnéticas de natureza próxima a da luz visível, foram descobertos em 1895 por Wihelm Conrad Röntgen<sup>16</sup>. A geração dos raios-X deve-se a transição de elétrons nos átomos e a desaceleração de partículas carregadas. Assim como as ondas, os raios-X possuem as mesmas propriedades e a partir da sua detecção principalmente na impressão de filmes fotográficos seu uso na Medicina e na indústria através da radiografia é possível [79].
- Ultravioleta: é a radiação eletromagnética com um comprimento de onda menor que a da luz visível e maior que a dos raios-X. Esses raios possuem efeito bactericida, o que os fazem utilizável na assepsia de alguns estabelecimentos, é usado também na polimerização de certos compostos [80].
- Infravermelho: é uma radiação não-ionizante invisível no espectro eletromagnético, foi descoberto por William Herschel<sup>17</sup> em 1800, quando o mesmo colocou um termômetro de mercúrio no espectro obtido por um prisma de cristal com a finalidade de medir o calor emitido pela cor. Essa radiação é muito utilizada nas trocas de informação entre computadores, celulares e outros eletrônicos [81].

Os aparelhos optoeletrônicos são transdutores, do elétrico para o ótico e vice e versa ou instrumentos que usam esses aparelhos em suas operações. A Optoeletrônica é baseada em efeitos quânticos da luz em materiais semicondutores, podendo ser na presença de um campo elétrico ou não [82].

---

<sup>14</sup>O urânio (homenagem ao planeta Urano), é um elemento químico de símbolo U e de massa atômica igual a 238 u, apresenta número atômico 92 (92 prótons e 92 elétrons).

<sup>15</sup>O rádio (do latim "radius", raio) é um elemento químico de símbolo Ra, número atômico 88 (88 prótons e 88 elétrons) com massa atômica igual a 226 u.

<sup>16</sup>Wilhelm Conrad Röntgen (Lenep, 27 de março de 1845 — Munique, 10 de fevereiro de 1923) foi um físico alemão que, em 8 de novembro de 1895, produziu radiação electromagnética nos comprimentos de onda correspondentes aos atualmente chamados raios-X.

<sup>17</sup>William Herschel (Hanôver, 15 de Novembro de 1738 — Slough, 25 de Agosto de 1822) foi um astrônomo e compositor alemão naturalizado inglês.

### 2.2.1 Dispositivos Optoeletrônicos

- Para efeitos fotoelétricos podem ser usados:
  - Fotodiodo (incluindo as células solares<sup>18</sup>): O fotodiodo é um dispositivo semicondutor que converte luz em corrente elétrica, essa corrente é gerada quando os fótons são absorvidos no fotodiodo. Quando a superfície do fotodiodo é aumentada, seu tempo de resposta passa a diminuir, assim é um componente eletrônico e um tipo de fotodetector com junção PN que tem como finalidade dar resposta a uma entrada óptica, possuindo uma conexão de fibra óptica que é responsável por deixar a luz passar e assim incidir na parte sensível do dispositivo [83]. Ver Figura 2.4<sup>19</sup>.



Figura 2.4: Fotodiodo. Fonte: FJMSoft.

- Fototransistores: O fototransistor é um transistor bipolar encapsado, que permite que a luz atinja a base coletora da junção; ele tem uma maior sensibilidade em relação à luz. Os elétrons que são gerados pelos fótons na junção da base coletora são aplicados na base do transistor, a corrente é amplificada pelo transistor e assim o tempo de resposta do fototransistor é maior que o do fotodiodo[84]. Ver Figura 2.5<sup>20</sup>.
- Fotomultiplicador: O fotomultiplicador é um dispositivo eletrônico que está presente nos tubos a vácuo e tem como finalidade converter a luz em corrente

<sup>18</sup>Uma célula solar ou célula fotovoltaica) é um dispositivo elétrico de estado sólido capaz de converter a luz diretamente em energia elétrica por intermédio do efeito fotovoltaico.

<sup>19</sup>Disponível em <[www.fjmsoft.com.br/ecommerce\\_site/produto\\_2079\\_9175\\_Fotodiodo-5mm-receptor-com-filtro-IR-preto-sensor-optico](http://www.fjmsoft.com.br/ecommerce_site/produto_2079_9175_Fotodiodo-5mm-receptor-com-filtro-IR-preto-sensor-optico)>. Acesso em 13 jul. 2015.

<sup>20</sup>Disponível em <<http://eletronicos.mercadolivre.com.br/pecas-componentes-eletricos/fototransistor>>. Acesso em 13 jul. 2015.



Figura 2.5: Fototransistor. Fonte: Google Imagens.

elétrica, sendo possível quantizar a corrente que chega ao aparelho, sendo assim um multiplicador do sinal luminoso [85]. Ver Figura 2.6<sup>21</sup>.

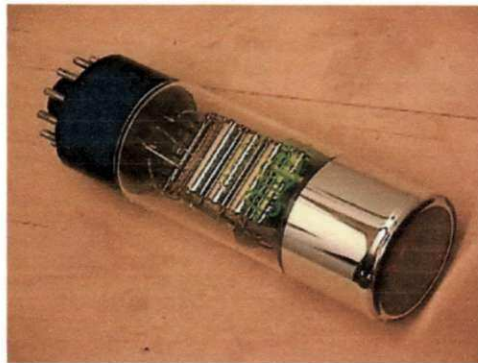


Figura 2.6: Fotomultiplicador. Fonte: Google Imagens.

- Elementos de circuitos óticos integrados: A algum tempo, a integração de componentes eletrônicos e óticos vem sendo discutida, principalmente para a fabricação de computadores mais rápidos e que não aqueçam em demasia. Para isso, pesquisadores alemães atualmente, estudam a interligação de chips através da luz, chips esses que possuem integração de componentes eletrônicos com componentes óticos, tais como, o laser e os fotodetectores. Os pesquisadores estudam interligar centenas de dispositivos em um único chip usando o silício. Essa integração trará uma grande revolução ao mercado, pois abrirá espaços para a chegada de infinitos circuitos integrados fotônicos para as mais diversas aplicações, como as telecomunicações, sensores, biomedicina

<sup>21</sup>Disponível em <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/photomultiplier-tube-pmt-001-692562674.html>. Acesso em 13 jul. 2015.

e o processamento de dados [86][87].

- Fotocondutividade, podem ser usados:

- Fotorresistores: Os fotorresistores são componentes eletrônicos do tipo passivo e do tipo resistor variável, ou seja, eles variam conforme a luz que incide sobre eles, quando a intensidade da luz aumenta, sua resistividade diminui. Ele é constituído a partir de um material semicondutor que possui uma resistência elétrica muito grande. É utilizado amplamente em circuitos eletrônicos onde é preciso um sensor de luz, já que o mesmo é de baixo custo e tem uma fácil utilização [88].
- CCDs (Dispositivos de carga acoplado): Os CCDs são sensores semicondutores para captação de imagens, formados por um circuito integrado que possui uma matriz de capacitores acoplados. Os mesmos possuem um grande destaque na tecnologia de imagem digital [89].

- Emissão Estimulada<sup>22</sup> pode ser usados:

- Laser Diodo: O laser diodo é muito utilizado na tecnologia atual, pois possui fácil acesso e uma montagem bastante simples. É um tipo de laser muito presente na base de transmissão de dados nas fibras ópticas, utilizado também na leitura de CDs e DVDs, apontadores de lasers, scanners, impressoras à laser e agora com a nova tecnologia de discos compactados, o Blu-Ray. A diferença do laser diodo com relação aos outros tipos de laser está na origem da fonte de energia, nesse caso a energia elétrica, e no meio ativo, nesse caso uma junção PN [90]. Ver Figura 2.7<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup>Em óptica, emissão estimulada é o processo pelo qual a matéria, quando perturbada por um fóton, pode perder energia resultando na criação de algum outro fóton. O fóton causador da perturbação não é destruído no processo, e o segundo fóton é criado com a mesma fase, frequência, polarização, e direção do fóton original.

<sup>23</sup>Disponível em <<https://www.apinex.com/pt/t203pt.html>>. Acesso em 13 jul. 2015.



Figura 2.7: Laser Diodo. Fonte: Apinex.com.

- Laser de Cascata Quântica<sup>24</sup>: Novos dispositivos irão permitir a construção de vários emissores de raio laser em um único chip, utilizando o cristal fotônico. Esses lasers são construídos empilhando-se várias camadas de poucos átomos de espessura do material semiconductor padrão, quando a espessura dessas camadas é variada, o comprimento de onda para o qual o laser emitirá luz, pode ser escolhido, isso permite a construção de lasers de acordo com a necessidade específica [91].
- Emissão Espontânea pode ser usada:
  - LEDs(diodo emissor de luz): São usados para a emissão de luz, principalmente quando é possível usá-lo no lugar de uma lâmpada. É um diodo semiconductor, onde a luz não é monocromática, mas um banda espectral estreita que é produzida a partir das interações energéticas do elétron [92].

## 2.3 Nanoeletrônica

Como já vimos, a descoberta do transistor trouxe grandes revoluções para a era tecnológica, quando se olhava um transistor de forma microscópica, o espanto era notável, a mesma coisa acontece hoje com relação as nanoestruturas [93]. Hoje, o domínio do transistor chega em seu limite, assim é preciso dominar o uso da nanotecnologia, pois os benefícios que isso traz são muito mais numerosos que os obtidos com o uso do transistor [94]. O objetivo central da nanotecnologia é criar, produzir e aplicar estruturas de dispositivos e sistemas, tendo a forma e o tamanho em escala nanométrica. Sendo assim um

---

<sup>24</sup>Quando uma corrente elétrica flui através de um laser de cascadeamento quântico, os elétrons formam uma “cascata” na escadaria de camadas. Cada vez que um elétron atinge uma camada, ou um degrau da escada, um fóton de luz infravermelha é emitido. Os fótons emitidos são refletidos para frente e para trás dentro do ressonador do semiconductor, estimulando a emissão de outros fótons.



tecnologia que manipula átomos e moléculas. O porquê de manipular átomos e moléculas tem muitas explicações, entre elas, estão a criação de novos materiais, novos dispositivos, a criação de nova eletrônica, produtos mais eficientes, resistentes e leves que trarão benefícios nas mais diversas esferas, tais como as tecnologias de informações e telecomunicações [95]. Quando se trabalha na escala nanométrica, certos atributos devem passar a ser considerados; entres eles estão os efeitos quânticos, que agora são explorados; os efeitos gravitacionais perdem importância e as propriedades óticas, nesse caso, os fótons, podem ser explorados. Vamos definir alguns termos:

- Nanociência: é o estudo dos fenômenos e da manipulação dos materiais na escala atômica, molecular e macromolecular.
- Nanotecnologia: é o projeto, caracterização, produção e aplicação de estruturas, equipamentos e sistemas controlando a forma e o tamanho em escala nanométrica.
- Mecânica Quântica: Descreve as interações entre matéria e energia em pequena escala.

Os átomos e as leis da natureza no mundo atômico foram descobertos de modo lento, e através do estudo de muitos pesquisadores e cientistas. A nanotecnologia, por sua vez, não é nova, a sintetização por polímeros, por exemplo, acontece a muitas décadas, mas os equipamentos que operam a matéria em escala nanométrica só começaram a ser produzidos recentemente[96]. Foi em 1974 que Taniguchi<sup>25</sup> criou a palavra nanotecnologia, para dar significado as máquinas que operam com tolerância de um micrón. A nanotecnologia possui uma interdisciplinaridade com as grandes ciências, tais como a Física, a Química, e a Biologia e também nas Engenharias, na Medicina e na Informática[97]. As pesquisas atuais em nanotecnologia se enquadram em 4 grandes categorias; são elas:

- Nanomateriais.
- Nanometrologia.
- Eletrônica, optoeletrônica e computação.
- Bionanotecnologia.

---

<sup>25</sup>Norio Taniguchi (27 de Maio de 1912 — 15 de Novembro de 1999) foi professor da Tokyo Science University. Ele cunhou o termo nano-tecnologia em 1974.

## Nanomateriais

Os nanomateriais são estruturas com dimensões menores que 100 nm, tais como os filmes finos, nanofios, nanotubos e os pontos quânticos. Estes apresentam superfícies relativas maiores em que os efeitos quânticos são explorados, com intuito de possibilitar a construção de estruturas de materiais cada vez menores [98]. Os nanomateriais se dividem em três tipos: 1D, 2D e 3D.

- **1D:** São materiais tais como os filmes finos, as camadas e as superfícies, são usados na construção de equipamentos eletrônicos, na Química e Engenharia.
- **2D:** São materiais que apresentam propriedades elétricas e mecânicas relevantes, como por exemplo, os nanotubos de carbono, os nanotubos inorgânicos e os nanofios. Esses materiais são usados em filmes e películas, antenas, sondas, implantes, além de dispositivos emissores de raio-X e dispositivos eletrônicos.
- **3D:** São materiais tais como as nanopartículas e os pontos quânticos, usados em detectores, diodos lasers e na computação quântica.

As aplicações dos nanomateriais são inúmeras, podemos destacar algumas como aplicações atuais, os cosméticos, compostos que utilizam nanopartículas, plásticos e cerâmicas e as superfícies. Algumas aplicações a longo prazo, são os sensores, aditivos, catalisadores, materiais magnéticos e implantes médicos [99].

## Nanometrologia

A nanometrologia é a ciência responsável pela medição em escala nanométrica, que dá vazão ao desenvolvimento de materiais que se adaptam a essa tecnologia. Entre os instrumentos da nanometrologia, podemos destacar o feixe de elétrons, o feixe de laser e as pontas de prova [100].

## Eletrônica, Optoeletrônica e Computação

O mercado da tecnologia está numa expansão assustadora atualmente; isso requer tecnologias mais amplas e mais significativas nos quesitos de tamanho e economia. As aplicações atuais e a longo prazo que se destacam são o uso de chips de computadores

miniaturizados, viável para a diminuição do tamanho dos computadores cada vez mais, armazenamento de informações, optoeletrônica, computação quântica, sensores, eletrônica baseada em plásticos, uso de moléculas como elementos funcionais em circuitos, sensores moleculares e principalmente a nanoeletrônica[101].

## Bionanotecnologia

A Bionanotecnologia abrange tanto máquinas mais completas e funcionais, quanto máquinas moleculares, referindo-se as propriedades em escala molecular e as aplicações de nanoestruturas biológicas. Entre suas muitas aplicações, podemos destacar algumas, tais como na eletrônica, na computação, em novos medicamentos, no tratamento do câncer, em implantes e em próteses [102].

É de certa relevância a preocupação com os impactos que podem surgir do uso da nanotecnologia, embora não exista grandes e precisas definições sobre esse assunto [103]. Os impactos com relação à saúde, podem ser entendidos no sentido de que as nanopartículas por serem da mesma escala física que os componentes celulares podem de certa forma iludir as defesas naturais e acabar danificando a célula. Os impactos ao meio ambiente são imprecisos, mas existe a ideia de que as bolas de carbono-fulerenos serem prejudiciais aos animais aquáticos, causando danos em seu cérebro, embora isso não esteja realmente provado. Já os impactos sociais, por exemplo, estão no fato de que o desenvolvimento dessa tecnologia trará mudanças significativas, tanto no plano social, como no plano econômico, o que acarretará em novos empregos em áreas novas, mas o desaparecimento de outros. Esse avanço também pode possibilitar que os países em desenvolvimento entrem na mesma corrida que os países desenvolvidos, mas também pode acabar aumentando a diferença entre eles. Há também a possibilidade de haver um aumento muito grande da aquisição de informações, que pode ser incontrolável, trazendo assim problemas incalculáveis [104].

### 2.3.1 Nanoeletrônica

A nanoeletrônica é o uso da nanotecnologia em componentes eletrônicos, tais como os híbridos moleculares, semicondutores eletrônicos, avançados componentes da eletrônica molecular e entre outros. Em 1965, Gordon Moore<sup>26</sup>, observou que os transistores de silí-

<sup>26</sup>Gordon Earle Moore (São Francisco, 3 de janeiro de 1929) é um engenheiro estadunidense.

cio são submetidos a um processo contínuo de escala descendente, os transistores durante essa época até hoje, diminuíram bastante de tamanho, assim, o campo da nanotecnologia visa permitir a continuação desse ritmo de miniaturização, utilizando novos métodos e materiais que permitam a construção de dispositivos eletrônicos com facilidade e tamanho em nanoescala [105]. A fabricação desses componentes é chamada de nanofabricação, e sua utilização está na construção de matrizes paralelas de nanofios que tem por finalidade sintetizar nanofios de forma individual. Os componentes eletrônicos da nanoeletrônica são chamados de nanomateriais eletrônicos, os mesmos são pequenos e permitem colocar por exemplo, mais transistores em um único chip, já os nanotubos que possuem uma estrutura uniforme e simétrica permite uma passagem melhor dos elétrons, aumentando assim a constante dielétrica do material. Na eletrônica molecular, é possível a auto montagem das moléculas, construindo assim estruturas maiores através de componentes e dispositivos. Essa tecnologia, no entanto, é nova, e seus usos futuros estão sendo aprofundados, principalmente no uso das moléculas com papéis responsáveis para a memória, lógica e amplificação, sintetizando assim diodo/resistor através da química orgânica. Há também a Nanofotônica, que é responsável pelo transporte de íons em nanoescala, em lugar dos elétrons a Nanofotônica estuda o comportamento da luz também em nanoescala, desenvolvendo dispositivos que tiram vantagem sobre esse comportamento [106][107].

## Aplicações

- **Computadores**

O objetivo da nanoeletrônica nos computadores é construir processadores de computadores mais poderosos, utilizando para isso nanofios ou moléculas pequenas, transistores de efeito de campo, utilizando semicondutores de nanotubos de carbono e nanofios semicondutores heteroestruturados [108].

- **Memória de Armazenamento**

Esse tipo de memória é baseada na spintrônica, como exemplo podemos citar a *Memória Trave*, fabricada a base de nanotubos de carbono, Nano-RAM [109].

- **Novos Dispositivos Optoeletrônicos**

Há algum tempo, começou a ocorrer a substituição de dispositivos eletrônicos analógicos por ópticos e optoeletrônicos. Podemos citar os cristais fotônicos, que possuem

uma característica interessante, onde os mesmos variam periodicamente o índice de refração, com uma constante de rede que é metade da frequência de onda da luz usada. Eles têm uma semelhança com o semicondutor, mas usam os fótons ao invés dos elétrons. E os pontos quânticos, usados para construir lasers nanométricos [110]. A seguir, temos a descrição de alguns dispositivos optoeletrônicos que usam a nanoeletrônica:

- **Display:** É possível fabricar displays com baixo consumo de energia, utilizando nanotubos de carbono, que devido ao seu pequeno diâmetro são utilizados como emissores de campo, seu princípio de funcionamento se assemelha aos raios catódicos, mas em uma escala bem menor [111].
- **Computadores Quânticos:** Esses computadores exploram as leis da mecânica quântica, onde os computadores quânticos utilizam algoritmos quânticos rápidos [112].
- **Rádios:** São fabricados nanorádios com estruturas de nanotubos de carbono.
- **Produção de Energia:** Para a produção de energia, podemos destacar o uso de nanofios e outros materiais nanoestruturados para a fabricação de células solares mais eficientes e baratas. Destaca-se também a *bio-nano*, um dispositivo eletroquímico em nanoescala, usado também para a geração de energia [113].
- **Dispositivos Médicos:** São fabricados dispositivos nanoeletrônicos que detectam concentrações de biomoléculas em tempo real, para a utilização em diagnósticos médicos, isso é conhecido como nanomedicina. Outros dispositivos são fabricados para interagir com células simples para o uso em pesquisas biológicas básicas, esses são chamados de nanosensores [114].

### 2.3.2 Nanofotônica

A Nanofotônica é o estudo do comportamento da luz em nanoescala, e estuda também a interação de objetos em nanoescala com a luz. O termo “nanofotônica” refere-se ao ultravioleta, visível e infravermelho próximo da luz [115]. Os componentes ópticos normais, tais como as lentes, por exemplo, de uma forma geral não podem focalizar a luz

para nanômetros normalmente, para isso, podemos citar como exemplo a utilização de plasmas de superfície [116]. A motivação de se estudar nanofotônica abrange muitos objetivos em áreas diversas, tais como as Engenharias, principalmente a Engenharia Elétrica. Para componentes optoeletrônicos que usam a nanofotônica temos uma breve descrição a seguir:

- **Fotodetectores:** O fotodetector tem a função de receber o sinal luminoso e converter esta intensidade luminosa que tem certa potência em uma corrente elétrica, para depois ser amplificada e demodulada [117].
- **Lasers:** Lasers muito pequenos apresentam características promissoras para a comunicação óptica, como por exemplo, baixa corrente limiar e modulação rápida [118].
- **Fotolitografia:** Os circuitos integrados são feitos usando a fotolitografia, que é a exposição à luz, quando se quer tornar os transistores muito pequenos, irá ser requerido uma focalização da luz em imagens muito nítidas [119].
- **Gravação Magnética por Calor:** Com o intuito de aumentar a quantidade de dados que uma unidade de disco pode armazenar, é preciso que uma laser aqueça uma pequena área antes que os dados sejam gravados [120].
- **Miniaturização em Optoeletrônica:** A miniaturização dos transistores em circuitos integrados tem melhorado sua velocidade e custo, mas os circuitos optoeletrônicos só podem ser miniaturizados se os componentes ópticos e juntamente com os eletrônicos sejam reduzidos [121].

## Princípios da Nanofotônica

Os metais eficazmente limitam a luz para muito abaixo do comprimento de onda, isso é muito utilizado em rádios e micro-ondas. A luz visível pode ser confinada à nanoescala em estruturas nanométricas metálicas, isso baseado na permissividade do metal que é muito grande e negativa. Um objeto é constituído de diferentes frequências espaciais. Quando a luz é emitida por esse objeto, a frequência mais alta forma uma onda evanescente, que só existe no campo muito perto do objeto, e no campo mais distante do

objeto ela desaparece, esse é o limite da difração, onde em uma lente a imagem fica desfocada. A nanofotônica preocupa-se aí, na presença desse campo de ondas evanescentes, as superlentes impedem essa queda de onda, e assim a resolução da imagem é melhor.

## **Metamateriais**

São materiais artificialmente modificados para possuírem propriedades não encontradas na natureza [122]. As suas propriedades óticas provem das nanoestruturas produzidas em laboratórios. O desenvolvimento de cristais metamateriais que permitem manipular seus índices de refração em escalas nanométricas possibilita a criação de cristais fotônicos, chips que trabalham com luz ao invés de eletricidade. Esses chips fotônicos apresentam ganhos essenciais em desempenho e velocidade de processamento, com consumo e desperdício de energia muito pequeno, o que permite computadores muito mais potentes, mas com baixo custo [122].

## **As aplicações prosseguem desenvolvendo...**

A Eletrônica parece já ter encontrado seus limites, a óptica pode abrir as portas para que a evolução proporcionada pela nanoeletrônica possa continuar. Isso não significa dizer que é o fim da Eletrônica, pelo contrário, vemos que futuramente os circuitos serão formados por integração fotônica e eletrônica, isso devido ao fato da eletrônica ser muito eficiente no processamento de informações. Há uma demanda de aplicações que necessitam de algumas reformulações nos circuitos, principalmente com a flexibilidade e moldagem, no próximo capítulo veremos que tipo de eletrônica favorece essa aplicação.

## Capítulo 3

# Avanços e Outras Aplicações Futuras

Em nossas vidas diárias, procuramos dispositivos eletrônicos que ocupem cada vez menos espaço, apresentem mais flexibilidade e principalmente sejam mais baratos. A Eletrônica Orgânica entra nesse meio utilizando materiais orgânicos para produzir circuitos e dispositivos eletrônicos. Nesse capítulo abordaremos esses novos avanços, e embora a Eletrônica Orgânica não possa competir com o silício em termos de velocidade e densidade, ela tem o potencial para proporcionar uma vantagem significativa em termos de custo e versatilidade.

### 3.1 Organoeletrônica

Definimos a Organoeletrônica como um campo da ciência dos materiais sobre a concepção, síntese, caracterização e aplicação de pequenas moléculas orgânicas chamadas de polímeros que possuem características eletrônicas, como a condutividade [123]. Os materiais organoeletrônicos são construídos a partir de pequenas moléculas orgânicas, como o carbono, ou por polímeros sintéticos desenvolvidos principalmente pela Química Orgânica. Os organoeletrônicos possuem muitas características favoráveis em comparação aos outros tipos de componentes, entre essas características, está o baixo custo com relação aos componentes atuais. Os materiais poliméricos mais utilizados na Eletrônica são os plásticos que servem de isolantes elétricos para coberturas de fios, encapsular dispositivos e para fabricar peças com funções variadas. Nos últimos anos, foram descobertos polímeros e substâncias orgânicas que conduzem corrente elétrica de forma semelhante a metais, semicondutores e até supercondutores. Sabemos que os condutores materiais permitem



o movimento das cargas elétricas. Entre os materiais condutores mais conhecidos estão o cobre e o alumínio. Estes possuindo alta condutividade elétrica. Outros condutores metálicos são formados de ligas de dois ou mais elementos de metal. Henry Letheby<sup>1</sup>, descobriu o mais antigo material condutor orgânico, em 1862. Ele usou anódico de oxidação de anilina em ácido sulfúrico, produzindo assim um material condutivo, mais conhecido depois como polianilina ( $C_6H_7N$ ). Em 1977 foi descoberto que o poliacetileno ( $C_2H_2$ ) pode ser oxidado com halógenos para produzir materiais condutores ou isolantes ou semicondutores. Nessas últimas décadas, as pesquisas sobre os condutores de polímeros avançou muito, o prêmio Nobel de Química 2000, foi atribuído a três cientistas, Alan J. Heeger<sup>2</sup>, Alan MacDiarmid<sup>3</sup> e Hideki Shirakawa<sup>4</sup>, em conjunto, por seus trabalhos em polímeros condutores. Os polímeros são usados principalmente na fabricação de condutores plásticos. Estes muito usados recentemente, são objetos de desenvolvimento e aplicação na indústria. Em 1987, o primeiro dispositivo de diodo orgânico foi produzido por Ching W. Tang<sup>5</sup>, gerando assim o campo de diodos emissores de luz orgânica, sendo estes para investigação e equipamentos para produção. Por toda a sua pesquisa e contribuição, Ching é considerado o pai da eletrônica orgânica [124]. As propriedades atrativas dos polímeros condutores, estão na condutividade elétrica. Os materiais orgânicos condutores podem ser agrupados em duas classes principais:

- **Polímeros Condutores:** São condutores intrínsecos e sua condutividade pode ser comparada a dos metais e a dos semicondutores. Eles são usados na construção de polímeros semicondutores eletroluminescentes, células solares e transistores [125].
- **Pequenas Moléculas Condutoras:** São usadas na construção de semicondutores orgânicos com grau de condutividade elétrica entre isoladores e metais [126].

O diodo orgânico emissor de luz, conhecido como OLED, é constituído por uma fina película de material orgânico que emite luz sob estimulação de uma corrente elétrica. Ching, em 1987, relatou a fabricação do primeiro OLED. Os materiais orgânicos OLED são

<sup>1</sup>Henry Letheby (1816 - 28 de março de 1876) foi um químico analítico inglês e diretor de saúde pública.

<sup>2</sup>Alan Jay Heeger (Sioux City, 22 de janeiro de 1936) é um físico estadunidense, laureado com o Nobel de Química de 2000.

<sup>3</sup>Alan Graham MacDiarmid (Masterton, Nova Zelândia, 14 de abril de 1927 — Drexel Hill, Pennsylvania, 7 de fevereiro de 2007) foi um químico estadunidense de origem neozelandesa.

<sup>4</sup>Hideki Shirakawa (Tóquio, 20 de agosto de 1936) é um químico japonês.

<sup>5</sup>Ching W. Tang é um americano físico-químico. Ele nasceu em Yuen Long, Hong Kong, em 1947.

divididos em duas grandes famílias: à base de pequenas moléculas e à base de polímeros. Os OLED à base de pequenas moléculas podem ser selecionados de acordo com o intervalo desejado de emissão de comprimento de onda. Os OLED à base de polímeros emitem luz sob uma corrente aplicada e requerem uma quantidade menor de energia para produzir a mesma luminescência [127].

### 3.1.1 Dispositivos Eletrônicos Orgânicos e Aplicações

Quando se fala em dispositivos eletrônicos orgânicos, nós estamos relacionando dispositivos flexíveis, que são dispositivos eletrônicos revestidos de plásticos flexíveis, utilizados na fabricação de circuitos eletrônicos [128]. Eles são muito usados atualmente em diversas aplicações, podemos destacar algumas. Nas células solares orgânicas, o custo de fábrica é mais baixo, quando comparado as células atuais de componentes eletrônicos. As células solares orgânicas utilizam materiais fotovoltaicos e diodos semicondutores orgânicos que convertem luz em eletricidade, essas células solares podem reduzir o custo de energia solar, já que utiliza polímeros orgânicos de baixo custo no lugar de silício cristalino que é usado na maioria das células solares. Há também os circuitos flexíveis frequentemente usados como conectores em diversas aplicações onde a necessidade de flexibilidade, de economia de espaço, de restrições de produção passa a limitar o uso de placas de circuito rígidas ou de fiação manual [129]. Os dispositivos eletrônicos orgânicos são usados também em impressoras à jato de tinta e revestimento de equipamentos de filmes fotográficos. Dessa forma, ver-se que hoje esses dispositivos estão amplamente utilizados em tecnologias já existentes e também em novos produtos em desenvolvimento. O método de fabricação desses tipos de dispositivos se diferem. Os dispositivos à base de polímeros condutores são produzidos por métodos de processamento de solução. Tanto esses processos de solução, como os métodos de sublimação à vácuo, realizados quando as moléculas semicondutoras do material são muitas vezes insolúveis e requerem esse procedimento, tem como finalidade produzir amorfos e filmes policristalinos com graus de desordem variados. Os polímeros condutores são mais leves, mais flexíveis e menos dispendiosos que os demais condutores, por isso, são muito procurados hoje em dia, pois algumas aplicações que seriam impossíveis usando o cobre e o silício, por exemplo, podem ser usadas agora [130]. Na organoeletrônica estão incluídos tanto os semicondutores orgânicos, os dielétricos orgânicos condutores e emissores de luz. A atividade de pesquisa em torno desses

materiais orgânicos é muito intensa e espera-se que em poucos anos, os mesmos passem a substituir os semicondutores metais tradicionais em diversos dispositivos.

## 3.2 WBG-Eletrônica

WBG-Eletrônica é baseada nos semicondutores de *gap longo*. Esses tipos de dispositivos são para alta potência, alta tensão, alta temperatura e alta frequência [131]. Os semicondutores de *gap longo* permitem a construção de mecanismos elétricos mais poderosos, mais baratos e mais eficientes em termos energéticos. O termo *gap longo* se refere ao aumento de tensão eletrônica nas lacunas de banda de energia, maiores que um elétron-volt. Semicondutores WBG são esperados para preparar o caminho para inovações em eletrônica, em aplicações diversas em vários setores industriais e de energia limpa. Percebendo o potencial de poupança de energia de semicondutores do WBG exigirá o desenvolvimento de processos de fabricação de ponta que podem produzir materiais de alta qualidade, dispositivos e módulos a um custo acessível. As aplicações dessa eletrônica, incluem dispositivos optoeletrônicos, como alta tensão para LED de iluminação e energia e componentes necessários para transformadores e eficiência mais elevadas para geração de energia alternativa. Esses materiais de *gap longo* são muito utilizados em aplicações que necessitam de alta temperatura. O *gap longo* faz com que a energia eletrônica de transição vá para o intervalo de energia de luz visível e assim os dispositivos de emissão de luz como os LEDs e os lasers agora emitam no espectro visível ou produzam emissão ultravioleta [131].

### As Propriedades dos Materiais<sup>6</sup>

A banda proibida de um material é determinada pelo potencial coulombiano, os elementos de alta energia na tabela periódica são mais propensos a ser materiais de *gap longo* [131]. A posição da banda de condução mínima contra a máxima na estrutura de banda determina se uma banda proibida é direta ou indireta, a maioria dos materiais com *gap longo* estão associados a banda proibida direta. O mínimo de fótons de energia que são

---

<sup>6</sup>Existem muitos compostos semicondutores nos grupos III-V e VI-II, com *gaps* longos, do grupo IV, só existem o carboneto e o silício. O nitreto de alumínio pode ser usado na fabricação de LCD ultravioleta, o nitreto de gálio é muito usado na fabricação de leds azul e lasers.

necessários para emitir um elétron para a banda de condução associa-se a banda proibida do material. Quando os pares elétron-buraco são recombinados, os fótons são gerados com as energias correspondentes à magnitude da banda de energia. A temperatura de fusão, coeficientes de expansão térmica e a condutividade térmica são propriedades secundárias e essenciais ao processamento, propriedades estas relacionadas com a ligação em materiais de gap longo [131].

## Aplicações

A alta tensão de ruptura de semicondutores de gap longo é uma propriedade muito útil em aplicações de alta potência que necessitam de grandes campos elétricos, principalmente dispositivos para alta tensão e alta temperatura. Na aplicação para os diodos emissores de luz, os LEDs brancos com características de mais brilho e vida mais longa estão substituindo as lâmpadas incandescentes. Os aparelhos de Blu-Ray usam lasers azuis de Nitreto de Gálio. Os materiais de gap longo são utilizados como transdutores devido ao efeito piezoelétrico<sup>7</sup>. Materiais WBG já são utilizados em grandes centros de dados, de alta eficiência e mostram fontes de alimentação compactas para eletrônicos de consumo. Semicondutores WBG tem grande potencial como um material que permita aplicações de alta energia, as comunicações por satélite de alta frequência e de radar de alta potência. Sendo possível também construir sensores eletrônicos que podem suportar alta tensão e ambientes de alta temperatura como os poços geotérmicos. Cabos fabricados com esse tipo de material suportam dez vezes mais tensão dos que os tradicionais de silício, assim como operam em temperaturas acima de 300°C, seus dispositivos também suportam frequências dez vezes maiores que os tradicionais dispositivos de silício [131].

## A evolução pode continuar?

Não é impossível que novas tecnologias sejam descobertas, à medida que a demanda por menos espaço, menos custos, e dispositivos cada vez mais rápidos, eficientes e econômicos aumente, novos estudos serão feitos e como consequência novos arranjos tecnológicos aprimorarão tecnologias já existentes. A Fotônica tem feito grandes avanços ao estudar a luz e seus efeitos para a Eletrônica, e assim como caminhamos com a Eletrônica

---

<sup>7</sup>O efeito piezoelétrico é entendido como a interação eletromecânica linear entre a força mecânica e o estado elétrico (forças de Coulomb) em materiais cristalinos (cerâmicos, polímeros).

e através dela conseguimos avanços imprescindíveis ao homem e as telecomunicações, podemos esperar muito mais descobertas essenciais da Fotônica que causarão tanto espanto e revolução como antes.

## Conclusão

A modernidade seria praticamente impossível sem a Eletrônica. Os desenvolvimentos e descobertas que ocorreram com o advento de todas as nossas máquinas, como os eletrodomésticos que facilitam nossa vida, só puderam ser possíveis graças a ela. Quando um dispositivo novo é inventado e chega em nossas mãos, muitas vezes, somos pegos de surpresa, achamos complicado seu funcionamento, e conseqüentemente rejeitamos essa nova tecnologia. Mas, com o passar do tempo, a necessidade e “carência tecnológica” nos faz ser autodidatas, e acabamos nos acostumando a tecnologia emergente. Para chegarmos hoje no que conhecemos como Eletrônica, é importante salientar a perseverança e insistência dos responsáveis, no que poderia ter sido considerado como loucura na época de seu descobrimento [18]-[21].

A Eletrônica Analógica surgiu com o advento de circuitos de controle que trabalham com grandezas físicas variáveis ou não, formas oscilatórias em baixas ou altas frequências e que são utilizados em quase todos os tipos de equipamentos. A Eletrônica Digital é uma área de estudos da Eletrônica, que é a mãe da grande maioria das tecnologias existentes hoje. Uma não substitui a outra, mas sim se complementam. Existem equipamentos que usam as duas tecnologias, de forma a melhorar o seu desempenho. A nanotecnologia trouxe um novo formato à Eletrônica, permitindo que a mesma agora saísse de um patamar menos acessível para o crescente mercado da tecnologia [34][41][42].

O mundo hoje sofre diversas carências, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável. Países e organizações perceberam que a luz é algo que deve ser mais profundamente estudada e debatida, seus recursos ópticos abrem as portas para caminhos que ainda não foram trilhados. A combinação de elementos ópticos e eletrônicos fornecem agora o controle da luz como energia, trabalhando as mais diversas esferas de apresentação da luz. A história do estudo da luz tem envolvido praticamente todas as principais personalidades da ciência, e suas histórias revelam o lado humano da ciência

de diferentes formas, desde as antigas tentativas para se compreender o movimento das estrelas e dos planetas até o reconhecimento da importância da luz na fotossíntese, ou seja, os esforços para entender a natureza e as características da luz têm revolucionado quase todos os campos da ciência. A substituição de equipamentos mais antigos pelas novas tecnologias da luz nos traz uma nova dimensão de economia e de gestão de recursos, além é claro de deixar o tempo de resposta e processamento de informações mais rápido. A Fotônica abriu esse caminho, dando novas dimensões aos recursos já existentes. As empresas na área da fotônica e das tecnologias baseadas na luz trabalham para solucionar os principais desafios enfrentados pela sociedade, como geração de energia e eficiência energética, envelhecimento saudável da população, mudança climática e segurança. As tecnologias fotônicas têm causado um grande impacto na economia mundial. A nanoeletrônica dispara na descoberta de novas possibilidades, quanto menor o tamanho mais longe poderemos ir, sem deixar, de nos preocupar com os efeitos indesejáveis, mas que estão presentes como consequência dessa nova tecnologia. O limite da Eletrônica parece enfim ter chegado, isso não significa porém o seu fim, pelo contrário, significa a junção de duas tecnologias que revolucionaram o modo de viver e que com grandes expectativas para o futuro, as mesmas seguem trilhando juntas, a Fotônica e a Eletrônica [75][76][82][92][95].

O homem por si só procura sempre a facilidade no seu dia-a-dia cada vez mais. Hoje a procura por menos espaço e mais flexibilidade tem aumentado muito, mesmo com a saciação dessa demanda, as pessoas não querem pagar mais caro por isso. Os materiais semicondutores que dominam hoje são o silício e o germânio, embora os dispositivos orgânicos não possam competir com os mesmos na questão da velocidade e densidade, nos termos de custos e versatilidade eles têm o potencial muito elevado. Esse potencial é tanto que muitas aplicações hoje usadas com semicondutores mais dominantes, estão sendo substituídas pelos condutores orgânicos, como é o caso das células solares. Em contraste com os semicondutores tradicionais à base de silício, que são fabricados com técnicas caras de fotolitografia, a eletrônica orgânica pode ser impressa usando processos de baixo custo. Isso torna os produtos extremamente baratos em comparação com os dispositivos eletrônicos tradicionais, tanto em termos de custo por aparelho, quanto do capital necessário para produzi-los. Países de grande renome em tecnologia buscam não apenas crescer cada vez mais tecnologicamente como também procuram diminuir seus próprios custos. É possível ver avanços em cada uma das categorias que de certa forma

foram se interpondo na história da Eletrônica até chegar a Fotônica. Isso só nos deixa com mais curiosidade sobre o que ainda pode ser melhorado e como se dará o descobrimento das novas tecnologias provenientes cada vez mais das próprias demandas da humanidade[128]-[131].



## Referências Bibliográficas

- [1] CARLOS FAZANO. A Idade do Elétron: 100 anos de progresso na Eletrônica. Disponível em <<http://www.fazano.pro.br/indice.html>>. Acesso em 21 abr. 2015.
- [2] ELETRON PI. Breve História da Eletrônica. Disponível em <[http://www.eletronpi.com.br/historia\\_da\\_eletronica.aspx](http://www.eletronpi.com.br/historia_da_eletronica.aspx)>. Acesso em 21 abr. 2015.
- [3] SITE DE CURIOSIDADES. Principais Invenções do Século XX. Disponível em <<http://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/principais-invencoes-eletronicas-do-seculo-xx.html>>. Acesso em 21 abr. 2015.
- [4] EMBARCADOS. A História do primeiro Transistor. Disponível em <<http://www.embarcados.com.br/a-historia-do-primeiro-transistor/>>. Acesso em 23 abr. 2015.
- [5] SABER ELÉTRICO. História da Eletrônica. Disponível em <<http://sabereletrico.blogspot.com.br/2010/07/historia-da-eletronica.html>>.. Acesso em 21 abr. 2015.
- [6] SITE DE CURIOSIDADES. A Origem da Eletrônica. Disponível em <<http://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/a-origem-da-eletronica.html>>. Acesso em 21 abr. 2015.
- [7] DESCOBRINDO A FÍSICA. Semicondutores. Disponível em <<http://descobrimdo-fisica.blogspot.com.br/2012/09/semicondutores-historia-em-1874-braun-o.html>>. Acesso em 23 abr. 2015.

- [8] LINS ELETRÔNICA(CONSTRUINDO FUTUROS PROFISSIONAIS). Eletrônica. Disponível em <<http://estudo-de-eletronica.webnode.com/>>. Acesso em 23 abr. 2015.
- [9] INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. Eletrônica Analógica e Digital. Disponível em <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica-digital/90-licao-1-eletronica-analogica-e-digital-sistemas-de-numeracao>>. Acesso em 21 abr. 2015.
- [10] SENAI ESPÍRITO SANTO/CNT(COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO). Elétrica-Eletrotécnica. Senai-ES, 1996. Apostila.
- [11] BLOG INSTITUTO MONITOR. Mundo Eletrônico: A História da Eletrônica - Parte I. Disponível em <<http://www.blog.institutomonitor.com.br/index.php/2013/04/16/historia-da-eletronica-parte-i/>>. Acesso em 30 abr. 2015.
- [12] BLOG INSTITUTO MONITOR. Mundo Eletrônico: A História da Eletrônica - Parte II. Disponível em <<http://www.blog.institutomonitor.com.br/index.php/2013/04/23/historia-da-eletronica-parte-ii/>>. Acesso em 30 abr. 2015.
- [13] BLOG INSTITUTO MONITOR. Mundo Eletrônico: A História da Eletrônica - Parte III. Disponível em <<http://www.blog.institutomonitor.com.br/index.php/2013/04/30/historia-da-eletronica-parte-iii/>>. Acesso em 30 abr. 2015.
- [14] BLOG INSTITUTO MONITOR. Mundo Eletrônico: A História da Eletrônica - Parte IV. Disponível em <<http://www.blog.institutomonitor.com.br/index.php/2013/05/07/historia-da-eletronica-parte-iv/>>. Acesso em 30 abr. 2015.
- [15] AMBIENTE BRASIL. Histórico das Células Fotovoltaicas e a Evolução da Utilização de Energia Solar. Disponível em <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia\\_solar/historico\\_das\\_celulas\\_fotovoltaicas\\_e\\_a\\_evolucao\\_da\\_utilizacao\\_de\\_energia\\_solar.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html)>. Acesso em 2 mai. 2015.

- [16] VALÉRIA, A.M. BRITO, M.C. Meio Século de História Fotovoltaica. *Gazeta*, São Paulo, 2 fev 2006. *Gazeta de Física*, p.10-15.
- [17] GUIA DA ENERGIA SOLAR: Conversão Fotovoltaica da Energia Solar. Concurso Solar Padre Himalaya, 2006. 22 p.,il.
- [18] ARGONAUTAS. Início da Evolução Eletrônica. Disponível em <<http://argonautas.blogspot.com.br/2011/06/inicio-da-evolucao-eletronica.html>>. Acesso em 5 mai. 2015.
- [19] BASSALO, J.M.F. A Crônica da Física do Estado Sólido: I. Do Tubo de Gleisser às Válvulas à Vácuo. *Revista Brasileira do Ensino de Física*, vol. 15, n°s(1-4), 1993.
- [20] FOTÔNICA SÉCULO 21. Photophone de Graham Bell. Disponível em <<http://www.fotonicaseculo21.com.br/2012/11/photophone-de-graham-bell.html>>. Acesso em 7 mai. 2015.
- [21] UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. *Efeito Fotoelétrico*, Departamento de Física do Estado Sólido. Roteiro. Salvador, 2002. 9 p.
- [22] CARLOS FAZANO. O Diodo de Flemming. Disponível em <<http://www.fazano.pro.br/port03.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [23] PRODUÇÃO VIRTUAL UFPB. As Gerações dos Computadores: Primeira Geração. Disponível em <<http://producao.virtual.ufpb.br/books/camyle/introducao-a-computacao-livro/livro/livro.chunked/ch01s02.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [24] GREF. *Física 3 - Eletromagnetismo*. São Paulo: Ed. 5, 2007. 440p.(EDUSP). Bibliografia: p. 324. ISBN 978-85-314-0115-2.
- [25] TECMUNDO. O que é um transistor e porque ele é importante para o computador?. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/o-que-e/3596-o-que-e-um-transistor-e-porque-ele-e-importante-para-o-computador-.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [26] PRODUÇÃO VIRTUAL UFPB. As Gerações dos Computadores: Segunda Geração. Disponível em <<http://producao.virtual.ufpb.br/books/camyle/introducao-a-computacao-livro/livro/livro.chunked/ch01s02.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.

- [27] BRASIL ESCOLA. Revolução do Computador. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/informatica/revolucao-do-computador.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [28] TECMUNDO. A Evolução dos Computadores. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/infografico/9421-a-evolucao-dos-computadores.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [29] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. O computador: Hardware-Processador. Disponível em <<http://www.ufpa.br/dicas/mic/mic-proc.html>>. Acesso em 9 mai. 2015.
- [30] SÓ FÍSICA. Resistores. Disponível em <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/resistores.php>>. Acesso em 10 mai.2015.
- [31] SÓ FÍSICA. Capacitores. Disponível em <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/capacitores.php>>. Acesso em 10 mai. 2015.
- [32] ELETRÔNICA PROGRESSIVA. Disponível em <<http://www.eletronicaprogressiva.net/2013-07/Indutores-o-que-sao-para-que-servem-e-como-funcionam.html>>. Acesso em 10 mai. 2015.
- [33] HABILITAÇÃO TÉCNICA EM ELETRÔNICA. Eletrônica Analógica. Centro Paula Souza do Estado de São Paulo, Fundação Padre Anchieta, 2011. Apostila.
- [34] BURGOSELETRÔNICA LTDA. Curso Prático de Eletrônica Geral. <<http://www.burgoseletronica.net>>. Apostila.
- [35] GERSON ROBERTO LUQUETA. Curso Básico de Eletrônica Analógica. Eng. Gerson R. Luqueta. Apostila.
- [36] KITTEL, C. *Introdução à Física do Estado Sólido*. Rio de Janeiro: Ed. 8, 2006. 582p.(LTC). p. 161-163. ISBN 85-216-1505-1.
- [37] USP ELETRÔNICA. Semicondutores Intrínsecos e Extrínsecos-Materiais Tipo N e Tipo P. Disponível em <<http://www.lsi.usp.br/eletroni/milton/matpn.html>>. Acesso em 11 mai. 2015.

- [38] KITTEL, C. *Introdução à Física do Estado Sólido*. Rio de Janeiro: Ed. 8, 2006. 582p.(LTC). p. 427-428. ISBN 85-216-1505-1.
- [39] HABILITAÇÃO TÉCNICA EM ELETRÔNICA. *Eletrônica Digital*. Centro Paula Souza do Estado de São Paulo, Fundação Padre Anchieta, 2011. Apostila.
- [40] NEWTON C. BRAGA. *Curso de Eletrônica Digital*. Saber Eletrônica Especial, 2002. Apostila.
- [41] GERALDO MARCELO ALVES DE LIMA. *Eletrônica Digital*. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, Vitória-ES, 2002. Apostila.
- [42] MARTINI, S. et al. Spintrônica – Parte I: uma introdução. *Centro de Pesquisa da Universidade São Judas Tadeu.*, São Paulo, n. 53, abr./mai./jun. 2008. Seção Engenharia. Disponível em <[ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/171\\_53.pdf](ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/171_53.pdf)>. Acesso em 11 mai. 2015.
- [43] HALLIDAY, D. et al. *Fundamentos de Física 4*. Rio de Janeiro: Ed. 7, 2007. 407p.(LTC). p. 240-245. ISBN 978-85-216-1487-6.
- [44] TIPLER, PAUL A. et al. *Física Moderna*. Rio de Janeiro: Ed. 3, 2001. 515p.(LTC). p. 197-198. ISBN 85-216-1274-5.
- [45] RAMÓM FERREIRA DE JESUS. *Magnetorresistência gigante*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Apostila.
- [46] SEARA DA CIÊNCIA. Universidade Federal do Ceará: A Magnetorresistência gigante. Disponível em <<http://www.seara.ufc.br/tintim/tecnologia/mrg/mrg02.htm>>. Acesso em 15 mai. 2015.
- [47] SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS. Engenharia precisa na fabricação de válvulas de spin. Disponível em <<http://sbpmat.org.br/artigo-em-destaque-engenharia-precisa-na-fabricacao-de-valvulas-de-spin/?print=1>>. Acesso em 15 jul. 2015
- [48] INFO WESTER. Características e funcionamento dos HDs (discos rígidos). Disponível em <<http://www.infowester.com/hd.php>>. Acesso em 15 mai. 2015.

- [49] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. “Memória universal” usa propriedades quânticas e não perde dados. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110070824>>. Acesso em 17 mai. 2015.
- [50] GUIA DO HARDWARE. MRAM. Disponível em <<http://www.hardware.com.br/termos/mram>>. Acesso em 17 mai. 2015.
- [51] SALLES, Filipe. A LUZ - Propriedades e Características. Memocine, 2010. Apostila.
- [52] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 440-452. ISBN 85-363-0040-x.
- [53] BRASIL ESCOLA. Cor da Luz: Verificando a Cor da Luz. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/fisica/cor-luz.html>>. Acesso em 13 mai. 2015.
- [54] ALUNOS ONLINE. Luz e Cor: Aulas de Física e Química. Disponível em <[http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_13.html](http://www aulas-fisica-quimica.com/8f_13.html)>. Acesso em 13 mai. 2015.
- [55] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 455-465. ISBN 85-363-0040-x.
- [56] SÓ FÍSICA. Tipos de Reflexão e Refração. Disponível em: <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Fundamentos/tiposdereflexaoerefracao.php>>. Acesso em 15 mai. 2015.
- [57] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 469-489. ISBN 85-363-0040-x.
- [58] ALUNOS ONLINE. Natureza Ondulatória da Luz: Aulas de Física e Química. Disponível em <[http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_12.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_12.html)>. Acesso em 18 mai. 2015.
- [59] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 494-510. ISBN 85-363-0040-x.
- [60] INFO ESCOLA. Fóton. Disponível em <<http://www.infoescola.com/fisica/foton/>>. Acesso em 21 mai. 2015.

- [61] BRASIL ESCOLA. Espectros de Emissão e de Absorção e Leis de Kirchoff. Disponível em <<http://www.brasilescola.com/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchhoff.html>>. Acessado em 21 mai. 2015.
- [62] BRASIL ESCOLA. Diferença entre Fluorescente e Fosforescente. Disponível em <[www.brasilescola.com/quimica/diferenca-entre-fluorescente-fosforescente.html](http://www.brasilescola.com/quimica/diferenca-entre-fluorescente-fosforescente.html)>. Acessado em 21 mai. 2015.
- [63] BLOG PAPO FÍSICO. Incandescência X Fluorescência X Fosforescência. Disponível em <<http://papofisico.tumblr.com/post/36106473898/incandescencia-x-fluorescencia-x-fosforescencia>>. Acesso em 21 mai. 2015.
- [64] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 513-524. ISBN 85-363-0040-x.
- [65] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 528-540. ISBN 85-363-0040-x.
- [66] BRASIL ESCOLA. Princípio da Incerteza. Disponível em <<http://www.brasilescola.com/fisica/principio-incerteza.html>>. Acesso em 23 mai. 2015.
- [67] INFO ESCOLA. Princípio da Incerteza. Disponível em <<http://www.infoescola.com/fisica/principio-da-incerteza-de-heisenberg/>>. Acesso em 23 mai. 2015.
- [68] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). p. 528-540. ISBN 85-363-0040-x.
- [69] HEWITT, Paul G. *Física Conceitual* Porto Alegre: Ed. 9, 2002. 685p.(Bookman). Bibliografia: p. 528-540. ISBN 85-363-0040-x.
- [70] OUTER SPACE, PORTAL TERRA. 50 Anos da Invenção do Laser. Disponível em <[forum.outerspace.terra.com.br/index.php?threads/50-anos-da-invencao-do-laser-fibras-oticas-fotos.166478/](http://forum.outerspace.terra.com.br/index.php?threads/50-anos-da-invencao-do-laser-fibras-oticas-fotos.166478/)>. Acesso em 26 mai. 2015.
- [71] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Fotônica. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/meta.php?meta=Fot%F4nica>>. Acesso em 26 mai. 2015.

- [72] PRÉ UNIVESP. A Fotônica está em todo lugar. Disponível em <[http://pre.univesp.br/fotonica.VaPzP\\_IViko](http://pre.univesp.br/fotonica.VaPzP_IViko)>. Acesso em 26 mai. 2015.
- [73] TEC MUNDO. Veja como a luz está presente em nossa vida mais do que imaginávamos. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/laser/2779-veja-como-a-luz-esta-mais-presente-na-nossa-vida-do-que-imaginamos.html>>. Acesso em 28 mai. 2015.
- [74] UNIP/UNIVERSIDADE PAULISTA. Universidade Paulista: Curso de Ciências da Computação: Disciplina de Telecomunicações: Redes Fotônicas. Disponível em <<http://www.kusumoto.com.br/wp-classes/2014.02/teleco/fotonicas/assunto6.html>>. Acesso em 28 mai. 2015.
- [75] UFRJ. Laboratório de Instrumentação e Fotônica: Da Astronomia à Telecomunicação, como a luz é aplicada a tecnologia. Disponível em <<http://www.lif.coppe.ufrj.br/index.php/component/flexicontent/88-textos-em-jornais-de-noticias-revistas/123-da-astronomia-a-telecomunicacao-como-a-luz-e-aplicada-na-tecnologia>>. Acesso em 28 mai. 2015.
- [76] PEA-UNESCO BRASIL. Ano Internacional da Luz - 2015; Fotônica: A Revolução do Século 21, São Paulo, 2014. Apostila.
- [77] SUPER INTERESSANTE. São Paulo: Ed. Abril, n. 25, 25 out. 1989. 148p.
- [78] BRASIL ESCOLA. Raios Gama. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/quimica/raios-gama.html>>. Acesso em 31 mai. 2015.
- [79] BRASIL ESCOLA. Raios-X. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/fisica/raios-x.html>>. Acesso em 31 mai. 2015.
- [80] INFO ESCOLA. Radiação Ultravioleta. Disponível em <<http://www.infoescola.com/fisica/radiacao-ultravioleta/>>. Acesso em 31 mai. 2015.
- [81] BRASIL ESCOLA. Raios Infravermelhos. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/quimica/raios-infravermelhos.html>>. Acesso em 31 mai. 2015.



- [82] SUPER INTERESSANTE. São Paulo: Ed. Abril, n. 25, 25 out. 1989. 148p.
- [83] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Fotodiodos. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Fotodiodo.html>>. Acesso em 02 jun. 2015
- [84] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Fototransistores. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Fototransistor.html>>. Acesso em 02 jun. 2015
- [85] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Cintiladores e Fotomultiplicadores, 2010. Apostila.
- [86] INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. Circuitos Ópticos de Interfaciamento. Disponível em <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/1933.>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [87] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Metatrônica demonstra primeiros circuitos lógicos ópticos. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=metatronica-circuitos-logicos-opticosid=010110120229.VaR5pPIViko>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [88] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Fotoresistor. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Fotoresistor.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [89] TEC MUNDO. CCDs. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/fotografia-e-design/23626-video-explica-como-funciona-o-sensor-ccd-das-cameras-digitais.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [90] MSPC. Laser - Princípios Básicos de Funcionamento. Disponível em <<http://www.mspc.eng.br/eletrn/laser110.shtml>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [91] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Novo laser de Cascadeamento Quântico. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110031111>>. Acesso em 02 jun. 2015.

- [92] PHILIPS. Iluminação LED. Disponível em <<http://www.lighting.philips.com.br/light-community/trends/led/>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [93] INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAQHIN”. As Nanoestruturas. Disponível em <<http://portal.ifi.unicamp.br/dfa/grupo-de-fisica-de-nanossistemas-e-materiais-nanoestruturados-gfmmn->>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [94] TEC MUNDO. Por que existem limites de velocidade em processadores? Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/processadores/15076-por-que-existem-limites-de-velocidade-em-processadores-.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [95] NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA. Aplicações tecnológicas dependem de investimentos privados. Disponível em <<http://www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano02.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [96] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Equipamento para nanotecnologia é lançado por empresa brasileira. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=equipamento-para-nanotecnologia-e-lancado-por-empresa-brasileiraid=010165081118.VaSBOPIViko>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [97] COM CIÊNCIA. Entrevista: Nanotecnologia brasileira deve aliar investimentos em ciência básica e aplicada. Disponível em <<http://www.comciencia.br/entrevistas/nanotecnologia/leite.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [98] PENt UFRJ. Nanomateriais. Disponível em <<http://www.pent.coppe.ufrj.br/index.php/linhas-de-pesquisa/nanomateriais.html>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [99] ANA CRISTINA FACUNDO DE BRITO. A indústria na era dos nanomateriais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009. Apostila.
- [100] VII ENCONTRO SBPMAT. Micro e Nanometrologia. Disponível em <[http://www.sbpmat.org.br/7encontro/programa/simposio\\_N.php](http://www.sbpmat.org.br/7encontro/programa/simposio_N.php)>. Acesso em 02 jun. 2015.

- [101] MARCO AURÉLIO C. PACHECO. Uma introdução a Nanotecnologia. PUC-Rio, 2010. Apostila.
- [102] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Bionanotecnologia exige envolvimento do público. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=bionanotecnologia-exige-envolvimento-do-publicoid=010165081022.VaSF5PIViko>>. Acesso em 02 jun. 2015.
- [103] WOLFART G. Nanotecnologia, saúde e ambiente: riscos e benefícios. *IHU ONLINE*, São Leopoldo, n. 252, 31 mar. 2008. Seção Ciência e Tecnologia. Disponível em <[http://www.ihuonline.unisinos.br/index.php?option=com\\_contentview=articleid=1668secao=252](http://www.ihuonline.unisinos.br/index.php?option=com_contentview=articleid=1668secao=252)>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [104] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Impactos ambientais da nanotecnologia podem ser maiores do que se pensava. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010125070822.-VaSGnvlViko>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [105] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Pesquisadores criam componentes e circuitos eletrônicos baseados em grafite. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110060316.-VaSIjPIViko>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [106] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Cientistas descobrem menor supercondutor do mundo. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=supercondutividade-nanofios-molecularesid=010165100331.VaSI6PIViko>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [107] OSVALDO LUIZ ALVES. Nanotecnologia, Nanociência e Nanomateriais. Universidade Estadual de Campinas, 2004. Apostila.
- [108] DICYT. Somos capazes de fazer dispositivos eletrônicos menores do que um vírus. Disponível em <<http://www.dicyt.com/noticia/somos-capazes-de-fazer-dispositivos-eletronicos-menores-do-que-um-virus>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [109] COMPUTER WORLD. Fab plants are now making superfast carbon nanotube memory. Disponível em <<http://www.computerworld.com/article/2929471/emerging->

- technology/fab-plants-are-now-making-superfast-carbon-nanotube-memory.html>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [110] MUNDO VESTIBULAR. A evolução do laser – Spaser, o laser nanométrico. Disponível em <<http://www.mundovestibular.com.br/articles/7653/1/A-evolucao-do-laser-Spaser-o-laser-nanometrico/Paacutegina1.html>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [111] TEC MUNDO. Novas telas touchscreen poderão utilizar nanotubos de carbono. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/touchscreen/8088-novas-telas-touchscreen-poderao-utilizar-nanotubos-de-carbono.html>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [112] HYPE SCIENCE. Computação quântica: Átomo plano bizarro representa grande avanço. Disponível em <<http://hypescience.com/atomo-plano-computacao-quantica/>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [113] ENERGIA INTELIGENTE. Nanoeletrônica aposta em metais nos transistores. Disponível em <<http://energiainteligenteufjf.com/2013/06/28/nanoeletronica-aposta-em-metais-nos-transistores/>>. Acesso em 03 jun. 2015.
- [114] DR. ALVARO ANTONIO ALENCAR DE QUEIROZ. Nanoeletrônica na medicina: a saúde por um fio. Universidade Federal de Itajubá, 2012. Apostila.
- [115] INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS. IFSC-USP cria e desenvolve a área de Nanofotônica. Disponível em <[http://www.ifsc.usp.br/index.php?option=com\\_contentview=articleid=2580:ifsc-usp-cria-e-desenvolve-a-area-de-nanofotonicacatid=7:noticiasItemid=224](http://www.ifsc.usp.br/index.php?option=com_contentview=articleid=2580:ifsc-usp-cria-e-desenvolve-a-area-de-nanofotonicacatid=7:noticiasItemid=224)>. Acesso em 04 jun. 2015.
- [116] GARCIA, T. Plasma: Tecnologia Limpa. Universidade Federal do Amazonas, 2010. Apostila.
- [117] TELECO. Circuito Receptor. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfsoe>>. Acesso em 15 jul. 2015.
- [118] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Spaser: criado o menor laser do mundo. Disponível em <[http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=spaser-criado-menor-laser-mundoid=010110090817.VaSSQ\\_lViko](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=spaser-criado-menor-laser-mundoid=010110090817.VaSSQ_lViko)>. Acesso em 04 jun. 2015.

- [119] TEC MUNDO. Como transformar areia em um processador. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/processadores/24719-como-transformar-areia-em-um-processador-video-.htm>>. Acesso em 15 jul. 2015.
- [120] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Discos rígidos podem ser gravados com calor. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=gravacao-discos-rigidos-com-calorid=010110120208.VaSTFfViko>>. Acesso em 04 jun. 2015.
- [121] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Dispositivos microfluídicos reprogramáveis dinamicamente. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110030812>>. Acesso em 04 jun. 2015.
- [122] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Metamateriais. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/meta.php?meta=Metamateriais>>. Acesso em 04 jun. 2015.
- [123] REZENDE, SERGIO M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. São Paulo: Ed. 2, 2004. 547p. (Editora Livraria da Física). Bibliografia: p. 19-20. ISBN 85-88325-27-6.
- [124] DEPARTMENT OF CHEMISTRY. University Rochester: Ching W. Tang. Disponível em <<http://www.chem.rochester.edu/faculty/faculty.php?name=tang>>. Acesso em 04 jun. 2015.
- [125] REZENDE, SERGIO M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. São Paulo: Ed. 2, 2004. 547p. (Editora Livraria da Física). p. 507-513. ISBN 85-88325-27-6.
- [126] REZENDE, SERGIO M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. São Paulo: Ed. 2, 2004. 547p. (Editora Livraria da Física). p. 501-506. ISBN 85-88325-27-6.
- [127] REZENDE, SERGIO M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. São Paulo: Ed. 2, 2004. 547p. (Editora Livraria da Física). p. 513-514. ISBN 85-88325-27-6.
- [128] SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA. Pireno,  $C_{16}H_{10}$ . Disponível em <[http://qnint.s bq.org.br/qni/popup\\_visualizarMolecula.php?-id=sGy9OTY5GjZx5YLvfiGcnmI0SagP-bFrmvcz-9h9FuBY4itc0ZviGdh\\_T2sAM5JlleUBrnGEn-e0ZrXQgFmBQ==>](http://qnint.s bq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?-id=sGy9OTY5GjZx5YLvfiGcnmI0SagP-bFrmvcz-9h9FuBY4itc0ZviGdh_T2sAM5JlleUBrnGEn-e0ZrXQgFmBQ==>)>. Acesso em 06 jun. 2015.

- [129] FAPESP. Finas e Flexíveis. Disponível em <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2009/10/01/finas-e-flexiveis/>>. Acesso em 06 jun. 2015.
- [130] INSTITUTO NACIONAL DE ELETRÔNICA ORGÂNICA. Conheça dez tecnologias que podem salvar a economia mundial. Disponível em <[http://www.ifsc.usp.br/ineo/news/index.php?pos\\_id=428](http://www.ifsc.usp.br/ineo/news/index.php?pos_id=428)>. Acesso em 06 jun. 2015.
- [131] ADVANCED MANUFACTURING OFFICE. Wide Bandgap Semiconductors: Pursuing the Promise. U.S. Department of Energy. Washington DC, 2013. Apostila.