



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CCT

DEPARTAMENTO DE FÍSICA – DF

CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

MAGNA CELY CARDOSO DE LIMA

**UM ESTUDO DA FÍSICA DOS SEMICONDUTORES NA ELETRÔNICA DA
TRANSMISSÃO DE DADOS: UM EXPERIMENTO COM O LED**

CAMPINA GRANDE – PB, 2017.

MAGNA CELY CARDOSO DE LIMA

**UM ESTUDO DA FÍSICA DOS SEMICONDUTORES NA ELETRÔNICA DA
TRANSMISSÃO DE DADOS: UM EXPERIMENTO COM O LED**

Monografia apresentada ao departamento de Licenciatura em Física, do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual Paraíba, em cumprimento do trabalho de conclusão de curso (TCC), com exigência para obtenção de título de Licenciada Plena em Física.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva / UEPB

CAMPINA GRANDE – PB, 2017.

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

L732e Lima, Magna Cely Cardoso de.
Um estudo da Física dos semicondutores na eletrônica da transmissão de dados [manuscrito] : um experimento com o LED / Magna Cely Cardoso de Lima. - 2017.
51 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva, Departamento de Física".

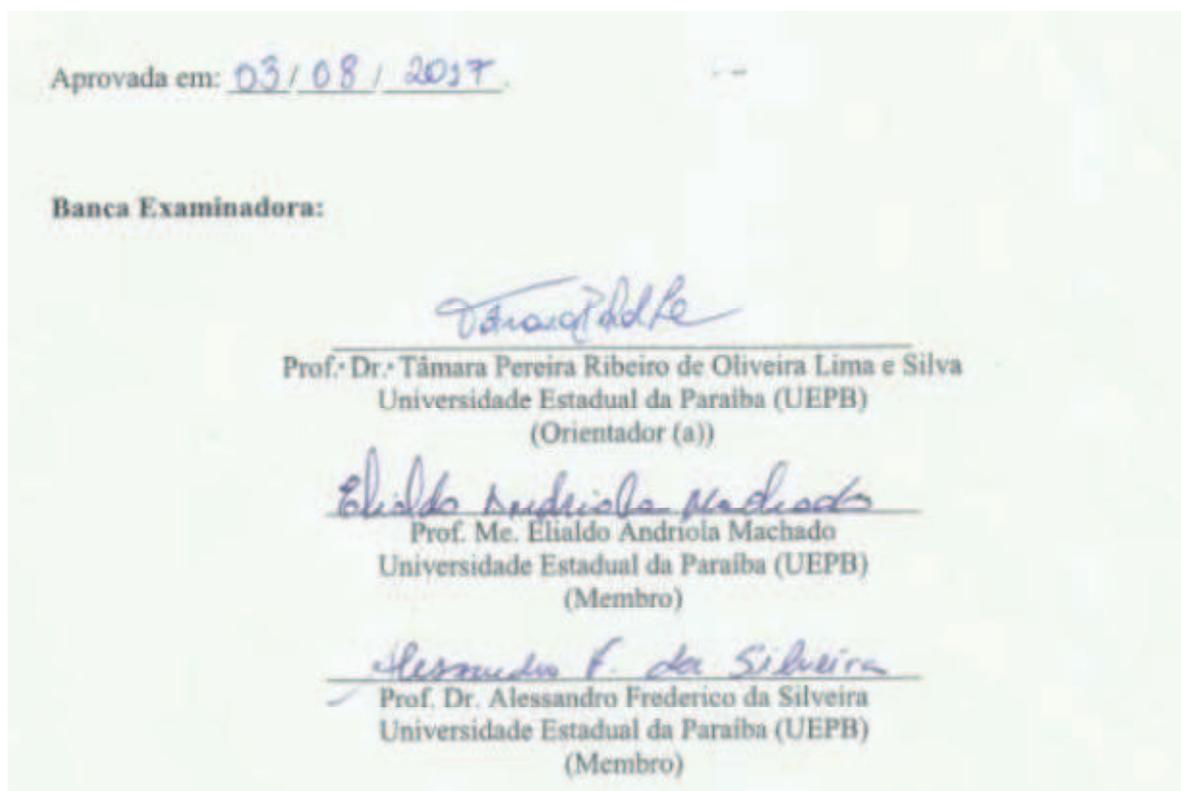
1. Semicondutores. 2. LED. 3. Transmissão de dados. 4. Optoeletrônica. I. Título.

21. ed. CDD 535.357

MAGNA CELY CARDOSO DE LIMA

**UM ESTUDO DA FÍSICA DOS SEMICONDUTORES NA ELETRÔNICA DA
TRANSMISSÃO DE DADOS: UM EXPERIMENTO COM O LED**

Monografia apresentada ao departamento de Licenciatura em Física, do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual Paraíba, em cumprimento do trabalho de conclusão de curso (TCC), com exigência para obtenção de título de Licenciada Plena em Física.



CAMPINA GRANDE – PB, 2017.

*A minha família que, com muito esforço e amor, fez
o possível para que tão longe eu chegasse...*

Dedico!

“Os três grandes fundamentos para se conseguir qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo; segundo, perseverança; terceiro, senso comum.”

Thomas A. Edison

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por está sempre comigo, por ser meu amparo, meu refúgio, não me deixando cair nem fraquejar, me fortalecendo a cada instante, pois a ele devo toda a graça e proteção, sabedoria e discernimento, saúde e paciência para a construção da minha vida.

Agradeço a minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Tâmara Pereira Ribeiro de Lima e Silva pela dedicação, paciência e por sua imensa ajuda e contribuição na minha caminhada e na realização desse sonho. Minha imensa admiração, “Quero ser igual à senhora quando crescer!” Que assim seja!

Ao Técnico Dr. Tiago S. Araújo, pela imensa ajuda com o laboratório e a paciência em me ajudar e ensinar a soldar e a cortar os fios, foi uma aventura e tanto, obrigada pela sua colaboração.

Ao grupo OSA Campina Student Chapter, pelas imensas conquistas, pessoal e profissional. Vocês são diretamente responsáveis por está etapa.

A minha família como um todo, e em especial nas pessoas do meu pai **Luiz de Lima**, meus Irmãos Magno Luiz, Wellington Cardoso e Martins Cardoso, e a minha mãe **Maria das Graça**, meu espelho, que em momento algum mediu esforços para me ajudar e me dar aquilo que necessitava mesmo sem condições, que nunca me cobrou por isso, que nunca desistiu de realizar o meu sonho, e por muitas vezes desistiu dos dela. A vocês devo a pessoa que sou hoje, sou grata a vocês eternamente. Amo vocês!

Ao meu noivo **Gilbevan Ramos de Almeida**, companheiro de todas as horas, por seu mais puro e sincero amor, e por está ao meu lado em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis, por dividir comigo todas as experiências e por me falar tudo que era necessário ouvir, obrigada pela dedicação e pelo incentivo de sempre, “Tamo Junto Sempre!” TE AMO!

Aos meus amigos de graduação que levarei para a vida, Janaina Guedes, Romário Santos, Elton Gonçalves e Thallison Gouveia, obrigada por todas as horas dedicadas aos estudos e pelos vários momentos de diversão, risadas e cabelos arrancados, valeu a pena!

Aos demais amigos de graduação, a Gustavo Santos, pelo empréstimo e doação forçada do livro que não te devolverei! Por diversos pratos do RU divididos e a sua avó Noelma pelas diversas acolhidas em sua casa. A Marciana Cavalcante, Lucas Allyson, Mayra Lindsley, Ronaldo Andrade, Ângelo Fernandes, Almir Dantas, Felipe Santana, Flavio Ygor, Ravyck Medeiros, Gerinaldo da Silva, Jaqueline Salviano, Marcius Rogerio, Roberto Bennely, Joel Oliveira, Berlânia Antero, André Souza, Ingrid K. Laura, Emmanuely Franca,

Eduardo Lourenço, Mauro Venicius, José Rodolfo, Lidiania Santos, Maria Paula, Naara Karolina, Andréa Simphoroza, Nilton Ronny, Alcineide Moura, Marcelo Santos e Vanessa Batista muito obrigada pela bela e simples amizade de todos vocês.

Aos professores do Departamento de Física da UEPB, pelo seu melhor, pela dedicação e ensinamentos e contribuição para a minha formação. Muito obrigada!

Ao secretário do Departamento de Física, Sr. **João Severino da Silva**, pela imensa amizade, pelas ajudas, pela alegria de todos os dias, pelas conversas, risadas e pela sinceridade, e pela pessoa que és com todos. Obrigado por seu bellissimo trabalho amigo!

A todos os funcionários que compõem a equipe do CCT, em especial a equipe da limpeza que deixa tudo limpinho e cheiroso.

Agradeço aqueles que não acreditaram em mim, por me dar incentivo e dedicação, de fazer e mostrar que sou capaz de muito mais. Obrigada, vocês também foram importantes.

A tantos amigos não mencionados aqui que me acompanharam e incentivaram para que eu pudesse chegar aqui.

Enfim agradeço a todos que contribuíram de alguma forma, se empenhando e me ajudando a trilhar essa caminhada.

Muito obrigado a todos vocês!

RESUMO

Desde o início da utilização do LED no mercado, observamos seus diversos avanços tanto na parte econômica quanto na ambiental. Utilizado inicialmente de forma tímida apenas em aparelhos eletrônicos, hoje temos sua vasta utilização no mercado no ramo da iluminação pela sua eficiência energética e na transmissão de dados. Atualmente temos o diodo emissor de luz, o LED, do inglês “light emitting diode”, como um dispositivo semicondutor cujo funcionamento está associado aos conceitos da Física do Estado Sólido. Neste trabalho de conclusão de curso, a princípio, abordaremos as temáticas associadas a esta área da Física ligada ao comportamento de cristais, conceitos sobre materiais semicondutores, e por fim discutiremos o uso do LED na eletrônica, através de uma abordagem experimental, um aparato que converte o sinal sonoro em luminoso por meio de um sistema óptico contendo um LED e uma fibra óptica em sua estrutura. O experimento visa conectar os conceitos acima citados a uma aplicação dos mesmos em sala de aula, com o objetivo de divulgar e discutir temas como comunicações ópticas, optoeletrônica e semicondutores, que nem sempre são abordados no Ensino Médio e de Graduação. Destacamos a relação entre o comprimento de onda emitido pelo emissor de luz ao tipo de material semicondutor utilizado em sua composição. A variação de emissores de luz emitindo em diversos comprimentos de onda possibilitou a fabricação do WLED (white light emitting diode), que só foi possível após a fabricação do LED azul, sendo este o tema que recebeu o Nobel de Física no ano de 2014.

Palavras-Chaves: Semicondutores, LEDs, Transmissão de Dados, Optoeletrônica.

ABSTRACT

Since the beginning of the use of LED (light emitting diode) in the market, we have observed its various advances in both economic and environmental aspects. Initially used timidly only in electronic devices, today it is also used in the fields of lighting due to its energy efficiency and data transmission. We currently have the (LED) as a semiconductor device whose operation is associated with the concepts of Solid State Physics. In this work, we will first discuss some topics related to this area of physics connected to crystal behavior, concepts about semiconductor materials; and finally we will discuss the use of LEDs in electronics, through an experimental approach, which aims to explore the concepts mentioned above in the classroom in order to promote and discuss themes such as optical communications and optoelectronics, highlighting the relation between the wavelength emitted by the LED to the type of material used in the semiconductor composition. The variation of LEDs emitting at different wavelengths led to the fabrication of the white light emitting diode (WLED), the white LED, which was only possible after the fabrication of the blue LED, this being the theme that received the Nobel Prize in Physics in 2014.

Keywords: Semiconductors, LEDs, Data Transmission, Optoelectronics.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:**(a) Representação do elemento sódio na tabela periódica (família 1A – metais alcalinos). (b) Representação do número atômico do sódio e a distribuição eletrônica de Pauli, com a ilustração do spin em seu ultimo nível, 3s. 18
- Figura 2:** Modelo esquemático de um cristal de sódio, cujo raio do íon Na^+ vale $0,98\text{\AA}$ e a distancia interiônica é $1,83\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$). 18
- Figura 3:** Distribuição dos níveis de energia num átomo, onde n representa o nível de energia (n° quântico principal), l representa o subnível energético (n° quântico secundário). O número de orbitais corresponde à degenerescência (n^2) de cada nível, isto é, à quantidade de estados degenerados. 19
- Figura 4:** Formação de bandas de níveis de energia devido à aproximação de átomos em um sólido [REZENDE, 1996]..... 20
- Figura 5:** Modelo representativo das bandas de energia em metais. 20
- Figura 6:** Estrutura cristalina (do tipo cúbica simples) para um sólido com parâmetro de rede a (a), e a energia potencial V de um elétron na rede cristalina ao longo do eixo x (b). 22
- Figura 7:** Situação ideal que ilustra a energia potencial do elétron livre em função do vetor de onda. 23
- Figura 8:** Situação real do elétron quase livre, mostrando as regiões de energia proibida (gaps de energia) [REZENDE 1996]. 23
- Figura 9:** Deslocamento das bandas na segunda zona de Brillouin de $\pm\frac{2\pi}{a}$ (a). Esquema de bandas reduzido à primeira zona após o deslocamento (b). 25
- Figura 10:** Esquema das bandas de energia (reduzida à primeira zona de Brillouin) no estado fundamental (a $T=0K$) para os isolantes (a) e para materiais condutores mostrando a última banda semicheia (b) E_F representa a energia do nível de Fermi..... 26
- Figura 11:** Ocupação das bandas de energia em semimetais [SOBRAL, 2007]. O nível de Fermi possui energia E_F 27

Figura 12: Bandas de valência e de condução em semicondutores. As regiões escuras representam a ocupação dos elétrons a $T > 0$. A distância entre bandas e o <i>gap</i> de energia, $E_g = E_c - E_v$	28
Figura 13: Representação de bandas de semicondutores de <i>gap direto</i> em (a) e de <i>gap indireto</i> em (b) no gráfico que expressa a energia (E) em termos do vetor de onda (k). A aproximação parabólica das BV e da BC é mostrada pelas curvas pontilhadas em (b) [MARQUES, 2009].....	31
Figura 14: Absorção de um fóton de energia $\hbar\omega$ leva um elétron do ponto A na BV para o ponto B , na BC. k_e e k_b são respectivamente vetores de onda associado ao elétron e ao buraco (dopar elétron-buraco)..	33
Figura 15: RGB é a abreviatura do sistema de cores aditivas formado por vermelho (red), verde (green) e azul (blue).....	39
Figura 16: Sound spot (ponto de som), constituído por três spots de cores diferentes (vermelho, verde e azul) que, conectados a instrumentos de uma banda, cada cor enviará um fluxo de áudio diferente. Se o fotodetector receber apenas uma portadora apenas aquele áudio será ouvido [HARUYAMA, 2011].	39
Figura 17: (a) WLED ou LED branco de alto brilho; (b) Visão geral do LED composto por um chip semicondutor responsável pela geração de luz, um copo refletor, um terminal maior chamado de ânodo (positivo), e um menor chamado de cátodo (negativo), que também é reconhecido pelo chanfro. E o símbolo do LED na eletrônica.....	39
Figura 18: Espectro do visível, que vai do ultravioleta ao infravermelho.	40
Figura 19: Dopagem de semicondutores do tipo $p-n$ (a e b) [OSA, 2015]; (c) tabela referente à emissão da cor do LED, com referência ao material semicondutor utilizado.	41
Figura 20: Mostradores numéricos de 7 segmentos em (a) e o componente eletrônico (módulo) onde o visor (display) é acoplado (b) [WIKIDEBROUILLARD, 2017].	42
Figura 21: (a) Fibra óptica [JAMES, 2017]. (b) Esquema estrutural da fibra óptica (núcleo, bainha e proteção).....	43

Figura 22: Demonstração do que acontece com o sinal de luz transmitido numa fibra multimodo com fonte LED (a) ou monomodo com fonte laser (b) [TECMUNDO,2011]. O alcance do sinal transportado pela fibra monomodo é bem maior que no outro caso. Por exemplo, na monomodo a luz é transmitida sem perdas ópticas (isto é, sem diminuir a intensidade) por uma distância de até 80 km..... 44

Figura 23: Fotos da montagem do experimento. (a) Material utilizado na montagem (plug, bateria 9V, resistor, fibra óptica, pilha, LED azul, chaves e conectores), (b) circuito emissor onde está acoplado o LED azul, (c) e o circuito receptor óptico que converte o sinal luminoso trazido pela fibra óptica em sinal sonoro..... 46

Figura 24: Visão geral do conversor montado¹ 47

¹ Todas as imagens no corpo deste trabalho são originais da autora, exceto as referenciadas.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
1.A FÍSICA DE ESTADO SÓLIDO EM CRISTAIS	17
1.1 MODELOS DE ELÉTRONS LIVRES PARA METAIS	17
1.2 BANDAS DE ENERGIA E NÍVEL DE FERMI.....	19
1.3 CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES.....	25
2. MATERIAIS SEMICONDUTORES	31
2.1 GAP DIRETO E INDIRETO	31
2.2 SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS.....	32
2.3 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS.....	34
2.4 CORRENTE DE CONDUÇÃO EM SEMICONDUTORES.....	35
3. O USO DO LED PARA TRANSMISSÃO DE DADOS.....	38
3.1 O LED NA ELETRÔNICA.....	40
3.2 FIBRA ÓPTICA	44
3.3 EXPERIMENTO	43
3.3.1 COMUNICAÇÃO À VELOCIDADE DA LUZ.....	44
3.3.2 CONVERSOR DE SINAL SONORO EM LUMINOSO.....	44
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	49

INTRODUÇÃO

É visível a capacidade econômica associada à utilização no mercado do LED (Diodo Emissor de Luz) que, ao surgir, não obteve uma boa aceitação inicial, pois seus primeiros exemplares teriam um custo financeiro muito elevado em relação aos custos de mercado. Hoje observamos a sua ampla utilização e seus diversos benefícios, tanto na parte econômica quanto na ambiental. Antes visto apenas em aparelhos eletrônicos, hoje é possível observá-lo até na iluminação pública.

O LED é constituído de um material semicondutor que sofre um processo de dopagem, através da junção de materiais do tipo *p* e *n*. De modo geral, um semicondutor é um material com capacidade variável de conduzir corrente elétrica. A maioria deles é feita de um condutor pobre que sofre o tratamento de dopagem, ou seja, átomos de outro material são adicionados à sua composição [NOVOA, 2005], nos quais serão definidos posteriormente.

A implantação da tecnologia do LED no mercado surgiu no ano de 1962. De acordo com [SCHUBERT, 2003], as quantidades de fabricação do produto foram baixas, provavelmente devido ao alto preço por unidade de LED, que supostamente foi de 130 US\$. Com a descoberta e fabricação do primeiro LED, houve também expectativa em torno da redução do consumo de energia elétrica. Outra vantagem na utilização de luminárias LED é a redução do custo operacional com manutenção, pois elas possuem vida útil superior às lâmpadas tradicionais [ASCURRA, 2013].

Os primeiros diodos emissores de luz baseados no material semicondutor constituído pelo GaAsP (fosforeto de gálio e arsênio), emitiam no comprimento de onda da cor vermelha, projetados para a região do visível. A luz emitida pelo LED é monocromática e o comprimento de onda está relacionado ao tipo de material utilizado na composição do semicondutor [PINTO, 2008]; posteriormente apareceu uma variação desses dispositivos emitindo em outros comprimentos de onda, o que nos permite inúmeras possibilidades de iluminação.

Os estudos sobre os diodos emissores de luz deram aos japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura o prêmio Nobel de Física em 2014 por terem inventado, nos anos 90, o LED azul [VEJA, 2014] que, associado aos LEDs vermelho e verde (criados em 1963 e 1975 respectivamente), tornou possível a fabricação do LED de luz branca, que possibilitou o desenvolvimento de uma forma eficiente e duradoura de iluminação.

Ao longo deste trabalho trataremos, inicialmente, nos capítulos 1 e 2, de temáticas associadas à Física do Estado Sólido em cristais e de conceitos sobre materiais semicondutores (intrínsecos e extrínsecos). No capítulo 3 discutiremos o uso do diodo emissor de luz na eletrônica. Para isso, mostraremos um experimento didático que serve como proposta de atividade de laboratório para se explorar e discutir, em sala de aula, uma aplicação de um material semicondutor, acoplado a um dispositivo de fibra óptica, para transmissão de dados.

Destacamos que a proposta de atividade tratada neste trabalho através do aparato desenvolvido aqui expõe, de forma didática e curiosa, a tecnologia do diodo emissor de luz conectada à transmissão de dados em um meio óptico, servindo de motivação aos estudantes para que possam conectar conceitos de Óptica e Física do Estado Sólido, nem sempre abordados no Ensino Médio e Graduação, associados a uma aplicação do cotidiano na área de optoeletrônica .

1. A FÍSICA DE ESTADO SÓLIDO EM CRISTAIS

A Física do Estado Sólido tem a tarefa de explicar toda uma série de comportamentos dispares [FIGUEIREDO, 2006], como suas propriedades térmicas, elétricas, ópticas, magnéticas e mecânicas.

Por volta de 1948, a Física do Estado Sólido recebeu um grande impulso devido à descoberta do transistor [MELLO, 1975]. Entretanto não foi apenas por causa de sua importância tecnológica que a nova área se desenvolveu rapidamente. A enorme variedade de fenômenos que os elétrons e os núcleos apresentam coletivamente em sólidos deu origem a descobertas fundamentais e excitantes [SBF, 1990].

A física do estado sólido tem, pois a tarefa de explicar, recorrendo às leis básicas da física, toda uma série de comportamentos dispares da matéria condensada [FIGUEIREDO, 2006].

A Física do Estado Sólido diz respeito, em grande parte, ao estudo dos cristais e dos elétrons nos cristais [KITTEL, 2013] e hoje está inserida na Física da Matéria Condensada.

Neste capítulo, discutiremos tópicos de Física do Estado Sólido como o comportamento de elétrons livres em metais, bandas de energia e a diferença entre materiais condutores, isolantes e semicondutores. Essa abordagem inicial é importante para se explorar o tema deste trabalho.

1.1 MODELOS DE ELETRONS LIVRES PARA METAIS

O modelo de elétron livre para os metais fornece boa visão para o entendimento da capacidade calorífica, das condutividades térmica e elétrica, da suscetibilidade magnética e da eletrodinâmica dos metais [KITTEL, 2013].

Muitas das propriedades eletrônicas dos metais podem ser compreendidas em termos do movimento livre dos elétrons no metal, explicado pelo *princípio de exclusão de Pauli* [LIMA, 2014]; significa que, após uma colisão, o elétron livre deve ocupar orbitais que estejam desocupados. E que a maioria dos átomos possui elétrons de valência, que são aqueles localizados no nível energético mais distante do núcleo atômico, num subnível representado por um orbital incompleto [EISBERG, 1982]. Vejamos o exemplo do átomo de sódio, ilustrado na figura 1.



Figura 1: (a) Representação do elemento sódio na tabela periódica (família 1A – metais alcalinos). (b) Representação do número atômico do sódio e a distribuição eletrônica de Pauli, com a ilustração do spin em seu último nível 3s.

Segundo a distribuição eletrônica de Pauli, este átomo tem 1 elétron de valência no orbital **3s**.

Os elétrons de condução num metal simples são provenientes dos elétrons de valência dos átomos constituintes. Num átomo de sódio, o elétron de valência está no estado 3s; no metal, este elétron se torna um elétron de condução, movendo-se através do cristal [KITTEL, 2013].

No caso do sódio, um metal alcalino, o elétron de condução está no que chamaremos mais adiante de **banda de condução** 3s. Já o íon Na^+ (cristal monovalente) apresenta um núcleo com 10 elétrons, representando em torno de 15% do volume do sódio cristalino. O raio do íon Na^+ é $0,98\text{\AA}$, como visto na Figura 2.

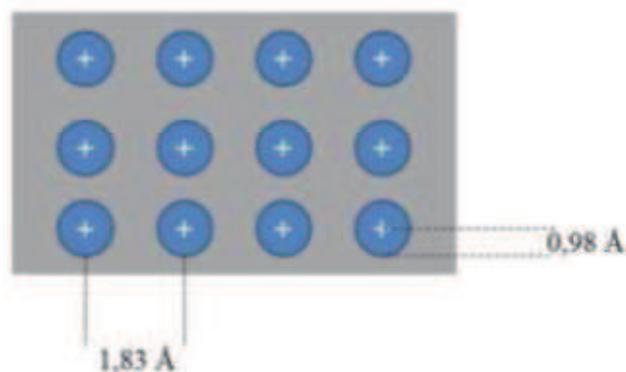


Figura 2: Modelo esquemático de um cristal de sódio, cujo raio do íon Na^+ vale $0,98\text{\AA}$, e a distancia interiônica é $1,83\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$).

O centro de cada átomo é constituído por um íon Na^+ ; os íons estão imersos num mar de elétrons de condução, que são elétrons de valência do nível $3s$ dos átomos de sódio. Cada núcleo atômica contém 10 elétrons de configuração eletrônica $1s^2 2s^2 2p^6$ [KITTEL, 2013].

Já os metais nobres, Cu, Ag, Au (cobre, prata e ouro), apresentam núcleos atômicos maiores (pois seus números atômicos são maiores), que podem estar em contato uns com os outros. Geralmente o livre caminho médio de um elétron livre num metal é aproximadamente 1 cm [REZENDE, 1996]. Isso significa que o elétron é capaz de se mover livremente na rede cristalina do metal, em linha reta e sem colidir com outros elétrons livres ou com núcleos atômicos. Esse fato acontece por duas razões:

- I. Um elétron de condução se movimenta através de ondas de matéria, que se propagam livremente numa estrutura periódica, que é o caso do arranjo dos núcleos na rede cristalina dos metais;
- II. Um elétron de condução sofre espalhamento somente por outros elétrons de condução, o que não ocorre com frequência. Esta propriedade é que descreve os elétrons de condução em metais como um **Gás de Fermi de elétrons livres** [ASHCROFT, 1976].

1.2 BANDAS DE ENERGIA E NÍVEL DE FERMI

Em Física do Estado Sólido, costumamos representar os níveis de energia de um material associado a **bandas**. Observe a representação na Figura 3 para os níveis de energia num átomo.

					Degenerescência (n^2)
$n = 4$	$4s^2$ $l=0$	$4p^6$ $l=1$	$4d^{10}$ $l=2$	$4f^{14}$ $l=3$	16 Estados Deg.
$n = 3$	$3s^2$ $l=0$	$3p^6$ $l=1$	$3d^{10}$ $l=2$	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$	9 Estados Deg.
$n = 2$	$2s^2$ $l=0$	$2p^6$ $l=1$	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$		4 Estados Deg.
$n = 1$	$1s^2$ $l=0$	$\uparrow\downarrow$			1 Estado Deg.

Figura 3: Distribuição dos níveis de energia num átomo, onde n representa o nível de energia (n° quântico principal), l representa o subnível energético (n° quântico secundário). O número de orbitais corresponde à degenerescência (n^2) de cada nível, isto é, à quantidade de estados degenerados.

Ao aproximarmos um átomo isolado de outro, os níveis de energia de cada um são perturbados levemente pela presença do vizinho. Se aproximarmos um grande número de átomos, teremos um grande número de níveis próximos uns dos outros, formando uma **banda de energia** [BEAM, 1965], como visto na Figura 4.

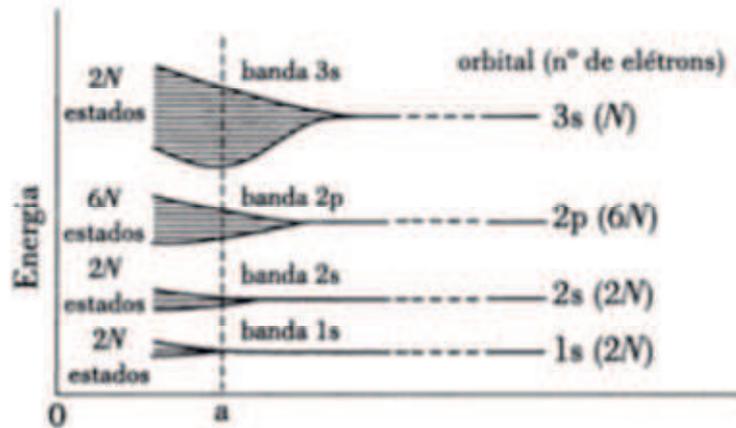


Figura 4: Formação de bandas de níveis de energia devido à aproximação de átomos em um sólido [REZENDE, 1996].

De modo ainda mais compacto podemos organizar as bandas em metais do modo ilustrado na Figura 5.

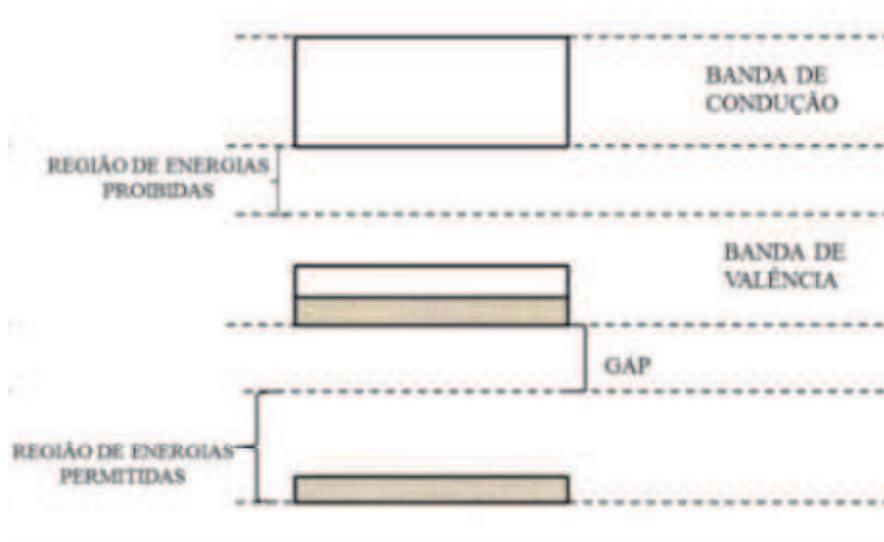


Figura 5: Modelo representativo das bandas de energia em metais.

De acordo com a Figura 5, as bandas com menor energia são mais estreitas que as bandas que possuem maior energia; isso acontece porque essas bandas de baixa energia correspondem a níveis do átomo isolado que são ocupados por elétrons que permanecem a

maior parte do tempo na região mais interna da nuvem de elétrons do átomo [HALLIDAY, 1991].

Aqui é oportuno definir o Nível de Fermi (n_f), o nível de energia mais alto que contenha elétrons, onde começamos a preencher os níveis com elétrons do nível mais baixo (E_f , $n=1$) até aquele que comporta o último elétron do metal. A condição $2n_f = n_e$ (onde n_e representa o número de elétrons do metal) determina n_f , que significa o valor de n (número quântico principal) para o último nível de energia ocupado. Dai podemos calcular a Energia de Fermi (E_f), como sendo energia do nível mais alto e com elétrons do estado fundamental do átomo [KITTEL, 2013].

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n_f \pi}{L} \right)^2 = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n_e \pi}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

Onde m é a massa do elétron e L é o comprimento de onda.

O sistema de bandas de energia é útil porque está ligado a como os elétrons de um material respondem a um campo elétrico aplicado. Se tivermos uma resposta rápida significa dizer que o material é um condutor de corrente elétrica. Qualitativamente isso pode ser analisado arranjando-se os elétrons da rede cristalina de um metal em **bandas de energia** como observamos na Figura 5, separadas por regiões de energias proibidas chamadas de **band gaps**; estas regiões resultam da interação entre as ondas de propagação dos elétrons de condução com os núcleos atômicos do cristal [KITTEL, 2013].

A separação (**gap**) entre a banda de valência (última banda que contém elétrons) e a banda de condução (vazia) determina a propriedade elétrica do material. Nos condutores os elétrons passam facilmente para a banda de condução e, portanto estão essencialmente livres. Neste caso, a propagação de um elétron está descrita por uma onda; e o envoltório de uma banda é a representação gráfica da própria onda de propagação, indicada pela função de onda independente do tempo de um elétron livre [GRIFFITHS, 2011].

$$\psi_{(\vec{r})=A} e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (2)$$

Onde A é a amplitude da onda, \vec{r} o vetor posição e \vec{k} o vetor de onda, associado ao momento linear carregado pela onda por, $\vec{p} = \hbar\vec{k}$.

A estrutura da banda de um cristal pode frequentemente ser descrita pelo modelo do elétron quase livre, para o qual os elétrons das bandas são tratados como perturbados apenas fracamente pelo potencial periódico dos núcleos iônicos [KITTEL, 2013].

Podemos explicar fisicamente a origem dos gaps de energia considerando o problema de um material sólido cristalino cujo parâmetro na rede seja a , conforme visto na Figura 6.

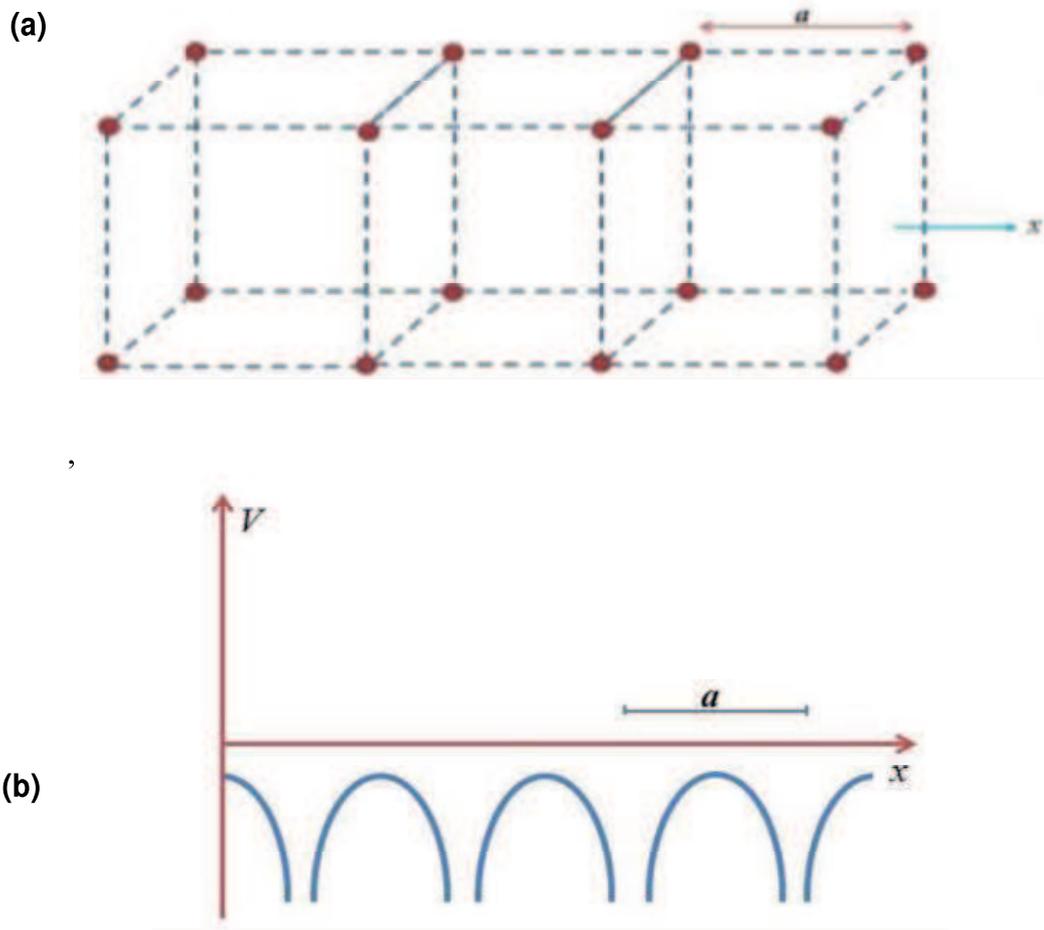


Figura 6: Estrutura cristalina (do tipo cúbica simples) para um sólido com parâmetro de rede a (a), e a energia potencial V de um elétron na rede cristalina ao longo do eixo x (b).

Segundo [HUMMEL, 1985], o problema consiste em considerar que problema envolve um só elétron, e que todos os elétrons são considerados parte integrante dos íons que criam um potencial periódico ao qual o sólido está submetido. E ainda que o potencial periódico ao qual o elétron está submetido leva à solução da equação de **Schrödinger** cujas energias formam bandas [HUMMEL, 1985].

As energias mais baixas da estrutura de bandas podem ser vista na Figura 5, e mais detalhada na figura 7, para um elétron totalmente livre, e na figura 8 para o elétron “Nearby Free” ou elétrons quase livres.

Energia potencia para o elétron livre.

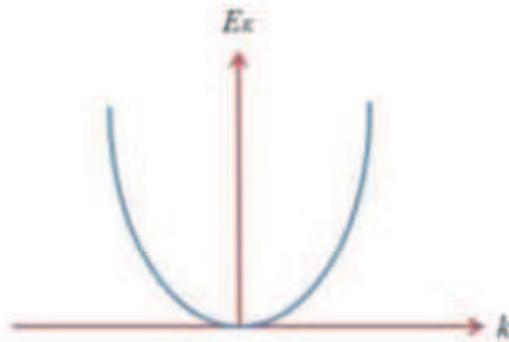


Figura 7: Situação ideal que ilustra a energia potencial do elétron livre em função do vetor de onda.

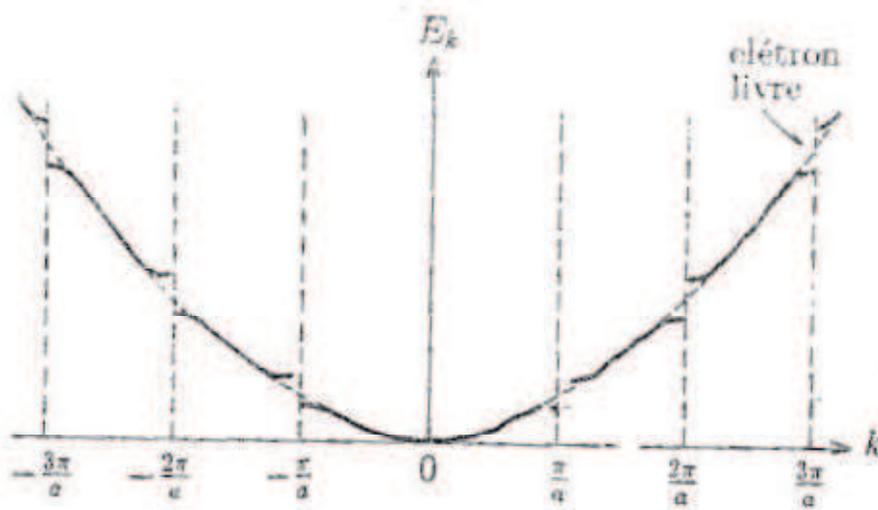


Figura 8: Situação real do elétron quase livre, mostrando as regiões de energia proibida (gaps de energia) [REZENDE 1996].

Na Figura 8, observamos a relação de dispersão entre E_k e o vetor de onda em função do parâmetro da rede a .

Comparando as figuras 7 e 8, vemos que, para o elétron numa rede cristalina, a energia potencial não é contínua, isto é, o potencial ao qual o elétron é submetido é periódico, o que altera a relação entre (E_k, k) . Podemos comparar este comportamento ao efeito de uma grade de difração e usar a equação que leva em conta a relação entre o parâmetro a e os mínimos de difração para encontrarmos a relação entre o módulo do vetor de onda e o parâmetro da rede. Considerando a periodicidade da rede em uma dimensão, as ondas que se propagam na mesma e são mais afetadas são as que têm o vetor de onda satisfazendo a condição de Bragg [KITTEL, 2013].

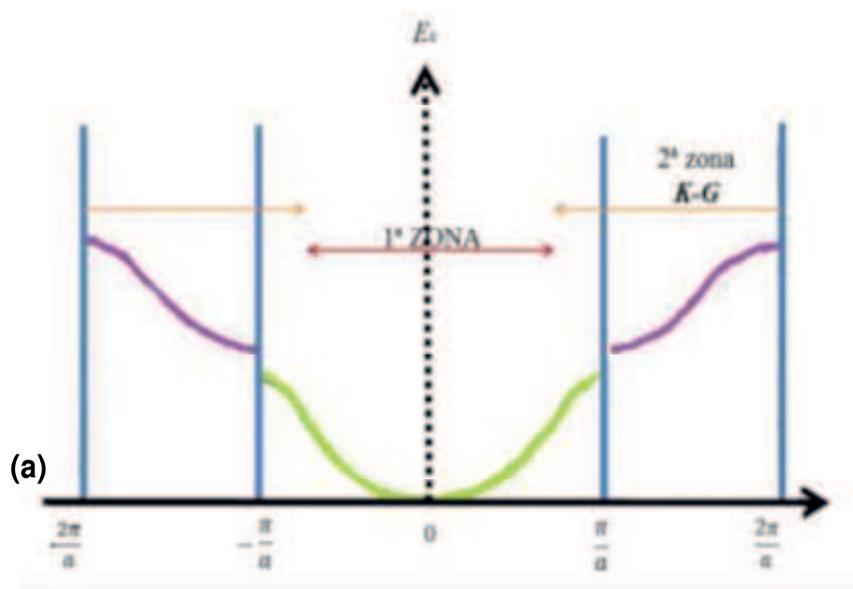
$$2a \sin \theta = n\lambda = n \frac{2\pi}{k} \quad (3)$$

Onde usamos $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, com $a = \frac{n\lambda}{2}$ para $\sin \theta = 1$. Desse modo, a curva de dispersão contínua da Figura 7 divide-se em duas, na figura 8, que representa a separação das linhas sólidas em bandas de energia dos estados eletrônicos. Os elétrons de um sólido cristalino, portanto, só podem ocupar estados ou níveis de energia que estejam no interior dessas bandas.

A teoria de bandas de energia para o elétron também pode ser abordada pelo esquema de zona reduzida, que exhibe a condição de difração expressa na equação (3), estudada pela primeira vez em sólidos por Brillouin [KITTEL, 2013].

A reflexão do equilíbrio de E_k (Figura 8) para $k = -\frac{\pi}{a}$ surge porque a onda refletida por um átomo da rede linear interfere construtivamente com as ondas refletidas pelos átomos vizinhos mais próximos [FIGUEIREDO, 2006]. A região no espaço com k entre $-\frac{\pi}{a}$ e $\frac{\pi}{a}$ corresponde à primeira zona de Brillouin da rede [KITTEL, 2013].

Uma zona de Brillouin é definida como uma célula primitiva na rede cristalina periódica de um sólido. Deslocando-se a segunda zona de Brillouin no espaço de momentum subtraindo-se um vetor $G = \frac{2\pi}{a}$ de um vetor k localizado na segunda zona, com $\frac{\pi}{a} < k < \frac{2\pi}{a}$, temos o deslocamento de bandas ilustrado na Figura 9.



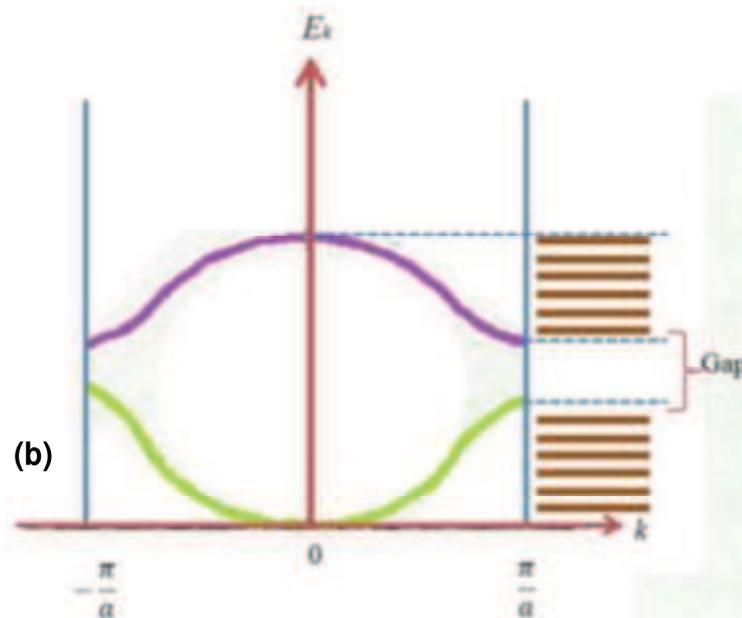


Figura 9: Deslocamento das bandas na segunda zona de Brillouin de $\pm \frac{2\pi}{a}$ (a). Esquema de bandas reduzido à primeira zona após o deslocamento (b).

Estas operações mostradas nas Figuras 9 (a) e (b), para as primeiras bandas, resultam no esquema de **bandas reduzido à primeira zona**. Neste esquema fica evidente que não há estados eletrônicos entre as bandas de energia, isto é as regiões entre as mesmas são **faixas proibidas** de energia, os band gaps [HUMMEL, 1985].

1.3 CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES

A natureza das bandas de energia determina se um material é um isolante, um semicondutor ou um condutor [YOUNG, 2009].

Num cristal com n elétrons, o estado fundamental é obtido preenchendo os níveis de menos energia primeiramente. Logo em um cristal a $T=0K$ (estado fundamental), há varias bandas cheias com elétrons, sendo a última necessariamente cheia por completo ou pela metade [REZENDE, 1996]. As propriedades de condução do cristal dependem do comportamento desta última banda.

Além disso, é sabido que, nos isolantes a zero absoluto, a banda de energia mais elevada que esta completamente preenchida é chamada **banda de valência**, onde existem elétrons. A banda mais elevada seguinte é chamada de **banda de condução** que é completamente vazia. [YOUNG, 2009]. Neste caso a aplicação de um campo elétrico num

crystal desse tipo não altera o comportamento de seu Estado Fundamental, pois todos os estados disponíveis estão ocupados [REZENDE, 1996].

Por definição, um isolante é um sólido através do qual não pode fluir uma corrente de elétrons direcionados [HALLIDAY, 1991]. Isso explica porque os isolantes não conduzem corrente elétrica. O nível de energia acima do qual não há estados ocupados á temperatura $T=0K$ é o nível de Fermi, já discutido anteriormente.

Aqueles materiais com a última banda de energia semicheia, conhecidos como condutores, são os metais alcalinos e metais nobres. Neste caso é possível modificar os estados dos elétrons aplicando um campo elétrico, o que resulta em corrente elétrica [SOBRAL, 2007]. Os metais nobres (Cu^{29} , Ag^{47} , Au^{79}), por exemplo, tem um número atômico ímpar, o que significa que os elétrons de maior energia em cada um deles são os externos ao último nível completo.

Em um material condutor, como um metal, existem elétrons na banda de condução até mesmo no zero absoluto [YOUNG, 2009]. Seu sistema de ocupação de banda é observado na Figura 10 em analogia ao dos isolantes. As bandas de metais alcalinos (família 1A da tabela periódica) apresentam o mesmo comportamento que no caso dos metais nobres. Na Figura 10(a) é observado a banda de valência (BV) totalmente preenchida no estado fundamental num material isolante. Neste caso, o nível de Fermi (de energia E_F) encontra-se entre esta banda BV e a seguinte, banda de condução (BC), que está vazia. Na figura 10(b) é observado a BC parcialmente preenchida no estado fundamental; por isso o nível de Fermi é o último contendo elétrons dentro desta banda.

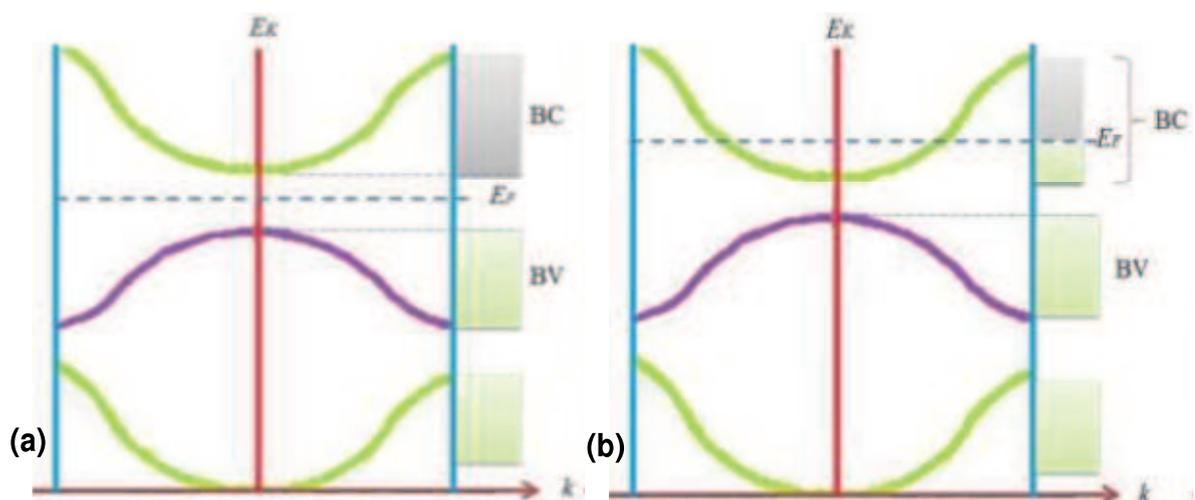


Figura 10: Esquema de bandas de energia (reduzida à primeira zona de Brillouin) no estado fundamental (a $T = 0K$) para os dois isolantes (a) e para materiais condutores mostrando a última banda semicheia (b) E_F representa a energia do nível de Fermi.

Já os metais alcalinos terrosos (família 2A da tabela periódica) apresentam o esquema de bandas da Figura 11. Nela vemos que o topo da última banda, que seria totalmente preenchida, está acima do mínimo da banda seguinte. Pelo fato de os elétrons ocuparem os estados de menos energia, aqueles que estavam no topo da banda cheia, passaram para a próxima banda, ficando ambas incompletas [REZENDE, 1996]. Sendo assim, ao se aplicar um campo elétrico a um metal da família 2A da tabela periódica, os elétrons são deslocados de seus estados e há a passagem de corrente elétrica, mas menos intensa que nos metais alcalinos nobres. Assim um material desse tipo é chamado de semimetal. [REZENDE, 1996].

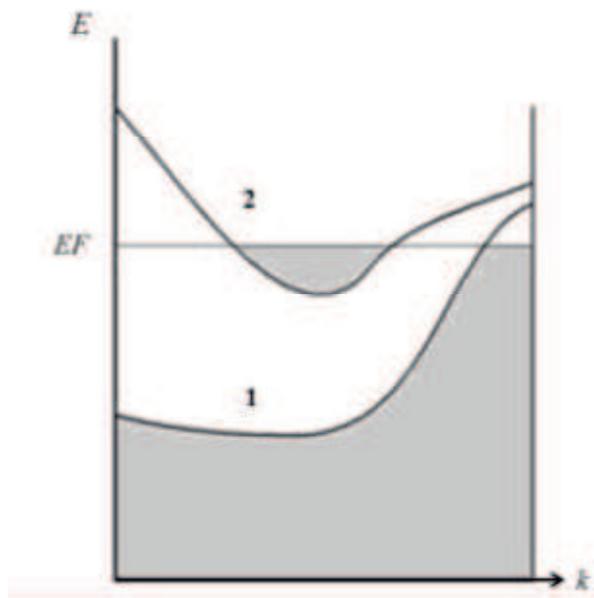


Figura 11: Ocupação das bandas de energia em semimetais [SOBRAL, 2007]. O nível de Fermi possui energia E_F .

Os semicondutores são caracterizados por uma banda de valência cheia BV e uma banda de condução vazia BC a $T=0K$, separadas por um **gap** de energia relativamente pequeno, $E_g < 2 eV^2$ [REZENDE, 1996].

Em um semicondutor, assim como num isolante, o mais alto nível preenchido (no zero absoluto) ocupa o topo de uma banda. Contudo o semicondutor difere de um isolante justamente por ter a lacuna entre as bandas de valência e condução, isto é, o gap de energia muito menor do que aquele do isolante [HALLIDAY, 2011].

² $1eV = 1,6 \times 10^{-19} J$

De um modo geral, um cristal semiconductor puro perfeito torna-se isolante no zero absoluto [KITTEL, 2013].

Ao alterarmos a estrutura de um semiconductor através do processo de dopagem (depositando impurezas no mesmo), temos a possibilidade de fabricar dispositivos eletrônicos com o mesmo material semiconductor como base.

Até o momento verificamos definições que levaram em conta o comportamento dos cristais em $T=0K$. Nesta temperatura a condutividade é nula, porque todos os estados da banda de valência BV estão ocupados e todos os da banda de condução BC estão vazios. À medida que a temperatura aumenta alguns dos elétrons da BV são excitados termicamente e passam para a BC, tornando-se móveis [FIGUEIREDO, 2006], como ilustrado na Figura 12, onde se verifica que o gap de energia $E_g = E_c - E_v$ é definido pela diferença entre as energias do mínimo e do topo da BC e da BV, respectivamente.

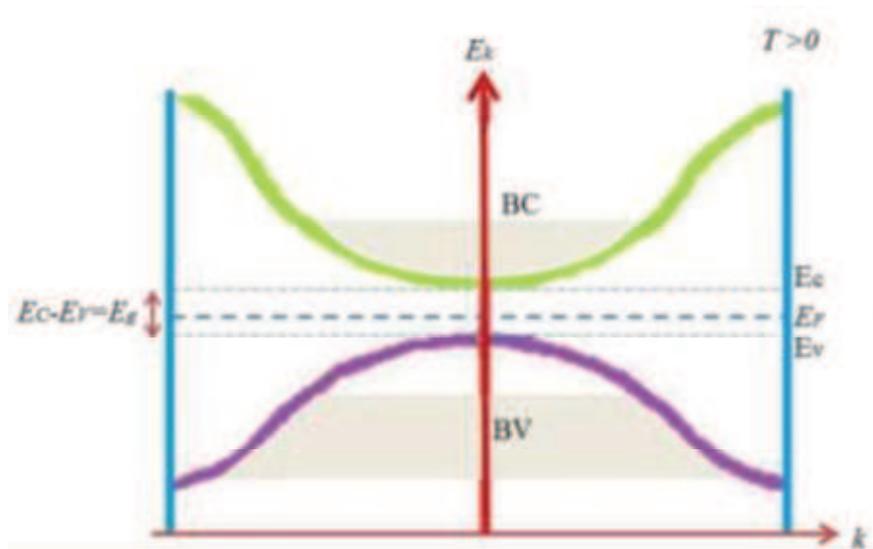


Figura 12: Bandas de valência e de condução em semicondutores. As regiões escuras representam a ocupação dos elétrons a $T > 0$. A distância entre bandas e o gap de energia, $E_g = E_c - E_v$

A passagem desses elétrons para a BC deixa a BV com estados que se comportam como portadores de carga elétrica, denominadas **buracos**.

Sendo assim se houver campo elétrico (\mathbf{E}) diferente de zero, aplicado a um isolante a uma temperatura maior que zero, surge uma corrente elétrica.

A condutividade deste material passa a depender do número de elétrons que vão para a BC e será tanto maior quanto mais alto for T e menos for o **gap** de energia (E_g) que separa as

BV e BC. Os cristais que são naturalmente isolantes a $T=0K$, mas apresentam **gap** pequeno ($E_g \leq 1 \text{ eV}$) à temperatura ambiente ($T \sim 298K$) têm condutividade significativa e por isso são chamados de **semicondutores**.

Nesses materiais o número de elétrons na banda de condução pode ser significativo em relação a um isolante, mas é ainda muito menor que o número de elétrons livres num metal [REZENDE, 1996]. A principal diferença entre um isolante e um semicondutor é o valor da energia do **gap** (E_g). Por exemplo, comparando o silício (Si) com o diamante vemos que o primeiro tem $E_g = 1,1 \text{ eV}$ e o segundo tem $E_g = 5 \text{ eV}$, e ambos possuem a mesmo tipo de estrutura cristalina à temperatura ambiente. Mas o Si é considerado um ótimo semicondutor, enquanto o diamante é um ótimo isolante.

À medida que a temperatura aumenta, os elétrons ficam termicamente excitados e passam da BV para a BC. Tanto os elétrons da BC quanto os orbitais vazios ou buracos deixados na BV contribuem para a condutividade elétrica [KITTEL, 2013].

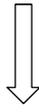
Para entender o mecanismo de passagem de corrente elétrica em metais e semicondutores, é preciso estudar como um elétron se comporta no material sob ação de um campo externo \mathbf{E} aplicado.

O elétron cuja energia vale $E = \hbar\omega$, pode ser representado por um pacote de onda que se movimenta com velocidade de grupo:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial}{\partial k} (E/\hbar) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} \quad (4)$$

Onde ω é frequência da energia, que varia com o vetor de onda k . Se o elétron for submetido a uma força elétrica \mathbf{F} , podemos encontrar sua magnitude partindo do principio de que sua energia potencial varia de dE enquanto o mesmo percorre uma distancia dx , realizando um trabalho $d\omega = dE$. Assim, usando a equação (4) e o conceito $v_g = \frac{\partial x}{\partial t}$, temos:

$$d\omega = dE = Fdx = \hbar v_g dk = \hbar \frac{dx}{dt} = dk$$



$$F = \hbar \frac{dk}{dt} = \frac{dp}{dt}, F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

Onde foi usado que a equação (5) representa a segunda lei de Newton em função do momento linear (p), o que significa que a rede cristalina do material não afeta a variação de k ;

o que ele altera é como a energia E muda com o momento linear do elétron, que corresponde a este ter sua massa alterada. Para verificarmos isso, temos que:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{dv_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dk} \right) \frac{dk}{dt} \\
 a &= \frac{1}{\hbar} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial^2 k} \right) \frac{dk}{dt} \\
 a &= \frac{1}{\hbar} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial^2 k} \right) \frac{F}{\hbar} \\
 F &= \frac{\hbar^2}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial^2 k} \right)} a = m^* a
 \end{aligned} \tag{6.a}$$

e

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial^2 k} \right)} \tag{6.b}$$

Onde m^* corresponde à massa efetiva de um elétron no cristal na presença de um campo E externo, que se comporta como um elétron livre. Aqui $m^*=m$, ou seja, a massa efetiva é a própria massa do elétron livre [REZENDE, 1996]. E usamos o conceito de $E=E(k)$, isto é, a energia só depende de k ; mas em geral, para metais e semicondutores a energia e , portanto, a massa efetiva, depende da direção de k :

$$m_{\alpha\beta}^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E}{\partial k_\alpha \partial k_\beta}} \tag{7}$$

A equação (7) leva em conta as direções de propagação estabelecidas pelo vetor de onda k . Esta é uma grandeza tensorial sobre a qual não entraremos em detalhes neste trabalho.

2. MATERIAIS SEMICONDUTORES

Os semicondutores são materiais que apresentam uma condutividade intermediária entre os isolantes e os metais, ou seja, não são perfeitos condutores nem isolantes plenos, o que justifica o nome que lhes é atribuído. Logo, podemos classificar os semicondutores em dois tipos, os intrínsecos e os extrínsecos, e a diferença entre eles está em sua composição [PEREIRA, 2016].

A principal característica dos elementos semicondutores é a de possuir um gap de energia entre as bandas de valência (BV) e banda de condução (BC). Portanto, para que um elétron passe da BV para a BC é necessário que ele receba a quantidade de energia necessária para que os portadores possam atravessar o gap [RODRIGUES, 2012].

Os elementos semicondutores podem ser modificados quimicamente podendo, deste modo, ter a sua capacidade de transmitir e controlar uma corrente elétrica aumentada [SOBRAL, 2007]. A versatilidade dos semicondutores pode ser grandemente aumentada pela introdução de um pequeno número de átomos substitutos (chamados de impurezas) na rede do semicondutor, num processo denominado de dopagem [HALLIDAY, 1991].

2.1 GAP DIRETO E INDIRETO

Para isolantes e semicondutores, chama-se de *gap* a região de separação entre a BV e a BC. Quando o topo da BV e o mínimo da BC estiverem alinhados com o mesmo valor do vetor de onda k , o semicondutor possui *gap direto* e se estiverem posicionados de forma a terem valores distintos de k , então o semicondutor é de *gap indireto* [MARQUES, 2009], conforme ilustrado na Figura 13.

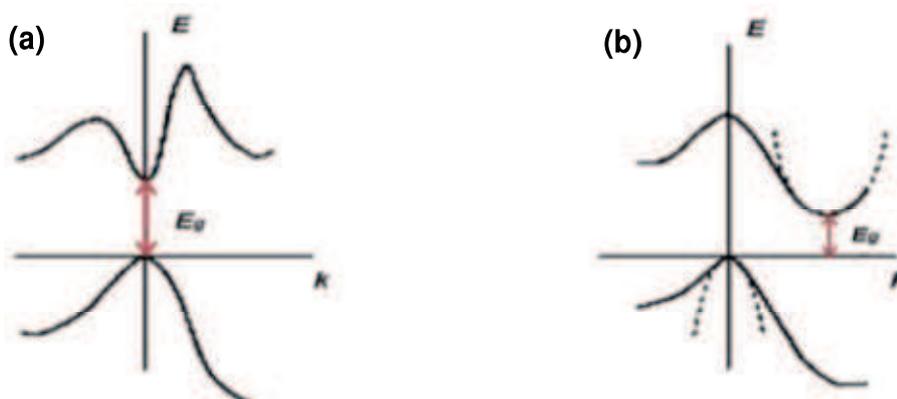


Figura 13: Representação de bandas de semicondutores de *gap direto* em (a) e de *gap indireto* em (b) no gráfico que expressa a energia (E) em termos do vetor de onda (k). A aproximação parabólica das BV e da BC é mostrada pelas curvas pontilhadas em (b) [MARQUES, 2009]

Depois do Si (Silício), o GaAs (Arseneto de Gálio) é o material semiconductor mais utilizado na indústria de dispositivos semicondutores. GaAs possui gap direto, ao contrario do Si que possui gap indireto [FELIX, 2009].

Em um processo direto de absorção, o limiar da absorção óptica relaciona-se com a frequência ω_g , que determina a energia associada à largura da banda proibida, $E_g = \hbar\omega_g$. Em um processo indireto de absorção, a distância mínima entre o máximo da banda de valência e o mínimo da banda de condução envolve elétrons e buracos separados por um vetor de onda k_c [KITTEL, 2013].

Como a transição em semicondutores de gap indireto envolve fônons (excitações mecânicas que se propagam na rede de um sólido cristalino) e fótons (partícula de luz) [REZENDE, 1996], a probabilidade de emissão e absorção de fótons é menor que no caso de gap direto. Por esta razão é preciso utilizar semicondutores de gap direto para fabricar lasers e diodos emissores de luz (LED) [REZENDE, 1996].

2.2 SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS

Os semicondutores intrínsecos são, de uma maneira geral, encontrados na natureza na sua forma mais pura, isto é, em que a concentração de portadores de cargas positivas e negativas é igual. Além disso, são caracterizados por sua baixa condutividade e dependência da temperatura, que por sua vez altera a própria condutividade, o que leva a serem pouco utilizados. [PEREIRA, 2016].

Dos diversos tipos de semicondutores, temos dois muito comuns e utilizados, que são o **Ge** (germânio) e o **Si** (silício). Por possuírem quatro elétrons de valência (no seu nível de energia mais externo) estes elementos conseguem realizar quatro ligações com outros quatro átomos.

Num semiconductor à temperatura finita, devido à excitação térmica, um certo número de elétrons passa da BV para a BC. Por conseguinte, se ele é submetido a um campo elétrico, as duas bandas contribuem para a condução de corrente elétrica [REZENDE, 1996].

Num semiconductor puro ou intrínseco, o número de buracos na BV é igual ao número de elétrons na BC. Quando aplicado um campo elétrico esses portadores se movem em sentidos contrários. Portanto, um buraco na BV se comporta como uma carga positiva, embora as cargas que se deslocam na banda sejam elétrons [HALLIDAY, 1991]. Neste mesmo semiconductor a $T=0$ (zero absoluto) e sem qualquer perturbação externa, não há

elétrons na BC e nem buracos na BV, em outras palavras não há portadores de cargas elétricas [REZENDE, 1996], estes só aparecem se o cristal for excitado termicamente. Neste caso, a passagem de um elétron para a BC sempre corresponde à criação de buraco na BV é o que chamamos de criação par elétron-buraco [KITTEL, 2013].

Pares elétrons-buracos também aparecem em processos como o de absorção óptica, como visto na Figura 14. Desse modo, quando um fóton de energia $\hbar\omega$ é absorvido, um elétron da BV vai para a BC, isto é, a absorção de um fóton é acompanhada da criação do par elétron- buraco. Os vetores de onda são, respectivamente para o elétron e buraco, \vec{k}_e e \vec{k}_b , onde $\vec{k}_b = -\vec{k}_e$, dessa forma, momento total se conserva, pois $\hbar\vec{k}_b + \hbar\vec{k}_e = 0$ [REZENDE, 1996].

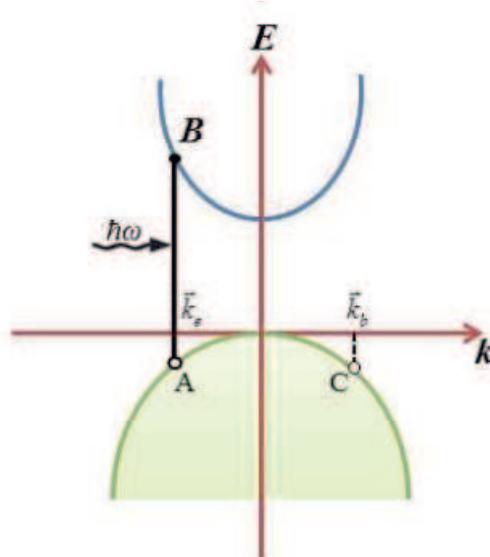


Figura 12: Absorção de um fóton de energia $\hbar\omega$ leva um elétron do ponto **A** na BV para o ponto **B** na BC. k_e e k_b são respectivamente vetores de onda associados ao elétron e ao buraco (par elétron-buraco).

Nos materiais semicondutores intrínsecos, como para cada elétron livre gerado tem-se uma lacuna correspondente, o movimento destas não pode ser desconsiderado e, portanto, quando um semicondutor é submetido a um potencial elétrico, tanto na condução dos elétrons num sentido quanto a das lacunas no sentido contrário são importantes.

No equilíbrio térmico, afirmamos que a concentração de elétrons (n) na BC e de buracos (p) na BV é:

$$n = p = n_i, \quad (8)$$

Onde n_i representa a concentração de portadores intrínsecos, que é igual nas duas bandas quando o semicondutor é intrínseco.

A taxa de criação de buracos na BV, g , representa o número de pares gerados por unidade de volume por unidade de tempo. Ao mesmo tempo, elétrons recombinam com buracos a uma taxa de recombinação r , como ocorre no caso da excitação térmica.

No caso da absorção de fótons, a recombinação é comprovada pela emissão de fótons. Aqui destacamos que, independente do processo, o número de pares é constante, ou seja, as taxas de criação e recombinação são iguais [REZENDE, 1996].

$$r = g \quad (9)$$

A equação (9) corresponde ao princípio de balanceamento detalhado.

2.3 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

Sabemos que os semicondutores intrínsecos são aqueles encontrados de forma pura na natureza, mas os mesmos têm pouca utilização em dispositivos por sua baixa condutividade e por depender muito da temperatura. De uma maneira geral, utiliza-se de semicondutores com impurezas ou, como abordado anteriormente, materiais que, propositalmente sofrem o processo de dopagem. Através desse processo é possível fazer com que o número de elétrons seja maior que o número de buracos, ou vice-versa. Semicondutores com impurezas são chamados de extrínsecos [REZENDE, 1996].

Este tipo de semicondutor pode ser subdividido em dois outros tipos; **tipo n**, aqueles que possuem mais elétrons do que buracos, e **tipo p**, em que o número de buracos é predominante [PEREIRA, 2016].

Contrariamente aos semicondutores intrínsecos, os semicondutores extrínsecos do **tipo p** e do **tipo n** possuem a condutividade mais elevada, que é caracterizada por um processo específico de condução via elétrons ou buracos [SILVA, 2005]. O processo de dopagem permite o controle do fluxo de elétrons e buracos entre as bandas, e consequentemente das propriedades elétricas do semicondutor [MARQUES, 2009].

No interior do semiconductor do **tipo n** a carga dos elétrons moveis é compensada pelos doadores positivos imobilizados, enquanto que nos do **tipo p** têm-se buracos móveis e aceitadores negativos imobilizados, mantendo-se portanto um equilíbrio entre os portadores de carga: no **tipo n** estes são elétrons e no **tipo p** são buracos [SILVA, 2005].

Denominamos **doadores** átomos de impurezas capazes de fornecer elétrons, e **receptores** ou **aceitadores** impurezas que podem receber elétrons da BV, deixando buracos nesta banda [KITTEL, 2013].

Podemos calcular os níveis de energia das impurezas no gap de um semiconductor considerando o modelo do átomo de hidrogênio, que é um modelo simples, utilizando a equação (10):

$$E = \frac{m_e^* e^4}{2(4\pi \epsilon)^2 \hbar^2} \equiv \frac{m_e^*}{m_0} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right) E_H, \quad (10)$$

em que ϵ é a permissividade do cristal, m_e^* é a massa efetiva de condução, $E_H = \frac{e^4 m_0}{32\pi^2 \epsilon \hbar^2 \epsilon_0}$ como sendo a energia no átomo de hidrogênio, cujo valor, calculado com $m_e^* = m_0$ e $\epsilon = \epsilon_0$ é $E_H = 13,6$ eV [REZENDE, 1996].

2.4 CORRENTE DE CONDUÇÃO EM SEMICONDUTORES

Para cristais semicondutores, existem dois mecanismos responsáveis pelo movimento dos elétrons e dos buracos: a corrente de deriva e a de difusão.

A corrente de condução, ou deriva, resulta do lento deslocamento médio de portadores de carga produzido por um campo elétrico externo, simultâneo com o movimento rápido e aleatório característico das partículas em agitação térmica. Esta corrente é da mesma natureza que nos metais, entretanto, nos semicondutores, ela é formada tanto por elétrons quanto por buracos [REZENDE, 1996].

Quando um campo elétrico de intensidade \mathcal{E} é aplicado num semiconductor, surge uma densidade de corrente dada por:

$$\mathbf{J}_n = \sigma_n \mathcal{E}, \quad (11)$$

onde a condutividade σ_n devida aos elétrons é dada por

$$\sigma_n = \frac{e^2 n_0 \tau_e}{m_e^*} \quad (12)$$

Na equação (12) n_0 é a concentração de equilíbrio de elétrons e τ_e representa tempo de colisão do elétron. Como a condutividade resulta do movimento médio do conjunto de elétrons, é útil definir uma nova grandeza, que descreve a facilidade de deslocamento de cada elétron sob a ação de um campo externo. Essa grandeza é a mobilidade expressa por [REZENDE, 1996].

$$\mu = \frac{v}{\mathcal{E}} \quad (13)$$

Temos a mobilidade dos elétrons dada por,

$$\mu_n = \frac{e^2 \tau_e}{m_e^*} \quad (14)$$

Por esta definição observamos que a mobilidade envolve explicitamente apenas parâmetros intrínsecos do material, entretanto ela depende indiretamente da concentração de impurezas, uma vez que este é um fator determinante do tempo de colisão τ_e [MELLO, 1975].

Os elétrons livres e os buracos são acelerados pelo campo eléctrico e adquirem uma velocidade de deriva. Se a intensidade do campo eléctrico for designada por \mathcal{E} então os buracos deslocar-se-ão no sentido do campo com uma velocidade:

$$v = \frac{\mu_p}{\mathcal{E}} \quad (15)$$

onde μ_p designada a mobilidade dos buracos [ISCTE, 2017].

Para além da corrente de condução ou deriva o transporte de cargas num semiconductor pode ser resultado de um outro mecanismo chamado de difusão, o qual está associado ao movimento aleatório provocado pela agitação térmica.

Num semiconductor é possível haver uma concentração não uniforme de partículas, portanto o gradiente de concentração resultante produz movimento de portadores. A existência de um gradiente implica que tomando como referência uma superfície imaginária, a densidade de lacunas de um dos lados da superfície é superior à densidade de lacunas existente do outro lado.

Como portadores possuem cargas elétricas, seu movimento de difusão resulta numa corrente elétrica, a corrente de difusão.

É no momento da difusão que, após certo tempo, uma gota de tinta, por exemplo, colocada em água espalha-se uniformemente. Neste processo, cada molécula, tanto na tinta quanto na água, move-se numa direção arbitrária até colidir com outra. Após o choque as moléculas se movem em outra direção, em movimento aleatório.

Para obter a equação que descreve o movimento de difusão, vamos considerar um modelo simples em uma dimensão. Se a concentração de buracos for à mesma à esquerda ou a direita de x , o número líquido de buracos que atravessa o plano perpendicular ao eixo x é nulo, assim como a corrente elétrica [REZENDE, 1996].

Desse modo, temos a densidade de corrente de difusão dos buracos na direção positiva de x dada por;

$$J_p^{dif} = -eD_p \frac{dp(x)}{dx}, \quad (16)$$

Onde $D_p = \frac{\ell^2}{2\tau}$ é o coeficiente de difusão dos buracos com ℓ sendo a distância média percorrida e $p(x)$ representa a concentração de buracos ao longo do eixo x . Do mesmo modo temos a corrente de difusão dos elétrons. Como o elétron tem carga negativa temos:

$$J_n^{dif} = +eD_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad (17)$$

Sendo D_n o coeficiente de difusão e $n(x)$ a concentração de elétrons. Portanto, de acordo com as equações (16) e (17), vemos que a corrente de difusão será nula se não houver variação espacial da concentração de portadores [REZENDE, 1996].

3. O USO DO LED PARA TRANSMISSÃO DE DADOS

Neste capítulo, daremos ênfase ao uso dos semicondutores no dispositivo denominado diodo emissor de luz, também conhecido pela sigla em inglês LED (light emitting diode), que possibilitou um vasto avanço nos diversos ramos tecnológicos, dentre os quais destacamos a comunicação e a iluminação. No setor das comunicações, a aplicação dos LEDs como fonte óptica na transmissão de dados foi possível devido aos mesmos emitirem luz em diferentes comprimentos de onda. Já no setor da iluminação (doméstica e de uso mais geral), o principal interesse era a fabricação de um LED que possuísse uma forma mais duradoura e eficiente de emissão luminosa, que seria a de luz branca.

Até 1993 só existiam dois dos três tipos de diodos emissores de luz necessários para produção de LED branco: LEDs emitindo nos comprimentos de onda vermelho, constituídos pelo semicondutor GaAsP (fosforeto de gálio e arsênio) e no comprimento do verde constituído pelo semicondutor InGaN (nitreto de gálio e índio). Logo não se podia obter um LED de luz branca [CONCEIÇÃO, 2015]. Depois disso, o japonês Shuji Nakamura desenvolveu o LED azul, formado por GaN (nítreto de gálio), e o verde, formado por InGaN (nítreto de gálio e índio), de forma mais eficiente. Com o desenvolvimento do LED azul nos anos 90, Shuji Nakamura, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano conquistaram o Nobel de Física no ano de 2014 [VEJA, 2014]. A partir daí, utilizando a mistura das três cores primárias (vermelho, verde e azul) de LED, foi possível fabricar o diodo emissor de luz branca. Este LED permite obter uma elevada largura de banda, o que o torna adequado para comunicação óptica com alta taxa de transmissão [CONCEIÇÃO, 2015].

O LED ainda possui como característica uma taxa de variação de corrente rápida, diferente das fontes de luz incandescentes e fluorescentes, possibilitando a modulação da informação a ser transmitida.

A transmissão de dados em várias portadoras em comprimentos de onda (cores) diferentes é possível. Um exemplo é o uso de LEDs RGB (que acoplam as cores associadas aos comprimentos de onda vermelho, verde e azul), visto na Figura 15, onde utilizamos cada componente de cor em separado para uma portadora. Um exemplo de aplicação é o *sound spot* (ponto de som), ilustrado na Figura 16, desenvolvido pela Universidade de Keio, no Japão, e a JVC. Através dele, a luz emitida em cores diferentes enviam fluxos de áudio diferentes [JUNIOR, 2011].

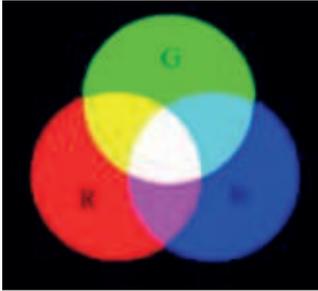


Figura 15: RGB é a abreviatura do sistema de cores aditivas formado por vermelho (red), verde (green) e azul (blue).



Figura 16: Sound spot (ponto de som) constituído por três spots de cores diferentes (vermelho, verde e azul), que conectados a instrumentos de uma banda, cada cor enviará um fluxo de áudio diferente. Se o fotodetector receber apenas uma portadora apenas aquele áudio será ouvido [HARUYAMA, 2011].

O diodo emissor de luz branca, WLED (white light emitting diodes), e a visão geral de um LED são representados da Figura 17. Os WLEDs são superiores a qualquer outra fonte de iluminação no que diz respeito à eficiência luminosa e substituíram rapidamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Eles têm baixo consumo de energia e longa vida de duração, e por isso, são chamados de *ecofriendly*. Além disso, os custos de manutenção são baixos e o brilho pode ser ajustável [MOON, 2014].

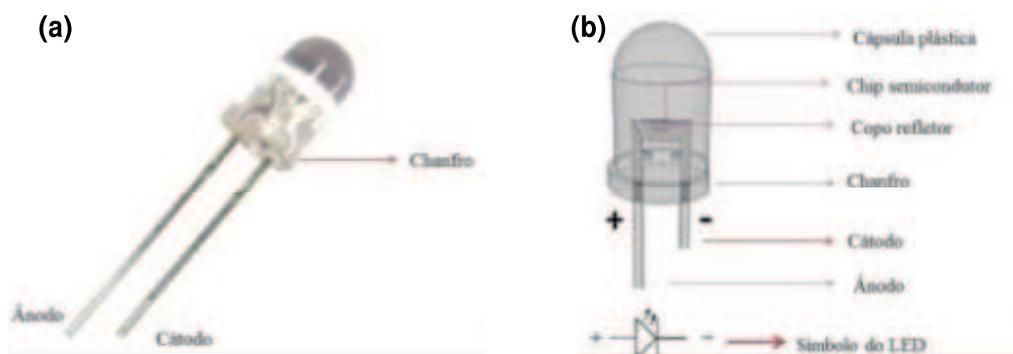


Figura 17: (a) WLED ou LED branco de alto brilho; em (b) Visão geral do LED composto por um chip semiconductor responsável pela geração de luz, um copo refletor, um terminal maior chamado de ânodo (positivo), e um menor chamado de cátodo (negativo), que também é reconhecido pelo chanfro. E o símbolo do LED na eletrônica.

A sua utilização em iluminação de emergência e decorativa começa a ser cada vez mais frequente. E seu uso em painéis publicitários também começa a ter um grande impacto, sobretudo porque permite maiores efeitos estéticos quando comparado a meios de iluminação convencionais. Além disso, o custo em manutenção e a economia em consumo são significativamente mais baixos do que nos sistemas tradicionais.

3.1 O LED NA ELETRÔNICA

A conversão de um sinal elétrico em um sinal luminoso é uma função importante na eletrônica [REZENDE, 1996]. O uso comercial do LED começou no final de 1960. Os primeiros LEDs, hoje obsoletos, eram conhecidos como pequenas lâmpadas coloridas usadas como indicadores em diversos tipos de aparelhos eletrônicos. Mais tarde LEDs foram utilizados em *displays* alfanuméricos (compostos por pontos e barras), nas primeiras calculadoras e relógios eletrônicos [NOVOA, 2005].

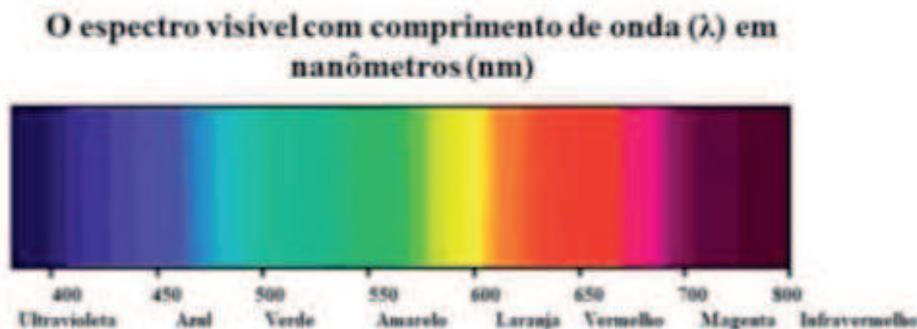
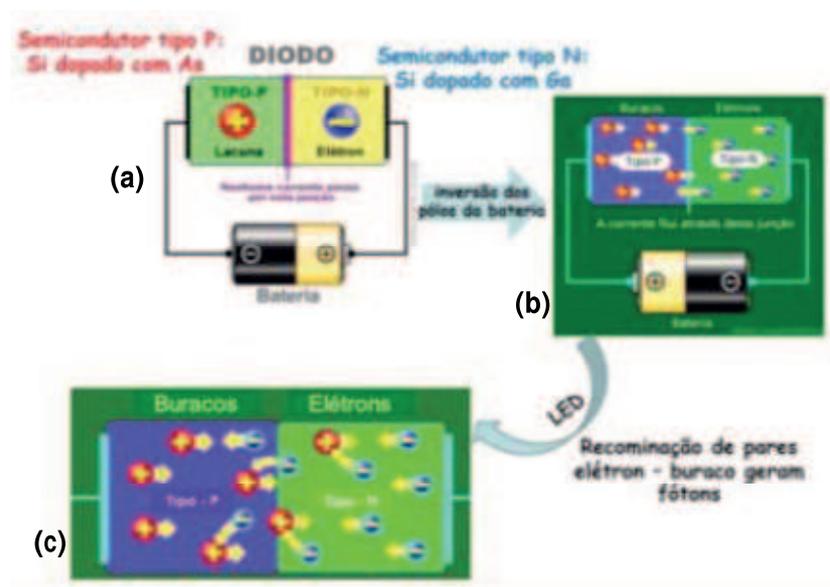


Figura 18: Espectro do Visível que vai do ultravioleta ao infravermelho.

Os LEDs comerciais, projetados para a região do visível, como visto na Figura 18, são usualmente baseados num material semicondutor composto de gálio (Ga), arsênio (As) e fósforo (P). Os LEDs que operam na região do infravermelho são muito usados em sistemas de comunicação baseados em fibras ópticas [HALLYDAY, 1991].

O funcionamento do diodo emissor de luz é baseado numa forma especial de eletroluminescência (aplicação de um campo ou corrente elétrica), produzida pela injeção de portadores numa junção do tipo *p-n* [REZENDE, 1996]. Isso acontece quando os elétrons (portadores de carga negativa) são transferidos entre bandas do material semicondutor originando os já discutidos buracos portadores de carga positiva. Aplicando-se uma corrente elétrica inversa ao sentido tradicional, como mostra a Figura 19, num circuito contendo uma

junção $p-n$, ocorre à recombinação de pares elétron- buraco e, como consequência, a emissão de luz em determinado comprimento de onda (a depender do tipo de semiconductor que compõe o LED) [RANGEL, 2009].



A cor do LED depende do material semiconductor usado	
Semiconductor	Cor Emitida
AlGaAs	Vermelho
AlInGaP	Amarelo/Laranja
AlInGaN	Azul
InGaN	Verde

Figura 19: Dopagem de semicondutores do tipo $p-n$ (a e b) [OSA, 2015], (c) tabela referente à emissão da cor do LED, com referência ao material semiconductor utilizado.

Quando juntamos dois pedaços de semicondutores, um do tipo p e outro do tipo n , conforme indicado na Figura 19, observamos que no lado p da junção existem buracos livres em concentração igual à de cargas negativa (-) produzidas na ionização dos átomos de impurezas receptoras. Do lado n da junção existe elétrons livres e um igual número de átomos doadores positivos (+) [KITTEL, 2013]. Na junção, os elétrons portadores da parte n tendem a ocupar buracos na parte p , deixando esta com um potencial negativo e a parte n com

um potencial positivo e, assim, formando uma barreira de potencial V_0 . Assim, a polaridade da barreira de potencial mantém os elétrons na parte n e os buracos na parte p [MELLO, 1980].

Trata-se, portanto, de um processo de difusão de buracos, do lado de maior concentração para o de menor concentração. Do mesmo modo, existe o fenômeno de difusão de elétrons de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração. Assim, depois que um certo número de elétrons e buracos atravessa a junção, é criado um campo elétrico que interrompe o movimento de portadores. É assim que se atinge o equilíbrio, no qual a corrente total é zero; as correntes de difusão dos elétrons e buracos são equilibradas exatamente pelas correntes de deriva devido ao campo elétrico interno [MELLO, 1975].

Se um potencial externo $V > V_0$ for aplicado como na Figura 19 (b), o potencial de barreira será quebrado e a corrente elevada, pois existem muitos elétrons em n . Diz-se, então, que a junção está diretamente polarizada.

No caso de inversamente polarizada, observada na Figura 19 (a), o potencial de barreira será aumentado, impedindo ainda mais a passagem de elétrons e a corrente será pequena. Este conjunto, chamado diodo de junção, funciona como um retificador [KITTEL, 2013].

Na Figura 20 mostra uma aplicação do LED em eletrônica, nela está apresentado um modelo de *display* de 7 segmentos, utilizado para indicar os algarismos de 0 a 9. Cada segmento é formado por um conjunto de LEDs, conectados em paralelo e encapsulados numa mesma peça, de modo a produzir iluminação uniforme em toda sua extensão [REZENDE, 1996].

A vantagem de se utilizar esse tipo de componente é que a disposição dos segmentos de LEDs, os tamanhos dos *displays* e a ordenação e numeração dos pinos é, na sua maioria, padronizada permitindo, assim, que se utilize *displays* de múltiplos fabricantes, sem prejuízos.

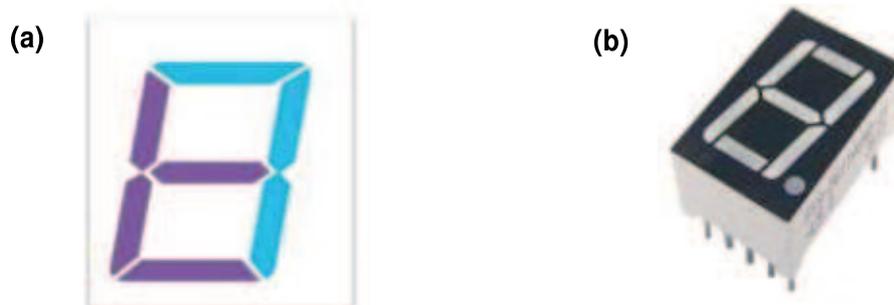


Figura 20: Mostradores numéricos de 7 segmentos em (a) e o componente eletrônico (módulo) onde o visor (display) é acoplado (b) [WIKIDEBROUILLARD, 2017].

3.2 FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica, vista na Figura 21, é um fio fino de seção reta circular, feita de material transparente, em geral vidro ou plástico. Ela é flexível e não quebra quando é encurvada suavemente, sendo usada para guiar um feixe de luz através de caminhos sinuosos sem interferência do meio externo [CARTAXO, 2006].

A ideia básica do seu uso como guia de luz é muito antiga. Fibras ópticas de vidro ou plástico transparentes são usadas como guias de onda de luz para aplicação simples desde a década de 1930, mas a partir da década de 70 foram desenvolvidas as fibras de sílica (feito de dióxido de silício - SiO_2), com baixas perdas, possibilitando guiar feixes de luz a grandes distâncias [SCHUBERT, 2003].

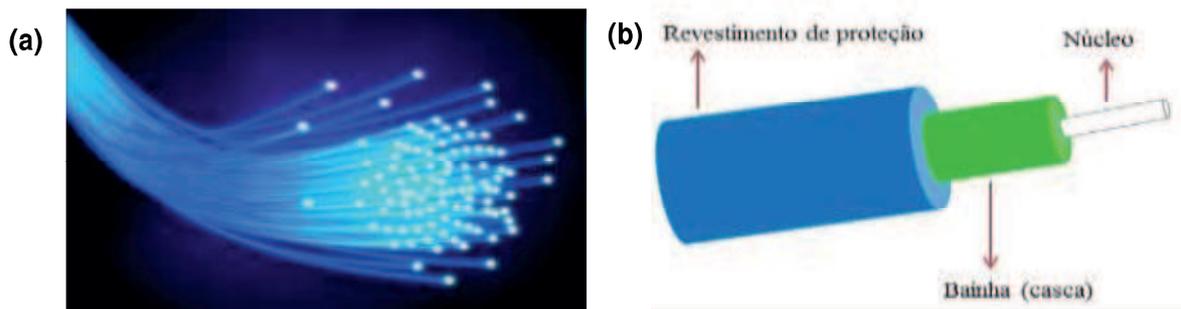


Figura 21: (a) Fibra óptica [JAMES, 2017]. (b) Esquema estrutural da fibra óptica (núcleo, bainha e proteção).

A fibra óptica não envia dados da mesma maneira que os cabos convencionais. Para garantir mais velocidade, todo o sinal é transformado em luz, com o auxílio de conversores integrados aos transmissores. Há dois modos de converter os dados: por meio de fontes laser e quando a fonte de luz é o LED (respectivamente associados a fibras monomodo e multimodo) [TECMUNDO, 2011]. Das definições temos que quanto maior o diâmetro da fibra, maior o número de modos diferentes que podem se propagar. Uma fibra multimodo é a aquela com perfil degrau, com diâmetro do núcleo de $100\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu = 10^{-6}\text{m}$), podendo propagar milhares de modos no comprimento de onda de $0,85\ \mu\text{m}$. Já as monomodo são as que permitem a propagação de apenas um modo. Vejamos os dois exemplos na Figura 22.

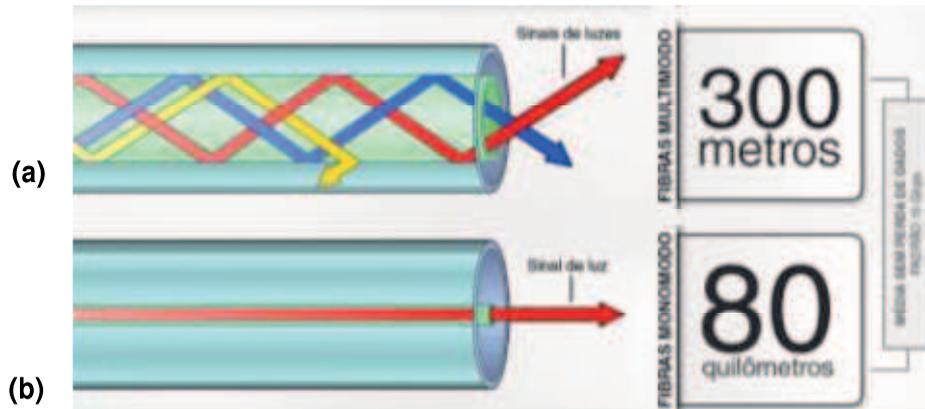


Figura22: Demonstração do que acontece com o sinal de luz transmitido numa fibra multimodo com fonte LED (a) ou monomodo com fonte laser (b) [TECMUNDO,2011]. O alcance do sinal transportado pela fibra monomodo é bem maior que no outro caso. Por exemplo, na monomodo a luz é transmitida sem perdas ópticas (isto é, sem diminuir a intensidade) por uma distância de até 80 km.

3.3 EXPERIMENTO

O experimento descrito neste trabalho é um equipamento que **converte um sinal sonoro em luminoso** por meio de circuito emissor, no qual se encontra um LED azul, conectado a uma fibra óptica. Ao final do processo, o sinal é novamente convertido em som através de um receptor. Esta atividade tem como objetivo divulgar e discutir uma aplicação do LED nos sistemas de comunicação óptica, muito comum no cotidiano. Ao mesmo tempo, os estudantes podem interagir, na prática, com conceitos da Física do Estado Sólido associado ao uso dos semicondutores e conceitos vistos em óptica conectados ao comportamento da luz numa fibra óptica.

3.3.1 COMUNICAÇÃO À VELOCIDADE DA LUZ

“Comunicação à Velocidade da Luz” é um projeto de iniciativa do OSA Campina Student Chapter [www.uepb.wix.com/cgstudentchapter], grupo coordenado pela Profa. Tâmara Lima e Silva, em parceria com a Optical Society of American (OSA) [www.osa.org].

As atividades do projeto visam desenvolver dispositivos que conectam a tecnologia de fibras ópticas à eletrônica, para divulgar aplicações na área de comunicação, fotônica e optoeletrônica a estudantes do Ensino Médio e da Graduação, com o objetivo de despertar o seu interesse por essas áreas, contribuindo de forma a facilitar o aprendizado dos conceitos ópticos conectados à Física do Estado Sólido, o que nem sempre é abordado em sala de aula.

O grupo OSA Campina Student Chapter, do qual faço parte e sou a atual presidente, conta com 11 membros, e representa uma parceria da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB (através do Departamento de Física), com a Sociedade Americana de Óptica (OSA), que tem sede em Washington D.C., Estados Unidos, e que se dedica à divulgação de conhecimento em óptica e fotônica em todo o mundo. Os propósitos da sociedade são científicos, técnicos e educacionais, visando sensibilizar a comunidade acadêmica ou não sobre a importância da óptica na pesquisa e desenvolvimento tecnológico, o que tem impacto direto em nossas vidas.

A OSA Campina Student Chapter, assim como todos os seus projetos, tem apoio e financiamento da OSA, sendo a atividade experimental desenvolvida neste trabalho um exemplo do que pode ser feito utilizando tal recurso. O experimento discutido na próxima seção foi projetado e montado por membros do Chapter, sendo assim participei ativamente da sua confecção. As atividades do projeto são divulgadas em eventos através de palestras, mostras científicas, oficinas e minicursos, ligados ao Ensino de Física, para motivar o público alvo a estudar temas nem sempre abordados em sala de aula.

3.3.2 CONVERSOR DE SINAL SONORO EM LUMINOSO

O aparato experimental deste trabalho foi montado no laboratório didático de Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), por mim e outros estudantes membros do OSA Campina Student Chapter

Este trabalho tem o propósito de motivar os estudantes a discutir alguns conceitos ópticos associados ao uso do LED na eletrônica, área conhecida por optoeletrônica, [SUPER, 2016], através da execução de atividades em laboratório, inspirada na tradição newtoniana de se estudar a luz a partir da análise e compreensão de experiências reais [NEWTON, 1704], que propiciassem com clareza a ligação entre a teoria da refração e reflexão da luz e uma de suas aplicações diretas em redes de comunicação. Para tanto, foi confeccionado um equipamento de transmissão de dados constituído de três componentes: um sistema emissor, um meio de propagação e um detector óptico; que nos proporciona mostrar aos alunos que as ondas sonoras são convertidas em sinal luminoso fazendo uso de um LED (aqui utilizou-se o azul) e, após passar pelo meio óptico, representado pela própria fibra, o sinal é reconvertido em som ao ser detectado pelo fotodiodo do circuito receptor, que coleta a luz e recupera o sinal elétrico associado ao som fazendo uso da linguagem binária (onde um pulso luminoso

indica o bit 1 e a sua ausência indica o bit 0). A Figura 23 mostra imagens da montagem experimental, onde foram montados circuitos contendo um LED azul (emissor) ligado a um circuito receptor por meio de uma fibra óptica simples.

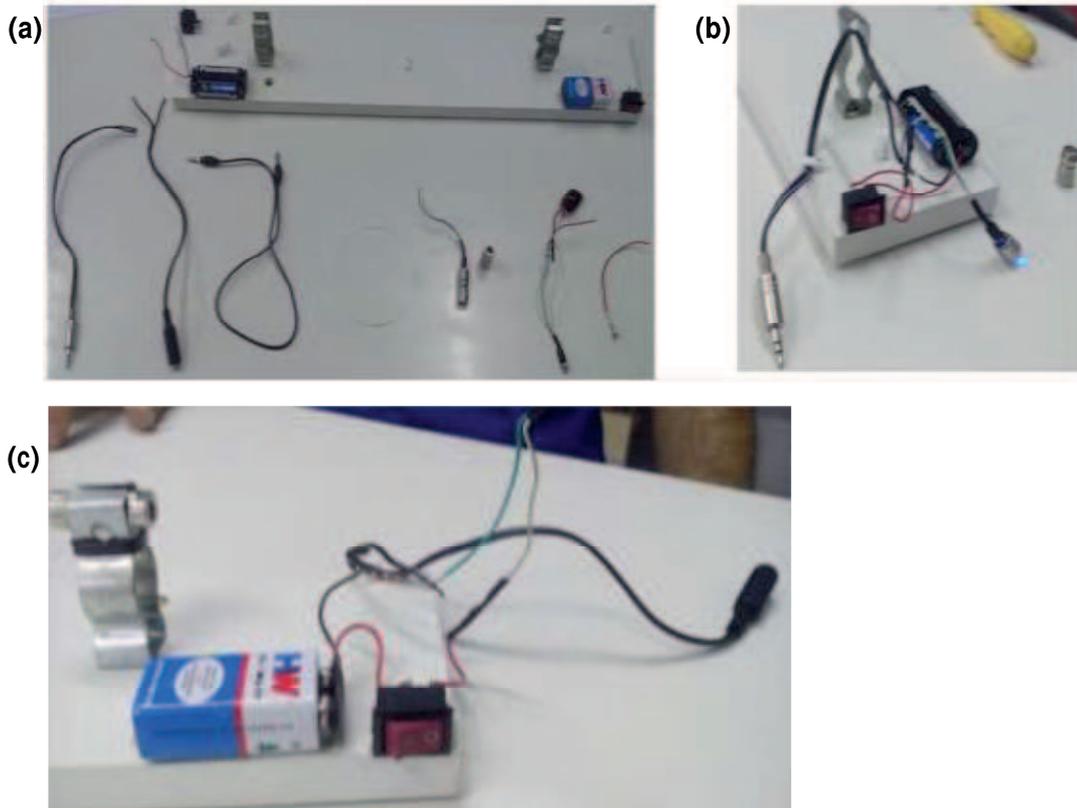


Figura 23: Fotos da montagem do experimento. (a) Material utilizado na montagem (plug, bateria 9V, resistor, fibra óptica, pilha, LED azul, chaves e conectores), (b) circuito emissor onde está acoplado o LED azul, (c) e o circuito receptor óptico que converte o sinal luminoso trazido pela fibra óptica em sinal sonoro.

Através da montagem deste aparato, foi possível associar a capacidade das fibras ópticas se comportarem como guias de onda, à necessidade atual de desenvolvimento de dispositivos que possibilitam, cada vez mais, a transmissão de dados de forma rápida e eficiente (com atenuação mínima do sinal transmitido ao longo da fibra).

A partir da confecção do equipamento de transmissão aqui proposto é possível visitar alguns preceitos da Óptica Geométrica, utilizando o traçado de raios para analisar como a propagação da luz ocorre numa fibra óptica por meio de fenômenos de refração e reflexão [MENDONÇA, 1997]. Quando o raio luminoso passa de um meio (núcleo da fibra óptica) para outro (casca da fibra óptica) é refratado (desviado) por esse meio; isso faz com que o raio luminoso viaje pela fibra óptica sendo refratado cada vez que toca o núcleo/casca de acordo com a Lei de Snell (quanto mais refrações, mais perdas sofre o sinal luminoso). E a reflexão

ocorre, pois a fibra óptica é composta de material dielétrico com índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo; assim, quando a luz incide sobre a casca, volta a se propagar ao longo do núcleo, realizando sucessivas reflexões, internas totais [ROCHA, 2004] durante sua propagação. Então, para se ter um sistema eficiente, são necessários mais reflexões e menos refrações.

O experimento aqui apresentado na Figura 24, por exemplo, pode ser reproduzido a partir de uma música em andamento num aparelho celular. Para tanto, basta ligar o celular ao conector de entrada do circuito emissor para que o sinal elétrico associado ao áudio seja convertido em sinal luminoso ao passar pelo LED azul. Daí o sinal é transmitido pela fibra óptica por reflexões totais sucessivas e é coletado pelo fotodiodo no circuito receptor. Em seguida é reconvertido em sinal elétrico e as ondas sonoras associadas à música são recuperadas conectando-se a saída do circuito receptor a uma caixinha de som, por exemplo.

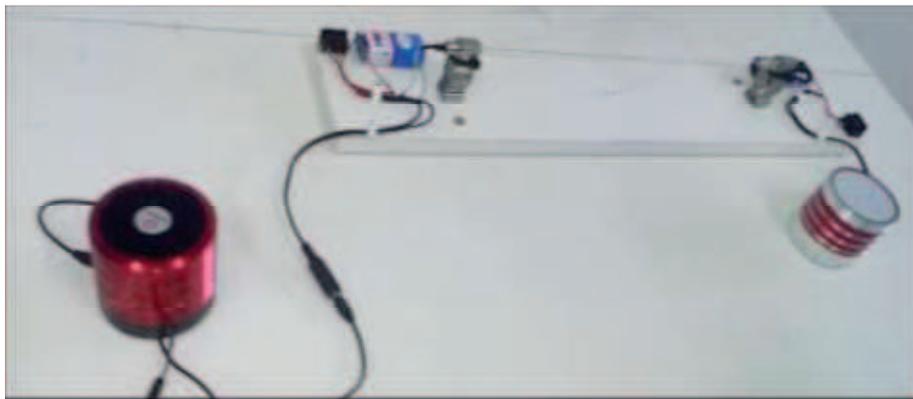


Figura 24: Visão geral do conversor montado.

Através da proposta apresentada neste trabalho os estudantes aprendem alguns fundamentos de optoeletrônica (área multidisciplinar que está presente em várias tecnologias atuais associadas à óptica e à eletrônica) de forma qualitativa, o que contribui para motivá-los a discutir a Física dos semicondutores de uma forma diferente e curiosa, levando em conta que esta área nem sempre é abordada no conteúdo do Ensino Médio ou graduação em Física.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- ✓ Estudando Física do Estado Sólido é possível, a partir da análise do comportamento dos elétrons num cristal classificar um material como: condutor, semicondutor ou isolante;
- ✓ Com o estudo sobre semicondutores verificou-se que sua versatilidade pode ser aumentada através do processo de dopagem, que o torna um semicondutor extrínseco (não puro), diferentemente dos encontrados na natureza, que são intrínsecos (puros);
- ✓ Pudemos verificar, neste trabalho a aplicação da teoria de semicondutores em um dispositivo de transmissão de dados;
- ✓ Puderam ser estudados, neste experimento, conceitos sobre: LEDs, reflexão total da luz; fibras ópticas e circuitos.
- ✓ A montagem do experimento permite que estudantes entrem em contato com a optoeletrônica, área que aplica conceitos de óptica na Engenharia;
- ✓ Os estudantes são capazes de compreender como funciona uma tecnologia presente em seu cotidiano por meio da construção de um conversor de sinais simples usando conceitos atuais relacionados a uma das aplicações da fibra óptica e do LED.
- ✓ O aparato pode ser utilizado como proposta de atividade experimental para facilitar a compreensão dos estudantes a respeito dos conceitos físicos e as tecnologias aqui já discutidas.

REFERÊNCIAS

[ASCURRA, 2013] ASCURRA, R. E.; **Eficiência Elétrica em Iluminação Pública Utilizando Tecnologia Led: Um Estudo de Caso**. Cuiabá (2013).

[ASHCROFT, 1976] ASHCROFT, N. W e MERMIN, N. D. **Solid State Physics**. 1ª ed. New York (1976).

[BEAM, 1965] BEAM, W. R.; **Electronics of Solids**. McGraw – Hill, New York (1965).

[CARTAXO, 2006] CARTAXO, A.; **Sistema de Redes de Telecomunicação - Transmissão em fibra óptica**. IST (2006).

[CONCEIÇÃO, 2015]. CONCEIÇÃO, M. L.; **Comunicação Por Luz Visível**. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Brasília (2015).

[EISBERG, 1982] EISBERG, R. M. e LERNER, L.S.; **Física: Fundamentos e Aplicações**. MacGraw-Hill, São Paulo (1982).

[FIGUEIREDO, 2006] FIGUEIREDO, J.; **Notas de Física do Estado Sólido, versão 0.3**. Departamento de Física da Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Portugal (2006).

[FELIX, 2009] FELIX, J. F. **Síntese e Caracterização de Filmes Finos de Óxidos de Zinco e Polianilina para Aplicações em Heterojunções Semicondutoras**, Recife (2009).

[GRIFFITHS, 2011] DAVID, J. GRIFFITHS; **Mecânica Quântica: 2ª ed.**, Pearson Prentice Hall, São Paulo (2011).

[HALLIDAY, 1991] HALLIDAY, D. RESNICK e R. WALKER, J.; **Fundamentos de Física 4: Óptica e Física Moderna**, LTC (1991).

[HUMMEL, 1985] HUMMEL, R. E.; **Electronic Properties of Materials** Springer – Verlag, Berlin (1985).

[HARUYAMA, 2011] HARUYAMA, S.; **Visible Light Communications: Recent Activities in Japan**. Universidade de Keio, Yokoroma. Japão (2011).

[ISCTE, 2017] ISCTE - DCTI (Semicondutores) **Fundamentos da Eletrônica** <<http://cadeiras.iscte.pt/fe/semicondutores.pdf>> (Acesso em 23/03/2017).

[JAMES, 2017] JAMES, T.; **Tachyon is the Google for your IT infrastructure**. <<http://www.sustainableit.co.za/tachyon-google-infrastructure/>> (Acesso em 25/05/2017)

[JUNIOR, 2011] JUNIOR, H. C.; **Comunicação de dados Utilizando Luz Visível**. Universidade Federal Fluminense. Niterói (2011).

[KITTEL, 2013] KITTEL, C.; **Introdução à Física do Estado Sólido** 8ª Ed., LTC, Rio de Janeiro (2013).

[LIMA, 2014] LIMA, J. R. F. de.; **Propriedade Eletrônica da Matéria Topológica; Heteroestruturas e Efeitos da Relação**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa (2014).

[MARQUES, 2009] MARQUES, F. A. M. **Investigação da Difusão de Portadores em Pontos Quânticos Sob Campo Elétrico Externo Por Meio da Varredura da Microluminescência**, Uberlândia (2009).

[MELLO, 1975] MELLO, H. A. e BIASI, R. S.; **Introdução à Física dos Semicondutores**. São Paulo, (1975).

[MELLO, 1980] MELLO, H. A.; **Dispositivos Semicondutores: Diodos, Transistores, Fotossensíveis, Circuitos Integrados**. 4ª Ed. Rio de Janeiro, (1980).

[MENDONÇA, 1997] MENDONÇA, C. R.; MISOGUTI, L.; MUNIZ, S. R.; TUBOY, A. M.; BAGNATO, V. S.; **Demonstration of total internal reflection for high school students**. Instituto de Física de São Carlos, São Paulo (1997).

[MOON, 2014] MOON, J. W; KIM, J. S.; Min, B. G.; KIM, H. M. e YOO, J. S.;– **Optical Materials Express: Optical and Longevity of Quantum Dot-Coated White LED**. Issue 10, vol. 4. pp. 2174-2181. Outubro (2014).

[NEWTON, 1704] NEWTON, I. **Opticks: Or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light**. 1st Edition, London, Dover Publications, (1704).

[NOVOA, 2005] NOVOA, L. M. e TOMIOKA, J.; **Estudo da Estrutura do White Light Emitting Diode – White LED**. São Paulo (2005).

[OSA, 2015] OSA – Campina Student Chapter: **Comunicação a Velocidade da Luz**. UEPB, Campina Grande <www.uepbosa.wix.com/cgstudentchapter> (acesso em 20/04/2017).

[PINTO, 2008] PINTO, R. A.; **Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs)**. Santa Maria (2008).

[PEREIRA, 2016] PEREIRA, D. L.; **Introdução Física do Estado Sólido**. Campina Grande (2016).

[RANGEL, 2009] RANGEL, M. G. SILVA. P. B. GUEDE, J. R.; **LED – Iluminação de Estado Sólido**. FEAV/UNIVAP – São José dos Campos - SP (2009).

[REZENDE, 1996] REZENDE, S.M.; **A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 1ª ed., Editora Universitária – UFPE, Recife (1996).

[ROCHA, 2004] ROCHA, F. R. P. e Teixeira, L. S. G. **Estratégias Para Aumento de Sensibilidade em Espectrofotometria UV-VIS**. Quim. Nova, Vol. 27, Nº. 5, 807-812, São Paulo (2004).

[RODRIGUES, 2012] RODRIGUES, C. R. B. S.; **Contribuições do uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública**. UFJF, Minas Gerais (2012).

[SBF, 1990] SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA.; **A física no Brasil na próxima década**. Instituto de Física da USP, SBF, São Paulo (1990).

[SCHUBERT, 2003] SGHUBERT, F. E.; - **Light-Emitting Diodes: History of Light – Emitting Diodes**. Cambridge University Press (2003).

[SILVA, 2009] SILVA, L. M.; - **Eletroquímica do Estado Sólido: “Fundamentos sobre Materiais Semicondutores”**. UNICAMP – LQA (2005).

[SOBRAL, 2007] SOBRAL, E. G. e PASKOCIMAS, C. A.; **Construção de células solares de correntes fotoexcitáveis utilizando flavonoides da Capsicum Frutescens, pimenta malagueta**. UFRN, Natal (2007).

[SUPER, 2016] SUPERINTERESSANTE. **Optoeletrônica: A Invenção da Luz**. Ed. Abril. Outubro (2016) <<http://super.abril.com.br/tecnologia/optoeletronica-a-invasao-da-luz/>> (Acesso em 15/06/2017).

[TECMUNDO, 2011] HAMANN R.; **O Que Acontece Com o Sinal de Luz**. <<https://www.tecmundo.com.br/infografico/9862-como-funciona-a-fibra-otica/infografico.htm>> (Acesso em 25/04/2017).

[VEJA, 2014] REVISTA VEJA.; **Fiat Lux do Gênesis aos Prêmios Nobel de 2014, o Triunfo da Luz**. Ed. 2395- Ano 47, nº 42, p. 84-86, Editora Abril (2014).

[WIKIDEBROUILLARD, 2017] **Display 7 segmentos**. <<http://www.wikidebrouillard.org>> (Acesso em 25/04/2017).

[YOUNG, 2009] YOUNG, H. D. **Física IV: Ótica e Física Moderna/ YOUNG e FREEDMAN**. Adson Wesley, São Paulo (2009).

