

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

MANOEL DÁRIO DE QUEIROZ OLIVEIRA FILHO

**ESTUDO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS VIABILIZADORAS
DA TECNOLOGIA LI-FI E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO
PARA TRANSMISSÃO DE DADOS UTILIZANDO LUZ VISÍVEL**

Fortaleza, Ceará

2020

MANOEL DÁRIO DE QUEIROZ OLIVEIRA FILHO

ESTUDO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS VIABILIZADORAS DA
TECNOLOGIA LI-FI E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA
TRANSMISSÃO DE DADOS UTILIZANDO LUZ VISÍVEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia de telecomunicações. Área de concentração: sistemas de telecomunicações.

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

Fortaleza, Ceará

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48e Oliveira Filho, Manoel Dário de Queiroz.
Estudo das principais características viabilizadoras da tecnologia Li-Fi e implementação de um protótipo para transmissão de dados utilizando luz visível / Manoel Dário de Queiroz Oliveira Filho. - 2020.
87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Jose Alves de Aquino.

1. Li-Fi. 2. Comunicação por luz visível. 3. Protótipo. 4. LED. I. Título.

CDD 621.382

Dedico esse trabalho aos meus pais, Mirleni e Dário, meu irmão, Pedro, a minha família, Nely, Francisca e Mirleide e a minha noiva, Isabele. Eu não teria um passado, um presente e um futuro, sem vocês.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Mirleni Queiroz, por ser o meu sinônimo de amor, ao meu pai, Dário Queiroz, por ser o meu sinônimo de trabalho e honestidade, ao meu irmão, Pedro Henrique, por ser o meu sinônimo de dedicação aos estudos, a minha vó, Nely Pereira, por ser o meu sinônimo de dedicação incondicional, a minha madrinha, Francisca Ferreira, por ser o meu sinônimo de disciplina e força. Agradeço a minha tia, Mirleide Pereira, por ser meu sinônimo de irmã.

Agradeço a minha noiva, Isabele Araújo, por acreditar em mim, quando eu mesmo não acredito. Você é o meu motivo, o meu sinônimo de futuro.

Agradeço a todos os professores que, de alguma forma, em qualquer instante de tempo, fizeram sua contribuição verdadeira para que eu me tornasse um estudante melhor. Em especial ao meu orientador, professor Dr. Francisco José por ter aceitado esse desafio que é me orientar.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, onde completo mais uma etapa na minha vida acadêmica.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro, pelo qual eu sempre trabalhei, pertence a mim.”
(Nikola Tesla)

Resumo

A tecnologia *Li-Fi*, que permite uma comunicação bidirecional através da utilização de luz visível, detém características intrínsecas a sua natureza que se destacam positivamente quando comparada com as tecnologias de comunicação baseadas em radiofrequência. Entretanto, por ser uma tecnologia relativamente recente, ainda há necessidade de pesquisa e de aprendizado coletivo para converter uma ideia em produto factível, constante no cotidiano da sociedade. Nosso trabalho enumera diversos predicados referentes à tecnologia *Li-Fi*, no intuito de disseminar o interesse pela respectiva linha de pesquisa através de um estudo sobre os principais artigos alusivos ao tema, versando sobre o fato do aumento da demanda por comunicação sem fio, a capacidade de canal e a limitação das tecnologias mundialmente difundidas, a taxa de transmissão de dados superior, a característica eficiente quando comparado às tecnologias atuais, a existente infraestrutura que é presente em várias localidades, a segurança da informação e a disponibilidade de uma tecnologia de comunicação que não seja restrita a determinados ambientes devido a sua natureza. Aditivamente a esse estudo teórico, nos propusemos à construção de um protótipo de transmissão de dados de áudio através de luz visível. Desse protótipo, foram extraídas medições das intensidades luminosa e sonora, permitindo a construção de gráficos referentes ao funcionamento do aparato em cada um dos pontos de medição estabelecidos com distâncias que variam igualmente entre si. Esse conjunto de pontos foram arquitetados sobre uma mesa de medição e, dessa maneira, fomos capazes de estudar o funcionamento do protótipo e comparar as atenuações da luz e do som em função da distância. Por fim, discutimos os resultados obtidos e algumas limitações encontradas, além de sugerimos algumas propostas para pesquisas e trabalhos futuros.

Palavras-chave: *Li-Fi*, comunicação por luz visível, protótipo, LED.

Abstract

The Li-Fi technology, which allows bidirectional communication through the use of visible light, has characteristics intrinsic to its nature that stands out positively when compared to radio frequency-based communication technologies. However, as it is a relatively recent technology, there is still a need for research and collective learning to convert an idea into a feasible product, constant in society's daily life. Our work lists several predicates referring to Li-Fi technology, in order to disseminate interest in the respective line of research through a study on the main articles allusive to the theme, versing about the fact of the increased demand for wireless communication, the channel capacity and the limitation of technologies that are spread worldwide, the higher data transmission rate, the efficient characteristic when compared to current technologies, the existing infrastructure that it is present in several locations, the security of information and the availability of a communication technology that is not restricted to certain environments due to its nature. In addition to this theoretical study, we proposed to build a prototype for transmitting audio data through visible light. From this prototype, measurements of light and sound intensities were extracted, allowing the construction of graphics referring to the operation of the apparatus at each of the measurement points established with distances that vary equally between each other. This set of points was built on a measuring table and, in this way, we were able to study the prototype operation and to compare the attenuations of light and sound as a function of distance. Finally, we discuss the results obtained and some limitations found, in addition to suggesting some proposals for future research and work.

Keywords: Li-Fi, visible light communication, prototype, LED.

Lista de figuras

Figura 1 – Visão geral do <i>Li-Fi</i> .	20
Figura 2 – Espectro eletromagnético.	22
Figura 3 – Gama de eficácia para várias fontes de luz.	24
Figura 4 – Imagens transmitidas e distâncias.	28
Figura 5 – Configurações realizadas.	28
Figura 6 – Diagramação do protótipo.	32
Figura 7 – Etapa de filtragem e amplificação.	32
Figura 8 – Disposição do protótipo e da mesa de medições.	33
Figura 9 – Pontos de medição.	35
Figura 10 – Legenda do gráfico de cores.	36
Figura 11 – Protótipo - emissor.	39
Figura 12 – Protótipo - receptor.	39
Figura 13 – Distância dos pontos de medição.	40
Figura 14 – Atenuação da intensidade luminosa.	40
Figura 15 – Medição da intensidade sonora horizontal.	40
Figura 16 – Medição da intensidade sonora vertical.	41
Figura 17 – Medição da intensidade sonora.	41
Figura 18 – Atenuação da intensidade sonora.	42
Figura 19 – Atenuação relativa entre intensidade sonora e luminosa.	42
Figura 20 – Desvios na simetria da medição sonora.	43
Figura 21 – Estrutura cristalina do silício.	55
Figura 22 – As ligações covalentes de um cristal de silício.	56
Figura 23 – Adição de um átomo de antimônio como impureza em uma base de silício.	57
Figura 24 – Adição de um átomo de boro como impureza em uma base de silício.	57
Figura 25 – Dois tipos de semicondutores.	58
Figura 26 – A junção PN.	58
Figura 27 – O surgimento dos íons.	59
Figura 28 – A camada de depleção.	59
Figura 29 – Polarização direta.	60
Figura 30 – Polarização reversa.	61
Figura 31 – Estrutura do LED.	62
Figura 32 – Circuito de polarização do fotodiodo.	63
Figura 33 – Os inventores do transistor.	66
Figura 34 – O primeiro transistor.	67
Figura 35 – As três regiões de um transistor NPN.	67
Figura 36 – As camadas de depleção de um transistor NPN.	68

Figura 37 – Injeção de corrente na base.	69
Figura 38 – Injeção de corrente na base e no coletor.	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Marcos historicamente relevantes para a VLC.	16
Tabela 2 – Consumo de potência de diferentes fontes luminosas para o mesmo padrão de iluminação.	24
Tabela 3 – Custos dos componentes mínimos e máximos.	33
Tabela 4 – Características das regiões de um transistor.	68

Lista de abreviaturas e siglas

APD	<i>Avalanche photodiode</i>
AWG	<i>Arbitrary waveform generator</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CSMA/CD	<i>Carrier sense multiple access with collision avoidance</i>
DMT	<i>Discrete multi-ton</i>
ERB	Estações de rádio base
IEEE	Instituto de engenheiros eletricitas e eletrônicos
IoT	<i>Internet of things</i>
IR	<i>Infrared</i>
JEITA	<i>Japan Electronics and Information Technology Industries Association</i>
LED	<i>Light emitting diode</i>
<i>Li-Fi</i>	<i>Light Fidelity</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MIMO	<i>Multiple-input-multiple-output</i>
MSE	<i>Mean squared error</i>
MTC	<i>Machine type communication</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OMEGA	Projeto de tecnologia da comunicação e informação europeu
PSNR	<i>Peak signal-to-noise ratio</i>
RF	Radiofrequência
RGB	<i>Red, green and blue</i>

VLC	<i>Visible light communication</i>
VLCC	<i>Visible light communication consortium</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WYSIWYS	<i>What you see is what you send</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos específicos	17
1.3	Organização do texto	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Introdução	19
2.2	Visão geral da tecnologia <i>Li-Fi</i>	19
2.3	Características relevantes na análise da viabilidade do <i>Li-Fi</i>	19
2.3.1	Aumento da demanda	20
2.3.2	Capacidade do canal	21
2.3.3	Taxa de dados	21
2.3.4	Eficiência energética	23
2.3.5	Infraestrutura	23
2.3.6	Segurança e Disponibilidade	25
2.4	Revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam VLC	26
2.5	Conclusão do capítulo	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Introdução	30
3.2	Idealização e montagem do protótipo	30
3.3	Protótipo	31
3.3.1	Custo dos componentes	31
3.4	Configuração da mesa de medições	34
3.4.1	Mesa de medições	34
3.4.2	Pontos de medição	34
3.4.3	Eixos horizontais e verticais	35
3.5	Medição da luz e do som	35
3.5.1	Gráfico de cores e de linhas	35
3.5.2	Medição da intensidade luminosa	36
3.5.3	Medição da intensidade sonora	36
3.6	Conclusão do capítulo	37
4	RESULTADOS	38
4.1	Introdução	38

4.2	Resultados obtidos	38
4.3	Discussão dos resultados	41
4.3.1	Relação entre luz e som	42
4.3.2	Medição sonora	42
4.3.3	Atenuação do som	43
4.3.4	Atenuação da luz superior a atenuação do som	44
4.4	Distância máxima, interferência e obstrução do feixe de luz	44
4.5	Conclusão do capítulo	45
5	CONCLUSÕES	46
5.1	Introdução	46
5.2	Viabilidade da tecnologia <i>Li-Fi</i>	46
5.3	O protótipo e a transmissão de dados de áudio	47
5.4	Trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICES	52
	APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA	53
	ANEXO A – FUNDAMENTOS DE ELETRÔNICA	55
A.1	Semicondutores	55
A.1.1	Definição	55
A.1.2	Dopagem	56
A.1.3	Tipos N e P	56
A.1.4	Junção PN	57
A.2	LED	61
A.3	Fotodetectores	62
A.4	Capacitor de acoplamento	63
A.4.1	Impedância ($\dot{Z}$) e Reatância capacitiva (X_C)	63
A.4.2	Dedução de $\dot{Z}$ e X_C	63
A.5	Transistores	66
A.5.1	Princípio de funcionamento	67
A.5.2	Correntes no transistor	70
A.5.3	α_{CC} e β_{CC}	70
A.5.4	Ponto quiescente (Q)	71
	ANEXO B – DATASHEET BC 547	72

ANEXO C – DATASHEET LED	77
ANEXO D – DATASHEET FOTODIODO	80

1 Introdução

A comunicação por luz visível (VLC) não é algo recente, Alexander Graham Bell já a estudava no século XIX. Entretanto, as possibilidades que temos no século XXI, para esse gênero, são consideradas promissoras, especificamente com a tecnologia nomeada de *Light-Fidelity (Li-Fi)*, desenvolvida pelo professor Harald Haas, da Universidade de Edimburgo. No ano de 2011, em uma conferência oficial do *TED Global*, o professor Haas demonstrou, pela primeira vez, a transmissão de um vídeo em alta definição através de luz visível. Seu projeto desenvolvido serviu como referência para a construção do protótipo do nosso trabalho. A Tabela 1 traz em ordem cronológica alguns dos principais acontecimentos que marcaram a história da VLC.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento de um estudo sobre a viabilidade de uma tecnologia que se mostra promissora, com características vantajosas, inatas a sua própria natureza, aditado do implemento de um aparato experimental que se propõe a transmitir dados através de luz visível, nos parece uma forma relativamente sólida para se propor um caminho para novos trabalhos analíticos e experimentais.

Um questionamento que se faz presente, quando tratamos de comunicação sem fio, capacidade de conectividade, além de uma demanda crescente pelo serviço, que hoje tem como sua principal tecnologia o *Wireless Fidelity (Wi-Fi)*, é: até quando teremos espaço para todos? Veremos, mais adiante, que uma das limitações da comunicação *Wi-Fi* é representada pela sua capacidade de canal. A internet das coisas, também denominada como *internet of things (IoT)*, é uma variável que adentra essa equação de forma preocupante, pois devido a ela, temos vários itens do nosso cotidiano sendo conectados à rede mundial.

Uma promissora tecnologia que se apresenta como uma alternativa para suprir essa demanda é o *Li-Fi*. Essa é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza o espectro infravermelho e visível da luz para transmissão de dados em altas velocidades. Se a demanda continuar a crescer, o que é uma afirmação razoável devido ao advento da Internet das coisas (IoT) e do Machine Type Communication (MTC), em até 20 anos a comunicação Wi-Fi não vai suprir a quantidade de usuários. Para melhor visualizarmos, o espectro inteiro de radiofrequência é cerca de 300 GHz, aproximadamente 2.600 vezes menor do que o espectro utilizado pelo *Li-Fi* de 780 THz (HAAS, 2018).

Ademais, existem muitas outras vantagens que o *Li-Fi* incorpora, intrínsecas as suas características, como por exemplo, não causar interferência eletromagnética em

Tabela 1 – Marcos historicamente relevantes para a VLC.

Ano	Marco
1999	VLC para sistemas de áudio.
2003	Formação do Consórcio de Comunicação por Luz Visível (VLCC) - Japão.
2004	Um artigo fundamental por Komine e Nakagawa estabelece a estrutura para a análise matemática de sistemas VLC.
2005	Um sistema de comunicação VLC transmitindo dados para telefones móveis é demonstrada com uma taxa de transferência de até vários Mbps.
2007	Os padrões da Associação das Indústrias de Tecnologia de Eletrônica e Informação do Japão (JEITA) CP-1221 e CP-1222 são propostos e aceitos pelo VLCC no Japão.
2008	O projeto OMEGA, financiado pela União Européia, visa desenvolver padrões globais para redes domésticas, incluindo o uso de comunicação óptica sem fio empregando tecnologias Infravermelho (IR) e VLC.
2009	Demonstração de um sistema VLC de acesso múltiplo full-duplex de 100 Mbps com faixa de operação de 3 m, utilizando CSMA/CD óptico.
2011	O IEEE publica o padrão IEEE 802.15.7 para VLC. As camadas de acesso físico e de mídia são definidos.
2013	Demonstração experimental de VLC indoor usando a modulação de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas - Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal (MIMO-OFDM) alcança uma taxa de transferência de 1 Gbps em um link de transmissão com 205 Mbps, cada.
2016	Demonstração experimental de um sistema VLC baseado em OFDM de 10 Gbps, usando um microLED violeta de nitreto de gálio (GaN).

Fonte: (BLINOWSKI, 2019).

componentes eletrônicos, podendo ser utilizados em aviões e hospitais, possuindo uma disponibilidade maior. Outro exemplo é voltado para a segurança, onde aquela informação sendo distribuída fica confinada em um ambiente, posto que a luz não atravessa paredes assim como as ondas de rádio, impedindo que outras pessoas, inclusive mal-intencionadas, tenham acesso à rede (CARVALHO; PEREIRA; CARVALHO, 2015).

Nosso trabalho se propõe a trazer algumas das informações pertinentes quando nos referimos ao assunto de comunicação através de luz visível, expondo suas vantagens e buscando suprimir o distanciamento entre a visualização da ideia e a sua consecução. Não visa somente demonstrar a viabilidade contida na área de pesquisa das comunicações através de luz visível, mas trazer um aparato experimental com o intuito de incentivar e promover o estudo desta forma de comunicação sem fio que se mostra promissora e com uma quantidade considerável de áreas inexploradas, no aguardo da construção de um futuro, segundo Haas et al. (2011), mais brilhante e mais conectado por esse brilho.

1.2 Objetivos

Estudar a viabilidade de implementação da tecnologia *Li-Fi* e construir um protótipo de comunicação de dados de áudio através de luz visível.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar as principais características viabilizadoras da implementação da tecnologia *Li-Fi*.
- Construir um protótipo para transmissão de arquivos de áudio utilizando um LED.
- Estudar o comportamento das grandezas envolvidas na transmissão de dados.

1.3 Organização do texto

O Capítulo 2 aborda os fundamentos da tecnologia, através da exposição das principais características de um sistema de comunicação por luz visível e do *Li-Fi*. Essa fundamentação vai nos dar o suporte necessário para verificar a viabilidade de implementação desse sistema. Ademais, faremos uma breve menção soa principais trabalhos produzidos na área de comunicação por luz visível, especificamente nos referentes a algumas das características da fundamentação ou que tenham como objetivo o desenvolvimento de um protótipo.

O Capítulo 3 traz a metodologia utilizada no projeto, que consiste inicialmente na idealização do aparato experimental e na construção do protótipo. Em um segundo momento, são elucidados como foi realizada a concepção da mesa de medições, como estão dispostos os elementos transmissor e receptor, como foi realizada a definição dos pontos de medição e suas considerações, como foram definidos os eixos verticais e horizontais e como foram gerados os gráficos de cores e de linhas. Posteriormente, foram feitas diversas medições das intensidades do sinal luminoso e do sonoro transmitidos, através de um luxímetro e um decibelímetro, respectivamente. O intuito foi estudar como a luminosidade e o som estavam se propagando no ambiente e gerar gráficos que traduzissem esse comportamento em diversos pontos de medição. Foram gerados gráficos de cores, que indicam a dimensão espacial, localizando a medição, além de fornecer o valor da grandeza medida ou calculada. Além desses, foram gerados gráficos de linha, no intuito de fornecer uma visualização completa do estudo, abrangendo gráficos voltados para a medição no sentido horizontal e vertical da mesa de medições, considerando o todo e como se comportam as variações das grandezas medidas de acordo com a localização na mesa de medições.

O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos através das medições e as observações pertinentes contidas nos dados coletados. A análise do protótipo em funcionamento, críticas, suas limitações e pontos a serem melhorados também são objetos de discussão.

O Capítulo 5 encerra o trabalho trazendo as conclusões retiradas das medições realizadas, das análises das informações e do protótipo construído. Outrossim, traz uma gama de possibilidades para pesquisas e trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

Neste capítulo, apresentamos uma fundamentação teórica que concede o embasamento científico, através do panorama geral sobre o *Li-Fi* e suas principais características que são relevantes à aplicação de um sistema de comunicação através de luz visível, lançando mão de vários trabalhos desenvolvidos na área de comunicação sem fio através de luz visível, especificamente os concernentes à tecnologia denominada *Li-Fi*. Após essa seção, é realizada uma breve menção às principais pesquisas realizadas dentro do escopo da comunicação utilizando luz visível.

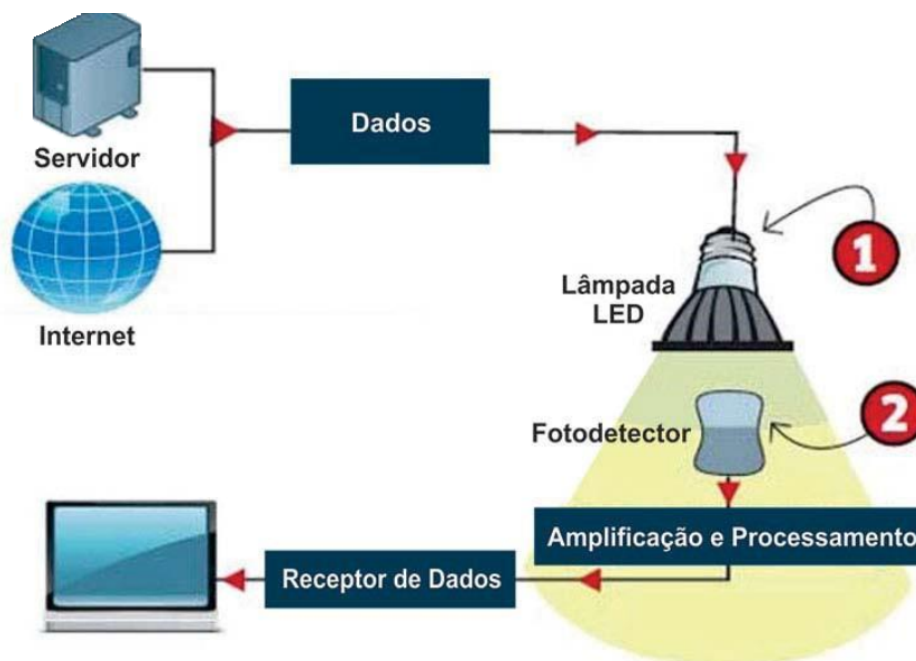
2.2 Visão geral da tecnologia *Li-Fi*

O *Li-Fi* pode ser definido, segundo [Chakraborty et al. \(2018\)](#), como sendo uma variante da VLC que utiliza o espectro visível para comunicação. Existem algumas particularidades que diferenciam a VLC do *Li-Fi*. Ainda de acordo com [Chakraborty et al. \(2018\)](#), a VLC pode ser considerada como uma comunicação ponto-a-ponto através da modulação de intensidade transmitida através de um Diodo Emissor de Luz (LED) e recebida por um fotodiodo. A expressão *Li-Fi* engloba uma completa rede de comunicação sem fio, bidirecional e multiponto-a-ponto. Todavia, antes de tratarmos das características da tecnologia-tema do nosso trabalho, do *Li-Fi*, e do aparato experimental proposto, se faz necessário uma menção a algumas das obras relevantes no contexto da comunicação através da luz. Na Figura 1, podemos observar uma visão geral do funcionamento da tecnologia *Li-Fi*.

2.3 Características relevantes na análise da viabilidade do *Li-Fi*

Abordaremos, em uma perspectiva generalista, as principais características consideravelmente relevantes quando se trata da implantação do *Li-Fi* como uma tecnologia substituta ou suplementar da tecnologia *Wi-Fi*, apresentando os principais trabalhos na área, comparando os dados, argumentando a viabilidade e buscando fomentar a pesquisa nas áreas das comunicações que utilizam a luz como elemento principal em uma transmissão de dados com maior capacidade, infraestrutura e eficiência energética, mais rápida, segura, eficiente e disponível.

Sabemos que, o nascimento de novas tecnologias, em regra, é acompanhado de um cenário composto por altos custos de investimento e baixa eficiência de sistemas. Com o

Figura 1 – Visão geral do *Li-Fi*.

decorrer do tempo, novas pesquisas são realizadas com o intuito de tornar o objeto de estudo viável. A ideia de transmitir informação através de luz visível, apesar de estar em processo de desenvolvimento, nos disponibiliza observar algumas vantagens significativas em relação ao modelo amplamente utilizado atualmente. Dentre elas, podemos citar as mais relevantes.

Nesse tipo de comunicação, LEDs únicos ou luminárias com vários LEDs são usados como transmissor e uma câmera com sensor de Metal-Óxido Semicondutor Complementar (CMOS) ou fotodiodos são usados como receptor. Os dados são transmitidos por comutação ou modulação da intensidade de saída do LED em uma taxa significativamente maior do que o olho humano pode discernir (BLINOWSKI, 2019).

2.3.1 Aumento da demanda

A crescente demanda por conectividade é uma característica intrínseca a nossa comunidade moderna. A não existência da conectividade virtual é quase que inimaginável para muitos aspectos do nosso cotidiano. Por exemplo, no deslocamento rotineiro das suas casas para o seus locais de trabalho, independente da consciência das possíveis rotas para se chegar ao destino, muitas pessoas utilizam mapas em tempo real, para evitar engarrafamentos causados por acidentes de trânsito ou algo semelhante. Toda essa informação em tempo real necessita de uma conexão constante. Toda essa dinâmica de interconexão entre todas as pessoas com dispositivos móveis era inconcebível há algumas décadas atrás.

O crescimento com características exponenciais é um fato observável diariamente.

A quantidade de estações rádio base espalhadas pelo mundo, em 2014, chegou ao número de 1,4 milhões em todo o mundo. Em adição a isso, tínhamos, até o final do mesmo ano, cerca de 7 bilhões de dispositivos móveis (CARVALHO; PEREIRA; CARVALHO, 2015).

Com a tecnologia trazida pela IoT, há um número imenso de dispositivos que se espera que estejam conectados à internet. Isto é considerado um problema para a atual rede Wi-Fi devido a possibilidade de saturação e incapacidade de acomodar tantos usuários (HUSSEIN; ANNAN, 2019). Esse aspecto da rede Wi-Fi nos leva ao próximo ponto de vantagem de um sistema baseado em comunicação através de luz visível: a capacidade de canal.

2.3.2 Capacidade do canal

A interação entre ondas eletromagnéticas e matéria há muito tempo foi usado para recuperar informações sobre objetos. Dependendo do comprimento de onda, informações diferentes podem ser recuperadas. Para ilustração, a Figura 2 representa o espectro eletromagnético classificado por faixa de comprimentos de onda (HADOUX, 2014).

Ondas de rádio são limitadas, escassas, onerosas e nós somente dispomos de uma certa extensão delas. É essa limitação que não suporta a demanda da transmissão de dados sem fio e o número de bytes e dados que são transmitidos a cada mês. Elas, simplesmente, estão ficando com o seu espectro esgotado (HAAS et al., 2011). Podemos perceber que, se a demanda crescente é um problema, a capacidade de canal da luz visível é uma vantagem considerável com relação à comunicação por ondas de rádio.

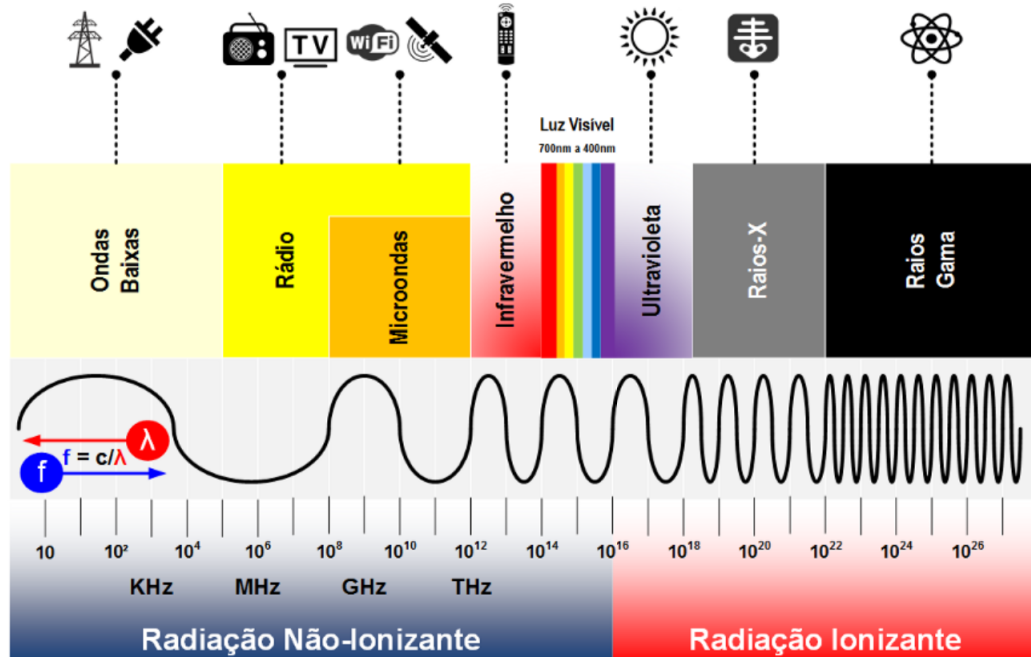
Segundo Hussein e Annan (2019), o espectro eletromagnético referente a radiofrequência (RF) tem se configurado como insuficiente. A própria busca pelo aumento da frequência de transmissão evidencia isso, pois, em se tratando da utilização de altas frequências de rádio, ainda que as frequências de rádio utilizadas atualmente não sejam prejudiciais de forma imediata aos seres humanos, a tendência é a de que esse processo seja regido pela necessidade de performance e eficiência, aumentando a frequência utilizada, porém sabemos que o corpo humano não deve se expor a frequências elevadas de RF.

2.3.3 Taxa de dados

A taxa de dados é um fator extremamente importante do ponto de vista comercial, pois todos querem conexões mais rápidas, que possuam essa velocidade do tráfego de informações cada vez mais aprimorada. Segundo Hussein e Annan (2019), em 2017, a velocidade de *download* estava em torno de 40 Gb/s. Quando comparados com os 300 MB/s do melhor sistema Wi-Fi disponível, é cerca de 100 vezes mais rápido.

Em 2018, Chakraborty et al. (2018) nos informa que a velocidade de uma transmissão de dados através do *Li-Fi* é, em torno, de 100 vezes mais rápida que por *Wi-Fi*,

Figura 2 – Espectro eletromagnético.



Fonte: (BRITO, 2020).

podendo alcançar velocidades de até 224 Gb/s. No intuito de concretizar essa transmissão, seriam necessários um LED branco de alto brilho como fonte e um fotodiodo com boa resposta a luz visível como elemento receptor.

Uma das principais características que posicionam o LED como uma fonte de relativa qualidade, com o intuito de emitir os dados no sistema, é a sua capacidade de modulação em altas frequências. Comparado com sinais de RF, segundo [Khalid et al. \(2012\)](#), os LEDs podem prover uma taxa de transferência de dados bem maior.

Os LEDs podem ser modulados em frequências muito altas, o que aumenta sua eficiência e permite a dupla finalidade de comunicação e iluminação de dados simultaneamente. A frequência de rádio tem algumas limitações que não estão à altura da demanda atual de largura de banda, mas usando luz visível, é possível obter taxas de dados mais altas por usuário. ([JHA; MISHRA; KUMAR, 2017](#)).

Há duas abordagens comuns, de acordo com [Khalid et al. \(2012\)](#) e [Cossu et al. \(2012a\)](#), para se produzir uma luz branca através de LEDs. Uma envolve LEDs de cor azul com fósforo de banda larga que produzem a forma de luz branca. Outra forma é por meio de LEDs vermelho, verde e azul, conhecidos como *Red, Green and Blue* (RGB).

Na primeira possibilidade, [Khalid et al. \(2012\)](#) foi capaz de atingir uma taxa de dados transmitidos de 1 Gb/s para um nível de iluminação padrão, utilizando um modulador *Discrete Multitone* (DMT). Isso foi possível após a investigação dos efeitos não-lineares do LED e do amplificador de potência.

Na segunda possibilidade, [Cossu et al. \(2012b\)](#) demonstrou experimentalmente o alcance de uma taxa de transmissão de dados, utilizando um LED branco, explorando uma modulação DMT otimizada, de 1,5 Gb/s com canal único e 3,4 Gb/s, implementando uma transmissão por *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) nos níveis de iluminação padrão.

De acordo com [O'brien et al. \(2008\)](#), a solução através do LED RGB é mais qualificada quando comparada ao LED à base de fósforo para melhorar a taxa de dados devido a uma característica do fósforo, cuja resposta é lenta e limita a largura de banda da modulação. Além disso, sua eficiência energética é reduzida quando combinado com o filtro azul de rejeição dos componentes fosforescentes. O autor ainda cita que os LEDs RGB oferecem a possibilidade a utilização da modulação WDM, a qual incrementa a capacidade total de transmissão.

2.3.4 Eficiência energética

Um aspecto relevante a se analisar é a eficiência energética gerada pela substituição das lâmpadas fluorescentes pelas LEDs. Se analisarmos o custo da energia, as lâmpadas LEDs são altamente eficientes. Adotadas em grande escala, diminuiriam consideravelmente o consumo energético e promoveriam uma grande redução na emissão de carbono ([CARVALHO; PEREIRA; CARVALHO, 2015](#)). Nos últimos 40 anos enquanto a capacidade de fluxo de dados em um LED vem aumentando aproximadamente 30 vezes por década, o custo de produção do mesmo cai a 10 vezes por década. Essa relação é conhecida com o a Lei de Haitz ([KUMAR et al., 2008](#))

O consumo de energia para iluminação por uma lâmpada fluorescente compacta no estilo *twisted* é de 23W enquanto que o consumo para iluminação de um único LED é de 1,05W ([SUN et al., 2013](#)). No artigo de [Sun et al. \(2013\)](#), foi realizada uma comparação relacionando o uso da iluminação em uma residência com lâmpadas de LEDs brancos e fluorescentes, com suas respectivas quantidades, potências e percentuais. Todas essas informações estão contidas na Tabela 2.

2.3.5 Infraestrutura

A infraestrutura da mencionada tecnologia está disponível onde a luz pode ser usada para iluminação e comunicação simultaneamente ([HUSSEIN; ANNAN, 2019](#)). Um dos mais significativos custos que uma nova tecnologia poderia possuir seria o de infraestrutura. Toda uma nova rede de distribuição e a substituição de todo um paradigma já estabelecido poderiam tornar a implementação extremamente onerosa. Entretanto, o fato é que a própria infraestrutura de distribuição de energia elétrica seria utilizada para tal fim.

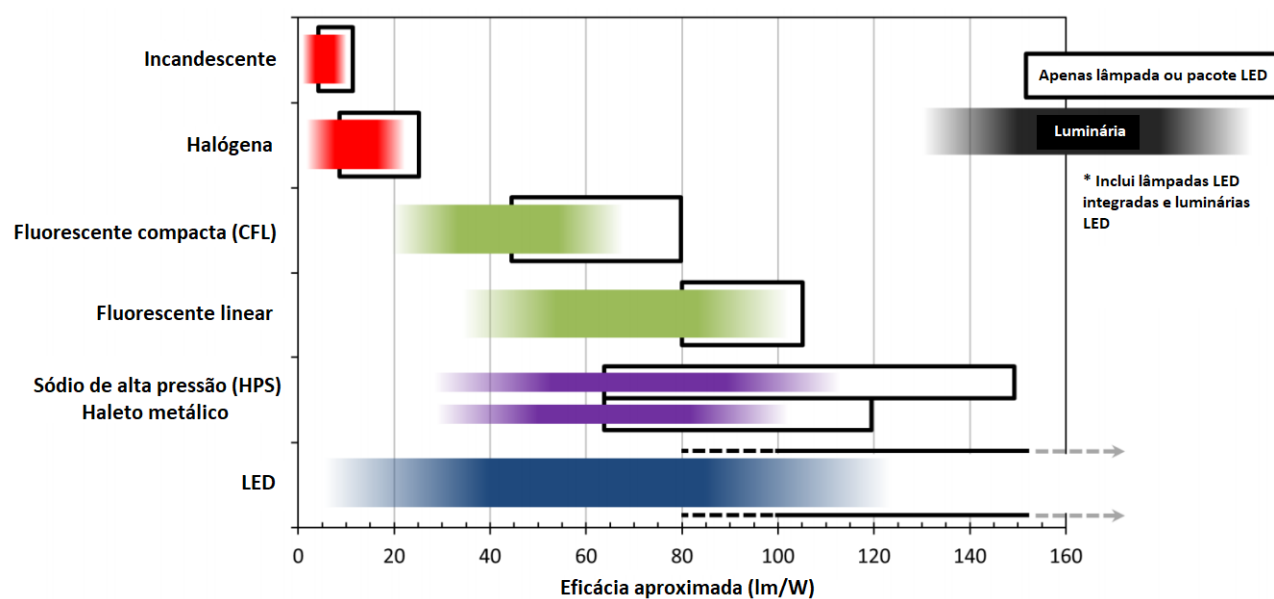
A iluminação fundamentada em LED está cada vez mais presente e traz benefícios

Tabela 2 – Consumo de potência de diferentes fontes luminosas para o mesmo padrão de iluminação.

Tipo Ambientes	Lâmpada LED			Lâmpada Fluorescente		
	Quantidade	Potência	Percentual	Quantidade	Potência	Percentual
Varanda	24	25,2 W	5	2	46 W	5
Sala de estar	96	100,8 W	20	6	138 W	15
Sala de jantar	12	12,6 W	2,5	3	69 W	7,5
Cozinha	60	63 W	12,5	5	115 W	12,5
Sala de leitura	32	33,6 W	6,67	4	92 W	10
Quarto principal	44	46,2 W	9,17	4	92 W	10
Quarto infantil	90	94,5 W	18,75	4	92 W	10
Quarto dos pais	80	84 W	16,67	7	161 W	17,5
Banheiros	24	25,2 W	5	2	46 W	5
Escada	18	18,9 W	3,75	3	69 W	7,5
Total	480	504 W	100	40	920 W	100

Fonte: (SUN et al., 2013).

Figura 3 – Gama de eficácia para várias fontes de luz.



Fonte: (IANNUCCI; PINI, 2014).

consistentes e relevantes quando comparada a iluminação por lâmpadas fluorescentes, como visto na Tabela 2. A Figura 3 compara a eficácia luminosa das lâmpadas e a eficácia da luminária, ambos em lm/W. A eficácia da luminária (representada pelas regiões sombreadas) refere-se a todo o sistema (incluindo elétrico, térmico, e perdas ópticas) (IANNUCCI; PINI, 2014). A utilização de toda essa infraestrutura, implementando-se apenas a modulação desse elemento final do sistema, torna o custo com infraestrutura extremamente baixo, quando comparado com os custos padrões de implementação de uma tecnologia inovadora.

Nesse contexto, mesmo as infraestruturas tradicionais como o sistema de iluminação pública de uma cidade podem revelar oportunidades interessantes, quando acopladas com tecnologias atualizadas. A relevância da tecnologia *Li-Fi* é identificada quando é relacionada a capacidade de instalar com eficiência conexões sem fio para transferência de dados sem aumentar (ou reduzindo também) o fundo do microondas em uma área urbana (IANNUCCI; PINI, 2014).

2.3.6 Segurança e Disponibilidade

A segurança é outro problema da comunicação sem fio atual, pois as ondas de rádio penetram através das paredes. Elas podem ser interceptadas, alguém pode fazer uso da sua rede se possui más intenções (HAAS et al., 2011). A tecnologia VLC é considerada mais segura, por definição, do que as técnicas tradicionais baseadas em rádio. Isso ocorre porque a diretividade e a alta impermeabilidade dos obstáculos dos sinais ópticos na VLC são considerados uma maneira mais segura (em comparação com RF) de transmissão de dados em um ambiente interno, tornando o sinal difícil de interceptar de fora (BLINOWSKI, 2019).

Conti (2008) intitulou um trabalho com a expressão "*What you see is what you send*" (WYSIWYS), definindo de forma sucinta, com uma sigla, como a VLC se coloca no quesito segurança da informação transmitida. Além da segurança com a informação, podemos citar os protocolos de segurança adotados em alguns ambientes que limitam a utilização de RF por questão de segurança. Ambientes intrinsecamente seguros, como uma usina de petroquímicos, não se pode usar RF, pois há a possibilidade de gerar faíscas na antena. Não obstante, podemos usar luz para viabilizar a comunicação sem fio (HAAS et al., 2011). Ainda segundo Haas et al. (2011), o autor nos desafia a pensar em outros lugares e situações, como por exemplo, hospitais e aviões, em que a disponibilidade da rede baseada em RF é limitada por suas características inatas.

2.4 Revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam VLC

Os pesquisadores que estudam a comunicação através de luz visível têm realizado importantes avanços através de artigos científicos que aprimoram e aproximam a utilização desse tipo de comunicação da realidade do nosso cotidiano. Nesta seção, foi realizado uma revisão de alguns dos principais trabalhos, disponibilizando os principais comentários sobre esses trabalhos de forma sucinta, abordando o cerne da pesquisa desenvolvida pelos autores.

Em [Duarte \(2018\)](#), foi realizado um estudo de alcance de sinal utilizando LEDs como transmissores para realizar uma comunicação sem fio através do espaço livre. Além disso, o trabalho se concentra na identificação dos pontos de *Eavesdropper*, que consiste em um dispositivo externo à rede que se aproveita da fulga de sinal entre o link ponto a ponto do transmissor para o receptor afim de capturar a informação enviada. Ademais, é realizado um mapeamento em um plano cartesiano da área de alcance do sinal e são verificados os pontos onde o sinal possui a maior e menor intensidade.

Em consonância com uma de nossas sugestões de trabalhos futuros, no que se refere à localização de robôs em movimento, o artigo de [Soner e Coleri \(2020\)](#) propõe uma nova solução de estimativa de posicionamento de veículo, baseada em VLC com um receptor de baixo custo que pode simultaneamente fornecer comunicação com alta taxa de dados transmitidos e medição de alta precisão e alta resolução. Em [Memedi e Dressler \(2020\)](#), foi estudado o estado da arte das comunicações utilizando luz visível concentrado nas aplicações veiculares. A pesquisa traz um estudo sobre o sistema de comunicação entre veículos se aprofundando nas características da VLC.

Em [Kumar e Singh \(2019\)](#), foi realizada uma revisão sobre VLC de forma abrangente, considerando os desafios enfrentados pelo sistema. Foram elucidados benefícios e aplicações do sistema. Ademais, foram discutidas técnicas de modulação e a comparação entre elas foi realizada através de simulações utilizando MATLAB. Os pesquisadores expuseram que as características dos sistemas VLC, maioria delas discutidas no nosso trabalho, são motivadoras da pesquisa, devido ao futuro promissor da tecnologia como substituto da comunicação baseada em RF. Em conclusão, além da viabilidade das comunicações através de luz visível, os autores consideraram, através dos resultados das simulações, que a técnica de modulação a ser melhor aplicada depende da taxa de dados. Se baixa a moderada, a modulação de uma única portadora realiza a transmissão. Entretanto, para taxa de dados mais elevadas, a técnica de múltiplas portadoras se faz necessária.

Um dos campos de pesquisa explorados pelos pesquisadores da área de VLC é o de posicionamento *indoor* através de luz visível, visando suprir as limitações do sistema de posicionamento global (GPS). Em [Yang et al. \(2013\)](#), o posicionamento foi idealizado baseando-se na potência dos sinais recebidos, os quais variam dependendo do ângulo e

da distância. Entretanto, o trabalho não considera os ruídos oriundos de outras fontes luminosas. Em [Yasir, Ho e Vellambi \(2014\)](#), a localização de um smartphone com o receptor é realizada considerando inclusive a altura, utilizando o sensor de luz e o acelerômetro, comumente encontrado em tais dispositivos. Entretanto, os dispositivos transmissores estão, necessariamente, na mesma altura e um erro considerável na altura é observado a partir de determinada angulação. Em [Vongkulbhisal et al. \(2012\)](#), é realizado um mapeamento do ambiente interno e essas informações são armazenadas em um banco de dados. Esses vários locais, onde o mapa interno é distribuído, são chamados de impressões digitais e os valores da potência do sinal recebidos em cada local são armazenados igualmente.

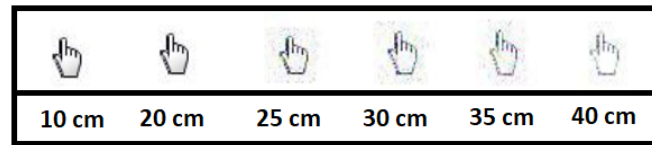
No ambiente real, existem muitas outras fontes participando e produzindo ruído no receptor, o que atrapalha a obtenção do posicionamento. Então, os sistemas de posicionamento têm resultados difíceis, mesmo em ambientes não críticos. Portanto, em todas essas situações, uma filtragem de algoritmo é empregado para melhorar os resultados dos sistemas de posicionamento. Em [Eroglu, Erden e Guvenc \(2019\)](#), o filtro utilizado na primeira fase calcula o estado atual e a covariância com base nos valores anteriores e em seguida, ele modifica os valores previstos. É possível alcançar boas estimativas com a filtragem realizada. Para sistemas não lineares, implementações são requeridas. Em [Popoola et al. \(2019\)](#), é utilizado um filtro mais estável, entretanto mais complexo.

Em [Shamsudheen, Sureshkumar e Chunkath \(2016\)](#), foi realizada uma transmissão de uma imagem e verificadas algumas variáveis relativas à imagem e à distância de transmissão. A relação sinal-ruído de pico (PSNR), que é a relação entre a potência máxima possível de um sinal e a potência de ruído de distorção. O erro quadrático médio (MSE) mede a fidelidade do sinal. Ademais, também menciona a taxa de erro de bit (BER), que é a razão entre o número de bits com erro para o número total de bits transferidos ao longo do período de tempo estudado. As imagens transmitidas variaram de acordo com a distância, como podemos ver na Figura 4.

Uma das características tratadas na fundamentação teórica do nosso trabalho foi a disponibilidade dos sistemas de comunicação baseados em luz visível. Atualmente, as tecnologias de comunicação sem fio são empregadas na área médica para aumentar a flexibilidade e conveniência. Entretanto, sempre há o risco de perturbação por ondas eletromagnéticas para equipamentos médicos de precisão. Em [Ng e Chung \(2012\)](#), foi desenvolvido um novo sistema de comunicação utilizando luz visível para um ambiente hospitalar. Utilizando o protótipo, médicos e pacientes podem baixar os dados biomédicos e informações de saúde usando um dispositivo portátil com sensor óptico conectado.

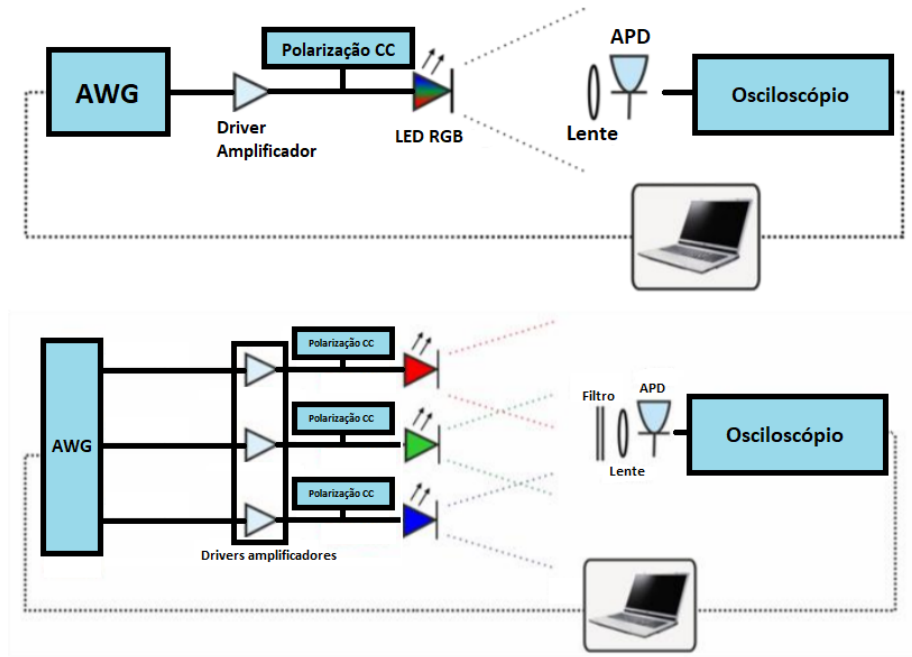
Alguns outros artigos discutem diversas possibilidades para a utilização da VLC. Nos trabalhos de [Arnon \(2014\)](#) e [Luo et al. \(2017\)](#), o assunto deriva para sistemas de transporte inteligentes, carros utilizando luz visível para comunicação. Outro tema recorrente e atual são as cidades inteligentes, que são mencionadas pelo artigo de [Yaqoob et al. \(2017\)](#).

Figura 4 – Imagens transmitidas e distâncias.



Fonte: (SHAMSUDHEEN; SURESHKUMAR; CHUNKATH, 2016).

Figura 5 – Configurações realizadas.



Fonte: (COSSU et al., 2012c).

Diferentemente da localização dos carros, em ambiente *outdoor*, temos nos artigos, [Luo, Fan e Li \(2017\)](#) e [Patil et al. \(2017\)](#), a localização de robôs em ambientes *indoor*. Uma pesquisa interessante é a de sensoriamento humano, cujo artigo [Li et al. \(2015\)](#), onde o sistema usa a sombra do corpo humano a partir da luz bloqueada e reconstrói as posturas do esqueleto humano em tempo real, de forma tridimensional. Em [Khan \(2017\)](#), o assunto é a comunicação através de luz visível sem riscos no hospital, o que não é aconselhável com a RF. Inclusive em brinquedos e roupas estão sendo realizadas pesquisas para viabilizar a implementação, vide [Schmid et al. \(2017\)](#).

Em [Cossu et al. \(2012c\)](#), para realizar uma comunicação através de luz visível, foram implementadas duas configurações diferentes, como pode ser visto na Figura 5. Nesse artigo, foi apresentado um aumento significativo, quando comparado com trabalhos anteriores, na taxa de dados para as duas situações. Em um primeiro experimento, foi utilizado o LED RGB como uma fonte de canal único e foi alcançado 1,5Gb/s de capacidade. Em um segundo experimento, foi utilizado o LED RGB como fonte WDM, ou seja, cada cor

carregava um sinal diferente, atingindo a capacidade agregada de $3,4\text{Gbit/s}$. As BERs em ambos os casos estavam abaixo de 2.10^{-3} .

2.5 Conclusão do capítulo

Estudos estão sendo desenvolvidos no intuito de explorar as características da comunicação através de luz visível, com o enfoque principal no *Li-Fi*. Vários estudos mostram o potencial de desenvolvimento dessa tecnologia e as variadas aplicações, algumas já existentes com a atual tecnologia, outras ainda inexploradas por limitações intrínsecas ao paradigma da comunicação sem fio atual. Ainda nesse capítulo, foi realizada uma breve revisão bibliográfica de trabalhos na área de comunicação baseada em luz visível.

No próximo capítulo, demonstraremos a metodologia das medições realizadas no protótipo, onde serão estudadas as grandezas referentes à intensidade luminosa, à intensidade sonora e as suas respectivas atenuações. Ademais, realizaremos uma comparação entre as atenuações da luz e do som, para entender como ocorre a atenuação da iluminação em relação a atenuação do som reproduzido pelo dispositivo.

3 Metodologia

3.1 Introdução

Neste capítulo, inicialmente, tratamos da idealização e da montagem do protótipo de transmissão de dados via luz visível. Em um segundo momento, apresentamos o protótipo através de imagens e dispomos de duas tabelas informativas dos custos dos componentes empregados na construção. Posteriormente, definimos a configuração da mesa de medições, mencionando a sua concepção e a disposição dos elementos transmissor e receptor durante os testes. Além disso, definimos os pontos de medição, o distanciamento entre eles, a quantidade e a denominação. Ainda neste capítulo, esclarecemos a definição dos eixos horizontais e verticais, definindo os principais e, principalmente, firmando a escolha do ponto de referência para o cálculo das atenuações das grandezas luminosa e sonora. A medição de fato foi apresentada em dois tipos de gráficos, de cores e de linhas, que serão definidos nesse capítulo. Por fim, foram explicados os procedimentos realizados para aferição das intensidades luminosa e sonora.

3.2 Idealização e montagem do protótipo

O desafio de transmitir informação através de luz visível inicia-se na concepção de um modulador de um LED para transmitir algum tipo de dado. Foi escolhido transmitir arquivos de áudio por terem uma interface de saída mais simples, como, por exemplo, um alto-falante. Em um segundo momento, foi necessária a captação dessa informação em forma de luz visível, a transformação para o domínio elétrico e a sua leitura por parte do sistema reproduzidor de som, externando-se através dos dois alto-falantes integrados.

O protótipo foi desenvolvido com componentes eletrônicos básicos, em sua maioria fundamentados na teoria dos semicondutores. É constituído por um diodo emissor de luz, um fotodetector, capacitores, resistores e um transistor com funcionamento na região ativa, trabalhando com grandezas elétricas contínuas e alternadas. No Anexo [A](#), temos uma explanação sobre os conceitos fundamentais dos componentes eletrônicos que compõem o protótipo.

A teoria dos semicondutores é fundamental para o estudo dos diodos, em particular o LED, e para o estudo dos transistores, ambos os dispositivos integrantes do protótipo que será apresentado. O transistor utilizado no circuito do protótipo funciona como uma espécie de *drive* para modulação do LED que transmitirá a informação para o circuito receptor. O *datasheet* do transistor utilizado pode ser encontrado no Anexo [B](#).

Os capacitores, dispositivos que possuem uma impedância dependente da frequência do sinal, são elementos indispensáveis para a filtragem das correntes contínuas (CC) e das correntes alternadas (CA), denominados como capacitores de acoplamento. O fotodetector é o principal elemento do circuito receptor, cuja função é transformar a informação luminosa enviada pelo LED modulado em sinal elétrico reproduzível pela alto falante acoplado. Nos anexos C e D encontram-se os *datasheets* do LED e do fotodiodo utilizados, respectivamente.

A construção de um aparato que pudesse transmitir dados de áudio através de luz visível foi realizada considerando que, no emissor, deveríamos capturar essa entrada no nosso sistema e utilizá-la como informação moduladora do LED. No receptor, fizemos o processo inverso. Inicialmente, utilizaríamos um componente sensível à luz que pudesse replicar, de forma inversa, a relação entre semicondutor e luz que ocorre no LED. Analogamente a um LED que recebe uma corrente elétrica e emite luz correspondente àquela grandeza, o fotodiodo seria o componente que, ao receber a luz, replicaria a corrente elétrica relativa a luz incidente em sua estrutura.

Antes do LED e depois do fotodiodo, deveríamos tratar esse sinal para que houvesse uma transmissão de dados efetiva, através de amplificadores baseados em transistores e filtros capacitivos para garantir a não interferência das componentes contínuas, necessárias para o funcionamento dos amplificadores, nas componentes alternadas. No nosso projeto, não foi implementado nenhum tipo de memória para armazenagem dos dados transmitidos. Podemos observar, na Figura 6, a diagramação do protótipo desenvolvido.

A filtragem e a amplificação do sinal consubstanciam-se em uma etapa fundamental para o funcionamento do protótipo dentro dos parâmetros desejados. Foram utilizados componentes eletrônicos típicos para essa etapa na configuração denominada amplificador por divisor de tensão. Na Figura 7, podemos ver o esquemático da etapa mencionada.

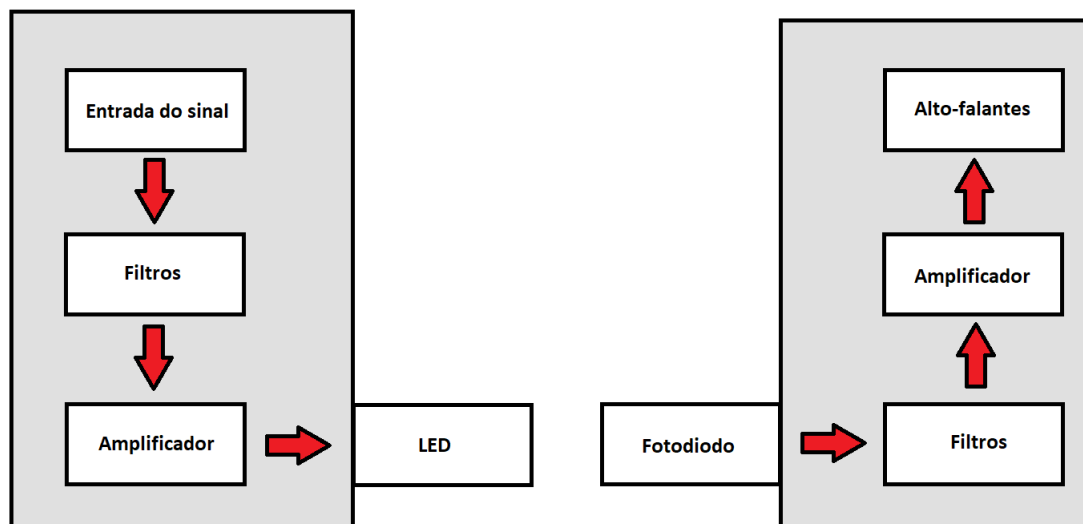
3.3 Protótipo

O protótipo desenvolvido é composto por um elemento transmissor, cuja saída da informação em forma de luz visível é viabilizada por um LED vermelho, e um receptor, cujo elemento de entrada da informação transmitida é um fotodiodo. Acoplado ao receptor, temos um sistema de filtragem e amplificação sonora com dois alto-falantes funcionando como saída.

3.3.1 Custo dos componentes

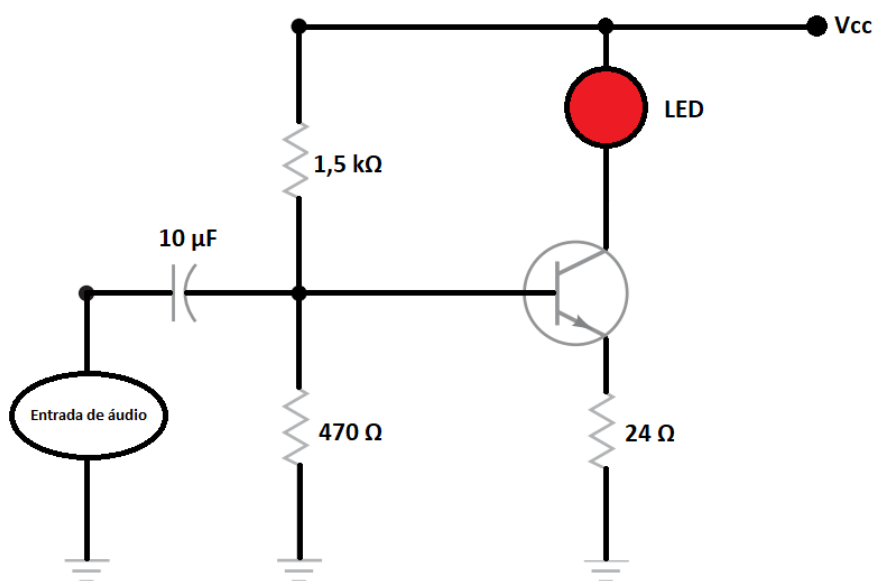
Uma das vantagens do nosso protótipo é o seu baixo custo de aquisição de componentes, devido ao fato do projeto ser baseado em componentes eletrônicos básicos e de fácil aquisição no mercado. Na Tabela 3, podemos observar os valores típicos dos

Figura 6 – Diagramação do protótipo.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 7 – Etapa de filtragem e amplificação.



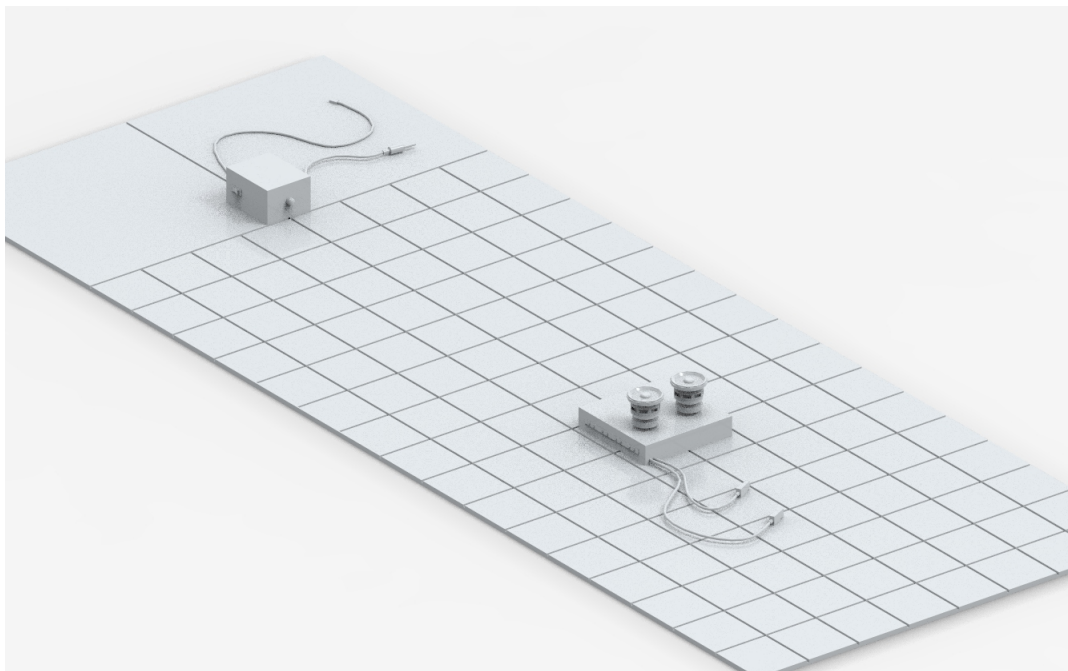
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Custos dos componentes mínimos e máximos.

Componentes	Custo por componente			Custo total	
	Máx. (R\$)	Mín. (R\$)	Qtde	Total mín. (R\$)	Total máx. (R\$)
Resistor	0,04	0,12	3	0,12	0,36
BC 547	0,40	1,20	1	0,40	1,20
LED	0,15	0,20	1	0,15	0,20
Capacitor	0,20	0,50	1	0,20	0,50
Fotodiodo	1,25	1,40	1	1,25	1,40
Plug P2	1,15	5,00	2	2,30	10,00
Total				4,42	13,66

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 8 – Disposição do protótipo e da mesa de medições.



Fonte: elaborada pelo autor.

componentes, variando entre valores mínimos e máximos que podem ser encontrados em lojas especializadas ou na internet. Os valores expostos não incluem custos com frete, dado o valor desse variar muito, dependendo da localidade, portanto seria algo a adicionar ao custo total, dependendo da localização. Outro custo que não foi considerado é o referente ao sistema reprodutor de som. Com a segunda entrada P2 é possível conectar o circuito receptor a reprodutores de áudio comuns, como alto-falantes ou caixas de som, com entradas compatíveis, disponíveis no mercado.

3.4 Configuração da mesa de medições

Nesta seção, observamos como a estruturação do processo de medições foi organizada. Abordaremos a concepção da mesa de medições, o distanciamento entre os seus pontos e a quantidade desses. Ademais, conceituaremos o *Line of sight* (LoS) e definiremos o ponto de medição que funcionará como referência para calcular as atenuações da luz e do som.

3.4.1 Mesa de medições

A auferição dos dados luminosos e sonoros foi realizada sobre uma mesa de medições, com distâncias determinadas e idênticas entre si, no intuito de perceber como as grandezas medidas se comportariam com o decréscimo da distância. A Figura 8 ilustra como a mesa de medições foi disposta com o protótipo, composto pelo emissor e pelo receptor, sobre ela e os pontos de medições estabelecidos para a consecução das medições.

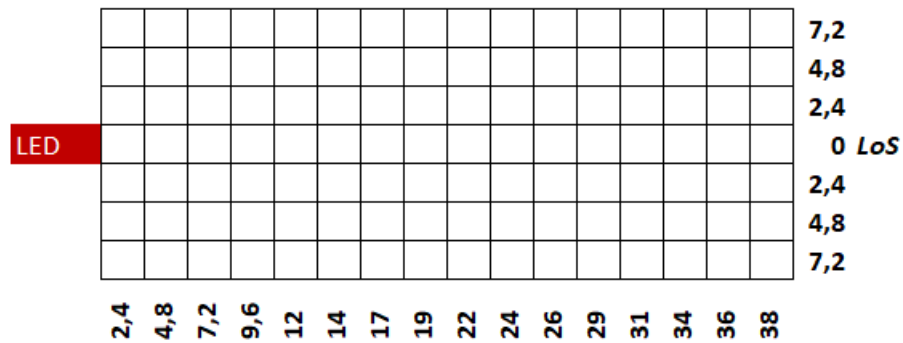
3.4.2 Pontos de medição

Os pontos de medição são as localidades onde o receptor do protótipo foi colocado para identificar os níveis de luminosidade e de intensidade sonora que incidiam no fotodiodo, naquela posição. O elemento de recepção foi mantido com a mesma angulação, em todos os pontos, portanto não foi realizado nenhum tipo de inclinação direcionando o receptor ao emissor.

Os pontos de medição contabilizaram 112 posições diferentes, sendo 7 eixos horizontais e 16 verticais. A intersecção dos eixos demarcam nossos pontos de medição. O espaçamento entre um ponto e outro, independentemente se na horizontal ou na vertical, foi estabelecido como sendo de $2,4\text{ cm}$. O porquê dessa medida se deve aos instrumentos utilizados na medição dessas distâncias. Para garantir que o paralelismo entre os eixos horizontais e entre os eixos verticais fosse respeitado, além de suas perpendicularidades entre horizontais e verticais, era necessário utilizar a medida adotada. Sem perda de generalidade, poderíamos ter escolhido qualquer distância entre os pontos, pois essa escolha não afetaria a medição em si, apenas a resolução do gráfico. Com distâncias menores, mais pontos de medição e, portanto, uma resolução maior da gradação de cores utilizada nos gráficos. Da mesma forma, se tivéssemos pontos mais distantes entre si, teríamos uma resolução menor.

Os pontos foram referenciados na forma $(x; y)$, onde x representa o ponto considerando o eixo horizontal e y , o eixo vertical. Na Figura 9, temos uma vista superior da mesa de medições, onde os pontos de medição foram representados pelos quadrados em branco e o LED emissor, pelo retângulo vermelho com a inscrição LED.

Figura 9 – Pontos de medição.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.4.3 Eixos horizontais e verticais

O principal eixo horizontal foi denominado *Line of Sight* (LoS), considerado como sendo a linha de visão do LED. Os demais, possuem o espaçamento de 2,4 cm, contabilizando 3 eixos acima e 3 abaixo. São 7 eixos horizontais no total. Na vertical, podemos definir como um eixo principal, o mais próximo, aquele que se distancia de 2,4 cm, do LED do emissor. Esse eixo é importante, pois a intersecção desse com o LoS, ($LoS; 2,4$), será o nosso ponto de medição referência para análise das atenuações das intensidades luminosa e sonora.

3.5 Medição da luz e do som

Nesta seção, definimos, inicialmente, os dois tipos de gráficos utilizados para representar as grandezas medidas. Posteriormente, tratamos dos procedimentos da medição das intensidades luminosa e sonora. O funcionamento do protótipo foi estudado através de suas variáveis, encontradas utilizando cálculos e medições. Para isso, utilizamos um decibelímetro e um luxímetro, além de dados referentes ao LED aferidos na medição e dentro dos parâmetros do seu *datasheet*, que pode ser encontrado no Anexo C. Ilustrada na Figura 9, podemos observar a configuração da mesa de medições na perspectiva bidimensional superior.

3.5.1 Gráfico de cores e de linhas

Foram escolhidas duas formas gráficas para representar as grandezas medidas. Uma delas foi o gráfico de cores, onde as posições dos pontos de medição podem ser vistas e, além da informação da localização, temos o valor da grandeza medida e uma escala de cores do vermelho ao verde, representando valores numericamente maiores e menores, respectivamente. A unidade de medida utilizada, referente aos valores expostos dentro da

Figura 10 – Legenda do gráfico de cores.



Fonte: elaborada pelo autor.

tabela, encontra-se exposta no canto superior esquerdo. A Figura ??, nos mostra uma legenda explicativa sobre a gradação utilizada.

Outra forma utilizada para representar as informações coletadas nas medições foi o gráfico de linhas, onde podemos perceber o comportamento da medição sonora em função do distanciamento horizontal e vertical.

3.5.2 Medição da intensidade luminosa

Inicialmente, através de um luxímetro, foi auferido, em cada ponto de medição, um valor médio da exposição do receptor ao emissor durante 30 segundos. Esses valores médios foram registrados e o mesmo procedimento foi realizado em todos os 112 pontos. O luxímetro forneceu dados para a formação de uma matriz de dados em lux. Em seguida, esses dados foram convertidos para uma unidade de potência por unidade de área. Consideramos, segundo [Pattison, Hansen e Tsao \(2018\)](#), de forma conservadora, um rendimento igual a 90 lúmens por Watt. Logo após, utilizamos a conversão para a escala logarítmica, que nos fornece a atenuação dessa intensidade luminosa. Conforme mencionado, definimos o ponto ($LoS; 2, 4$) como referência para calcular a atenuação nos demais pontos.

3.5.3 Medição da intensidade sonora

Após as medições da intensidade luminosa em cada ponto, foram medidos nas mesmas localizações da auferição luminosa, através de um decibelímetro, as medições da intensidade sonora. Da mesma maneira, após a calibração do aparelho, uma média dos valores capturados durante 30 segundos em cada ponto de medição foi registrada e originou uma matriz com as 112 medições. O decibelímetro fornece o nível de intensidade sonora em dB, não necessitando de conversões extras. De forma idêntica ao cálculo da atenuação luminosa, consideramos o ponto ($LoS; 2, 4$) como referência da atenuação sonora.

3.6 Conclusão do capítulo

Nesse capítulo, foram explicados os procedimentos realizados para que as informações sobre as grandezas medidas possam ter sido coletadas. No próximo capítulo, todas essas informações serão computadas em formas gráficas, que também foram mencionadas e definidas nesse capítulo. Atráves dessas formas gráficas, podemos realizar o estudo dos valores medidos e fornecer os resultados referentes ao funcionamento do protótipo.

4 Resultados

4.1 Introdução

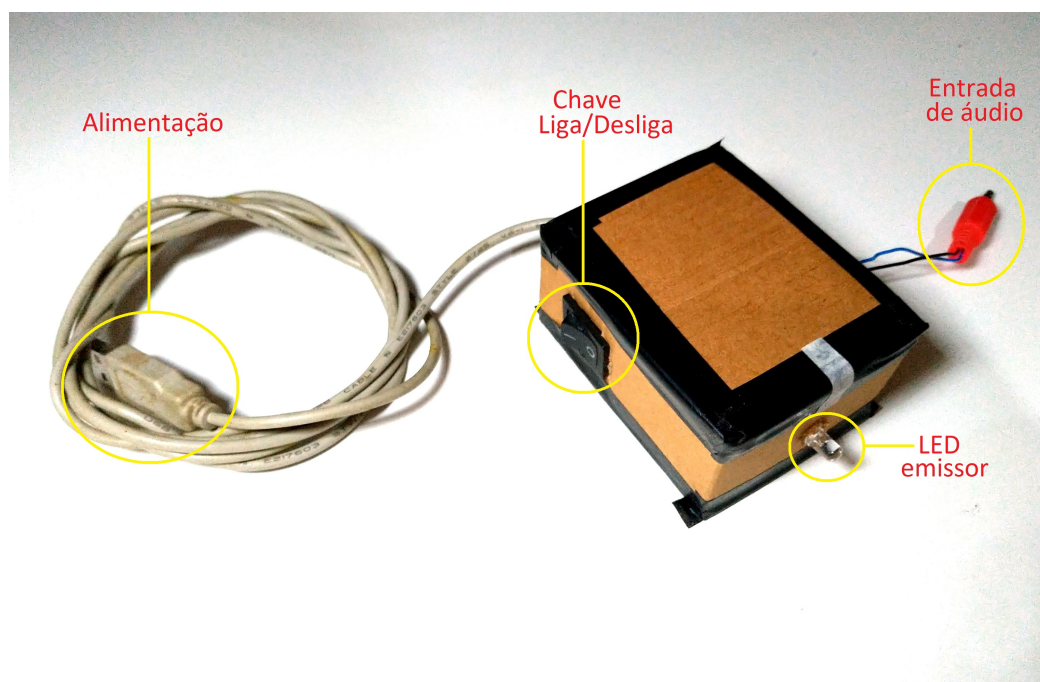
Neste capítulo, descrevemos e discutimos os resultados decorrentes da construção do protótipo, das medições realizadas, explanadas no capítulo anterior, e abordamos as principais observações referentes à transmissão de informação através de luz visível. Consoante a isso, podemos observar nas seções a seguir que o estudo das principais características viabilizadoras do *Li-Fi*, a construção de um protótipo para transmitir áudio através de luz visível e o estudo dessas grandezas envolvidas na transmissão foram realizados.

4.2 Resultados obtidos

Inicialmente, podemos ver, nas Figuras 11 e 12, o protótipo construído, receptor e emissor. Além disso, através da estipulação das distâncias dos pontos na mesa de medições, foi gerado um gráfico de cores referente à distância entre os pontos de medição e o circuito com o LED emissor, representado pelo retângulo vermelho com a inscrição 0,00. Esse gráfico inicial pode ser visto na Figura 13. Posteriormente, após a medição com o luxímetro e a conversão dos dados para a escala logarítmica, temos, na Figura 14, a atenuação da intensidade luminosa em função da distância entre o LED emissor e os pontos de medição.

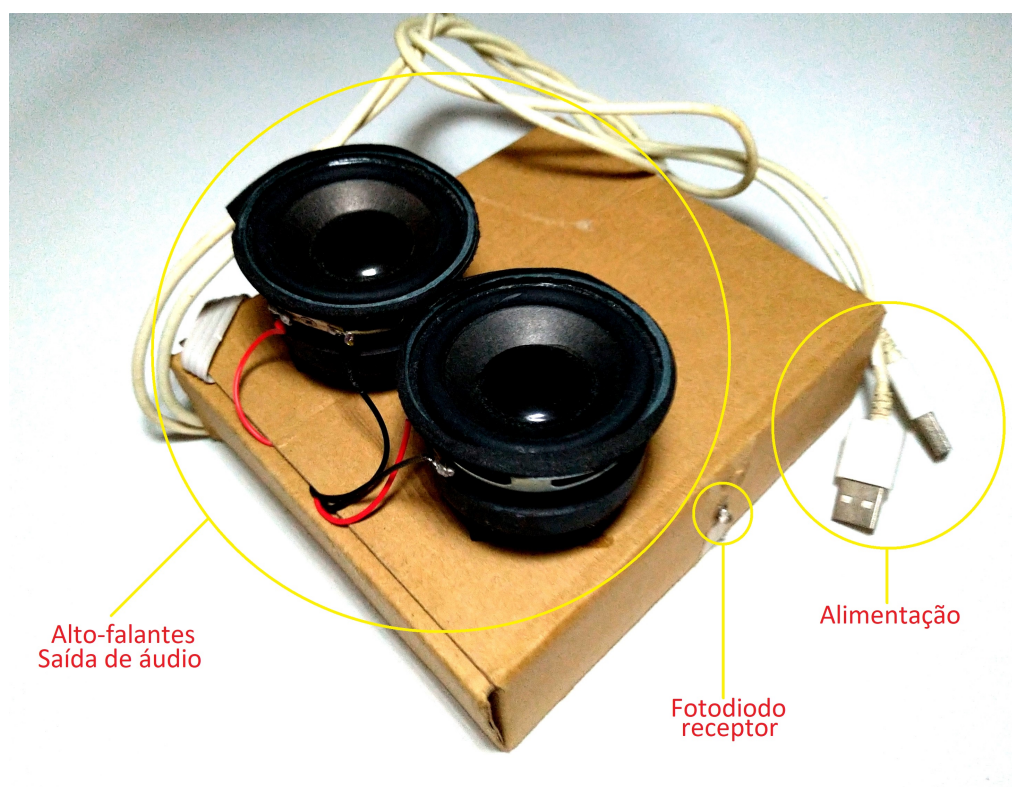
Em seguida, o decibelímetro nos fornece, em dB, o nível de intensidade sonora, como pode ser observado nas Figuras 15 e 16, considerando os eixos horizontal e vertical da mesa de medições como referência para a plotagem dos gráficos. Essas figuras representam a distribuição das medições sonoras em uma perspectiva de visualização compilada de todos os eixos horizontais e verticais, empilhando seus resultados nos seus respectivos gráficos. Outra forma de visualizar essa medição, é através do gráfico de cores apresentado na Figura 17. Entretanto, para efeito comparativo com a atenuação observada na intensidade luminosa, realizamos o mesmo procedimento adotado nessa para determinar a atenuação sonora, considerando o ponto (LoS; 2,4) como referência para os outros valores.

Figura 11 – Protótipo - emissor.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 12 – Protótipo - receptor.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 13 – Distância dos pontos de medição.

m	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	0,07589	0,08653	0,10182	0,12000	0,13994	0,16100	0,18278	0,20506	0,22768	0,25057	0,27364	0,29686	0,32020	0,34363	0,36713	0,39069
4,80	0,05367	0,06788	0,08653	0,10733	0,12924	0,15179	0,17472	0,19791	0,22127	0,24475	0,26833	0,29197	0,31567	0,33941	0,36319	0,38699
2,40	0,03394	0,05367	0,07589	0,09895	0,12238	0,14599	0,16971	0,19349	0,21733	0,24120	0,26509	0,28900	0,31292	0,33686	0,36080	0,38475
0,00	0,02400	0,04800	0,07200	0,09600	0,12000	0,14400	0,16800	0,19200	0,21600	0,24000	0,26400	0,28800	0,31200	0,33600	0,36000	0,38400
2,40	0,03394	0,05367	0,07589	0,09895	0,12238	0,14599	0,16971	0,19349	0,21733	0,24120	0,26509	0,28900	0,31292	0,33686	0,36080	0,38475
4,80	0,05367	0,06788	0,08653	0,10733	0,12924	0,15179	0,17472	0,19791	0,22127	0,24475	0,26833	0,29197	0,31567	0,33941	0,36319	0,38699
7,20	0,07589	0,08653	0,10182	0,12000	0,13994	0,16100	0,18278	0,20506	0,22768	0,25057	0,27364	0,29686	0,32020	0,34363	0,36713	0,39069

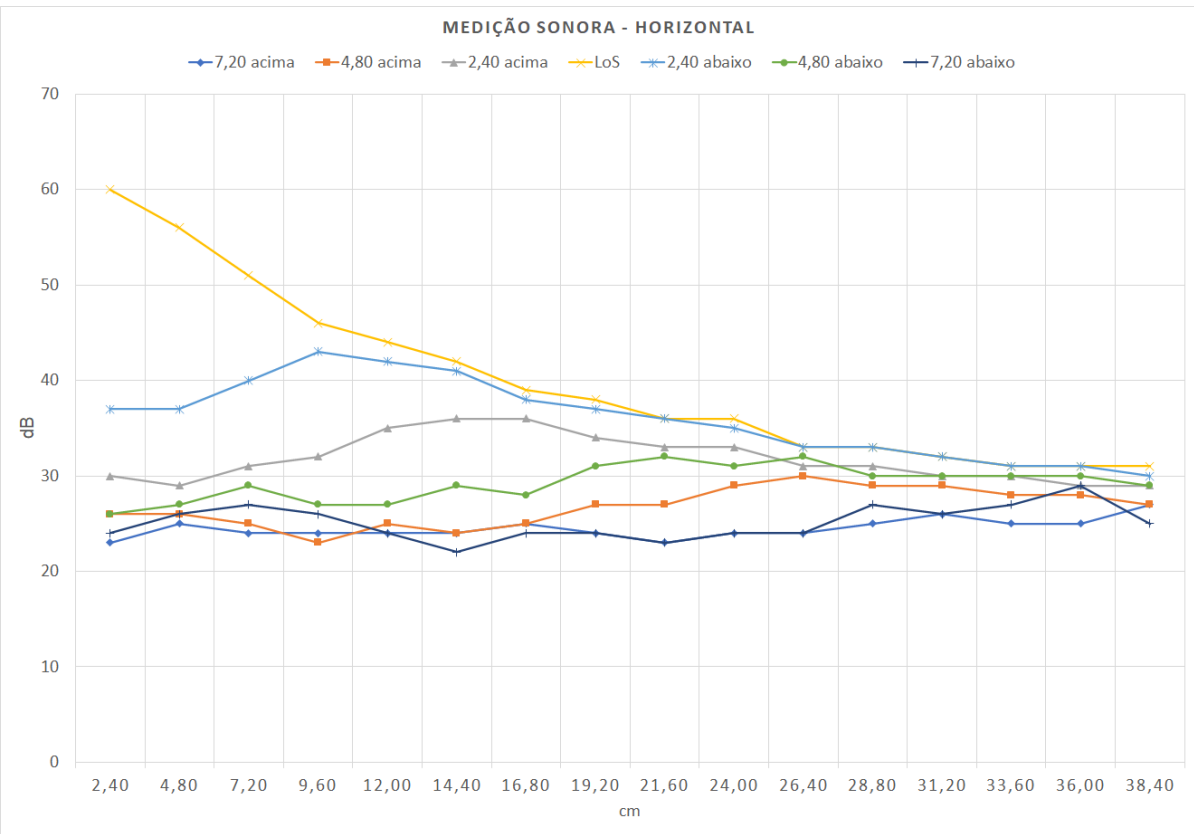
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 14 – Atenuação da intensidade luminosa.

dB	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	-28,69	-30,45	-28,69	-26,47	-26,47	-26,47	-25,01	-25,01	-25,01	-23,46	-23,46	-22,00	-21,42	-21,42	-21,70	-21,70
4,80	-28,69	-26,47	-25,01	-24,43	-23,46	-23,46	-22,32	-20,90	-19,84	-19,48	-19,14	-19,84	-20,03	-20,45	-21,15	-21,15
2,40	-20,24	-19,31	-17,33	-15,75	-15,01	-15,82	-16,47	-17,23	-17,23	-18,02	-18,27	-18,69	-18,99	-19,31	-19,66	-19,84
0,00	0,00	-4,93	-7,76	-9,88	-11,61	-12,78	-13,82	-14,77	-15,60	-16,38	-16,93	-17,55	-18,02	-18,54	-18,83	-19,14
2,40	-21,15	-18,54	-16,47	-14,77	-14,16	-15,33	-15,82	-16,47	-16,93	-17,55	-18,14	-18,69	-18,99	-19,66	-19,84	-20,03
4,80	-28,69	-25,68	-25,01	-23,92	-23,46	-23,46	-21,70	-21,70	-19,31	-18,69	-19,14	-19,66	-19,84	-20,24	-20,67	-20,67
7,20	-28,69	-28,69	-27,44	-27,44	-25,68	-25,68	-25,68	-25,68	-25,68	-23,46	-23,46	-23,46	-22,32	-21,42	-21,42	-21,42

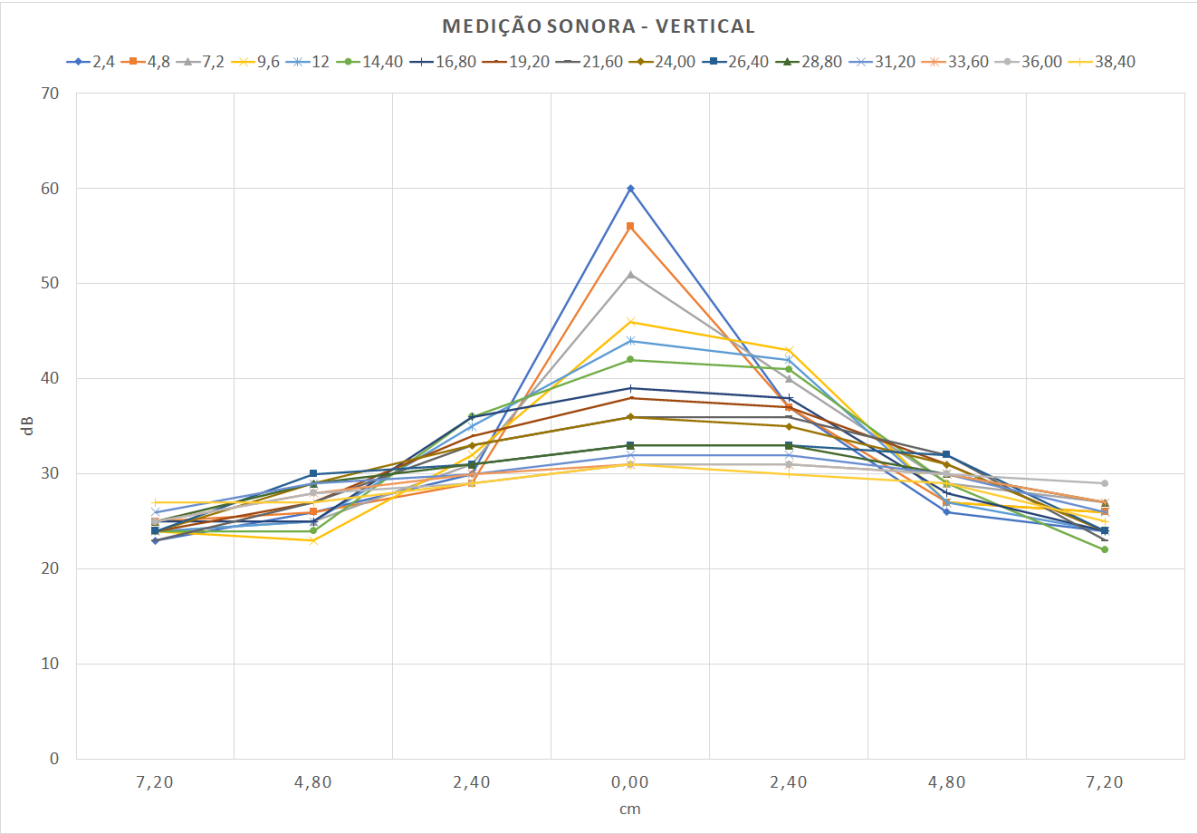
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 15 – Medição da intensidade sonora horizontal.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 – Medição da intensidade sonora vertical.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 17 – Medição da intensidade sonora.

dB	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	23	25	24	24	24	24	25	24	23	24	24	25	26	25	25	27
4,80	26	26	25	23	25	24	25	27	27	29	30	29	29	28	28	27
2,40	30	29	31	32	35	36	36	34	33	33	31	31	30	30	29	29
0,00	60	56	51	46	44	42	39	38	36	36	33	33	32	31	31	31
2,40	37	37	40	43	42	41	38	37	36	35	33	33	32	31	31	30
4,80	26	27	29	27	27	29	28	31	32	31	32	30	30	30	30	29
7,20	24	26	27	26	24	22	24	24	23	24	24	27	26	27	29	25

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 18, temos o gráfico de cores para a atenuação do som transmitido através de luz visível. Comparando os gráficos de atenuação da luz e do som, é obtida uma relação entre as atenuações das grandezas medidas. Essa relação pode ser vista na Figura 19.

4.3 Discussão dos resultados

Nesta seção, abordamos os pontos que demandaram observações mais relevantes e discutimos as suas causas e consequências em relação ao funcionamento do protótipo. Os tópicos abordados nessa seção de discussão dos resultados são referentes à medição sonora e a suas peculiaridades, especificamente a relação entre luz e som, o desvio na simetria

Figura 18 – Atenuação da intensidade sonora.

dB	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	-37,00	-35,00	-36,00	-36,00	-36,00	-36,00	-35,00	-36,00	-37,00	-36,00	-36,00	-35,00	-34,00	-35,00	-35,00	-33,00
4,80	-34,00	-34,00	-35,00	-37,00	-35,00	-36,00	-35,00	-33,00	-33,00	-31,00	-30,00	-31,00	-31,00	-32,00	-32,00	-33,00
2,40	-30,00	-31,00	-29,00	-28,00	-25,00	-24,00	-24,00	-26,00	-27,00	-27,00	-29,00	-29,00	-30,00	-30,00	-31,00	-31,00
0,00	0,00	-4,00	-9,00	-14,00	-16,00	-18,00	-21,00	-22,00	-24,00	-24,00	-27,00	-27,00	-28,00	-29,00	-29,00	-29,00
2,40	-23,00	-23,00	-20,00	-17,00	-18,00	-19,00	-22,00	-23,00	-24,00	-25,00	-27,00	-27,00	-28,00	-29,00	-29,00	-30,00
4,80	-34,00	-33,00	-31,00	-33,00	-33,00	-31,00	-32,00	-29,00	-28,00	-29,00	-28,00	-30,00	-30,00	-30,00	-30,00	-31,00
7,20	-36,00	-34,00	-33,00	-34,00	-36,00	-38,00	-36,00	-36,00	-37,00	-36,00	-36,00	-33,00	-34,00	-33,00	-31,00	-35,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 19 – Atenuação relativa entre intensidade sonora e luminosa.

dB	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	-8,31	-4,55	-7,31	-9,53	-9,53	-9,53	-9,99	-10,99	-11,99	-12,54	-12,54	-13,00	-12,58	-13,58	-13,30	-11,30
4,80	-5,31	-7,53	-9,99	-12,57	-11,54	-12,54	-12,68	-12,10	-13,16	-11,52	-10,86	-11,16	-10,97	-11,55	-10,85	-11,85
2,40	-9,76	-11,69	-11,67	-12,25	-9,99	-8,18	-7,53	-8,77	-9,77	-8,98	-10,73	-10,31	-11,01	-10,69	-11,34	-11,16
0,00	0,00	0,93	-1,24	-4,12	-4,39	-5,22	-7,18	-7,23	-8,40	-7,62	-10,07	-9,45	-9,98	-10,46	-10,17	-9,86
2,40	-1,85	-4,46	-3,53	-2,23	-3,84	-3,67	-6,18	-6,53	-7,07	-7,45	-8,86	-8,31	-9,01	-9,34	-9,16	-9,97
4,80	-5,31	-7,32	-5,99	-9,08	-9,54	-7,54	-10,30	-7,30	-8,69	-10,31	-8,86	-10,34	-10,16	-9,76	-9,33	-10,33
7,20	-7,31	-5,31	-5,56	-6,56	-10,32	-12,32	-10,32	-10,32	-11,32	-12,54	-12,54	-9,54	-11,68	-11,58	-9,58	-13,58

Fonte: elaborada pelo autor.

da medição sonora entre o hemisfério norte e sul, tomando, como referência equatorial, o LoS, a atenuação do som elevada em função do acréscimo da distância e o ponto onde a atenuação luminosa é maior que a atenuação sonora.

4.3.1 Relação entre luz e som

Com o protótipo em funcionamento, principalmente, mas também através dos números obtidos, percebeu-se que as grandezas luminosa e sonora estão intrinsecamente relacionadas, de uma maneira que a incidência direta do feixe luminoso sobre o fotodiodo permite uma reprodução com mais qualidade do que em posições onde a iluminação não é direta ou o distanciamento é superior. Esse comportamento dá suporte a pressuposição de que o protótipo estaria transmitindo os dados de áudio através de luz visível, cumprindo assim, com o objetivo da sua idealização e construção.

4.3.2 Medição sonora

No tocante a medição sonora realizada, algumas observações importantes surgem no momento da análise da Figura 17. A existência de uma não simetria é consideravelmente relevante, pois percebemos que há uma diferença substancial de decibéis em determinados pontos de medição simétricos, tomando como referência o LoS. Na Figura 20, temos uma ilustração dos locais mais suscetíveis a essas variações em pontos diametralmente opostos. Os valores mais elevados desse desvio se encontram na região onde a intensidade sonora e luminosa são maiores. Aparentemente, o sinal foi melhor captado no hemisfério sul, abaixo da LoS. O ponto que possui o maior desvio é o (2,4; 9,6).

Essa diferença, de forma geral, pode ser atribuída a uma série de características dos componentes e procedimentos na hora do teste de medição. Os elementos emissor e

Figura 20 – Desvios na simetria da medição sonora.

dB	2,40	4,80	7,20	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20	21,60	24,00	26,40	28,80	31,20	33,60	36,00	38,40
7,20	1	1	3	2	0	2	1	0	0	0	0	2	0	2	4	2
4,80	0	1	4	4	2	5	3	4	5	2	2	1	1	2	2	2
2,40	7	8	9	11	7	5	2	3	3	2	2	2	2	1	2	1

Fonte: elaborada pelo autor.

receptor podem apresentar algum defeito intrínseco, construtivo ou estrutural, de maneira a desuniformizar a intensidade luminosa prevista pela teoria, tanto na emissão, como na recepção do feixe de luz.

Considerando a medição realizada no nosso trabalho, uma possibilidade de entendermos o porquê dessa medição com certa descompensação seria uma pequena inclinação não prevista nos elementos de transmissão, não sendo possível, para o trabalho proposto, fornecer um alinhamento de eixos, entre o LED e o fotodiodo, perfeito. Além disso, há a possibilidade de que, durante a montagem do protótipo, algumas impurezas ficaram sedimentadas em uma concentração maior no lado do fotodiodo que recebe a luminosidade do LED quando aquele se encontra no hemisfério norte da mesa de medições.

Os dados objetivos que nos levam a concluir que as impurezas se encontram depositadas no fotodiodo, estão expostos na Figura 14 e traduz uma homogeneidade mais próxima do modelo ideal de luminosidade calculada pela teoria. Pelo fato da medição sonora possuir uma diferença relevantemente maior entre pontos simétricos quando referenciados pela LoS, exposto na Figura 20, podemos concluir que o problema de obstrução do feixe luminoso ocorre no receptor, não no emissor, que possui um gráfico de intensidade luminosa mais homogêneo.

Além dessas previsões, podemos ainda considerar os ruídos ambientes que possam ter causado interferência na medição sonora. A mesa de medições, no entanto, no momento dos testes, possuía uma medição inferior a 22 dB de ruído ambiente. Aproximadamente, seria um valor representativo de um ruído entre o barulho da respiração e de uma biblioteca silenciosa.

4.3.3 Atenuação do som

A taxa de decaimento da intensidade sonora, medido na Figura 18, é muito elevado, sendo essa atenuação medida, nos pontos mais distantes, em torno de -30 dB. Entretanto, era previsto esse decaimento acentuado devido a atenuação da luz emitida pelo LED. Ademais, percebemos, através da Figura 19, que o decaimento da intensidade sonora acompanha, em geral, de forma menos eficiente, a atenuação da luz visível. Podemos concluir que o som está sendo transmitida pela luz, com algumas perdas, em regra, quando comparada com a atenuação da luz.

4.3.4 Atenuação da luz superior a atenuação do som

As medições demonstraram um padrão de perdas consistentes, porém esperadas, relacionadas principalmente com a distância do elemento receptor ao emissor e com a captação do feixe luminoso de forma direta pelo fotodiodo. A intensidade luminosa é inversamente proporcional ao quadrado da distância e, dessa maneira, o som também tende a se comportar no mesmo sentido, ou seja reduzindo com o aumento do quadrado da distância.

Não obstante, alguns pontos se comportaram de maneira divergente ao restante do sistema. Podemos observar, na Figura 19, o ponto (LoS; 4,8) com valor positivo. Isso indica que, diferentemente dos outros pontos observados com valores negativos, nessa posição, temos uma atenuação da luz maior que a atenuação do som. Ambas as grandezas estão atenuando com o aumento da distância, entretanto, nesse ponto mencionado, temos a situação em que a intensidade luminosa decai com uma taxa de variação maior que a intensidade sonora. Isso pode ser explicado devido a proximidade entre os elementos emissor e receptor, cuja consequência dessa condição possa ter sido algumas reflexões que voltaram a incidir sobre o fotodiodo.

4.4 Distância máxima, interferência e obstrução do feixe de luz

O protótipo apresentou, além dos resultados obtidos mencionados anteriormente, algumas características que requerem uma menção específica, como a distância máxima de transmissão e a interferência luminosa.

Os gráficos representativos da intensidade sonora retratam uma queda abrupta com o distanciamento do emissor e do receptor. Entretanto, é perceptível que essa queda na intensidade sonora se atenua, tornando-se irrelevante com o aumento da distância. Em resumo, até certo ponto, a intensidade sonora se reduz como mostrado nos gráficos apresentados. Entretanto, quando atingida uma distância, a qual está associada uma reprodução sonora de baixa intensidade, mesmo com o aumento da distância, essa reprodução mantém, praticamente o mesmo nível de intensidade. Foi possível verificar a existência de som proveniente da transmissão via luz a uma distância de até 170cm.

Outra característica que pode ser apontada é a não interferência de outras fontes luminosas com relação aos dados transmitidos pelo sistema. mesmo com uma fonte luminosa externa, artificial ou natural, a transmissão e execução do arquivo de áudio se mostrou inalterada. Isso acontece devido a captação, pelo fotodiodo, apenas das pequenas variações causadas no LED através da modulação desse com os dados provenientes do áudio.

Ademais, a validação mais prática da transmissão de dados de áudio através de luz visível se dá com a obstrução do feixe luminoso. No momento em que colocamos um

obstáculo entre o emissor e o receptor, que impeça a passagem da luz para o circuito como fotodiodo, temos a interrupção instantânea da reprodução do áudio. Ao removermos o obstáculo, a transmissão volta a ocorrer, sempre em tempo real, pois a emissão do arquivo de áudio não foi interrompida, apenas o receptor foi impedido de receber a informação.

4.5 Conclusão do capítulo

Durante a exposição e a discussão dos resultados, podemos perceber que o som executado pelo dispositivo reprodutor de som acoplado ao elemento receptor estava sendo transmitido pelo emissor através da luz visível, mesmo que as atenuações ainda sejam elevadas e que a construção não industrial tenha tornado o protótipo com características não tão eficientes e padronizadas. Outro fator, consideravelmente definitivo com relação a transmissão de dados através de luz visível, foi o fato de que, quando colocado um obstáculo que não permite a passagem da luz entre o emissor e o receptor, a reprodução sonora é interrompida. No momento que o obstáculo é removido e a luz do LED fica possibilitada de percorrer o espaço livre até o fotodiodo, o som volta a ser reproduzido.

5 Conclusões

5.1 Introdução

Neste capítulo abordaremos as conclusões com relação ao estudo da tecnologia *Li-Fi* e sua viabilidade, ao protótipo em funcionamento e ao estudo do comportamento das grandezas medidas durante a transmissão de dados de áudio.

5.2 Viabilidade da tecnologia *Li-Fi*

O aumento da demanda em questão se coloca para a sociedade como extremamente provável. Não somente a população mundial que está cada vez mais conectada, mas também a quantidade de dispositivos que estão sendo adicionados a denominação *smart*. A própria alteração no paradigma do trabalho em um ambiente de trabalho, devido a crise sanitária de 2020, nos prepara para uma possível nova tendência mundial de mais pessoas se conectando de casa, em *home office*.

A capacidade do canal da tecnologia fundamentada em RF tem uma limitação definida e necessita de soluções para o longo prazo. A adição de uma tecnologia com uma faixa de espectro superior e capacidade de implementação conjunta com o próprio *Wi-Fi* permite a visualização de uma possível saída para o imbróglio decorrente dessa limitação atual.

A necessidade por conexões mais rápidas aumenta com a melhoria da qualidade de imagens, sons, vídeos e toda variedade de arquivos que serão compartilhados pela rede. O *Li-Fi* possui uma vantagem com relação a velocidade da tecnologia *Wi-Fi* que já se mostra muito relevante. Aditando a esse fato, a ideia de que as pesquisas relacionadas com a melhoria da taxa de transmissão continuarão a acontecer, é fácil perceber que esse abismo tende a aumentar, causando assim uma obsolescência em conexões com velocidades muito inferiores.

A eficiência energética de um sistema de comunicação busca a sustentabilidade. Com um rendimento muito inferior ao proposto pelos LEDs, as estações de rádio base são em sua maior parte, descrito como perdas. Essa ineficiência dos sistemas utilizados em conjunto com a eficiência da tecnologia *Li-Fi*, que utiliza um LED como elemento transmissor, configura a comunicação por luz visível como sendo uma alternativa bastante atrativa do ponto de vista econômico e ecológico.

A necessidade de investimento em infraestrutura é um ponto onde o *Li-Fi* se destaca quando comparado com outras tecnologias e seu processo de inserção no mercado.

A maior parte da infraestrutura compreende as próprias instalações elétricas das lâmpadas de iluminação, necessitando apenas a substituição de lâmpadas convencionais por LEDs. Devemos ainda levar em consideração que essa substituição é uma tendência mundial desde o surgimento da tecnologia de iluminação baseada em semicondutores. O ganho em eficiência consoante com a infraestrutura existente torna a transição consideravelmente menos onerosa.

A importância da segurança da informação é assunto cada vez mais recorrente e quando se trata de informações sigilosas, a preocupação com a integridade da rede é prioridade. Além da falta de segurança de informação, temos a limitação da disponibilidade tecnológica em certos ambientes restritos. Uma tecnologia baseada em luz visível não importaria preocupação nenhuma em locais intrinsecamente inseguros dada a presença de radiofrequência.

5.3 O protótipo e a transmissão de dados de áudio

A construção do protótipo foi realizada e pode ser visto nas Figuras 11 e 12. O áudio inserido no dispositivo emissor, através da entrada do tipo P2, foi transmitido, medido e mapeado de acordo com sua posição na mesa de medições. O sistema possui perdas e assimetrias de intensidade sonora em pontos igualmente distantes, mas com localizações diametralmente opostas, usando como referência a LoS. A causa provável dessas incongruências se revela como sendo o processo de manufatura do protótipo, sem o auxílio de maquinário específico de montagem com precisão industrial.

O estudo das grandezas envolvidas na transmissão de dados foi realizado e foi percebido que o áudio transmitido sofreu atenuações significativas. Entretanto, as atenuações elevadas estiveram presentes também na propagação da luz do LED. Esse decaimento no nível de intensidade sonora, juntamente com a intensidade luminosa, é congruente com a proposição do transporte de dados de áudio pela luz.

Dessa maneira, fomos capazes de, no nosso trabalho, além de abordar pontos relevantes relacionados à tecnologia *Li-Fi* e estudar sua viabilidade, transpor o escopo teórico da comunicação através de luz visível e construir um protótipo que transmite através de um LED, um sinal de áudio, independentemente de sua origem, em tempo real, para um outro ponto no espaço onde se encontra o receptor, sendo esse capaz de receber o sinal luminoso, recuperar o sinal elétrico e reproduzir através de alto-falantes.

5.4 Trabalhos futuros

A transmissão de informação através de luz visível e o estudo da tecnologia *Li-Fi*, nesse trabalho, tem caráter introdutório e incetivador a novas pesquisas em uma área que

ainda tem muito a se explorar. São propostas para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro:

- o estudo individualizado e aprofundado das características relevantes no que concerne à implantação do *Li-Fi* como tecnologia suplementar ou substituta do *Wi-Fi*;
- o controle da amplificação do sinal luminoso no receptor, equalizando-o para fornecer sempre a mesma intensidade sonora na saída;
- a implementação de uma comunicação via luz bidirecional;
- o desenvolvimento de um sistema de comunicação com a implementação de memória e protocolo de comunicação para garantir que a comunicação seja retomada em caso de interrupção;
- o desenvolvimento de um conversor analógico-digital para transmissão de bits em substituição à onda analógica;
- a comunicação via luz entre robôs em movimento com o objetivo de localização mútua;
- o desenvolvimento de robôs móveis intercomunicados por luz com implementação de um protocolo anticolisão;
- a transmissão de um vídeo através de luz visível;
- a distribuição de internet com um emissor e a implementação de um dispositivo com receptor conectado a rede mundial.

Referências

- ARNON, S. Optimised optical wireless car-to-traffic-light communication. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, Wiley Online Library, v. 25, n. 6, p. 660–665, 2014.
- BLINOWSKI, G. Security of visible light communication systems—a survey. **Physical Communication**, Elsevier, v. 34, p. 246–260, 2019.
- BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8a edição. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. ISBN 85-87918-22-2.
- BRITO, S. **Como o Sinal Wi-Fi é Propagado na Natureza?** 2020.
- CARVALHO, P. A. de; PEREIRA, A. G.; CARVALHO, J. L. de R. Li-fi (light-fidelity) uma luz na evolução das comunicações. **CES Revista**, v. 29, n. 2, p. 136–157, 2015.
- CHAKRABORTY, S. et al. Analysis of illumination properties of led sources used in li-fi communication. In: IEEE. **2018 Fifteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)**. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- CONTI, J. P. What you see is what you send-[comms visible light]. **Engineering & Technology**, IET, v. 3, n. 19, p. 66–69, 2008.
- COSSU, G. et al. 2.1 gbit/s visible optical wireless transmission. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **European Conference and Exhibition on Optical Communication**. [S.l.], 2012. p. P4–16.
- COSSU, G. et al. 3.4 gbit/s visible optical wireless transmission based on rgb led. **Optics express**, Optical Society of America, v. 20, n. 26, p. B501–B506, 2012.
- COSSU, G. et al. 3.4 gbit/s visible optical wireless transmission based on rgb led. **Optics express**, Optical Society of America, v. 20, n. 26, p. B501–B506, 2012.
- DUARTE, C. E. B. **Transceptores ópticos para comunicação FSO/CWO utilizando LED: O comportamento do sinal no canal LOS e proposta de uma nova topologia**. 67 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2018.
- EROGLU, Y. S.; ERDEN, F.; GUVENC, I. Adaptive kalman tracking for indoor visible light positioning. In: IEEE. **MILCOM 2019-2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)**. [S.l.], 2019. p. 331–336.
- HAAS, H. Lifi is a paradigm-shifting 5g technology. **Reviews in Physics**, Elsevier, v. 3, p. 26–31, 2018.
- HAAS, H. et al. Wireless data from every light bulb. **TED website**, p. 49, 2011.
- HADOUX, X. **Some Contributions to Supervised Classification of Hyperspectral Data**. Tese (Doutorado), 11 2014.

- HUSSEIN, Y. S.; ANNAN, A. C. Li-fi technology: High data transmission securely. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2019. v. 1228, n. 1, p. 012069.
- IANNUCCI, C.; PINI, F. Li-fi for a digital urban infrastructure: A novel technology for the smart city. **TeMA-Journal of Land Use, Mobility and Environment**, 2014.
- JHA, P. K.; MISHRA, N.; KUMAR, D. S. Challenges and potentials for visible light communications: State of the art. In: AIP PUBLISHING LLC. **AIP conference proceedings**. [S.l.], 2017. v. 1849, n. 1, p. 020007.
- KHALID, A. et al. 1-gb/s transmission over a phosphorescent white led by using rate-adaptive discrete multitone modulation. **IEEE Photonics Journal**, IEEE, v. 4, n. 5, p. 1465–1473, 2012.
- KHAN, L. U. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. **Digital Communications and Networks**, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 78–88, 2017.
- KUMAR, N. et al. Visible light communication systems conception and vidas. **IETE Technical Review**, Taylor & Francis, v. 25, n. 6, p. 359–367, 2008.
- KUMAR, S.; SINGH, P. A comprehensive survey of visible light communication: Potential and challenges. **Wireless Personal Communications**, Springer, v. 109, n. 2, p. 1357–1375, 2019.
- LI, T. et al. Human sensing using visible light communication. In: **Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 331–344.
- LUO, J.; FAN, L.; LI, H. Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 19, n. 4, p. 2871–2893, 2017.
- LUO, P. et al. Car-to-car visible light communications. **Visible Light Communications: Theory and Applications**, CRC Press, CRC Press, p. 253–282, 2017.
- MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica**. 8a edição. ed. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2016. ISBN 978-85-8055-577-6.
- MARKUS, O. **Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada**. 1a edição. ed. [S.l.]: Érica, 2001.
- MEMEDI, A.; DRESSLER, F. Vehicular visible light communications: A survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, 2020.
- NG, X.-W.; CHUNG, W.-Y. Vlc-based medical healthcare information system. **Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications**, World Scientific, v. 24, n. 02, p. 155–163, 2012.
- O'BRIEN, D. C. et al. Visible light communications: Challenges and possibilities. In: IEEE. **2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**. [S.l.], 2008. p. 1–5.

- PATIL, D. et al. Swarm robots in a closed loop visual odometry system by using visible light communication. In: SPRINGER. **International Symposium on Signal Processing and Intelligent Recognition Systems**. [S.l.], 2017. p. 201–212.
- PATTISON, P. M.; HANSEN, M.; TSAO, J. Y. Led lighting efficacy: status and directions. **Comptes Rendus Physique**, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 134–145, 2018.
- POPOOLA, O. R. et al. Optical boundaries for led-based indoor positioning system. **Computation**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 1, p. 7, 2019.
- SCHMID, S. et al. Adaptive software-defined visible light communication networks. In: IEEE. **2017 IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)**. [S.l.], 2017. p. 109–120.
- SHAMSUDHEEN, P.; SURESHKUMAR, E.; CHUNKATH, J. Performance analysis of visible light communication system for free space optical communication link. **Procedia Technology**, Elsevier, v. 24, p. 827–833, 2016.
- SONER, B.; COLERI, S. Visible light communication based vehicle localization and pose estimation. **arXiv preprint arXiv:2009.13912**, 2020.
- SUN, W.-S. et al. Simulation and comparison of the lighting efficiency for household illumination with leds and fluorescent lamps. **Journal of the Optical Society of Korea**, Optical Society of Korea, v. 17, n. 5, p. 376–383, 2013.
- VONGKULBHISAL, J. et al. A fingerprinting-based indoor localization system using intensity modulation of light emitting diodes. **Microwave and Optical Technology Letters**, Wiley Online Library, v. 54, n. 5, p. 1218–1227, 2012.
- YANG, S.-H. et al. Indoor three-dimensional location estimation based on led visible light communication. **Electronics Letters**, IET, v. 49, n. 1, p. 54–56, 2013.
- YAQOOB, I. et al. Enabling communication technologies for smart cities. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 55, n. 1, p. 112–120, 2017.
- YASIR, M.; HO, S.-W.; VELLAMBI, B. N. Indoor positioning system using visible light and accelerometer. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 32, n. 19, p. 3306–3316, 2014.

Apêndices

APÊNDICE A – Produção científica

Participação do XIV Simpósio Internacional de Lasers e suas Aplicações, ocorrido entre os dias 29 de outubro e 1º de novembro de 2019 no Departamento de Física da UFPE, Recife, Brasil, com a apresentação oral do trabalho "Comunicação *Li-Fi*: utilizando a luz para transmitir dados."



Participação no I Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (CONINP) do Instituto Federal do Ceará, de 17 a 20 de novembro de 2020, como autor(a) do trabalho intitulado Estudo da tecnologia Li-Fi: aparato experimental para transmissão de dados via luz.



ANEXO A – Fundamentos de eletrônica

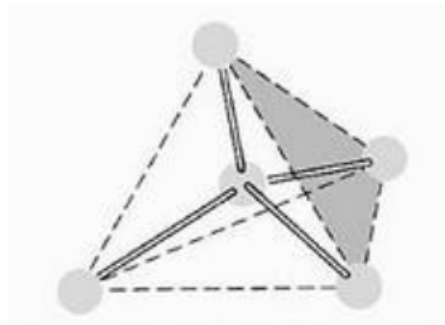
A.1 Semicondutores

A.1.1 Definição

Os semicondutores possuem, em sua camada de valência, quatro elétrons. Possuem uma característica semelhante ao carbono de formar grandes cadeias com os seus átomos conectados por ligações covalentes. Na Figura 21, temos a visualização da estrutura cristalina do semiconductor mais utilizado: o silício.

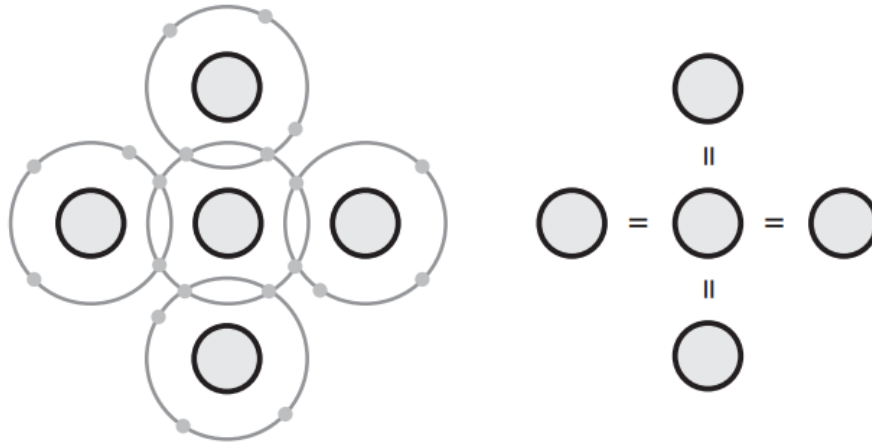
Quando os átomos de silício combinam-se para formar um sólido, eles se organizam num padrão ordenado chamado de cristal. Cada átomo de silício compartilha seus elétrons com quatro átomos vizinhos de tal modo que passam a existir oito elétrons na sua órbita de valência, como retratado na Figura 22 (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 21 – Estrutura cristalina do silício.



Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

Figura 22 – As ligações covalentes de um cristal de silício.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

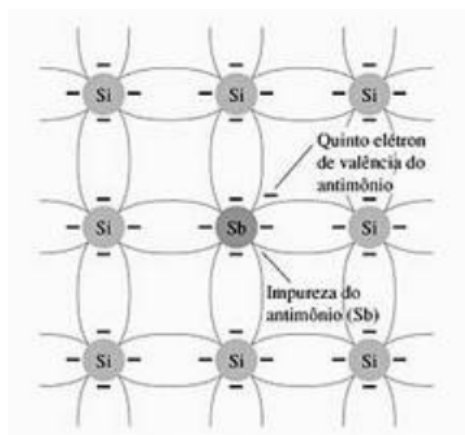
A.1.2 Dopagem

Há dois tipos de elementos químicos que são utilizados para realizar a dopagem de um semiconductor, um com três e outro com cinco elétrons na camada de valência, denominados como trivalentes e pentavalentes respectivamente, que quando adicionados à estrutura cristalina do silício ou do germânio, dopam o material semiconductor e produzem dois tipos de materiais, um com falta de um elétron, que podemos interpretar como uma lacuna ou carga positiva, outro com excesso de um elétron, ou seja, uma carga negativa. Os dois elementos químicos básicos mais utilizados na fabricação de componentes semicondutores são o silício e o germânio. Neste protótipo desenvolvido foram utilizados componentes baseados em silício.

A.1.3 Tipos N e P

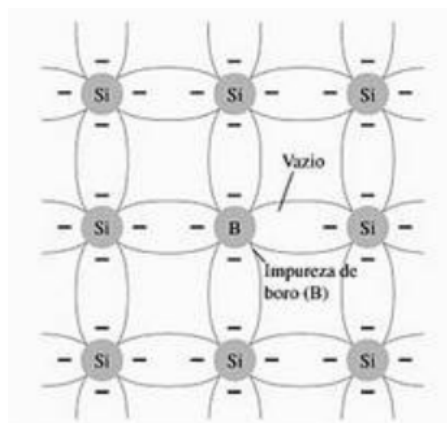
O material do tipo N e do tipo P são formados pela adição de um número determinado de átomos de impureza em uma base de germânio ou silício. O material do tipo N é criado com a introdução dos elementos de impureza que têm cinco elétrons de valência (pentavalente), como o antimônio, o arsênio e o fósforo. O efeito deles é indicado na Figura 23 (utilizando o antimônio como impureza em uma base de silício). Note que as quatro ligações covalentes ainda estão presentes. No entanto, existe um quinto elétron adicional devido à existência do átomo de impureza dissociado de qualquer ligação covalente específica. Esse elétron adicional, tenuemente ligado ao seu átomo de origem (antimônio), está relativamente livre para se mover dentro do recém-formado material do tipo N, já que o átomo de impureza inserido contribuiu para a estrutura com um elétron relativamente "livre" (BOYLESTAD, 2004).

Figura 23 – Adição de um átomo de antimônio como impureza em uma base de silício.



Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

Figura 24 – Adição de um átomo de boro como impureza em uma base de silício.



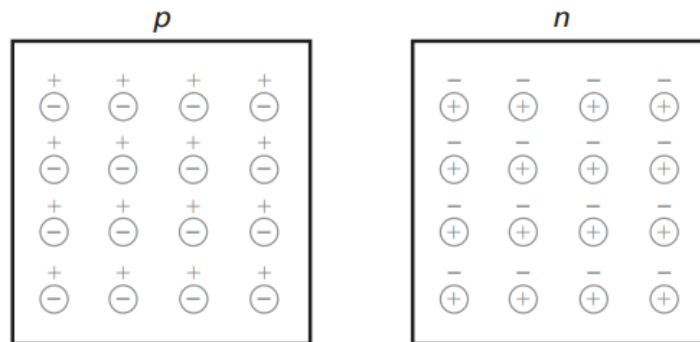
Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

O material do tipo P é obtido dopando-se um cristal de germânio ou silício puro com átomos de impureza que possuam três elétrons de valência. Os elementos mais comumente utilizados para esse propósito são o boro, o gálio e o índio. O efeito do boro sobre uma base de silício é mostrado na Figura 24. Note que agora há um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes da rede recém-formada. O espaço vazio resultante é chamado de lacuna e é representado por um pequeno círculo ou sinal positivo devido à ausência de uma carga negativa. Assim, a lacuna resultante aceitará rapidamente um elétron "livre". Os dois tipos de semicondutores podem ser vistos na Figura 25.

A.1.4 Junção PN

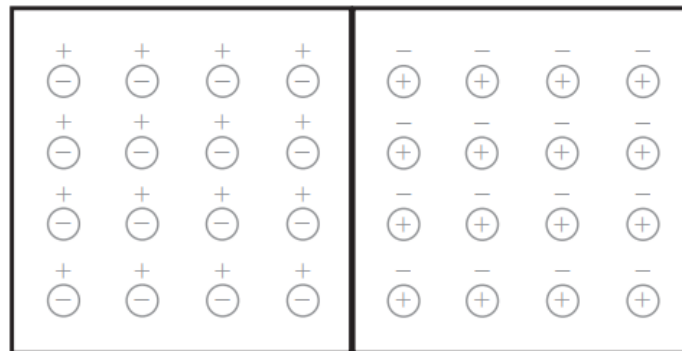
Em virtude da repulsão, os elétrons livres do lado n na Figura 26 tendem a se difundir (espalhar) em todas as direções. Alguns elétrons livres se difundem através da junção. Quando um elétron livre entra na região p, ele passa a ser um portador minoritário.

Figura 25 – Dois tipos de semicondutores.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 26 – A junção PN.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

Com tantas lacunas em seu redor, esse portador minoritário tem um tempo de vida muito curto. Logo que entra na região p, o elétron livre recombina com uma lacuna. Quando isso acontece, a lacuna desaparece e o elétron livre passa a ser um elétron de valência (MALVINO; BATES, 2016).

É importante perceber que, após a passagem dos elétrons do lado N para as lacunas do lado P, nós temos a criação de íons. Íons positivos do lado N e íons negativos do lado P, como podemos observar na Figura 27.

Cada par de íons positivos e negativos na junção é chamado de dipolo. A criação de um dipolo significa que um elétron livre e uma lacuna ficam fora de circulação. À medida que o número de dipolos aumenta, a região próxima da junção torna-se vazia de portadores de carga. Chamamos a região vazia de portadores de carga de camada de depleção (MALVINO; BATES, 2016). Podemos observar esse fenômeno na Figura 28.

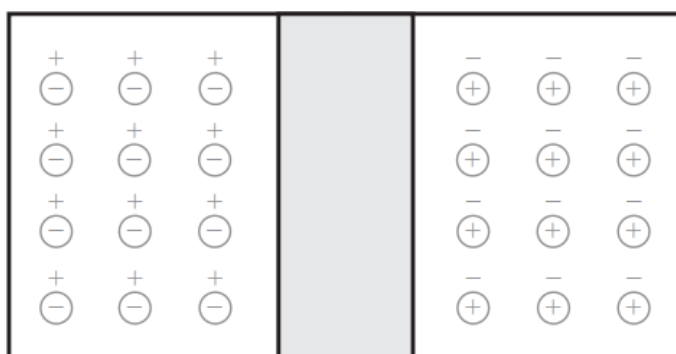
Eventualmente, a camada de depleção não permitirá que ocorra a passagem dos elétrons da região N para a região P, pois o campo elétrico gerado pelo dipolo de íons positivos e negativos assim não a permitirá. É nesse momento que temos o surgimento da

Figura 27 – O surgimento dos íons.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 28 – A camada de depleção.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

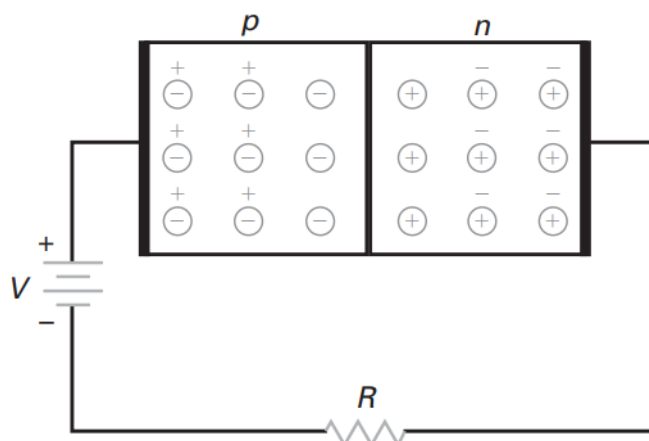
barreira potencial.

O campo elétrico entre os íons é equivalente a uma diferença de potencial chamada de barreira de potencial. Na temperatura de 25°C, a barreira de potencial é de 0,3 V aproximadamente para os diodos de germânio, e de 0,7 V para os diodos de silício (MALVINO; BATES, 2016).

Em resumo, devido aos dipolos e seus campos elétricos, o elétron da região N precisa de uma energia para romper esse bloqueio causado pelo campo elétrico e poder, enfim, se recombinarem com as lacunas da região P. Entretanto, o objetivo não é apenas criar mais dipolos através da recombinação, mas sim permitir um fluxo ordenado de corrente elétrica em um único sentido.

Através da polarização dessa junção PN que possui essa camada de depleção com um campo elétrico que origina uma barreira potencial que se opõe à passagem dos elétrons do lado N para o lado P, podemos observar duas situações: a polarização direta e a polarização reversa de um diodo. Nessa situação a nossa junção PN já pode ser denominada como diodo, que, segundo Malvino e Bates (2016), o diodo de junção é outro nome dado para

Figura 29 – Polarização direta.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

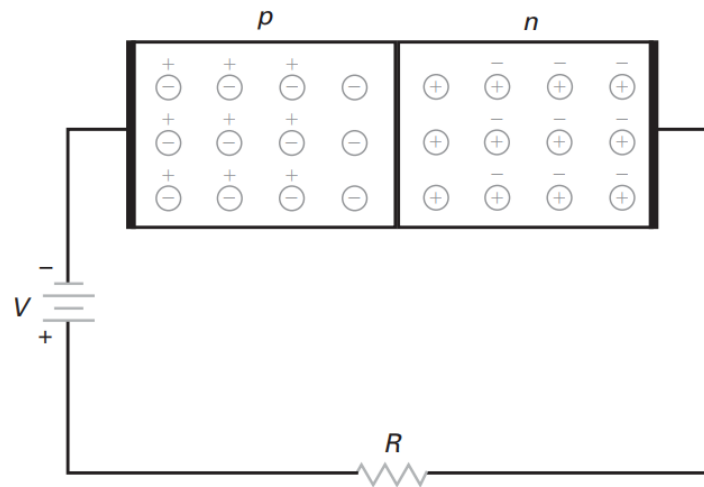
um cristal PN, pois a palavra diodo é uma contração de dois eletrodos.

Uma polarização direta do diodo, ou seja, aplicar uma diferença de potencial aos seus terminais, significa aplicar o terminal positivo da fonte de tensão ao lado P e o terminal negativo da fonte de tensão ao lado N. Podemos visualizar o terminal positivo da fonte de tensão aproximando as lacunas do lado P da camada de depleção. Pelo mesmo princípio, mas considerando agora as cargas negativas, o terminal negativo da fonte de tensão, ao repelir os elétrons da região N, os aproxima da camada de depleção. Se essa tensão de polarização direta do diodo for maior que a barreira potencial, esses elétrons terão energia suficiente para romper a barreira imposta pelo campo elétrico da camada de depleção. Ao chegar na região P, esse elétron será conduzido ao terminal positivo da fonte de tensão, ao mesmo tempo que outros elétrons vindos do terminal negativo da fonte são levados a ocupar as lacunas que surgem na região N, devido à passagem dos elétrons pela barreira potencial. Visualizando essa sequência de acontecimentos, podemos perceber um fluxo de corrente elétrica em um sentido, necessitando-se apenas de uma fonte de energia externa que supere a barreira potencial.

A Figura 29 mostra uma fonte CC aplicada a um diodo. O terminal negativo da fonte está conectado a um material tipo n e o terminal positivo está conectado a um material tipo p. Essa conexão produz o que chamamos de polarização direta (MALVINO; BATES, 2016).

Em contrapartida, em uma polarização reversa, que se caracterizaria pela conexão do terminal positivo da fonte de tensão à região N e pela conexão do terminal negativo da fonte de tensão à região P, observaríamos um crescimento da camada de depleção devido à atração das lacunas do lado P pelo terminal negativo e à atração dos elétrons do lado N pelo terminal positivo. O distanciamento entre elétrons e lacunas é proporcional à tensão aplicada entre os terminais, ou seja, quanto maior a diferença de potencial a qual o diodo é

Figura 30 – Polarização reversa.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

submetido de forma reversa, maior será a camada de depleção e menor será a possibilidade de uma corrente no sentido reverso.

Invertendo a fonte de tensão CC, obteremos o circuito mostrado na Figura 30. Desta vez, o terminal negativo da bateria está conectando do lado p, e o terminal positivo da bateria do lado n. Essa conexão produz o que é chamado de polarização reversa (MALVINO; BATES, 2016).

Dessa maneira, independentemente da polarização aplicada ao diodo, temos a garantia de que a corrente elétrica somente fluirá em apenas um único sentido. É dessa maneira, por exemplo, que através de circuitos com diodos podemos converter tensões e correntes alternadas em contínuas.

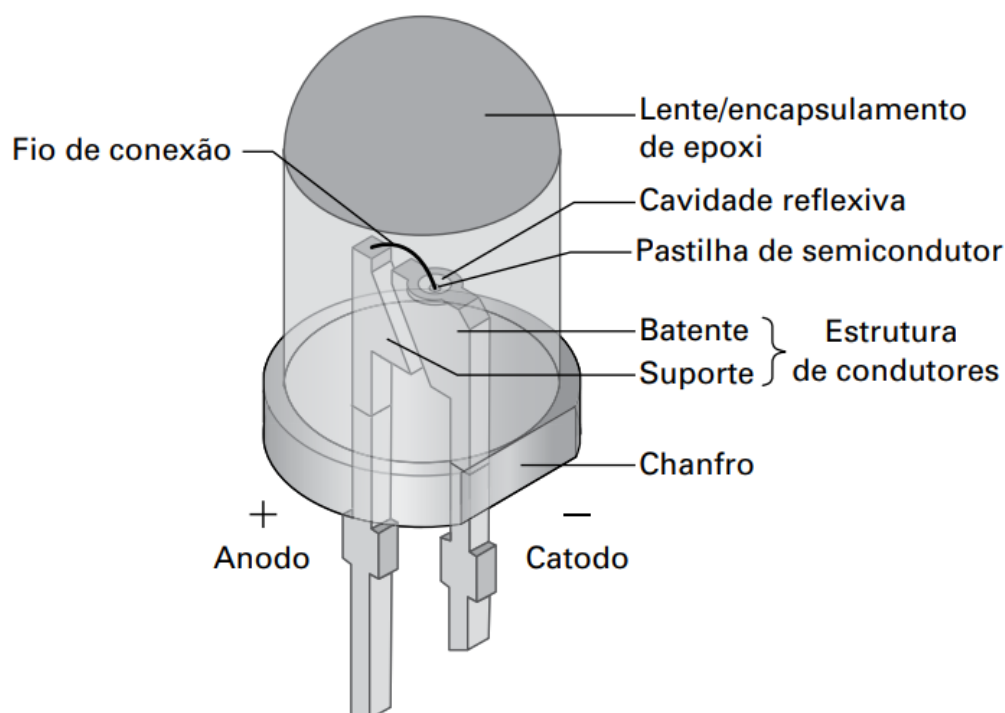
A.2 LED

A optoeletrônica é a tecnologia que combina a ótica com a eletrônica. Esse campo inclui vários dispositivos baseados na ação de uma junção pn. Alguns exemplos de dispositivos optoeletrônicos são: diodos emissores de luz (LEDs), fotodiodos, acopladores óticos e diodos laser (MALVINO; BATES, 2016).

Os LEDs substituíram as lâmpadas incandescentes em muitas aplicações devido a vários fatores: baixo consumo de energia, tamanho reduzido, resposta rápida a chaveamentos e longo ciclo de vida (MALVINO; BATES, 2016).

Essas características intrínsecas ao LED foram determinantes na escolha como fonte emissora de luz, principalmente pela capacidade de resposta rápida, propriedade extremamente útil durante o procedimento de modulação do emissor. Podemos observar

Figura 31 – Estrutura do LED.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

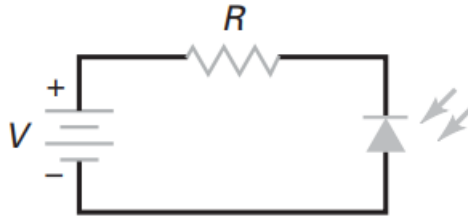
as partes de um LED, de acordo com a Figura 31.

Em um LED polarizado diretamente, os elétrons livres atravessam a junção pn e se recombinam com as lacunas. À medida que esses elétrons passam de um nível maior de energia para um menor, eles irradiam energia na forma de fótons. Nos diodos comuns, essa energia é irradiada sob a forma de calor; em um LED, essa energia é irradiada sob a forma de luz. Este efeito é conhecido como eletroluminescência (MALVINO; BATES, 2016).

A.3 Fotodetectores

Quando a energia luminosa bombardeia uma junção pn, ela pode deslocar elétrons de valência. Quanto mais intensa for a luz incidente na junção, maior será a corrente reversa num diodo. O fotodiodo é otimizado para ter uma alta sensibilidade à luz incidente. Nesse diodo, uma janela deixa passar a luz através do encapsulamento da junção. A luz penetrante produz elétrons livres e lacunas. Quanto maior a intensidade luminosa, maior o número de portadores minoritários e maior a corrente reversa (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 32 – Circuito de polarização do fotodiodo.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

A.4 Capacitor de acoplamento

Antes de entendermos o capacitor de acoplamento e sua função no circuito, devemos relembrar os conceitos de Impedância (Z) e Reatância capacitiva (X_C).

A.4.1 Impedância ($\dot{Z}$) e Reatância capacitiva (X_C)

A impedância $\dot{Z}$, em ohm [Ω], é um número complexo que caracteriza um dispositivo ou circuito e reflete tanto a oposição total que ela impõe à passagem da corrente alternada quanto a defasagem total entre a tensão e a corrente (MARKUS, 2001).

A impedância $\dot{Z}$ é composta por uma componente real denominada resistência R e por uma componente imaginária denominada reatância X (MARKUS, 2001).

A.4.2 Dedução de $\dot{Z}$ e X_C

No projeto desenvolvido, temos a utilização de um capacitor de acoplamento, portanto a reatância que trataremos aqui é referente ao capacitor, ou seja, a reatância capacitiva (X_C).

O capacitor utilizado no projeto trabalha no dois regimes de tensão e corrente, tanto em contínua como em alternada. Ele é utilizado para limitar as grandezas elétricas contínuas, utilizadas para funcionamento do transistor, ao ambiente a qual se propõe, de uma forma que a alimentação e as correntes contínuas possam permitir o funcionamento do protótipo e que elas não influenciem ou distorçam o sinal de alta frequência que será utilizado na saída do transmissor.

É importante salientar que, em resumo, o capacitor se comportará como um circuito aberto para as grandezas contínuas (frequência = 0 Hz) e como um curto-circuito para grandezas alternadas (altas frequências). Para chegarmos a essa conclusão, vamos explorar a dedução matemática do comportamento do capacitor:

De acordo com Markus (2001), temos a relação entre a corrente e a tensão em um capacitor dada por:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{A.1})$$

Considerando uma tensão CA aplicada ao capacitor definida como:

$$v_C(t) = V_C \cos(\omega.t) \quad (\text{A.2})$$

Temos que a corrente no capacitor, na equação A.1, pode ser expressa, utilizando a equação A.2 nas seguintes formas:

$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (\text{A.3})$$

$$i_c(t) = C \frac{d}{dt}(V_C \cos(\omega t)) \quad (\text{A.4})$$

Na equação A.4, derivando em função do tempo, temos:

$$i_C(t) = -\omega C V_C \sin(\omega t) \quad (\text{A.5})$$

Considerando a relação trigonométrica na equação A.6:

$$-\sin(\Theta) = \sin(\Theta) = \cos(\Theta + 90^\circ) \quad (\text{A.6})$$

Podemos substituir a equação A.5 pela equação A.7:

$$i_C(t) = \omega C V_C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{A.7})$$

Podemos perceber, através do ângulo de defasagem $\frac{\pi}{2}$, que a corrente do capacitor está adiantada em relação a tensão, que possui ângulo de defasagem igual a 0° , como definido no início.

Outra forma de representar a tensão e a corrente no capacitor é através do seu módulo e do seu ângulo de defasagem. Dessa maneira, temos:

$$\dot{V}_C = V_C \angle 0^\circ \quad (\text{A.8})$$

$$\dot{I}_C = I_C \angle 90^\circ \quad (\text{A.9})$$

Calculando a impedância no capacitor, através da relação entre as equações de tensão (A.8) e de corrente (A.9), podemos afirmar que:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V_C \angle 0^\circ}{I \angle 90^\circ} \quad (\text{A.10})$$

Substituindo o módulo da corrente no capacitor por $w.C.V_C$, de acordo com a equação A.7, obtemos:

$$\dot{Z} = \frac{V_C}{\omega C V_C} (\angle - 90^\circ) \quad (\text{A.11})$$

Cancelando a componente V_C e representando o ângulo de defasagem da impedância através de $-j$, temos:

$$\dot{Z} = -j \frac{1}{\omega C} \quad (\text{A.12})$$

Segundo Markus (2001), o módulo da impedância do capacitor corresponde a reatância capacitiva. Podemos defini-la da seguinte forma:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (\text{A.13})$$

Quando expandimos a componente w , para visualizarmos o papel da frequência no circuito, temos a seguinte equação:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{A.14})$$

Retornando a equação A.13, podemos reescrevê-la da seguinte maneira:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (\text{A.15})$$

Com a equação A.15 podemos finalmente analisar como um capacitor se comporta quando submetido a correntes e tensões contínuas e alternadas. Observe que a frequência influencia a reatância capacitiva de forma inversamente proporcional.

Portanto, quando temos frequências altas, como as frequências que o protótipo se propõe a transmitir, como um sinal de áudio, o denominador tende a valores muito maiores do que 1, reduzindo assim o valor da reatância capacitiva para próximo de zero. Em outras palavras, o capacitor funciona para o sinal da alta frequência que será transmitido como um curto-circuito.

Em oposição a esse comportamento, quando temos o regime contínuo, a frequência será igual a zero ($f = 0Hz$). Com a frequência nesse valor, fisicamente temos uma reatância capacitiva tendendo ao infinito. Ou seja, o capacitor funciona como um circuito aberto para a corrente contínua.

Figura 33 – Os inventores do transistor.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

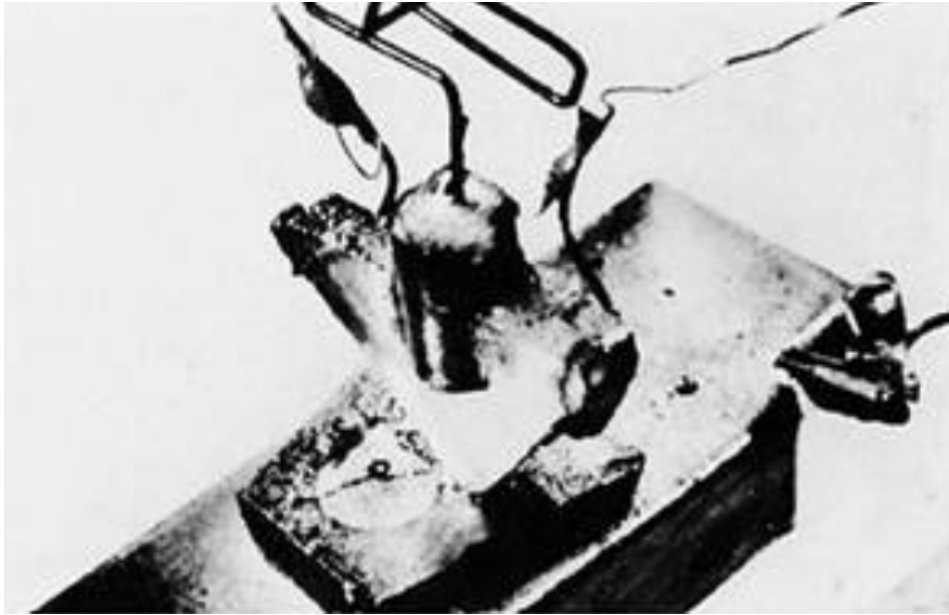
Dessa maneira, o capacitor garante que o transistor poderá operar sendo alimentado com as tensões e correntes contínuas sem permitir que essas grandezas interfiram no sinal CA que será transmitido, pois elas ficam restritas a alimentação do transistor.

A.5 Transistores

Em 1951, William Schockley inventou o primeiro transistor de junção, ilustrado na Figura 34, um dispositivo semicondutor que pode amplificar (aumentar) um sinal eletrônico como um sinal de rádio ou de televisão. O transistor deu origem a muitas outras invenções incluindo os circuitos integrados (CIs), pequenos dispositivos que contêm milhares de transistores. Graças ao CI, os modernos computadores e outros milagres eletrônicos tornaram-se possíveis (MALVINO; BATES, 2016).

Podemos observar o primeiro transistor, construído no Bell laboratories na Figura 34 e, juntamente com William Shockley, na Figura 33, os outros dois coinventores do revolucionário dispositivo.

Figura 34 – O primeiro transistor.

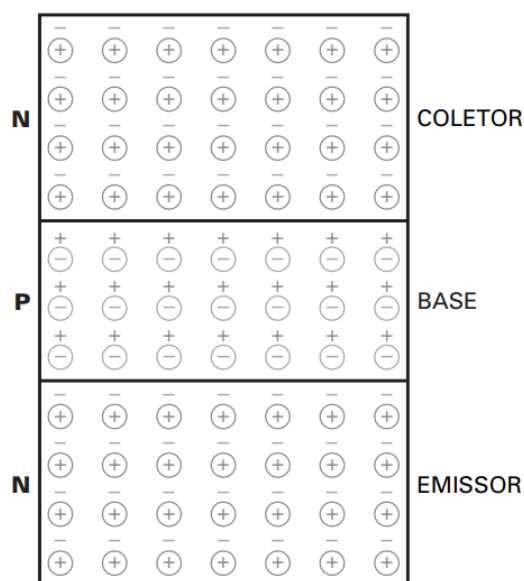


Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

A.5.1 Princípio de funcionamento

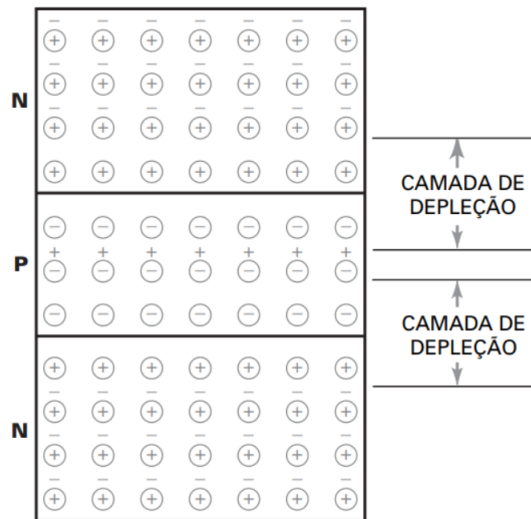
Um transistor tem três regiões dopadas, conforme mostrado na Figura 35. A região inferior é chamada de emissor, a região do meio é a base e a região superior é o coletor. Em um transistor real, a região da base é muito mais estreita comparada com as regiões do coletor e do emissor (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 35 – As três regiões de um transistor NPN.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 36 – As camadas de depleção de um transistor NPN.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

De acordo com Malvino e Bates (2016), similarmente ao que ocorre com a junção PN de um diodo, os elétrons livres (se considerarmos o fluxo de cargas no sentido real, não convencional) na região N se difundem através da junção e se recombinaem com as lacunas na região P, resultando em duas camadas de depleção, conforme mostrado na Figura 36.

As regiões de um transistor possuem tamanhos e dopagens diferentes. Essas características divergentes são essenciais para o funcionamento do dispositivo, pois influenciam diretamente em como se comportam as correntes dentro do transistor. Podemos observar na Tabela 4 o nível de dopagem e a área ocupada por cada uma das regiões.

Tabela 4 – Características das regiões de um transistor.

Região	Dopagem	Área
Base	Fraca	Estreita
Coletor	Intermediária	Larga
Emissor	Forte	Intermediária

Fonte: elaborada pelo autor.

Segundo Malvino e Bates (2016), se polarizarmos o diodo emissor diretamente e o diodo coletor reversamente, inicialmente, de acordo com a Figura 37, os elétrons do emissor serão injetados na base devido a polarização da fonte V_{BB} . Entretanto, o fato da base ser fracamente dopada define um tempo de vida maior e, somado a isso, temos que a base é uma área bem mais estreita. Essas duas condições tornam a passagem dos elétrons para o coletor muito facilitada, como podemos ver na Figura 38, quase em sua totalidade,

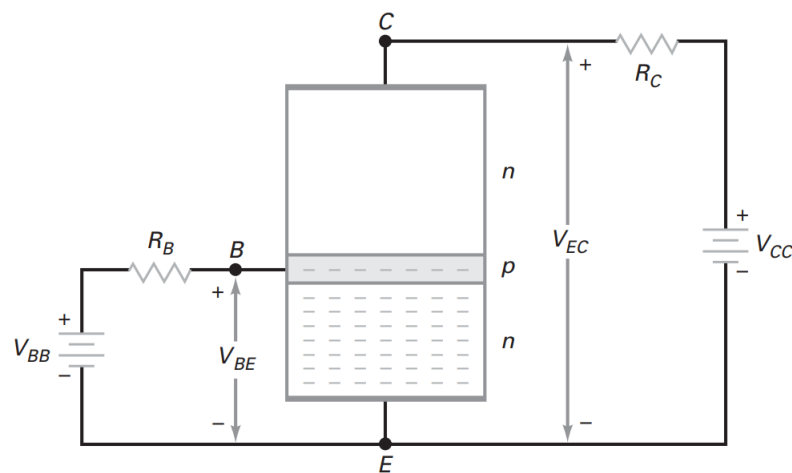
com apenas poucos elétrons passando pela base, conseqüentemente pelo resistor R_B , até o terminal positivo da fonte.

Essas características da base definem o por quê da corrente de base ser tão menor que a corrente de emissor e de coletor. Muitas vezes, a corrente de base chega a ser desprezível quando comparada as outras duas correntes no transistor.

Finalizando a análise do circuito de polarização, podemos observar que, da mesma forma que ocorre com a corrente que se destina ao terminal positivo da fonte da base V_{BB} por R_B , a corrente que é injetada no coletor se dirige ao terminal positivo da fonte de tensão V_{CC} através do resistor do coletor R_C .

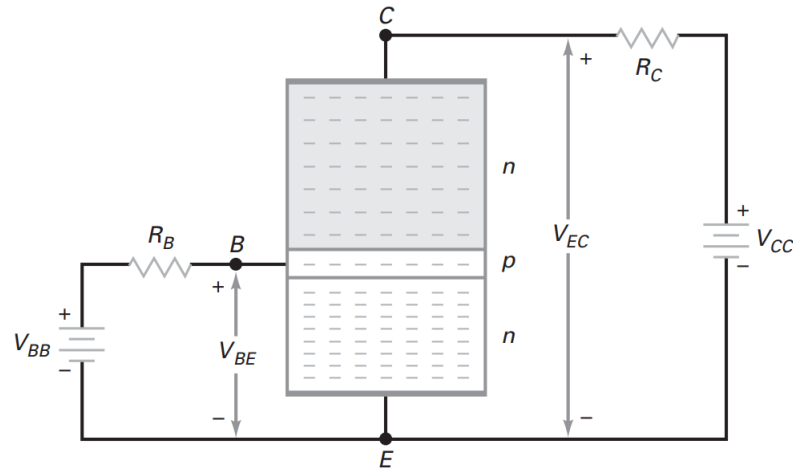
Nessa análise, adotamos o sentido real da corrente elétrica, ou seja, os elétrons (carga negativa) se deslocam do menor para o maior potencial. Não obstante, a análise através da corrente elétrica convencional (cargas positivas se deslocando) se faz possível, sem prejuízo algum.

Figura 37 – Injeção de corrente na base.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 38 – Injeção de corrente na base e no coletor.



Fonte: (MALVINO; BATES, 2016).

A.5.2 Correntes no transistor

Existem três correntes no transistor que se relacionam através de algumas equações. São denominadas como corrente de base (I_B), corrente do coletor (I_C) e corrente do emissor (I_E). O emissor possui a dopagem mais forte entre as três regiões do transistor e dele provêm as cargas negativas que são emitidas para a base, mas, em sua maioria, são coletadas pelo coletor. As relações entre as correntes no transistor estão dispostas nas Equações A.16 e A.19.

$$I_E = I_B + I_C \quad (\text{A.16})$$

A.5.3 α_{CC} e β_{CC}

O α_{CC} representa um percentual de quanto da corrente elétrica disponível em I_E será direcionada para I_C . Sua formulação é dada na Equação A.17.

$$\alpha_{CC} = \frac{I_C}{I_E} \quad (\text{A.17})$$

Podemos inferir dessa equação que, o percentual de corrente disponível em I_E que será direcionada para I_B será calculado com a Equação A.18.

$$1 - \alpha_{CC} = \frac{I_B}{I_E} \quad (\text{A.18})$$

O β_{CC} , também conhecido como ganho do transistor e mostrado na Equação A.19, é definido como o número de vezes que I_C é maior que I_B .

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B} \quad (\text{A.19})$$

Em termos práticos, é comum que os profissionais da área considerem, para transistores com $\beta_{CC} \geq 100$, que o I_B é desprezível quando comparado às correntes I_C e I_E .

A.5.4 Ponto quiescente (Q)

Para uma melhor amplificação de um sinal, é desejável que o transistor opere na região ativa, com aproximadamente metade da tensão de alimentação (V_{CC}) entre o coletor e o emissor (V_{CE}). Essa predefinição nos permite colocar o ponto de operação do transistor no centro da reta de carga, o que seria mais indicado para trabalharmos com o sinal que modulará o LED.

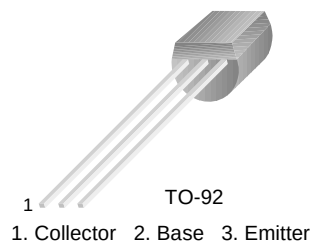
Depois que um transistor foi polarizado com o ponto Q próximo do centro da reta de carga, podemos acoplar uma tensão CA de baixo valor na base. Isso produzirá uma tensão CA no coletor. A tensão CA no coletor tem a mesma forma de onda da tensão CA na base, porém maior. Em outras palavras, a tensão CA no coletor é uma versão amplificada da tensão CA na base ([MALVINO; BATES, 2016](#)).

ANEXO B – Datasheet BC 547

BC546/547/548/549/550

Switching and Applications

- High Voltage: BC546, $V_{CEO}=65V$
- Low Noise: BC549, BC550
- Complement to BC556 ... BC560



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BC546	80	V
	: BC547/550	50	V
	: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BC546	65	V
	: BC547/550	45	V
	: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage : BC546/547	6	V
	: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ C$

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30V, I_E=0$			15	nA
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	110		800	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		90	250	mV
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		200	600	mV
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		700		mV
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		900		mV
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	580	660	700	mV
		$V_{CE}=5V, I_C=10mA$			720	mV
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5V, I_C=10mA, f=100MHz$		300		MHz
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB}=10V, I_E=0, f=1MHz$		3.5	6	pF
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB}=0.5V, I_C=0, f=1MHz$		9		pF
NF	Noise Figure : BC546/547/548	$V_{CE}=5V, I_C=200\mu A$		2	10	dB
		$f=1KHz, R_G=2K\Omega$		1.2	4	dB
		: BC549		1.4	4	dB
		: BC550		1.4	3	dB

h_{FE} Classification

Classification	A	B	C
h_{FE}	110 ~ 220	200 ~ 450	420 ~ 800

Typical Characteristics

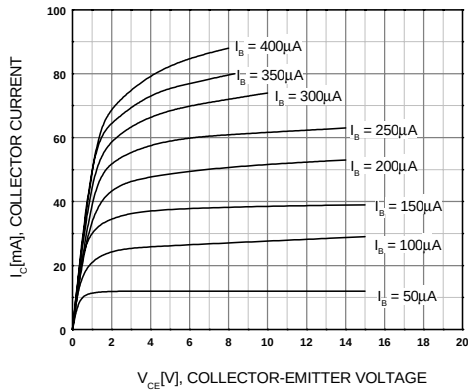


Figure 1. Static Characteristic

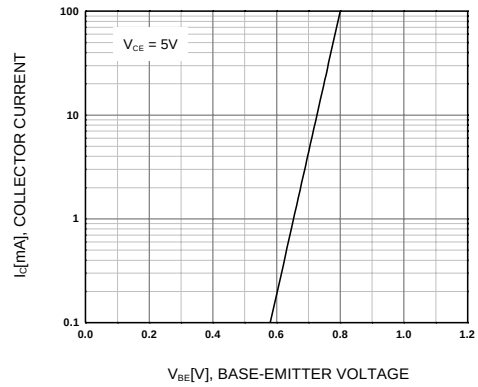


Figure 2. Transfer Characteristic

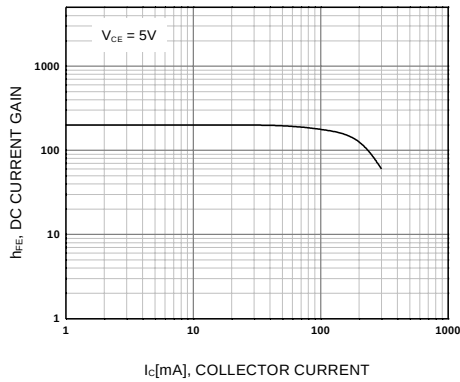


Figure 3. DC current Gain

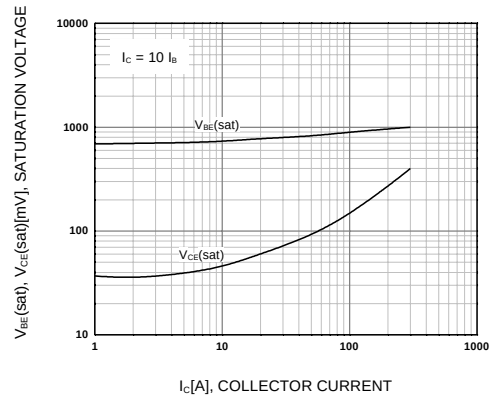


Figure 4. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

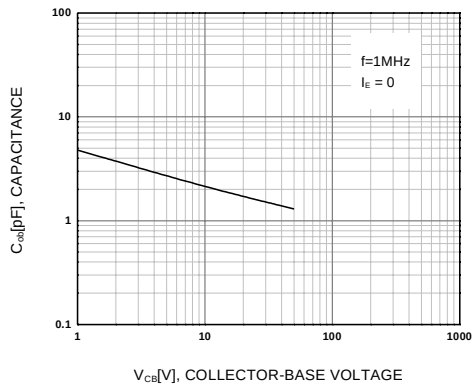


Figure 5. Output Capacitance

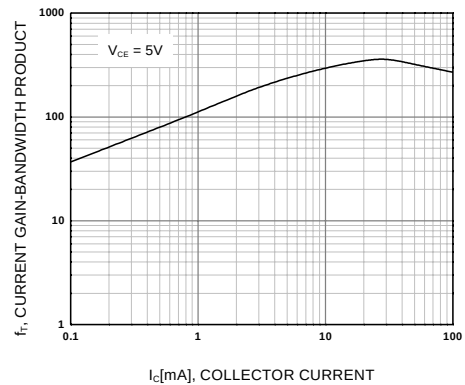
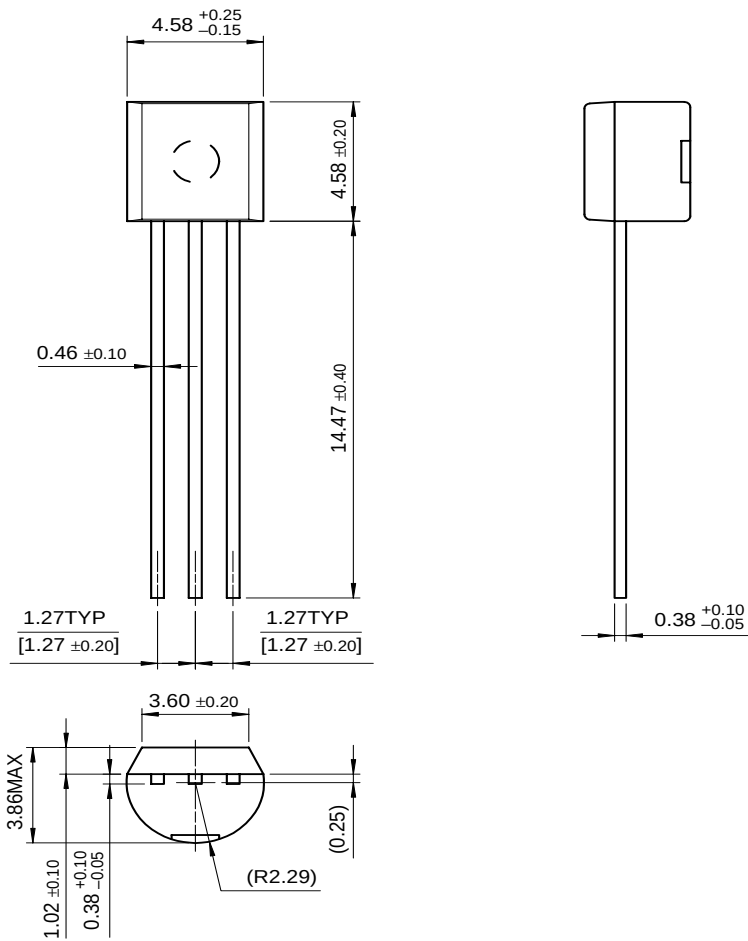


Figure 6. Current Gain Bandwidth Product

Package Dimensions

TO-92



Dimensions in Millimeters

TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACE [™]	FACT [™]	ImpliedDisconnect [™]	PACMAN [™]	SPM [™]
ActiveArray [™]	FACT Quiet series [™]	ISOPLANAR [™]	POP [™]	Stealth [™]
Bottomless [™]	FAST [®]	LittleFET [™]	Power247 [™]	SuperSOT [™] -3
CoolFET [™]	FASTr [™]	MicroFET [™]	PowerTrench [®]	SuperSOT [™] -6
CROSSVOLT [™]	FRFET [™]	MicroPak [™]	QFET [™]	SuperSOT [™] -8
DOME [™]	GlobalOptoisolator [™]	MICROWIRE [™]	QS [™]	SyncFET [™]
EcoSPARK [™]	GTO [™]	MSX [™]	QT Optoelectronics [™]	TinyLogic [™]
E ² CMOS [™]	HiSeC [™]	MSXPro [™]	Quiet Series [™]	TruTranslation [™]
EnSigna [™]	I ² C [™]	OCX [™]	RapidConfigure [™]	UHC [™]
Across the board. Around the world. [™]		OCXPro [™]	RapidConnect [™]	UltraFET [®]
The Power Franchise [™]		OPTOLOGIC [®]	SILENT SWITCHER [®]	VCX [™]
Programmable Active Droop [™]		OPTOPLANAR [™]	SMART START [™]	

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

ANEXO C – Datasheet LED



ELECTRONICS, INC.
44 FARRAND STREET
BLOOMFIELD, NJ 07003
(973) 748-5089
<http://www.nteinc.com>

NTE3019 Light Emitting Diode (LED) Red Diffused, 5mm

Features:

- Tapered Barrel T-1 3/4 Package
- High Intensity Red light source with various lens colors and effects
- Versatile Mounting on PC Board or Panel
- T-1 3/4 with Stand-off

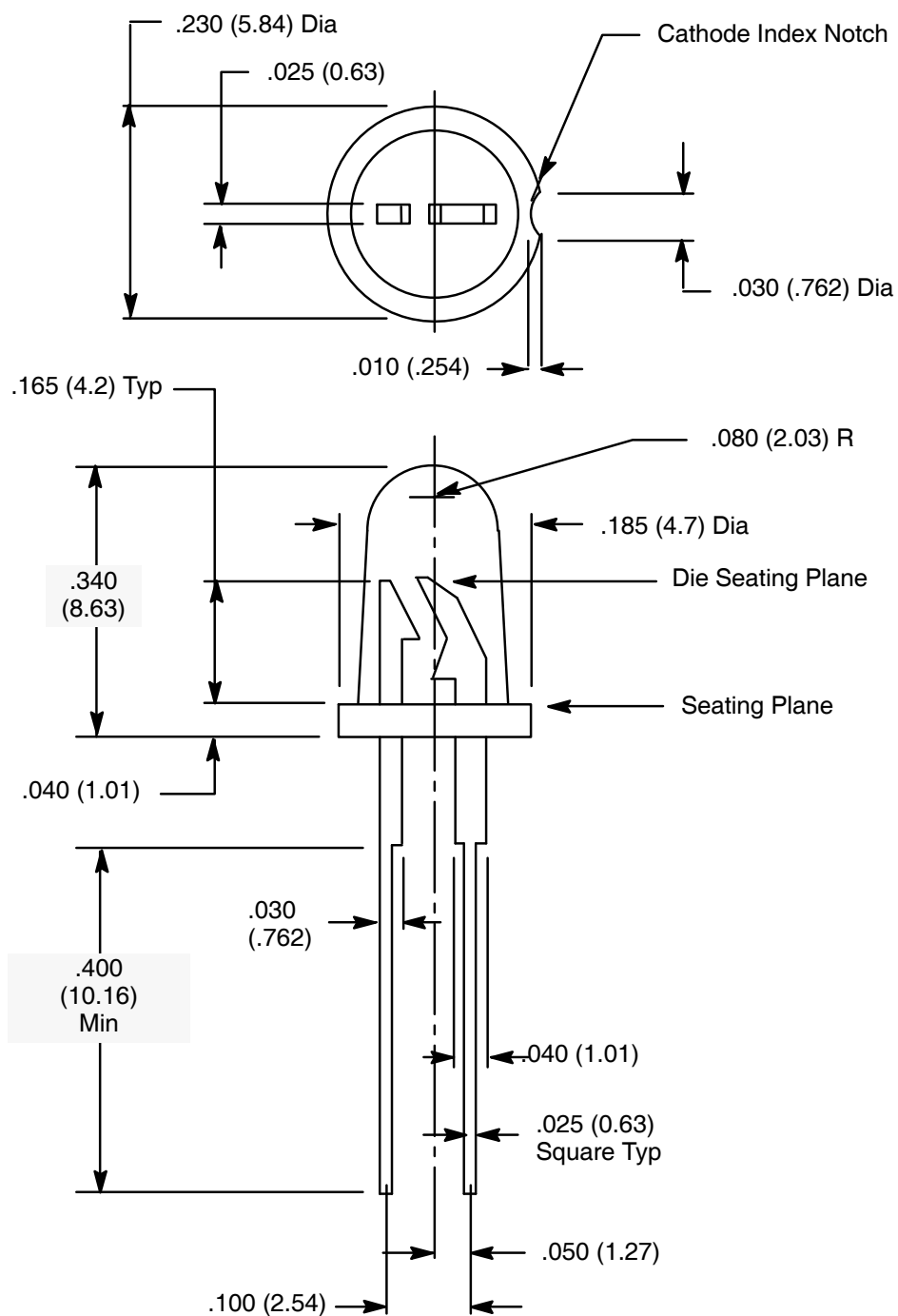
Absolute Maximum Ratings: ($T_A = +25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Reverse Voltage, V_R 5V
Peak Forward Current (Note 1, I_F 1A
Power Dissipation ($T_A = +25^{\circ}\text{C}$), P_D 180mW
Derate linearly from 25°C 2mW/ $^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range, T_{opr} -55° to $+100^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range, T_{stg} -55° to $+100^{\circ}\text{C}$
Lead Temperature (During Soldering, 1/16" (1.6mm) from case, 5sec max), T_L $+260^{\circ}\text{C}$

Note 1. Pulse Width = $1\mu\text{s}$, 0.3% duty cycle.

Electrical Characteristics: ($T_A = +25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Luminous Intensity	I_V	$I_F = 20\text{ mA}$	0.9	3.0	–	mcd
Peak Wavelength	λ_p	$I_F = 20\text{ mA}$	–	–	660	nm
Spectral Line Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F = 20\text{ mA}$	–	20	–	nm
Forward Voltage	V_F	$I_F = 20\text{ mA}$	–	1.65	2.0	V
Reverse Current	I_R	$V_R = 5.0\text{V}$	–	–	100	μA
Reverse Voltage	λ_A	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$	–	5.0	–	V
Capacitance	C	$V = 0$	–	35	–	pF
Viewing Angle	$2\theta_{1/2}$	Between 50% Points	–	60	–	degree
Rise Time	t_r	10% – 90% 50 Ω	–	50	–	ns
Fall Time	t_f	90% – 10% 50 Ω	–	50	–	ns



ANEXO D – Datasheet Fotodiodo



Technical Data Sheet

5mm Silicon PIN Photodiode , T-1 3/4

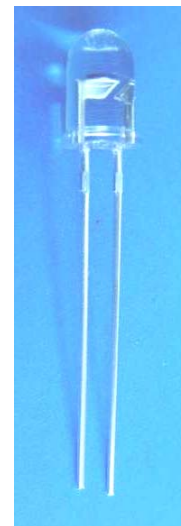
PD333-3C/H0/L2

Features

- Fast response time
- High photo sensitivity
- Small junction capacitance
- Pb free
- The product itself will remain within RoHS compliant version.

Descriptions

PD333-3C/H0/L2 is a high speed and high sensitive PIN photodiode in a standard 5 ϕ plastic package. Due to its water clear epoxy the device is sensitive to visible and infrared radiation.



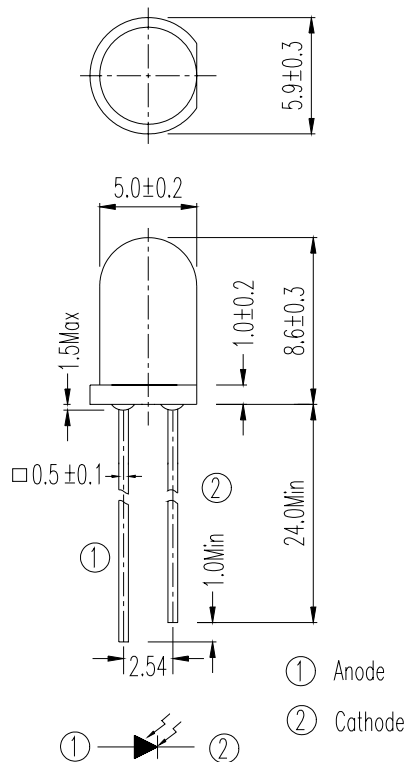
Applications

- High speed photo detector
- Security system
- Camera

Device Selection Guide

LED Part No.	Chip	Lens Color
	Material	
PD	Silicon	Water clear

Package Dimensions



Notes: 1.All dimensions are in millimeters
2.Tolerances unless dimensions ± 0.25 mm

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Reverse Voltage	V_R	32	V
Power Dissipation	P_d	150	mW
Lead Soldering Temperature	T_{sol}	260	°C
Operating Temperature	T_{opr}	-25 ~ +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	°C

Notes: *1:Soldering time ≤ 5 seconds.

Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Rang of Spectral Bandwidth	$\lambda_{0.5}$	-----	400	---	1100	nm
Wavelength of Peak Sensitivity	λ_p	-----	---	940	---	nm
Open-Circuit Voltage	V_{OC}	Ee=5m W/cm ² λ_p =940nm	---	0.39	---	V
Short- Circuit Current	I_{SC}	Ee=1m W/cm ² λ_p =940nm	---	40	---	μA
Reverse Light Current	I_L	Ee=1m W/cm ² λ_p =940nm V_R =5V	36	40	---	
Dark Current	I_d	Ee=0m W/cm ² V_R =10V	---	5	30	nA
Reverse Breakdown	BV_R	Ee=0m W/cm ² I_R =100 μA	32	170	---	V
Total Capacitance	C_t	Ee=0m W/cm ² V_R =5V f=1MHZ	---	18	---	pF
Rise/Fall Time	t_r/t_f	V_R =10V R_L =1K Ω	---	45/45	---	nS
View Angle	$2\theta_{1/2}$	I_F =20mA	--	80	--	deg

Typical Electro-Optical Characteristics Curves

Fig.1 Power Dissipation vs.
Ambient Temperature

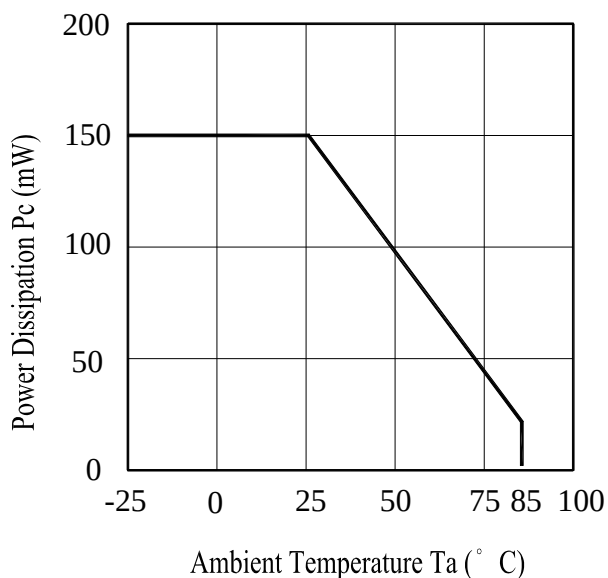


Fig.2 Spectral Sensitivity

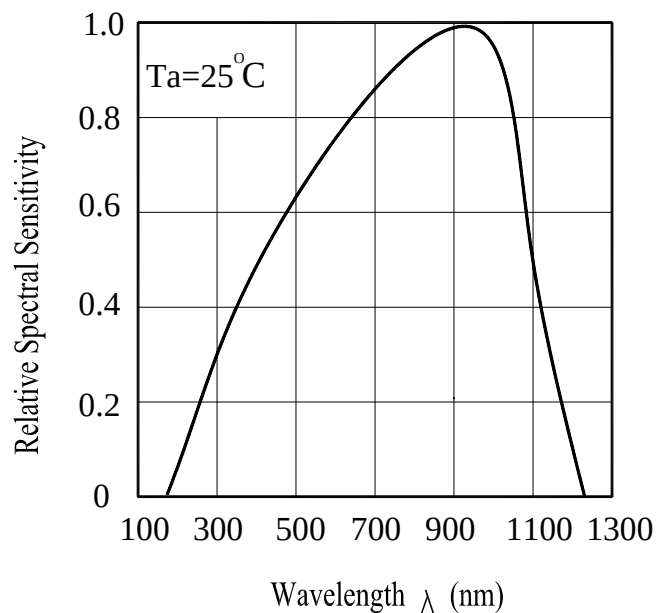


Fig.3 Dark Current vs.
Ambient Temperature

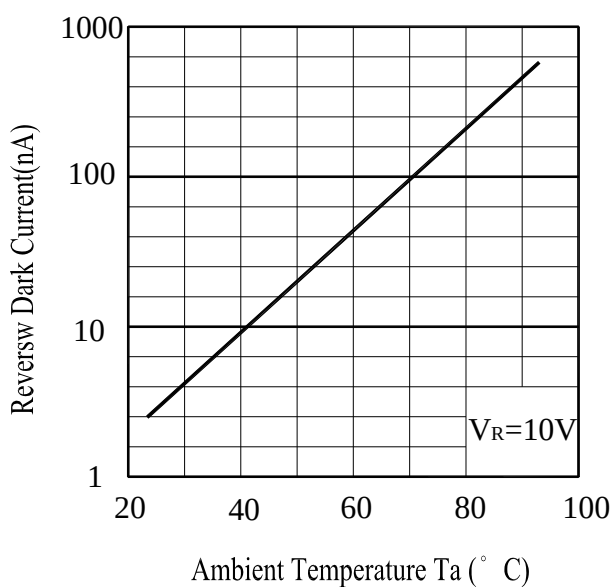
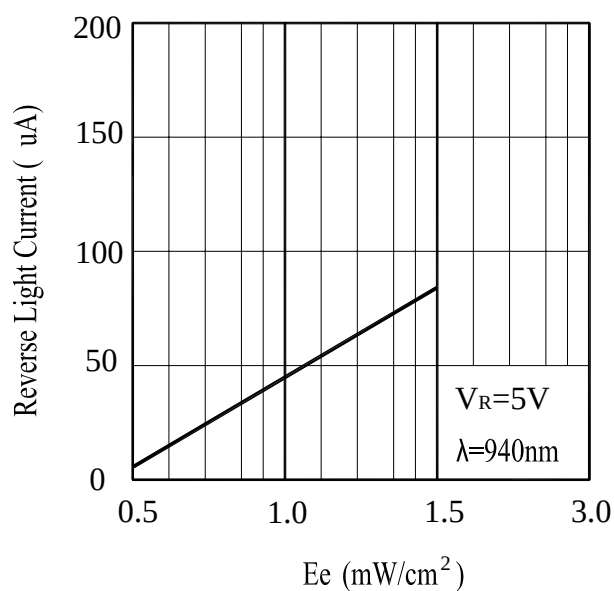


Fig. 4 Reverse Light Current vs.
 E_e



Typical Electro-Optical Characteristics Curves

Fig.5 Terminal Capacitance vs.

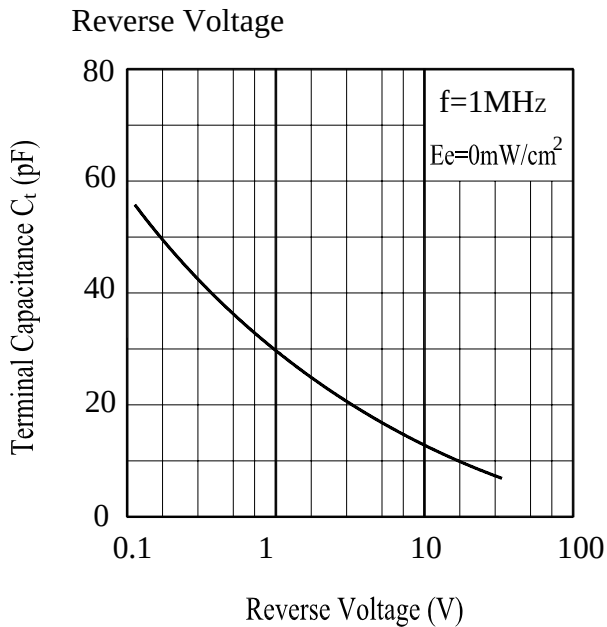


Fig.6 Response Time vs.

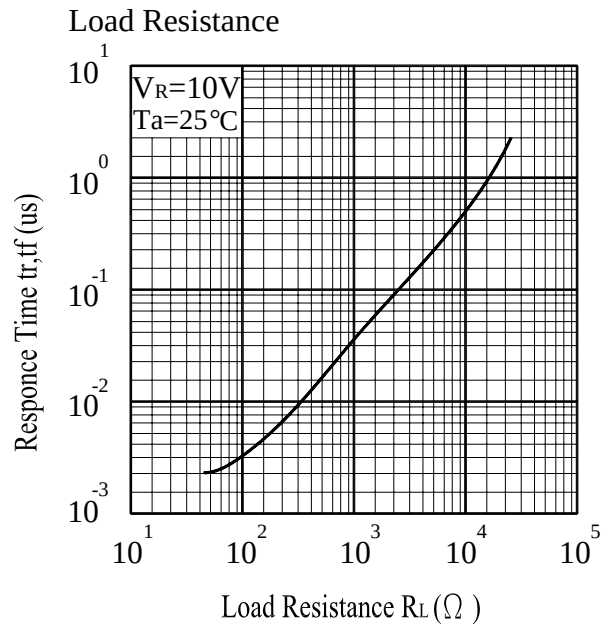


Fig.7 Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature($^\circ\text{C}$)

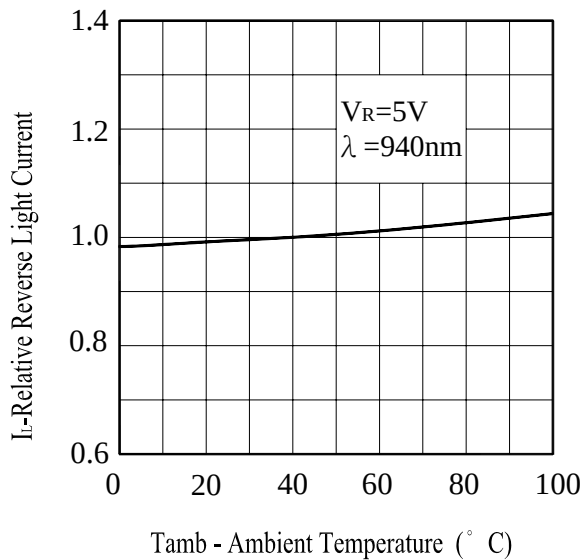
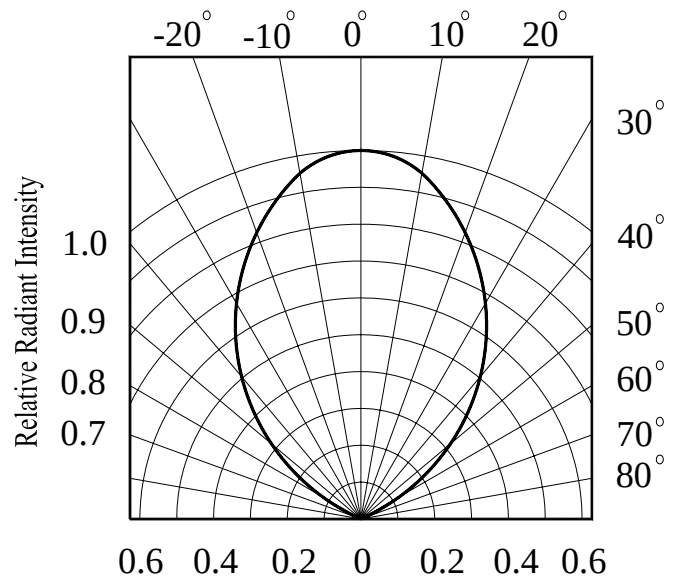


Fig.8 Relative Radiant Intensity vs. Angular Displacement



Reliability Test Item And Condition

The reliability of products shall be satisfied with items listed below.

Confidence level : 90%

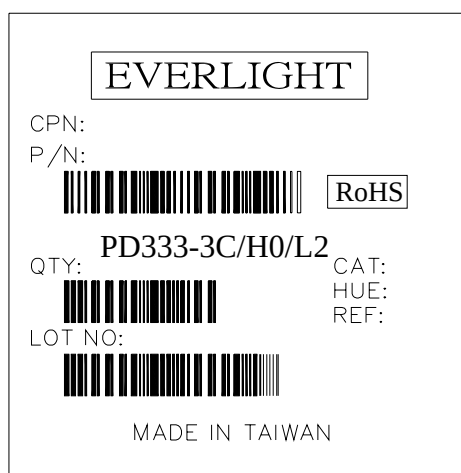
LTPD : 10%

NO.	Item	Test Conditions	Test Hours/ Cycles	Sample Sizes	Failure Judgement Criteria	Ac/R e
1	Solder heat	TEMP. : 260°C±5°C	10secs	22pcs	$I_L \leq L \times 0.8$ L : Lower Specification Limit	0/1
2	Temperature Cycle	H : +100°C 15mins ↑ ↓ 5mins L : -40°C 15mins	300Cycles	22pcs		0/1
3	Thermal Shock	H : +100°C 5mins ↑ ↓ 10secs L : -10°C 5mins	300Cycles	22pcs		0/1
4	High Temperature Storage	TEMP. : +100°C	1000hrs	22pcs		0/1
5	Low Temperature Storage	TEMP. : -40°C	1000hrs	22pcs		0/1
6	DC Operating Life	V _R =5V	1000hrs	22pcs		0/1
7	High Temperature/ High Humidity	85°C / 85% R.H	1000hrs	22pcs		0/1

Packing Quantity Specification

1.500PCS/1Bag , 5Bags/1Box

2.10Boxes/1Carton

Label Form Specification

The diagram shows a rectangular label with the following layout:

- Top center: **EVERLIGHT** in a box.
- Below it: CPN: and P/N: labels.
- Below P/N: a barcode.
- To the right of the barcode: **RoHS** in a box.
- Below the barcode: **PD333-3C/H0/L2**.
- Below that: QTY: label and a barcode.
- To the right of the QTY barcode: CAT: label.
- Below the QTY barcode: LOT NO: label and a barcode.
- To the right of the LOT NO barcode: HUE: and REF: labels.
- At the bottom center: **MADE IN TAIWAN**.

CPN: Customer's Production Number

P/N : Production Number

QTY: Packing Quantity

CAT: Ranks

HUE: Peak Wavelength

REF: Reference

LOT No: Lot Number

MADE IN TAIWAN: Production Place

Notes

1. Above specification may be changed without notice. EVERLIGHT will reserve authority on material change for above specification.
2. When using this product, please observe the absolute maximum ratings and the instructions for using outlined in these specification sheets. EVERLIGHT assumes no responsibility for any damage resulting from use of the product which does not comply with the absolute maximum ratings and the instructions included in these specification sheets.
3. These specification sheets include materials protected under copyright of EVERLIGHT corporation. Please don't reproduce or cause anyone to reproduce them without EVERLIGHT's consent.

EVERLIGHT ELECTRONICS CO., LTD.Office: No 25, Lane 76, Sec 3, Chung Yang Rd,
Tucheng, Taipei 236, Taiwan, R.O.C

Tel: 886-2-2267-2000, 2267-9936

Fax: 886-2267-6244, 2267-6189, 2267-6306

<http://www.everlight.com>