



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

AMANDA RÜHLEMANN BARREIRA

Sistema Protótipo de Comunicação via Luz Visível (VLC/LiFi) para fins Educacionais

NITERÓI

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

AMANDA RÜHLEMANN BARREIRA

Sistema Protótipo de Comunicação via Luz Visível (VLC/LiFi) para fins Educacionais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:
Hypolito José Kalinowski

NITERÓI

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

B271s Barreira, Amanda Rühlemann
Sistema Protótipo de Comunicação via Luz Visível
(VLC/LiFi) para fins Educacionais / Amanda Rühlemann
Barreira. - 2023.
111 f.: il.

Orientador: Hypolito José Kalinowski.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Comunicação via luz visível. 2. LiFi. 3. Produção
intelectual. I. José Kalinowski, Hypolito, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia.III.
Título.

CDD - XXX

AMANDA RÜHLEMANN BARREIRA

Sistema Protótipo de Comunicação via Luz Visível (VLC/LiFi) para fins Educacionais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 19 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Assinado digitalmente por HYPOLITO
JOSE KALINOWSKI:17091250982
DN: cn=HYPOLITO JOSE
KALINOWSKI:17091250982, c=BR,
o=ICP-Brasil, ou=videoconferencia,
email=H.KALINOWSKI@ID.UFF.BR
Data: 2023.04.19 15:21:13 -0300

HYPOLITO JOSE
KALINOWSKI:17091250982

Prof. Hypolito José Kalinowski, *D.Sc.* – Orientador – UFF

Assinado por: **Nélia Jordão Alberto**
Num. de Identificação: 11878266
Data: 2023.04.19 21:41:13+01'00'

Dra. Nélia Jordão Alberto, *D. Fis.* – IT – Aveiro

Documento assinado digitalmente
 **NILSON MARCOS DIAS GARCIA**
Data: 19/04/2023 22:18:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Nilson Marcos Dias Garcia, *D. Edu.* – UTFPR

Documento assinado digitalmente
 **VINICIUS NUNES HENRIQUE SILVA**
Data: 20/04/2023 14:29:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Vinicius Nunes Henrique Silva, *D. Eng.* – UFF

Niterói

2023

Dedico este trabalho a todos os familiares, amigos e professores.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pois sem Ele, esse sonho não se tornaria realidade. Em cada momento de dificuldade estive ao meu lado me dando sustento e bom ânimo para prosseguir.

Um agradecimento especial para o meu marido Júlio César, que sempre confiou no meu potencial, mesmo quando eu não acreditava e não me deixou abaixar a cabeça em nenhum momento ao longo da minha caminhada até aqui. Esse trabalho é nosso.

Muita gratidão também à Universidade Federal Fluminense (UFF), que desde a minha graduação, pode me proporcionar excelentes experiências e aprendizados, onde pude ter contato com professores incríveis que ficarão marcados para sempre na minha vida.

Não poderia deixar de citar meu orientador, Professor Hypolito, que sempre se fez muito presente e solícito durante todo o período de mestrado. Tive muita sorte de ser acolhida por um professor tão sábio (uma das pessoas mais inteligentes que já conheci) e tão disposto a compartilhar conhecimento. Obrigada por toda disponibilidade, paciência, incentivo e troca que tivemos.

Por fim, gostaria de enfatizar o apoio recebido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Com o crescente número de dispositivos móveis, e conseqüente aumento na demanda de serviços com uso de dados móveis, o espectro das radiofrequências (RF) vem se tornando cada vez mais saturado; estudos apontam que se pode atingir um colapso em breve. Nesse sentido, o estudo e desenvolvimento de mecanismos de comunicação alternativos tornam-se relevantes, onde uma solução pode aproveitar da ubiquidade dos Diodos Emissores de Luz (LED). A comunicação via luz visível (VLC) é uma tecnologia emergente, e através da variação de parâmetros luminosos, dados podem ser transmitidos a uma taxa superior se comparada às comunicações RF convencionais. A *Light Fidelity* (LiFi) é um tipo de tecnologia que faz uso da luz visível e pode ser considerada uma solução completa de comunicação, preenchendo algumas lacunas deixadas pelo vasto universo VLC.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento, com auxílio das plataformas Arduino e Matlab, de um sistema protótipo de comunicação com ênfase em fins educacionais que faça uso da luz visível como mecanismo de transmissão. A utilização do sistema proposto permite ao estudante desenvolver experimentos, aprofundar estudos e obter parâmetros importantes de transmissão, além da possibilidade de medições sob condições adversas, a exemplo da interferência de luz de fundo. Também são abordados o histórico da tecnologia, estado da arte, suas principais características, vantagens em relação às demais técnicas, aplicações e padronização.

Diferentes montagens contando com a variação dos dispositivos transmissores e receptores, além de distintos cenários de aplicação foram explorados. O desempenho da BER vs distância foi analisado, obtendo resultados na ordem de 10^{-3} para um caso particular utilizando um LED RGB e sem fontes de iluminação externa.

Palavras-chave: Comunicação por Luz Visível (VLC), Light Fidelity (LiFi), Arduino, Matlab.

Abstract

With the increasing number of mobile devices, and the consequent increase in demand for mobile data services, the radio frequency (RF) spectrum has become increasingly scarce, and studies indicate that it may soon collapse. In this sense, the study and development of alternative communication mechanisms becomes quite relevant, a solution can take advantage of the ubiquity of Light Emitting Diodes (LED). Visible Light Communication (VLC) is an emerging technology where, through the variation of light parameters, data can be transmitted at a much higher speed compared to conventional RF communications. Light Fidelity (LiFi), in turn, which will be explored throughout this document, is a type of technology that makes use of visible light and can be considered a complete communication solution, filling in some gaps left by the vast VLC universe.

The objective of this work is the development, with the support of platforms Arduino and Matlab, of a communication prototype with emphasis on educational purposes that makes use of visible light as a transmission mechanism. The proposed system, permits students to develop experiments, consolidate knowledge and to obtain important transmission parameters, in addition to the possibility of measurements in adverse conditions, such as under the presence of interference from backlight. The history of technology, state of the art, its main characteristics, advantages over other techniques, applications and standardization will also be discussed.

Different assemblies with varying transmitter and receiver devices, as well as different application scenarios were explored. The performance of BER vs distance was analyzed, obtaining results in the order of 10^{-3} for a particular case using a RGB LED and without external lighting source.

Keywords: Visible Light Communication (VLC), Light Fidelity (LiFi), Arduino, Matlab.

Lista de Figuras

1.1	Crescimento do tráfego de dados móveis	1
1.2	Torre repetidora na rede Semaphore	3
1.3	Desenho esquemático do Fotofone	3
1.4	Volume de trabalhos em VLC ao longo do tempo	8
2.1	Espectro eletromagnético	11
2.2	VLC x LiFi	14
2.3	Arquitetura LiFi	18
2.4	Diagrama de blocos do transmissor VLC/LiFi	19
2.5	Princípio de funcionamento do LED	19
2.6	LED no azul	20
2.7	Reflexão por fonte especular	23
2.8	Cenários do sistema VLC <i>indoor</i>	24
2.9	Receptor VLC/LiFi	24
2.10	Diagrama de blocos do receptor VLC/LiFi	25
2.11	Modulação OOK	27
2.12	Suporte ao escurecimento OOK	28
2.13	Modulação VPPM	29
2.14	Modulação OFDM	30
2.15	Modulação CSK	31
2.16	Constelação CSK	32
2.17	Arquitetura CSK	32
3.1	Módulo Arduino Uno	39

3.2	Circuito opto-eletrônico do transmissor OOK	40
3.3	Resposta espectral do APDS-9960	41
3.4	Montagem do receptor recorrendo ao APDS-9960	41
3.5	Esquemático simplificado montagem usando o LED branco e APDS-9960	42
3.6	Montagem utilizando um <i>tablet</i> como receptor	44
3.7	<i>Layout</i> da tela inicial do aplicativo Luxímetro	45
3.8	<i>Layout</i> da tela de configurações do aplicativo	45
3.9	Esquemático simplificado montagem usando o LED branco e <i>tablet</i>	46
3.10	Circuito opto-eletrônico transmissor CSK	47
4.1	Resposta do <i>tablet</i> para LED RGB	49
4.2	BER x Distância para transmissão de LED branco para <i>tablet</i> sem luz de fundo	51
4.3	BER x Distância para transmissão de LED branco para <i>tablet</i> com luz de fundo	52
4.4	BER x Distância para transmissão de LED RGB para <i>tablet</i> sem luz de fundo	53
4.5	Montagem utilizando um <i>tablet</i> como receptor	54
4.6	BER x distância comparativo - <i>tablet</i>	55
4.7	BER x distância - LED branco sem iluminação externa e sensor APDS-9960 para diferentes taxas de transmissão	56
4.8	BER x distância - LED branco com iluminação externa e sensor APDS-9960 para diferentes taxas de transmissão	56
4.9	Comparação LED RGB para APDS-9960 com e sem luz de fundo	57
4.10	Montagem para análise de perfil de intensidade luminosa	58
4.11	Diagrama esquemático da montagem da análise do perfil de intensidade luminosa	59
4.12	Perfil de intensidade luminosa usando o LED branco e APDS-9960	59
4.13	Perfil de intensidade luminosa usando o LED branco e <i>tablet</i>	60

Lista de Tabelas

1.1	Evolução da FSO	2
2.1	RF x VLC	12
2.2	Tabela modulação CSK	31

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACO-OFDM	<i>Asymmetrically Clipped Optical - OFDM</i>	30
AP	<i>Access Point</i>	12
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>	25
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>	22
BER	<i>Bit Error Rate</i>	15
CSI	<i>Channel State Information</i>	33
CSK	<i>Color Shift Keying</i>	27
DCO-OFDM	<i>DC biased optical - OFDM</i>	29
DD	detecção direta	10
FoV	<i>Field of View</i>	19
FSO	<i>Free Space Optics</i>	2
GND	<i>ground</i>	40
HD	<i>High Definition</i>	17
ICC	Interferência co-canal	15
ID	identidade	16
IM	<i>Intensity Modulation</i>	10
IR	infravermelho	4
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	18
LED	<i>Light Emitting Diode</i>	8
LiFi	<i>Light Fidelity</i>	7
LoS	<i>Line of Sight</i>	23
MAC	<i>Media Access Control</i>	13
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>	23
NOMA	<i>Non Orthogonal Multiple Access</i>	33

OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	15
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	33
OOK	<i>ON-OFF Keying</i>	13
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>	4
PAR	<i>Peak to Average Ratio</i>	15
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i>	4
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>	29
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>	4
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	29
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	29
QR	<i>Quick Response</i>	16
RF	radiofrequência	1
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>	11
RPO-OFDM	<i>Reverse Polarization Optical - OFDM</i>	30
Rx	receptor	23
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>	26
THz	Terahertz	4
Tx	transmissor	23
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	33
UFF	Universidade Federal Fluminense	5
UP-VLC	<i>Ultra Parallel - Visible Light Communication</i>	16
VLC	<i>Visible Light Communication</i>	7
VLCC	<i>Visible Light Communication Consortium</i>	13
VPPM	<i>Variable Pulse Position Modulation</i>	13
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>	11
WDMA	<i>Wavelength Division Multiple Access</i>	33
WHO	<i>World Health Organization</i>	34
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>	7

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Introdução Histórica	2
1.3	Histórico na Área de Ensino	5
1.4	Motivação e Objetivos	7
1.5	Estrutura do Trabalho	9
2	Revisão do Estado da Arte	10
2.1	VLC	10
2.1.1	Padronização VLC	13
2.2	LiFi	14
2.2.1	História da Tecnologia e Pesquisas em LiFi	15
2.3	Arquitetura	17
2.3.1	Transmissor	18
2.3.2	Canal Óptico sem Fio	21
2.3.3	Receptor	24
2.3.4	Relação Sinal Ruído	26
2.4	Técnicas de Modulação	27
2.5	Acesso Multiusuário	33
2.6	Aplicações	34
2.7	Vantagens	35

3	Métodos Empregados	38
3.1	Experimentos recorrendo ao LED branco	38
3.1.1	LED branco de alto brilho para APDS-9960	39
3.1.1.1	Circuito Transmissor	39
3.1.1.2	Circuito Receptor	40
3.1.1.3	Metodologia Empregada	42
3.1.2	LED branco de alto brilho para <i>Tablet</i>	43
3.1.2.1	Metodologia Empregada	45
3.2	Experimentos recorrendo ao LED RGB	46
3.2.1	LED RGB de alto brilho para APDS-9960	46
3.2.1.1	Circuito Transmissor	46
3.2.1.2	Circuito Receptor	47
3.2.1.3	Metodologia Empregada	47
3.2.2	LED RGB de alto brilho para <i>Tablet</i>	48
3.2.2.1	Metodologia Empregada	48
4	Resultados e Discussões	49
4.1	Resultados Obtidos recorrendo ao <i>Tablet</i>	50
4.1.1	LED Branco para <i>Tablet</i>	50
4.1.2	LED RGB para <i>Tablet</i>	52
4.2	Resultados Obtidos recorrendo ao sensor APDS-9960	55
4.2.1	LED Branco para APDS9960	55
4.2.2	LED RGB para APDS9960	57
4.2.3	Análise do Perfil de Intensidade Luminosa	58
5	Conclusão	61
5.1	Considerações Finais	61

5.2	Aplicações no Ensino de Engenharia de Telecomunicações	62
5.3	Trabalhos Futuros	64
	Referências	65
	Anexo A - <i>Datasheet</i> APDS-9960	71
	Apêndice A - Código Matlab Transmissor - LED Branco e RGB	79
	Apêndice B - Código Matlab Receptor - APDS-9960	80
	Apêndice C - Código Matlab Receptor Tablet - LED Branco	81
	Apêndice D - Código Matlab Receptor Tablet - LED RGB	82
	Apêndice E - Código Arduino Transmissor - LED Branco	83
	Apêndice F - Código Arduino Transmissor - LED RGB	84
	Apêndice G - Código Arduino Receptor - LED Branco	86
	Apêndice H - Código Arduino Receptor - LED RGB	88
	Apêndice I - Trabalho Publicado Referente ao Tema - I	90
	Apêndice J - Trabalho Publicado Referente ao Tema - II	95

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa

Com a crescente demanda por serviços de dados móveis, torna-se necessário o estudo de mecanismos alternativos que possam suprir esse mercado em ascensão. O gráfico ilustrado na figura 1.1 mostra esse crescente tráfego a nível global, com aumento não linear evidente.

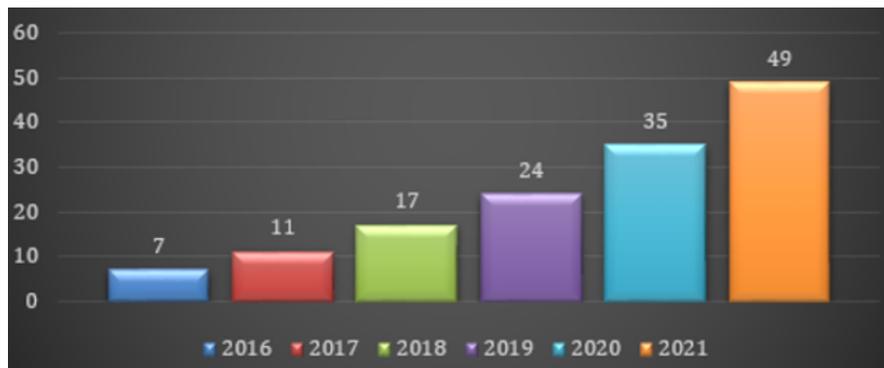


Figura 1.1: Crescimento do tráfego de dados móveis [Exabytes/Mês] ao longo do tempo [1]

Com a chegada do 5G, espera-se que o volume de dados transmitidos aumente ainda mais. Porém, um dos fatores que tornaram sua implementação tardia no Brasil, foi a questão regulatória quanto à licitação do espectro eletromagnético, onde operadoras como Claro, Vivo e TIM arremataram os três lotes na faixa de 3,5 GHz [2]. Nesse cenário, levando em consideração o limitado espectro de radiofrequência (RF) e as burocráticas questões regulatórias envolvidas, soluções com uso de luz visível têm sido exploradas ao longo dos anos. Tais soluções conseguem prover comunicação de alta velocidade com segurança para o usuário. Além disso, paralelamente ao fato de ser uma ferramenta de

comunicação, é capaz de desempenhar o papel de iluminação, dessa forma, uma parcela da infraestrutura local de instalação pode ser aproveitada, reduzindo os custos de implementação [3].

1.2 Introdução Histórica

As comunicações ópticas e os sistemas de comunicações ópticas no espaço livre *Free Space Optics* (FSO), são um tipo/mecanismo de comunicação que se utiliza da luz como meio de transmissão, sendo capazes de transmitir dados através da propagação de feixes ópticos na atmosfera ou no vácuo) [4]. Sua origem se deu na história antiga onde, através de sinalizadores e sinais de fumaça, mensagens podiam ser transmitidas. Desde a Grécia antiga, alguns experimentos e invenções foram registradas colaborando para os marcos alcançados nos dias atuais. A tabela 1.1 mostra algumas dessas contribuições.

Tabela 1.1: Evolução da FSO [5]

Ano	Autor e/ou Local	Contribuição
600 AC	Gregos	Sistemas visuais através de sinais de fogo e estações (humanas) repetidoras
1791	Chappe (França)	Invenção do Semaphore
1842	Collandon (Suíça)	Guiamento da luz com o uso de um jato fino de água
1880	Bell (EUA)	Invenção do Fotofone
1958	Shawlow e Townes	Concepção do Laser
1960	Mainman (EUA)	Operação do primeiro Laser (Rubi)
1962	EUA	Primeiro fotodiodo PIN de silício de alta velocidade

As linhas de semáforo são a forma mais antiga de aplicação da tecnologia FSO, sendo sua primeira implementação em 1792 através do engenheiro francês Claude Chappe [6]. Essa invenção permitiu a transmissão de 196 símbolos de informação codificados na posição de dois braços conectados por uma barra cruzada e foi o principal meio de comunicação militar no final do século XVIII e início do século XIX, tendo ampliado suas aplicações ao uso civil, incluindo comerciais [7]. A figura 1.2 mostra uma estação repetidora na rede implantada.

Naquela transição de séculos, redes de comunicação baseadas no Semaphore estenderam-se em vários países europeus (particularmente França e Suécia) através de enlaces que atingiram a marca de vários milhares de quilômetros.

Em 1880 ocorreu um grande marco com a invenção do primeiro sistema FSO foto-



Figura 1.2: Torre repetidora na rede Semaphore [7]

elétrico. Alexander Graham Bell e seu sócio Charles Sumner Tainter, realizaram um experimento, denominado Photophone (Fotofone) [8]. Esse sistema tinha por objetivo a transmissão de ondas acústicas via utilização da luz solar modulada que incidia sobre um dispositivo refletor. Na recepção, uma célula de selênio convertia a energia luminosa modulada em intensidade de corrente elétrica que, por sua vez, era convertida em som por um fone. O alcance deste dispositivo estava limitado a 200 m [5]. A figura 1.3 ilustra o equipamento e o processo descrito.

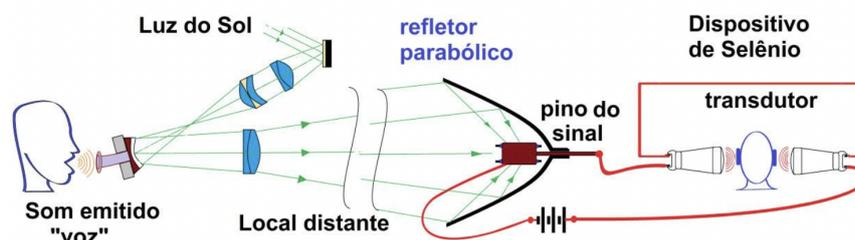


Figura 1.3: Desenho esquemático do Fotofone [9]

Ao longo do tempo, percebeu-se que a qualidade do enlace estava sujeita às condições atmosféricas e surgiu a necessidade da utilização de um meio guiado para transporte das informações por longas distâncias. Nesse contexto, no ano de 1956, o físico indiano N.S. Kapany cunhou pela primeira vez o termo Fibra Óptica. Na ocasião, os enlaces também não alcançavam distâncias muito significativas e, mais tarde, mostrou-se que isso ocorria devido a impurezas no material componente da fibra e perdas ligadas ao guia de onda [8][10].

Por volta dos anos 60, a partir da invenção do laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*), mais precisamente o laser de rubi, foi possível o desenvolvimento mais rápido dos sistemas de comunicações ópticas no espaço livre. Isso porque o laser consiste em uma fonte de luz com propriedades que o credenciaram para ser grande aliado daqueles sistemas. Suas principais características que o tornaram tão inovador foram possuir uma luz monocromática, coerente, direcional e focalizada [5].

Mediante a combinação dessas duas ferramentas, o laser e a fibra óptica, os sistemas da época puderam apresentar melhores desempenhos. Diante desse cenário, Elias Snitzer publicou uma descrição teórica e experimental, via utilização de laser na propagação de sinais em guias de onda dielétricos incluindo a situação monomodal [11] e, em 1966, Kao e Hockham demonstraram que as perdas nas fibras poderiam ser reduzidas consideravelmente removendo suas impurezas, com a expectativa de alcançar uma atenuação inferior a 20 dB/km [10]. Esse trabalho motivou muitos laboratórios e pesquisadores, impulsionando o desenvolvimento das comunicações ópticas. Apesar desses esforços, os sistemas FSO ficaram inviáveis em muitas aplicações devido às grandes perdas e instabilidades que o feixe óptico sofria na propagação pela atmosfera [10]. Devido a serem fabricadas com materiais dielétricos, os sistemas à fibra são também imunes às interferências eletromagnéticas. Isso é vantajoso pelo fato de não serem afetadas por possíveis sistemas que estejam próximos. Outra vantagem que merece destaque é a segurança desses enlaces. Pelo fato de a fibra não irradiar potência significativa da luz que é propagada, aliado ao fato de uma possível tentativa de interceptação ser mais facilmente percebida, esses sistemas mostram-se bastante confiáveis [12].

Gfeller e Bapst contribuíram no ano de 1979, apresentando o primeiro estudo baseado em um sistema de comunicação óptico sem fio para um ambiente interno, utilizando o comprimento de onda central 950 nm no espectro do infravermelho (IR) na faixa de Terahertz (THz). Seus trabalhos, a exemplo do artigo encontrado em [13], demonstraram o potencial do *Optical Wireless Communication* (OWC) para redes internas de alta capacidade, prometendo largura de banda de centenas de THz do espectro eletromagnético no domínio óptico. O sistema baseava-se em prover um link de banda base via modulação por código de pulso – *Pulse Code Modulation* (PCM) experimental e um link via modulação por deslocamento de fase – *Phase Shift Keying* (PSK), operando a 125 Kbit/s e 64 Kbit/s, respectivamente, com alcance de aproximadamente 50 m. Este estudo foi fundamental para o desenvolvimento dos sistemas modernos de VLC. A partir de então, outros experimentos dos mesmos e outros pesquisadores também exploraram o espectro IR e alcançaram taxas ainda superiores, atingindo o máximo de 100 Mbps [6].

Com o crescimento das comunicações móveis ao longo do tempo, surgiu um problema relacionado ao espectro de radiofrequência, que além de ser um espectro limitado, necessita da aquisição de licenças. Dessa forma, a utilização de faixas de frequências mais elevadas tornou-se necessária e a faixa óptica mostrou-se bastante eficiente, onde diferentemente dos enlaces de rádio, o FSO não faz uso de bandas licenciadas. O envio e recebimento de informações acontecem através de feixes luminosos, o que torna esses sistemas mais econômicos e não susceptíveis a ruídos e interferências causados por outros sistemas que utilizam o limitado espectro nas RF.

1.3 Histórico na Área de Ensino

O grupo precursor ao Laboratório de Comunicações Ópticas (LACOP) situado na Universidade Federal Fluminense (UFF) iniciou suas atividades em 1983-1984 com os professores Astor Modesto de Souza†, Luiz Carlos Scavarda do Carmo†, Jean Pierre von der Weid e Hypolito José Kalinowski ministrando as primeiras disciplinas de graduação relacionadas a tecnologias fotônicas e preparando a oferta do I Curso de Especialização em Fibras Ópticas.

A primeira edição daquele curso (1984-1986) teve como um dos focos a realização de uma série de experimentos educacionais sobre fibras ópticas, que muito contribuíram para seu sucesso e como elemento de propaganda interpessoal (o que possibilitou sua repetição até meados dos anos 1990) [14].

Produção de fibras ópticas vidro-ar por estiramento manual, determinação do perfil de índice, medida do coeficiente de atenuação e perdas por curvaturas, eliminação de modos por casamento de índice, responsividade de detectores, dentre outras, foram realizadas adaptando os procedimentos para a reduzida infraestrutura laboratorial existente. Observou-se, no corpo de estudantes já com experiência profissional de vários anos, um vívido interesse na realização daquelas atividades [14].

A interação com o setor de ensino prosseguiu na segunda metade dos anos 1980, através de projetos financiados pelo CNPq (Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – área de Educação para Ciências) e CNPq/COLCIENCIAS (Colômbia). Realizados, respectivamente, em colaboração com o Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná e com a *Universidad Nacional – Colombia*, visaram desenvolver instrumental e procedimentos para experimentos de óptica no ensino médio [15, 16] e para caracterização de sistemas de comunicação ópticos no ensino superior [17, 18].

O trabalho iniciado naqueles dois projetos teve continuidade no Grupo de Pesquisa "Dispositivos Fotônicos e Aplicações", sediado no CEFET/PR, hoje Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Além da continuidade do apoio PADCT na Educação para Ciências [19], foram adicionados recursos CAPES/CNPq através do programa REENGE (Reengenharia do Ensino das Engenharias) para expansão instrumental dos laboratórios na área de comunicações ópticas [20] e para inserção de novas tecnologias no público externo à universidade [21]. Ressalte-se, nesse histórico, o apoio PADCT à área de Ensino de Ciências, o que permitiu – em uma conjuntura nacional de reduzidos investimentos no setor de P&D – ampliar laboratórios de ensino médio até o início do século XXI, onde a atuação anteriormente mencionada continuou a ter resultados [22].

No ambiente externo ao grupo, outras iniciativas voltadas à educação em engenharias foram realizadas, com histórico que levam à criação da ABENGE (Associação Brasileira de Educação em Engenharia) em 1973 e à realização periódica de seu evento chave, o Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia que, no ano em curso, chega à sua 51^a edição. Essa associação publica regularmente a Revista de Ensino de Engenharia. Realçando ideias originais do grupo da UFF, o prof. Luiz Carlos Scavarda do Carmo† teve importante atuação em atividades realizadas pela associação ao longo das décadas de 1990 e 2000, incluindo a estruturação do já mencionado projeto REENGE.

Devido à disponibilização no mercado internacional de produtos voltados ao ensino de comunicações ópticas, em 1994-1995 a SBMO, Sociedade Brasileira de Micro-ondas e Optoeletrônica, elaborou o projeto Faraday, proposta piloto para realçar o ensino de comunicações nas faixas de micro-ondas e óptica mediante implantação de laboratórios em um grupo de universidades com cursos de telecomunicações. Tal projeto foi apresentado ao CNPq, que financiou a elaboração e a especificação dos instrumentos, mas teve sua implantação comprometida pelas dificuldades econômicas do setor de C&T na segunda metade daquela década.

Um experimento metodológico no ensino de comunicações ópticas foi realizado por Abdalla *et al.* [23] – uma fração dos autores esteve envolvida na proposição do projeto Faraday – com atividades experimentais desenvolvidas em dois níveis, experimentos didáticos e projeto final, com boa aceitação entre os estudantes participando. Aproximadamente no mesmo intervalo temporal, as técnicas de LiFi começavam a ser introduzidas nos currículos de graduação e sua divulgação teve crescimento na literatura própria de algumas instituições como, p.ex., Carvalho *et al.* [24], mas essa inserção aprofundou a diferença entre os conceitos teóricos (ou passíveis de simulações computacionais) com a base ex-

perimental disponível. Grupos externos ao Brasil também perceberam essa dificuldade entre os fundamentos da disciplina e sua realização prática em laboratórios [25]. Dentro desse contexto, foram reportados alguns resultados no desenvolvimento de métodos para o ensino de comunicações FSO – *Free Space Optics* [26], embora sem ênfase no aspecto experimental. Alguns módulos para experimentos de comunicação por luz visível (*VLC – Visible Light Communications*) foram também reportados [27].

No mercado internacional encontram-se produtos especificamente voltados ao ensino de comunicações ópticas nos catálogos de empresas especializadas, em geral não facilmente acessíveis aos laboratórios das IES brasileiras. A própria disponibilidade desses produtos no mercado nacional é muito limitada, dificultando sua implantação nos laboratórios temáticos. Como exemplo, a PASCO oferece um conjunto para experimentos do guiamento em jato d'água até pequenos enlaces entre microcomputadores (www.pasco.com). O mesmo ocorre com a *SSSO Optical Technology Fibers* (www.sssoptical.com/educational), mas seus instrumentos são mais voltados ao uso de lasers e requerem equipamento periférico de maior custo. Outras empresas oferecem apoio ao ensino de comunicações óptica por meio de fibra óptica tal como a *Industrial Fiber Optics* (www.i-fiberoptics.com) ou Scientech (www.scientechworld.com). Até mesmo distribuidores genéricos como Alibaba oferecem alguns sistemas envolvendo esse tipo de comunicação (<https://cngtee.en.made-in-china.com/product/cdufLgOrHTAX/China-Portable-Experimental-Optical-Fiber-Communication-Comprehensive-Experimental-Device.html>). Entretanto, não são encontráveis sistemas educacionais para comunicações ópticas no espaço livre ou usando conceitos do *Light Fidelity* (LiFi).

Dentro do contexto citado, é natural que o desenvolvimento de técnicas experimentais para ensino de comunicações por luz visível seja objeto de trabalho no grupo de pesquisa. Particularmente, tecnologias tipo LiFi tem grande interesse para disciplinas voltadas a redes de comunicação (p.ex., Redes de Acesso) no domínio óptico, onde a disponibilidade de equipamentos para estudos experimentais é reduzida ou não existente. Alternativas para simulação experimental com materiais acessíveis podem assim atrair um maior interesse dos estudantes.

1.4 Motivação e Objetivos

Baseado no fato de o *Visible Light Communication* (VLC) ser uma tecnologia promissora, que pode atingir taxas dezenas de vezes superiores às alcançadas pelo *Wireless Fidelity*

(Wi-Fi) e ser implementada em locais onde o RF não é suportado ou desejado; além de ser uma ferramenta pouco explorada no ambiente acadêmico, o interesse pelo desenvolvimento de um modelo protótipo de comunicação via luz visível para fins educacionais é visto como uma contribuição importante para o ensino de sistemas de comunicação, bem como para as atividades letivas da comunidade acadêmica.

Os estudos relacionados à comunicação envolvendo meios ópticos vêm sendo explorados há bastante tempo, adquirindo maior impulsão a partir dos anos 1970, ainda com uso do infravermelho. A partir dos anos 2000, os esforços se concentraram em realizar esse feito com uso de luz visível, sendo em 2011 atingido um marco bastante significativo: a primeira demonstração do uso do LiFi. A partir de então, muitos pesquisadores vêm se interessando pelo tema devido sua vasta contribuição, aplicabilidade e vantagens. Esse interesse pode ser observado pelo gráfico da figura 1.4, que mostra o aumento na publicação de trabalhos sobre VLC ao longo do tempo.

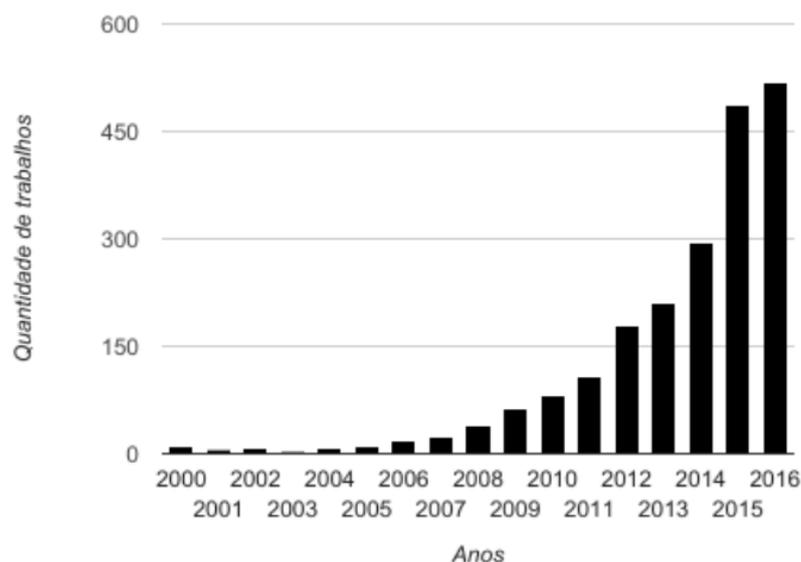


Figura 1.4: Volume de trabalhos em VLC ao longo do tempo[28]

Este trabalho tem por objetivo a elaboração de um sistema protótipo de laboratório para fins educacionais que permita comunicação via luz visível. Para tal, será desenvolvida uma aplicação que será a interface entre o transmissor, consistindo de um *Light Emitting Diode* (LED) e receptor onde, nesse caso, serão utilizados ora dispositivos de um *tablet* ora um fotodetector convencional. A câmera presente nos *tablets* atuais possuem características que as possibilitam serem substitutas do fotodetector, que seria um *hardware* adicional ao projeto. Para tal, será objeto de estudo o detector de nível luminoso (como

receptor e/ou sensor de radiação de fundo). A interface a ser desenvolvida deverá ser capaz de codificar e decodificar a informação a ser transmitida pelo sistema, de forma a estabelecer uma comunicação satisfatória.

Para dar embasamento ao sistema proposto, além de consolidar o conhecimento dos estudantes no que tange um projeto de comunicação via luz visível, serão realizadas medidas para diferentes cenários, sendo eles: variando a distância entre transmissor e receptor (o que modifica a potência óptica percebida na recepção), variando o receptor, e por fim, modificando o tipo de LED. Ao final das simulações, será possível obter conclusões sobre o melhor cenário de aplicação, bem como, avaliar a viabilidade do dispositivo realizado.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro deles dedica-se à introdução, onde se incluiu a justificativa, introdução histórica do tema, bem como a motivação e os objetivos a serem cumpridos.

O capítulo dois dá enfoque às principais características de um sistema VLC, sua arquitetura, suas principais diferenças quando comparadas à tecnologia LiFi; além de explorar os componentes envolvidos neste último, as técnicas de modulação mais comumente utilizadas, aplicações, vantagens dentre outros pontos importantes.

No capítulo seguinte, é desenvolvida a etapa dos materiais e métodos empregados, envolvendo o processo de confecção do protótipo, etapas de simulação e programação.

Posteriormente no capítulo quatro, são analisados os resultados obtidos com as simulações empregadas no capítulo anterior, para finalmente no capítulo cinco, revisitar os principais tópicos discutidos ao longo da dissertação e apresentar suas conclusões, contribuições na comunidade acadêmica, bem como registrar sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

Embora intimamente ligados, existem algumas diferenças importantes entre os conceitos de VLC e LiFi. Nas próximas seções, a exposição se concentrará em esclarecer a evolução, as principais características, semelhanças e diferenças de cada uma dessas técnicas. No caso do LiFi, a análise se estenderá um pouco mais englobando arquitetura, as aplicações, vantagens, pesquisas relacionadas ao tema, técnicas de modulação comumente utilizadas e esquemas de implementação.

2.1 VLC

A comunicação óptica de símbolos na idade contemporânea foi introduzida por volta de 1880, porém, mais atualmente, surgiu na década de 1990 em países como Alemanha, Coreia e Japão com a ideia de modernizar os LEDs para a transmissão de dados. Inicialmente, diferentes regiões espectrais de luz foram utilizadas, como o infravermelho, ultravioleta e luz visível [29].

O conceito de VLC, cunhado e demonstrado pela primeira vez em 2000 pelo laboratório Nakagawa [30], surge como alternativa aos sistemas de RF, visto sua vasta aplicabilidade e simplicidade. O VLC usa “lâmpadas” de LED para transmitir dados usando modulação em intensidade – *Intensity Modulation* (IM) e, no lado do receptor, através da detecção direta (DD) os sinais são capturados por fotodetectores. Em suma, é considerada uma técnica de comunicação ponto a ponto, substituindo um cabo convencional [31].

Sua viabilidade surgiu devido à escassez do espectro eletromagnético abaixo dos 10 GHz, sendo necessário explorar novas faixas de frequências [31], em particular, frequências mais elevadas. Logo, fazendo uso da faixa que varia entre 380 nm e 780 nm, faixa

esta não licenciada, esses sistemas além de proverem comunicação, também são capazes de entregar iluminação. A figura 2.1 ilustra o espectro eletromagnético, onde é possível notar a maior largura de banda da faixa visível em comparação à faixa de rádio, cerca de 10.000 vezes maior, o que lhes conferem possibilidades de taxas de transmissão mais elevadas.

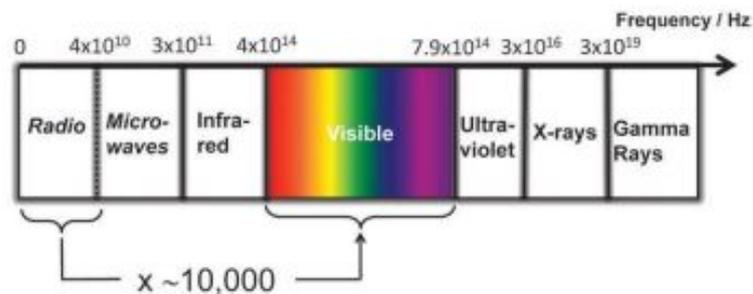


Figura 2.1: Espectro eletromagnético [32]

No início dos anos 2000, as lâmpadas de LED passaram a ser consideradas para experimentos envolvendo VLC, sendo em 2003 realizado um experimento com uma lâmpada de LED branca em ambiente *indoor*, atingindo taxas de 400 Mbps [33]. Esse trabalho de Tanaka e de sua equipe serviu de inspiração para muitos outros a seguir, onde foram acrescentadas algumas adaptações e até mesmo inovações, variando técnicas de modulação, tipos de lâmpadas de LED etc com o intuito de atingirem taxas de transmissão ainda mais elevadas. A exemplo dos trabalhos citados, um que merece destaque foi realizado com uso de LED *Red-Green-Blue* (RGB) e multiplexação por divisão em comprimento de onda – *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), onde a partir da modulação separada por cores, foi possível atingir taxas de 800 Mbps com uma única luminária RGB [6].

As principais vantagens dos sistemas VLC quando comparadas às comunicações via RF são a grande disponibilidade de lâmpadas de LED, de forma que grande parte da infraestrutura pode ser aproveitada. Outras vantagens são: segurança nos enlaces, visto que a luz não consegue ultrapassar paredes opacas, alta largura de banda e possibilidade de reuso de frequências [30].

A título comparativo, a tabela 2.1 destaca as principais diferenças entre os sistemas de radiofrequência e os que fazem uso de VLC.

Tabela 2.1: Comparação entre RF e VLC. Adaptado de [34]

	RF	VLC
Espectro	300 GHz	400 THz
Infraestrutura	Ponto de Acesso dedicado	Iluminação
Segurança	Baixa	Alta
Cobertura	Alta	Limitada
Interferência Eletromagnética	Sim	Não

Com relação à análise de cada um dos pontos da tabela, têm-se :

- Espectro

Conforme citado anteriormente, a largura do espectro visível é significativamente superior em comparação ao espectro de rádio. Essa maior largura de espectral (não licenciado), confere aos sistemas VLC possibilidade de elevadas taxas de transferência de dados.

- Infraestrutura

Nos sistemas WiFi, os pontos de acesso – *Access Point* (AP) são as antenas conectadas a transmissores ou os roteadores. Analogamente, em sistemas VLC os APs são os pontos de iluminação, tipicamente LEDs. Logo, a infraestrutura já presente pode ser aproveitada minimizando custos de implementação.

- Segurança

Este ponto está intimamente ligado ao fato de, diferentemente das ondas de rádio, as ondas luminosas não atravessarem paredes opacas. Dessa maneira, considera-se os sistemas VLC mais seguros visto o confinamento dos dados no ambiente de instalação dos APs.

- Cobertura

Está diretamente correlacionado ao item anterior, visto que a maior cobertura dos sistemas RF está atrelada ao fato de suas ondas serem aptas a atravessar paredes. Logo, a cobertura dos sistemas VLC está sujeito às características da fonte luminosa, sendo diretamente proporcional à capacidade de iluminação do LED. Em geral, mais limitada que aquela WiFi.

- Interferência Eletromagnética

Sistemas que operam com ondas de rádio interferem facilmente uns nos outros, sendo em algumas aplicações indesejável o seu uso, como o caso de hospitais, aviões etc. Em contrapartida, as ondas luminosas não são capazes de interferir em sistemas RF e, dependendo do cuidado tomado, nem em sistemas VLC próximos [34][31]. Logo, sistemas que operam com luz visível, são considerados imunes a interferências eletromagnéticas.

2.1.1 Padronização VLC

Em 2003, com objetivo de acelerar as pesquisas e comercialização do VLC, foi criado o *Visible Light Communication Consortium* (VLCC) propondo algumas normas. Porém, devido ao aumento do interesse dos pesquisadores na área, o VLCC introduziu o primeiro padrão IEEE 802.15.7 em 2009 [35]. O padrão propõe, além de técnicas de modulação, parâmetros da camada física e de acesso ao meio, topologias de rede, prevenção de colisão, suporte ao escurecimento [30] etc, para comunicações ópticas sem fio em curtas distâncias [36].

Grande parte dessa padronização é dedicada às características das camadas físicas e *Media Access Control* (MAC), em que a primeira é dividida em três modos de operação: PHY I, PHY II e PHY III, onde qualquer sistema compatível com o IEEE 802.15.7 deve implementar pelo menos os modos PHY I ou PHY II e, no caso de implementar o modo PHY III, também deve implementar o PHY II.

Com relação à taxa de dados, têm-se o seguinte:

- PHY I: Destinado a usos *outdoor* com aplicações que requerem baixa taxa de dados, variando de 11 Kbps à 266 Kbps, podendo fazer uso da modulação *ON-OFF Keying* (OOK) ou *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM), que serão detalhadas mais adiante neste documento.
- PHY II: Com taxas de dados moderados, que vão de 1,25 Mbps à 96 Mbps, são destinadas para aplicações *indoor*. Assim como o caso anterior, fazem uso das técnicas de modulação OOK ou VPPM.
- PHY III: O modo de operação PHY III contempla taxas de 12 Mbps à 96 Mbps, fazendo uso de uma técnica de modulação exclusiva, desenvolvida para lâmpadas LED multi-chips.

2.2 LiFi

O termo LiFi cunhado pela primeira vez em 2011 [37] por Harald Haas [38], durante um TED Talk, baseia-se em uma continuação à migração por frequências mais elevadas no espectro eletromagnético [31]. É considerado um tipo de tecnologia VLC, trazendo consigo muitas de suas características. Porém, algumas camadas de complexidade foram adicionadas ao LiFi, agregando novas possibilidades e ao mesmo tempo eliminando algumas limitações do VLC. Dessa forma o LiFi, diferentemente do VLC, é considerado um sistema de comunicação bidirecional completo, podendo ser ponto a multiponto ou multiponto a ponto [31]. Além do mais, suporta multiusuários e suas respectivas mobilidades [37].

De maneira sintetizada, a figura 2.2 ilustra as principais diferenças e pontos em comum entre o VLC e o LiFi, onde nota-se que o LiFi é uma técnica pertencente ao universo VLC.

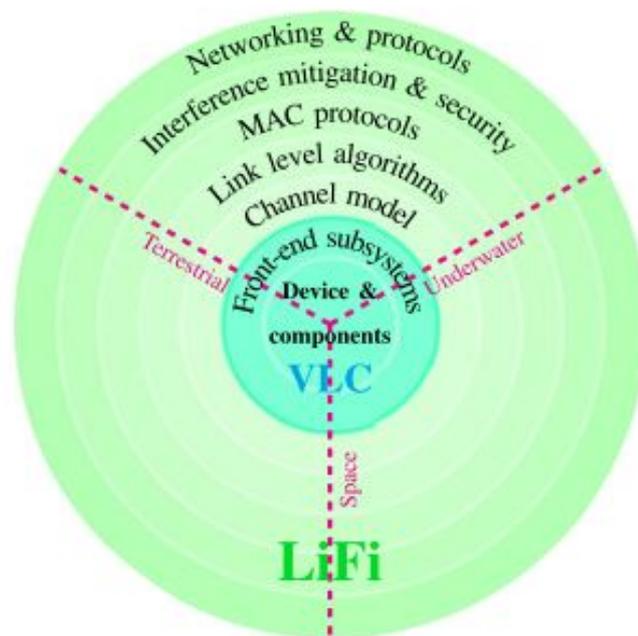


Figura 2.2: VLC x LiFi [31]

Dentre os pontos comuns, sob o ponto de vista dos autores de [31], têm-se os dispositivos, onde se incluem o *hardware* do transmissor e do receptor; além dos subsistemas *front-end*, que são os circuitos responsáveis pelo acionamento dos LEDs e por moldar os sinais que chegam ao fotodetector.

Já com relação aos pontos particulares do LiFi, têm-se:

- Modelos de Canal

Modelos que levam em conta a composição espectral do sinal e por conseguinte, conseguem estabelecer alguns parâmetros, como: largura de banda, Interferência co-canal (ICC) etc [31].

- Algoritmos de Nível de Enlace

Algoritmos que maximizam a taxa de transferência de dados através da moldagem do sinal de maneira adequada.

- Protocolos MAC

Protocolos de acesso ao meio que são fundamentais para prover acesso multiusuário, levando em conta recursos específicos da camada física LiFi.

- Mitigação de interferência e segurança

Técnicas que visam garantir alto rendimento do sistema.

- Protocolos e rede

Integração da *attocell* (esquema celular utilizado no LiFi) à redes definidas por *software* ou através da virtualização [31].

2.2.1 História da Tecnologia e Pesquisas em LiFi

Em 2006, Haas e outros três pesquisadores já davam os primeiros passos a respeito do LiFi. Eles propuseram um sistema de comunicação sem fio utilizando LEDs brancos de alto brilho e modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). A relação pico média – *Peak to Average Ratio* (PAR) em OFDM é geralmente considerada uma desvantagem em sistemas de transmissão de radiofrequência devido às não linearidades do amplificador de potência. Contudo, eles demonstraram que o alto PAR em OFDM pode ser explorado construtivamente na comunicação de luz visível para LEDs de modulação de intensidade. Mostraram grande proximidade entre os resultados teóricos e experimentais, atingindo uma distância de até um metro usando um único LED com uma taxa de erro de bit – *Bit Error Rate* (BER) de 10^{-3} sob condições de luz ambiente moderada [39].

De modo a obter novas contribuições com a tecnologia LiFi, em 2010 Harald Haas e seu grupo de pesquisa deram início ao projeto denominado *D-Light*, onde o objetivo inicial era de atingir taxas mínimas de 100 Mbps, porém foram alcançados 102,5 Mbps em condições normais de iluminação. O sistema *D-Light* utilizou técnicas OFDM, onde foi

possível modular a intensidade dos LEDs à uma taxa elevada, que não pode ser percebida pelo olho humano [40].

Em 2011, Haas demonstrou o LiFi publicamente na sua TED Talk, basicamente usou um abajur de mesa com uma lâmpada de LED para transmitir um vídeo, projetado em um tela. Durante o evento, ele bloqueava periodicamente a luz da lâmpada para provar que esta era realmente a fonte de dados de entrada. Na ocasião, uma taxa de transmissão de cerca de 10 Mbps foi atingida [41].

Em seguida, um grupo de pesquisa das universidades de Edimburgo, St.Andrews, Strathclyde, Oxford e Cambridge colaborou em um projeto de pesquisa chamado *Ultra Parallel - Visible Light Communication* (UP-VLC), projeto este que decorreu desde outubro 2012 a fevereiro de 2017. O UP-VLC baseou-se em transmissão de dados via uma lâmpada micro LED para transmitir dados separados de 3,5 Gbps por meio de cada uma das três cores primárias: vermelho, verde e azul, atingindo uma taxa de transferência combinada de 10 Gbps. Com uso da modulação OFDM, o micro-LED atuou como um interruptor rápido de ligar/desligar para manipular a intensidade de luz, permitindo transmitir blocos de dados binários em alta velocidade [42].

No ano de 2014 a contribuição veio dos Laboratórios Fujitsu, onde desenvolveram uma tecnologia que podia modular a cor da luz emitida pelas lâmpadas LED de maneira a incorporar dados de identificação em determinado objeto, usando modulação de cor. Baseado no fato que o LED combinava as três luzes, o vermelho, verde e azul para produzir uma gama de cores, a modulação da intensidade da luz emitida por cada uma das três cores ao longo do tempo, tornava possível integrar dados de identidade (ID) ao iluminar o objeto. A captura das informações ocorria apontando um *smartphone* para o objeto correspondente ao ID [43] (análogo aos códigos *Quick Response* (QR) utilizados atualmente). Essa tecnologia fornece uma gama de aplicações, desde aquelas em lojas para fornecer informações sobre produtos até mesmo em museus, para orientar os visitantes.

Em 2016, seguindo a mesma tendência, foi proposto um sistema para otimizar o tempo nas compras de supermercado. O sistema funcionava da seguinte maneira: o celular do cliente digitalizava um produto e exibia seu respectivo ID, o nome e o preço do mesmo. Quando o produto era colocado no carrinho, que também contava com um módulo LiFi, suas informações eram registradas. Depois que o processo de pagamento era realizado no aplicativo do celular através do sistema bancário, os detalhes da conta eram enviados para o módulo da porta do estabelecimento, também munido de um transceptor LiFi. No portão, o carrinho era escaneado para verificação final, sendo apenas liberado caso o

processo de pagamento fosse confirmado [44].

No mérito de produtos comercializados, em 2018 a Philips anunciou a *Philips Lighting*, a primeira companhia global a comercializar luminárias com a tecnologia LiFi. A promessa da empresa foi uma conexão estável e rápida com velocidade atingindo 30 Mbps sem comprometer a iluminação. O usuário poderia transmitir vários vídeos com qualidade de alta definição – *High Definition* (HD) enquanto ainda realizava videochamadas [45].

Já no ano de 2020, foi demonstrada a obtenção de taxas de transmissão superiores a 20 Gbps com uso de lasers como transmissores. Foram utilizados lasers azuis e fonte de luz branca integrada para funcionar como transmissor de alta velocidade, além do uso da técnica de modulação OFDM. Quanto aos resultados, com o uso de apenas um laser obteve-se taxas na ordem de 11 Gbps e 1,7 Gbps para 5 m e 50 m, respectivamente. Já com o uso de dois lasers, separados em dois canais distintos, foram alcançados 22 Gbps [46].

Atualmente conta-se com diversos trabalhos e produtos na área, onde por meio principalmente de mudanças nas técnicas de modulação e tecnologias embutidas no transmissor e receptor, taxas cada vez maiores podem ser atingidas. Um exemplo de produto recente que está disponível no mercado é o LiFi-XC, que promete fornecer velocidades de *uplink* e *downlink* de até 42 Mbps, possui tamanho reduzido, além da capacidade de fornecer comunicações seguras, bidirecionais e totalmente integradas à rede [47].

2.3 Arquitetura

A arquitetura de um sistema LiFi consiste de três elementos fundamentais: transmissor, receptor e o canal óptico. As principais características do transmissor e do receptor óptico que precisam ser levadas em consideração são: resposta espectral óptica, largura de banda de modulação elétrica, padrões de radiação/detecção, potência óptica de saída do LED, área fotossensível e figura de ruído do fotodetector [6]. No que diz respeito ao canal óptico, demonstrou-se ser um sistema linear, invariante no tempo e sem memória, com uma resposta ao impulso de duração finita. A figura 2.3 a seguir ilustra um sistema de comunicação simplificado, onde se pode notar que o fluxo de dados digitais oriundos da internet são enviados ao *driver* do LED, sendo este responsável pelo acionamento e a conversão desse fluxo em sinal luminoso. Já na recepção, ocorre o processo inverso, onde o fotodetector percebe as variações da intensidade luminosa convertendo-as de volta para sinal elétrico. Cada um dos itens envolvidos na arquitetura, serão detalhados nas subseções

seguintes, incluindo o canal óptico sem fio, meio pelo qual o sinal será propagado.

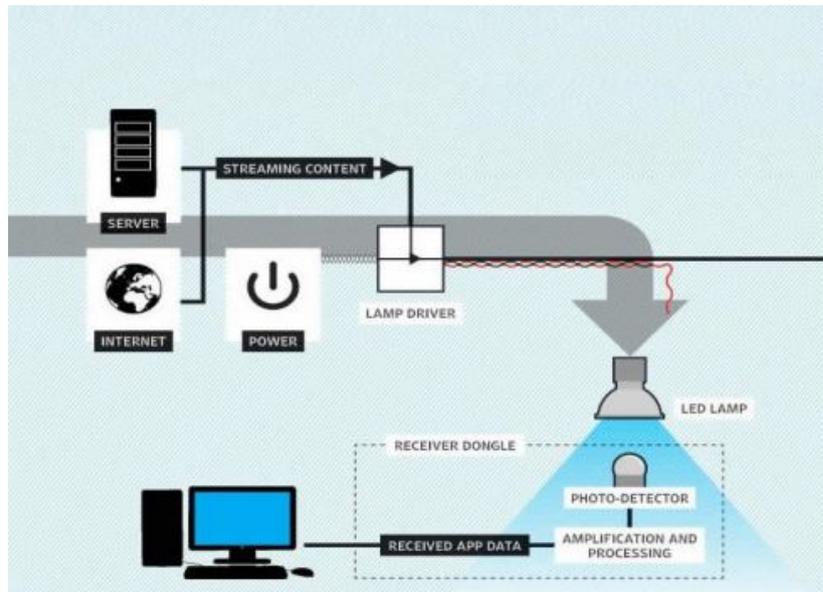


Figura 2.3: Arquitetura LiFi [48]

2.3.1 Transmissor

O transmissor em um sistema VLC/LiFi precisa estar apto para desempenhar duas funções (quando necessário), iluminação e comunicação, sendo fundamental manter a taxa de dados mesmo em níveis de iluminação baixos ou imperceptíveis aos olhos humanos. O dispositivo mais comumente utilizado que cumpre esses pré-requisitos é o LED, porém em casos onde não é necessária a iluminação, até mesmo um dispositivo no infravermelho próximo pode ser utilizado. Embora o LED possua uma maior largura espectral quando comparado ao laser (fator limitante na taxa de transmissão, restrita à aproximadamente 155 Mbps), esse mostra-se mais adequado para aplicações VLC. A tarefa do transmissor é converter dados digitais em luz visível e enviar as variações do sinal ao LED, onde há uma relação linear entre corrente e intensidade luminosa. No caso de uma aplicação onde as duas funções precisem ocorrer simultaneamente, os LEDs devem satisfazer os requisitos de iluminância, para que esta em ambientes *indoor* varie entre os 200 lux e 1000 lux, de acordo com as recomendações *International Organization for Standardization* (ISO) [33]. Os LEDs de brilho elevado utilizam correntes superiores, logo, para modular os dados nos referidos LEDs mantendo o nível de iluminação torna o projeto do transmissor VLC/LiFi mais complexo do que o convencional projeto de transmissor de comunicação. A figura 2.4 ilustra em forma de diagrama de blocos as etapas inerentes ao transmissor VLC/LiFi.

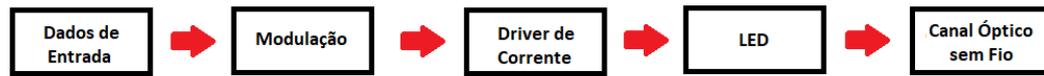


Figura 2.4: Diagrama de blocos do transmissor VLC/LiFi

Fonte: Autoria Própria

Apoiado no fato de o LED ser um dos principais transmissores em sistemas VLC/LiFi, é importante entender seu princípio de funcionamento. O LED é um tipo de diodo semicondutor de estado sólido que emite luz quando uma corrente é aplicada através do dispositivo, propriedade esta denominada de eletroluminescência. Ele é composto de dois elementos semicondutores, tipo p e tipo n, que são colocados em contato direto e formam o LED (a junção p-n). A corrente flui apenas do lado p (anodo) para o lado n (catodo) e a eletroluminescência ocorre quando uma interação elétron-buraco faz com que um elétron recombinar com uma vacância, liberando assim energia na forma de um fóton [49]. A figura 2.5 ilustra o princípio de funcionamento mencionado.

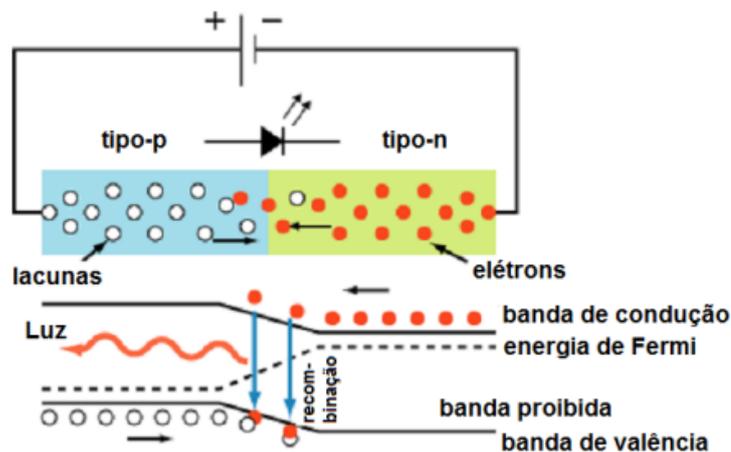


Figura 2.5: Princípio de funcionamento do LED. Adaptado de [49]

De maneira ideal, o LED é considerado um emissor lambertiano, onde seu ângulo de visão, *Field of View* (FoV) é definido como o ângulo entre os pontos de máxima intensidade do padrão de radiação, e aquele onde a diretividade é reduzida a 50% [50]. A distribuição espacial da intensidade de radiação na superfície é dada pela equação 2.1 [51], conforme a seguir:

$$I_{\phi} = I(0) \cdot \cos^m(\phi) \quad (2.1)$$

onde ϕ é o ângulo de irradiação em relação ao eixo normal à superfície do dispositivo, $I(0)$ é a intensidade luminosa central e m a ordem de emissão lambertiana. O valor de m depende do ângulo de meia potência do LED e quando se tem $m = 1$, considera-se que a fonte luminosa é um emissor lambertiano quase perfeito. Porém, na prática, os LEDs apresentam $m > 1$, havendo queda de intensidade com o ângulo. O cálculo de m é realizado segundo a equação 2.2 [51].

$$m = \frac{-\log 2}{\log(\cos \phi_{1/2})} \quad (2.2)$$

No que se refere aos LEDs de alto brilho com comprimentos de onda visível, existem aqueles LEDs de luz branca ou multicolor, chamados RGB, e os fosforescentes.

Os fosforescentes consistem em um LED azul em conjunto com uma camada de fósforo amarelo. Seu princípio de funcionamento baseia-se na utilização do fósforo para converter os comprimentos de onda, ou seja, a luz de comprimento de onda curto da junção pn no LED é absorvida pelo fósforo e, em seguida, a luz emitida pelo fósforo experimenta uma mudança de comprimento de onda para um comprimento de onda mais longo (menor energia). Como resultado, os múltiplos componentes de comprimento de onda são observados. O espectro de emissão de um LED baseado em fósforo tem espectro forte no azul original e os comprimentos de onda mais longos deslocados pelo fósforo [52], conforme ilustrado na figura 2.6.

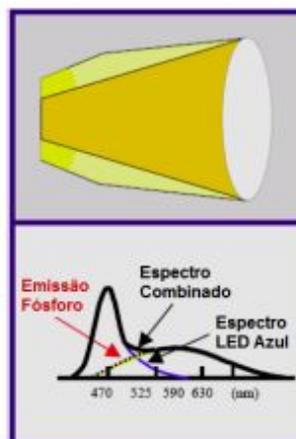


Figura 2.6: Obtenção de luz branca através do LED azul com camada de fósforo amarelo [51]

Entretanto, devido à resposta lenta do componente de fósforo amarelo, as larguras de banda de modulação são limitadas a poucos MHz. A fim de suprimir tal limitação, um filtro azul no receptor é empregado para filtrar os componentes amarelos (lentos) e, conseqüentemente, a largura de banda de modulação pode atingir algumas dezenas de MHz.

O LED branco chama a atenção para os dispositivos de iluminação, visto que ao compará-la com aquela de lâmpadas fluorescentes e incandescentes, apresenta vantagens como alta eficiência, fabricação ecologicamente correta, flexibilidade de projeto das luminárias, vida útil longa e melhor desempenho espectral.

Os LEDs RGB, consistem em três chips individuais: vermelho (emitindo comprimentos de onda próximos de 625 nm), verdes (emitindo próximo aos 525 nm) e azul (próximos aos 470 nm). Embora o tipo fosforescente permita, principalmente devido ao projeto mais simples, uma instalação mais eficaz em termos econômicos, permite apenas uma largura de banda de modulação reduzida, devido ao tempo de resposta lento do material utilizado. Por outro lado, os LEDs RGB permitem a utilização de três canais de cores diferentes, cada um com uma largura de banda elevada, permitindo ritmos de transmissão superiores [53].

Outro parâmetro influenciado pelo material do LED é a potência óptica de saída em função da corrente de entrada. A dependência linear entre essas grandezas torna a operação do LED mais simples e está intimamente relacionada ao desempenho na modulação de dados. Por outro lado, os materiais semicondutores possuem propriedades dependentes da temperatura e assim é observado uma queda na potência óptica de saída com o aquecimento do dispositivo. Devido à menor corrente operacional e com apropriado projeto de dissipação térmica, os LEDs podem operar em condições normais com potência óptica adequada.

2.3.2 Canal Óptico sem Fio

O modelo de canal pode ser descrito pelo modelo contínuo no tempo para um enlace de comunicação ruidoso, conforme equação 2.3 [54]:

$$y(t) = h(t) * R.x(t) + n(t) \quad (2.3)$$

onde $y(t)$ representa o sinal recebido após ter passado pelo canal óptico sem fio e acrescentado do ruído, $x(t)$ representa o sinal transmitido, R é a responsividade do fotodetector,

$h(t)$ representa a resposta ao impulso do canal e $n(t)$ representa o ruído aditivo branco Gaussiano – *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), ruído este aplicado para sistemas VLC em ambientes fechados.

A fim de modelar corretamente um canal óptico sem fio, alguns pontos precisam ser levados em conta. Dentre eles as eventuais reflexões realizadas no percurso, a localização do enlace, que pode ser interno ou externo, a dependência com o comprimento de onda, além da energia emitida na transmissão. No que diz respeito ao transmissor, que pode ter sua energia emitida quantificada com dependência proporcional à luz gerada pela fonte, pode ser modelado de acordo com o tipo de fonte, sendo três casos:

- Propagação de Sinal por Fonte Lambertiana

Na óptica, a lei do cosseno de Lambert afirma que a intensidade luminosa emitida por uma fonte ideal observada em uma superfície com reflexão difusa ideal, é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo θ entre a direção de incidência da luz e a normal da superfície [55]. Logo, a superfície lambertiana tem a mesma intensidade luminosa quando vista de qualquer ângulo, sendo a intensidade luminosa igual ao fluxo luminoso por ângulo sólido. Aqui, a luz pode ser refletida em todas as direções e depende da cor do objeto, da posição da luz e da orientação (vetor normal) da face onde está o ponto. Essa lei é muito utilizada nos enlaces VLC, visto que os objetos podem ser tratados como superfícies lambertianas. Esse nome foi dado em homenagem a Johann Heinrich Lambert, do seu trabalho *Photometria*, publicado em 1760, citado em [55].

- Por Reflexão de Fonte Especular

A reflexão especular é a reflexão por uma superfície plana e lisa, similar a um espelho plano em que a luz incide em uma única direção e é refletida em uma única direção de saída. Raios paralelos que incidirem sobre uma superfície plana e lisa, como mostra a figura 2.7, continuarão paralelos após a reflexão [56]. Esta abordagem não é adequada para VLC visto que os objetos com superfície semelhante a um espelho são pouco comuns.

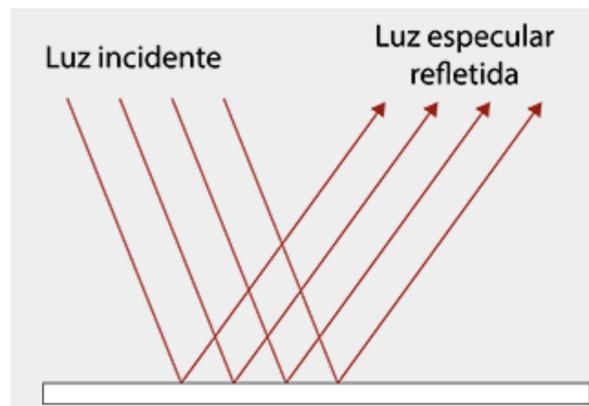


Figura 2.7: Exemplo de reflexão por fonte especular [57]

- Propagação de Fonte Mista

Já a propagação por fonte mista é uma combinação dos dois tipos visto anteriormente, ou seja, quando um raio de luz atinge um objeto, a reflexão tem comportamento especular, mas também lambertiano [53].

As características do canal óptico sem fio podem variar significativamente dependendo do cenário ao qual se está lidando. Por conseguinte, os projetos mais comuns de enlaces ópticos sem fio serão abordados, segundo dois critérios: primeiro, o grau de direcionalidade do transmissor (Tx) e receptor (Rx); segundo, a existência de um caminho de visada direta – *Line of Sight* (LoS) ou sem visada direta – *Non Line of Sight* (NLoS) entre Tx e Rx [54]. A figura 2.8 ilustra os cenários mencionados onde nas figuras 2.8a e 2.8c mostram um caso com LoS, havendo um caminho direto sem obstrução e alinhamento espacial entre transmissor e receptor, sendo a única perda considerada a gerada pelo meio. Um componente da propagação da luz é referido como a porção da luz irradiada pelo transmissor que chega dentro do campo de visão do receptor. Esse cenário maximiza a eficiência energética e minimiza a distorção por trajetos múltiplos. Além disso, é normalmente empregado em cenários de comunicação estática, onde as posições do transmissor e receptor permanecem fixas. Já as figuras 2.8b e 2.8d ilustram casos NLoS, que são caracterizados por serem canais onde existem obstáculos entre transmissor e receptor. Devido a presença desses tipos de bloqueios físicos, que interferem na comunicação, torna-se necessário a existência de reflexões para que haja uma comunicação robusta e confiável. No caso de uma única reflexão, o canal é considerado diretivo, e no caso de mais do que uma, considera-se que o canal é difuso, pois as reflexões chegam com diferentes atrasos no receptor [53].

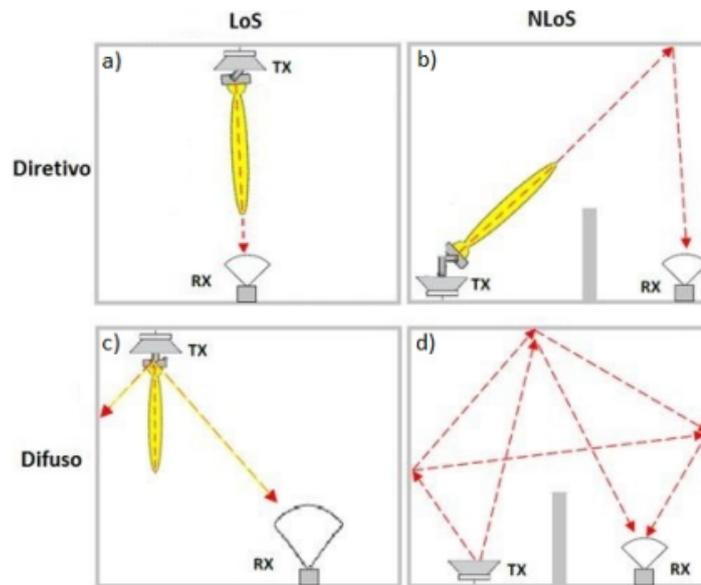


Figura 2.8: Cenários sistema do VLC *indoor* [53]

2.3.3 Receptor

O projeto completo de um receptor VLC é composto dos blocos inclusos no diagrama da figura 2.9. O enlace OWC está sujeito às interferências oriundas de fontes externas, (outros LEDs ou luz solar, por exemplo), assim torna-se necessário, em algumas aplicações, a inserção de elementos extras, como o concentrador e filtro óptico, utilizados para melhorar a captura do feixe luminoso e reduzir ruídos, respectivamente, otimizando a conversão da potência óptica em corrente elétrica no fotodetector (PD). Com isso o desempenho do sistema é significativamente aprimorado. Já amplificadores e processadores de dados são usados para aumentar o sinal elétrico e diminuir ruídos que afetem o sinal [40].

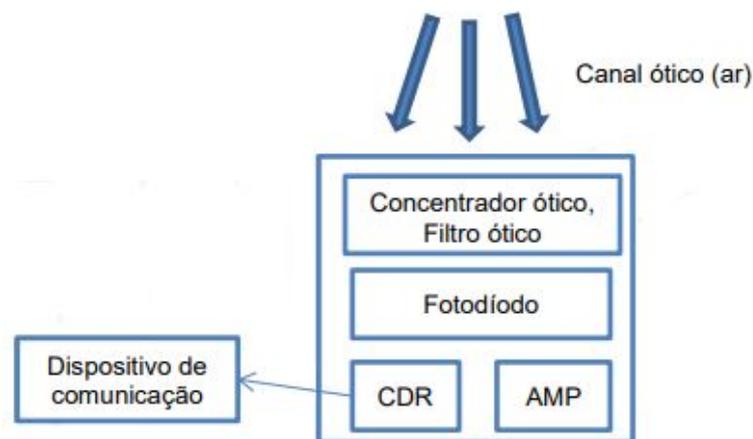


Figura 2.9: Receptor VLC/LiFi. Adaptado de [52]

Com relação ao fotodiodo, sua principal função é transformar a potência óptica recebida em corrente elétrica, sendo que a corrente gerada pelo fotodetector é proporcional ao quadrado do campo óptico incidente. O fator de conversão da potência óptica recebida em corrente elétrica é conhecido como responsividade. A eletrônica associada deve converter corrente em tensão para amplificar e comparar com o nível de tensão esperado para cada símbolo. É recomendado que o receptor esteja na linha de visada do transmissor, para que haja uma comunicação mais confiável.

Durante a transmissão da luz, haverá perda de intensidade do sinal devido ao espalhamento e absorção da luz pela atmosfera, além da interferência de outras fontes luminosas ou a própria luz solar, que contribuirão para o acréscimo de ruído.

Conforme mencionado, um PD detecta a fonte de luz e converte as mudanças em sua intensidade em um sinal elétrico. Por exemplo, usando modulação OOK quando o LED acende, o PD registra assim um binário 1, caso contrário, registra um binário 0. Os dados recebidos são amplificados, processados e encaminhados para o usuário. Existem vários tipos de circuitos de amplificação de sinal, entre eles os de alta impedância e amplificador de transimpedância, sendo a implementação do primeiro realizada com um resistor em série conectado ao ânodo do fotodiodo. Já o amplificador de transimpedância fornece corrente para tensão usando resistor de *feedback shunt* em torno de um amplificador inversor. A figura 2.10 ilustra, em diagrama de blocos, um segundo exemplo de arquitetura para um receptor.



Figura 2.10: Diagrama de blocos do receptor VLC/LiFi
Fonte: Autoria Própria

Os fotodiodos com boa responsividade à luz visível são os PIN de silício (Si PIN-PD) e fotodiodo de avalanche de silício – Si *Avalanche Photodiode* (APD). Eles utilizam os mesmos materiais e têm a mesma faixa de resposta espectral, porém podem ser diferenciados por algumas características [58]. Algumas diferenças estão listadas a seguir:

- Si PIN

Alta capacidade e velocidade de resposta;

Banda de frequência ampla;

Baixa tensão de operação;

Circuito de polarização simples;

Ruído determinado pelo fator térmico na eletrônica associada.

- Si ADP

Fotodetector com ganho interno (multiplicação);

Sensibilidade superior do que a dos fotodiodos PIN;

Amplificação do ruído;

Coefficiente de ganho afetado pela temperatura;

Ruído pode ser condicionado àquele balístico.

A maioria dos sistemas faz uso dos fotodiodos PIN, visto sua menor restrição quanto às aplicações, porém em casos de condições de perda excessiva do sinal ou transmissões de longas distâncias, o ADP é recomendado [59].

2.3.4 Relação Sinal Ruído

De forma a determinar a eficiência do enlace, um parâmetro que merece ser analisado é a relação sinal ruído – *Signal to Noise Ratio* (SNR), que determina a relação entre o sinal e o ruído. Quanto maior for esse parâmetro, melhor será a qualidade do enlace. Matematicamente, a SNR no canal ótico sem fio pode ser representado pela equação 2.4 [60], onde seu valor é proporcional ao quadrado da potência ótica recebida.

$$SNR = \frac{(P_r R)^2}{\sigma_{\text{total}}^2} \quad (2.4)$$

onde P_r representa a potência ótica média recebida, R é a responsividade do fotodiodo, σ^2 total é a variância total do ruído dada pela equação 2.5 [60]:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{térmico}}^2 + \sigma_{\text{balístico}}^2 \quad (2.5)$$

O ruído balístico é devido ao sinal incidente e à luz ambiente. Já o ruído térmico, gerado no circuito de fotodetecção.

2.4 Técnicas de Modulação

Algumas das técnicas de modulação já utilizadas nas comunicações móveis podem ser aplicadas no caso do LiFi, necessitando apenas de modificações para que sejam levadas em conta as características intrínsecas do LED. O projeto de um modulador LiFi deve incluir, por exemplo: controle de nível de iluminação e suporte ao escurecimento, pois é desejada transmissão de dados de alta qualidade mesmo com o LED apagado (ou em nível de luminosidade extremamente baixo, imperceptível aos olhos humanos) [61]. Sendo assim, são aplicadas mais comumente as técnicas de modulação OOK, VPPM e OFDM. Além dessas, uma modulação específica foi criada exclusivamente para atender os requisitos das comunicações VLC, denominada, *Color Shift Keying* (CSK) [31]. Cada uma dessas técnicas se mostra mais adequada para um cenário específico, devendo ser avaliado o volume de dados a ser transportado e o *trade-off* envolvido.

- OOK

Essa técnica é considerada a mais conhecida e de mais fácil implementação, fornecendo um bom equilíbrio entre complexidade e desempenho [31]. Seu princípio de funcionamento consiste no deslocamento da amplitude, onde na presença da portadora (estado do LED ligado) a representação é dada pelo bit “1” e, na ausência de portadora (estado de LED desligado), a representação ocorre com o bit “0”. A figura 2.11 representa o processo descrito com uso da codificação Manchester, um código de linha utilizado em telecomunicações para codificação de dados binários, onde cada bit é transmitido em um tempo fixo.

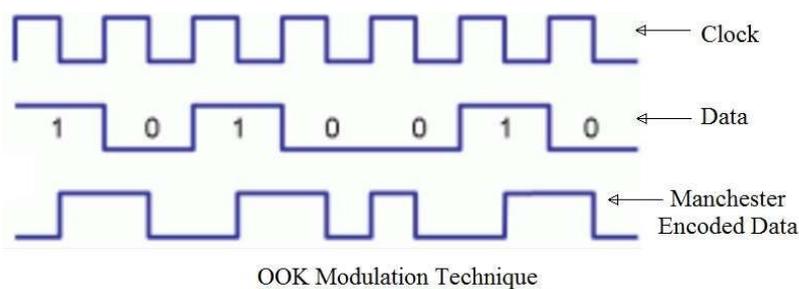


Figura 2.11: Modulação OOK [62]

O processo de acender e apagar do LED precisa ser imperceptível aos olhos humanos, sendo assim, alguns ajustes precisam ser realizados nessa modulação para atender a este fato. Para exemplificar, pode-se imaginar que a sequência 100001 seja enviada. Nesse caso, o LED permaneceria desligado por um longo período de tempo, indo contra ao princípio da não percepção humana. Nesse contexto, algumas medidas foram propostas na norma IEEE 802.15.7: redefinição dos níveis de ON/OFF e inserção de períodos de compensação [61]. Na primeira delas, considerando a sequência do exemplo, o bit “0” passaria a representar outra intensidade luminosa. Essa técnica é capaz de manter a mesma taxa de dados, porém o alcance diminuiria em níveis baixos de escurecimento [31]. Já a segunda técnica consiste na inserção de períodos de compensação na onda modulada, dependendo do nível de escurecimento desejado. Porém, considerando que o máximo de taxa de dados é alcançado quando têm-se números iguais, na média, de “0” e “1”, consequentemente ao modificar a intensidade do LED, a taxa de dados diminuiria.

O suporte ao escurecimento é atendido com as modificações propostas pelo IEEE, visto que os bits de informação continuariam sendo enviados mesmo que o LED estivesse visivelmente apagado, já que, conforme ilustra a figura 2.12, o bit “1”, neste exemplo, representa não somente um brilho de 100%, mas também outros níveis de intensidade luminosa, com um mínimo de 25%.

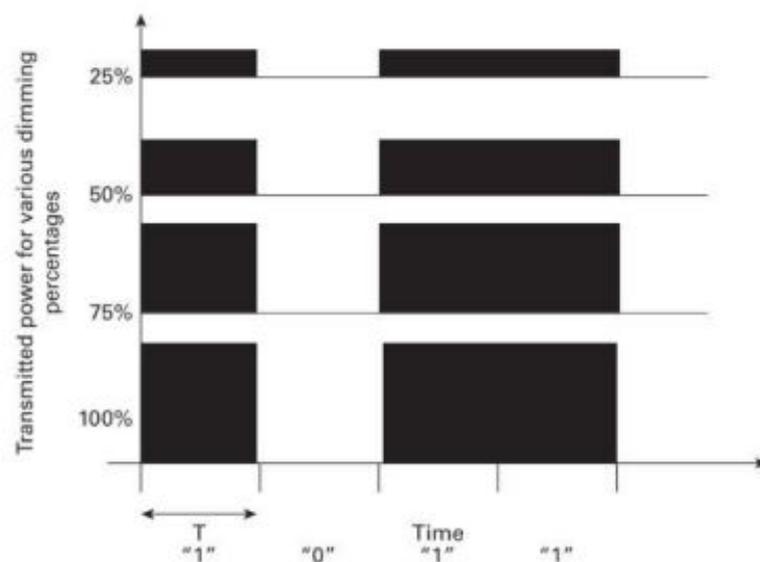


Figura 2.12: Suporte ao escurecimento OOK [63]

- VPPM

A modulação VPPM é a combinação das técnicas *Pulse Position Modulation* (PPM) e *Pulse Width Modulation* (PWM) [61]. A PPM consiste em dividir a duração do símbolo em intervalos de mesma duração, onde um pulso é transmitido em um desses intervalos, sendo que sua posição determina seu valor, ou seja, o “0” é representado por um pulso positivo no início do período seguido de pulso negativo e o “1” é representado por um pulso negativo no início do período seguido de um pulso positivo. Já a PWM permite que o escurecimento seja ajustado de acordo com a largura do pulso. Na figura 2.13 é ilustrada a relação diretamente proporcional entre largura do pulso e nível de intensidade luminosa. Então, de maneira similar ao OOK, os bits “1” e “0” podem representar quaisquer outros níveis de intensidade, não apenas 100% e 0%.

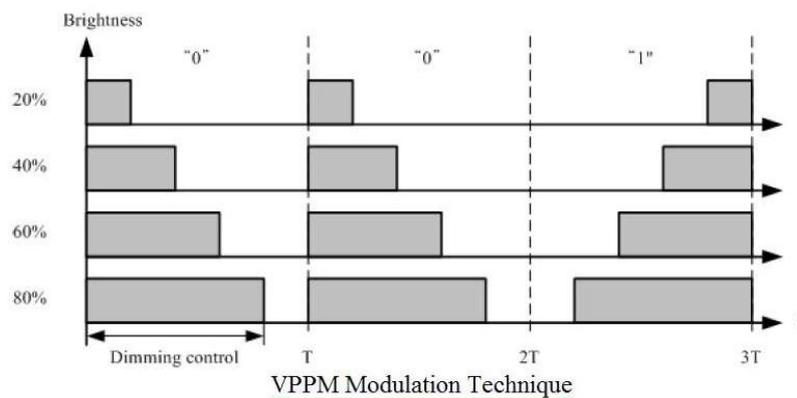


Figura 2.13: Modulação VPPM [62]

- OFDM

Aqui a informação a ser transmitida é dividida em subportadoras ortogonais entre si, conforme ilustrado na figura 2.14, onde cada uma delas pode aplicar técnicas de modulação diferentes, sendo PSK e *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) algumas delas. Por se tratar de uma técnica com múltiplas portadoras, a OFDM quando comparada às técnicas mencionadas anteriormente, oferece suporte à taxas de transmissão mais elevadas.

O sinal oriundo da modulação OFDM é por natureza bipolar e complexo. Diante disto, para que seja possível aplicá-lo ao universo VLC, onde há presença de LEDs, são necessárias algumas adaptações para tornar esse sinal positivo e real. Diversas estratégias podem ser adotadas, sendo algumas delas a aplicação de uma polarização positiva de corrente contínua para geração de sinal unipolar, chamado *DC biased*

optical - OFDM (DCO-OFDM); como também a imposição de simetria Hermitiana para uso apenas das subportadoras ímpares, *Asymmetrically Clipped Optical - OFDM* (ACO-OFDM), e as pares zeradas para obtenção de sinal real [31].

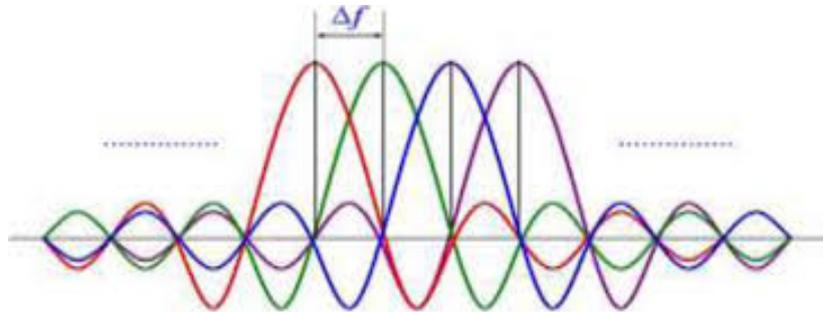


Figura 2.14: Modulação OFDM [64]

No que diz respeito ao suporte ao escurecimento, foi proposto o *Reverse Polarization Optical - OFDM* (RPO-OFDM), onde ocorre uma combinação com a técnica PWM para alteração da largura do pulso [31].

- CSK

Esta técnica foi desenvolvida exclusivamente para atender as propriedades do VLC, sendo necessário neste caso, o uso de LED RGB como emissor. Seu princípio de funcionamento e sua implementação são mais complexos se comparado às técnicas anteriores, porém com o uso de mais LEDs, as possibilidades para modulação e detecção do sinal são ampliadas [31].

Aqui, os bits de entrada são mapeados segundo um diagrama de cromaticidade, denominado CIE 1931. Este diagrama foi dividido em sete bandas, onde todas as cores percebidas aos olhos humanos podem ser mapeadas segundo um par de coordenadas (x,y). A figura 2.15 ilustra o diagrama mencionado.

Paralelamente, foi desenvolvido um mapeamento mostrado na tabela 2.2 que possui relação direta com a figura 2.15, onde os símbolos de entrada possuem correlação com um par de coordenadas (x,y).

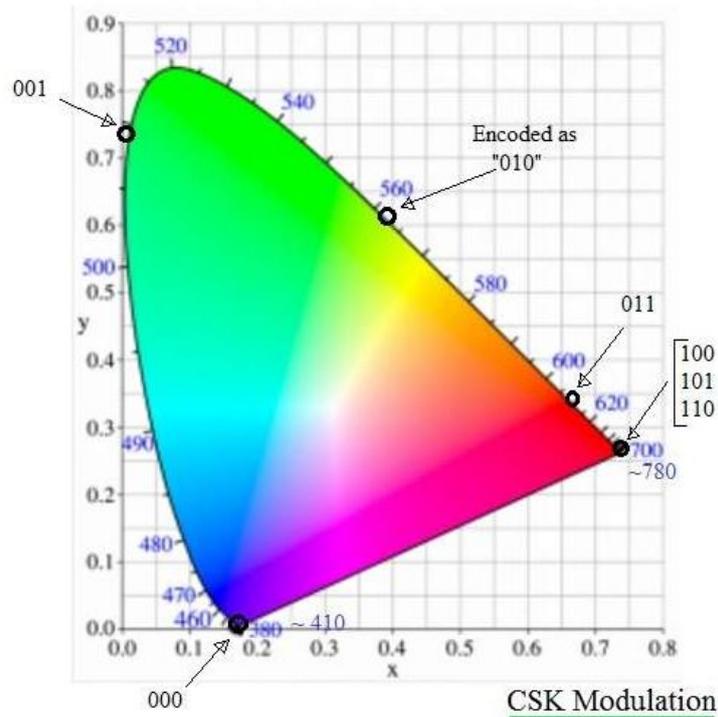


Figura 2.15: Modulação CSK [35]

Tabela 2.2: Tabela modulação CSK [35]

Banda (nm)	Código	Centro	(x,y)
380-478	000	429	0.169, 0.007
478-540	001	509	0.011, 0.733
540-588	010	564	0.402, 0.597
588-633	011	611	0.669, 0.331
633-679	100	656	0.729, 0.271
679-726	101	703	0.734, 0.265
726-780	110	753	0.734, 0.265

O funcionamento ocorre conforme ilustrado nas figuras 2.16 e 2.17, onde a informação de entrada é codificada em bits. Em seguida, esses bits são agrupados em símbolos e convertidos nas coordenadas (x,y), marcando os pontos R, G e B no diagrama de cromaticidade com o auxílio da tabela 2.2, onde $G(x_j, y_j), R(x_i, y_i), B(x_k, y_k)$ indicam uma fonte de luz do LED. Nesse momento, já se sabe as intensidades para as quais os LEDs precisam ser ajustados. Logo, os níveis de corrente do LED são determinados para ajustar a intensidade luminosa desejada, mantendo uma cor (nível de iluminação) percebida média constante.

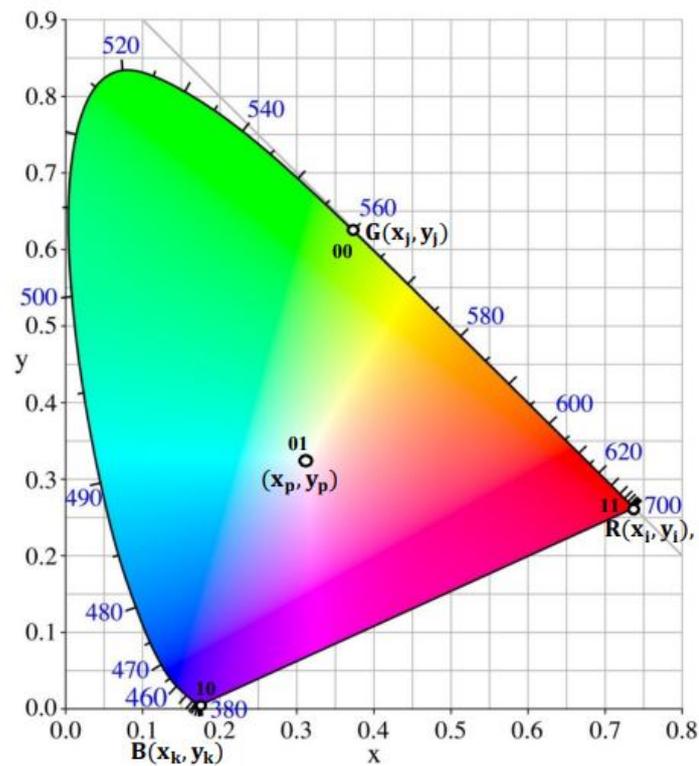


Figura 2.16: Constelação CSK [35]

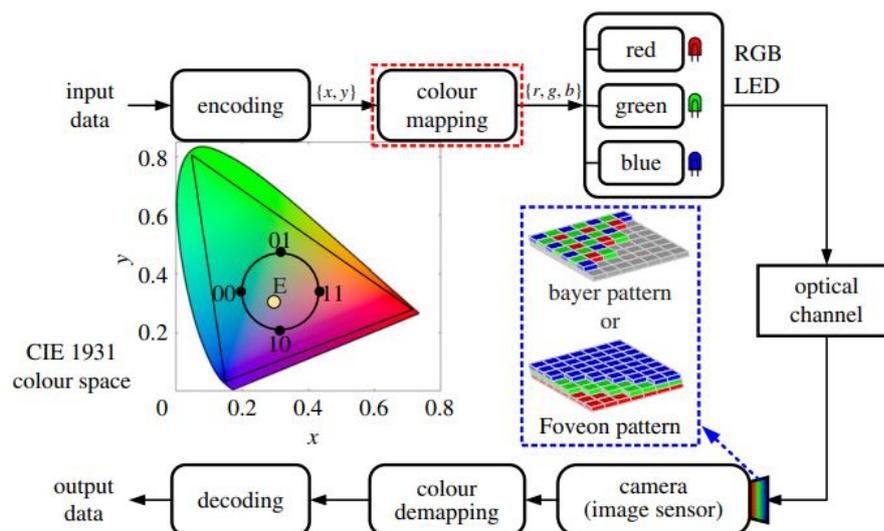


Figura 2.17: Arquitetura CSK [65]

No lado do receptor, ocorre o processo inverso, onde será realizada a conversão óptica-elétrica e, as intensidades RGB poderão ser representadas novamente por um par (x_p, y_p) e conseqüentemente, um código binário. Essas últimas coordenadas são determinadas pelas equações 2.6, 2.7 e 2.8, citadas por [35]:

$$x_p = P_i \cdot x_i + P_j \cdot x_j + P_k \cdot x_k \quad (2.6)$$

$$y_p = P_i \cdot y_i + P_j \cdot y_j + P_k \cdot y_k \quad (2.7)$$

$$P_i + P_j + P_k = 1 \quad (2.8)$$

onde P_i, P_j e P_k é o valor da potência (intensidade) de cada luz no LED RGB.

2.5 Acesso Multiusuário

Conforme mencionado anteriormente, o LiFi possui a característica de suportar multiusuários e suas respectivas mobilidades dentro da região de cobertura. Isso é possível devido à grande disponibilidade de lâmpadas de LED em ambientes *indoor* e *outdoor*, onde cada LED possui 5,7 ou 11 diodos, sendo cada um deles capaz de prover uma única conexão, fornecendo uma grande densidade de enlaces. São estimados em torno 14 bilhões de lâmpadas públicas, cada uma com seus diodos, podendo fornecer no total, centenas de bilhões de conexões [66].

Algumas técnicas de acesso multiusuário utilizados na comunicação RF podem ser adaptadas para OWC desde que respeitadas as devidas modificações necessárias para que sejam atendidos os requisitos da natureza da modulação do sinal. Como exemplo, pode-se citar a *Time Division Multiple Access* (TDMA), *Non Orthogonal Multiple Access* (NOMA), *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), *Wavelength Division Multiple Access* (WDMA). Ao comparar a eficiência das técnicas mencionadas, o TDMA não é uma ferramenta muito considerada em experimentos visto sua semelhança com o OFDMA e por não apresentar uso eficiente da largura de banda de modulação do LED. O WDMA é um esquema que pode reduzir a complexidade do processamento, porém requer um *hardware* mais complexo. Aqui o múltiplo acesso é dado pela multiplexação por divisão do comprimento de onda, onde cada AP exigiria vários LEDs e fotodetectores de banda estreita para a correta captação do comprimento de onda de interesse. Por fim, a NOMA, em suma, baseia-se na emissão da informação por um LED onde esta pode ser consirada como uma soma dos sinais de interesse dos usuários em questão. Através de alguns critérios de partição de potência e conhecimento prévio das informações de estado do canal - *Channel State Information* (CSI) [67], cada usuário consegue recuperar sua própria mensagem.

2.6 Aplicações

O grande potencial da tecnologia LiFi é a versatilidade no quesito aplicações. A seguir descrevem-se algumas delas:

1. Sistemas de Trânsito

Essa implementação seria possível utilizando os faróis e lanternas de LED dos automóveis como emissores e receptores, bem como aqueles em semáforos e *outdoors*. Com isso, essa comunicação seria viabilizada com o intuito de mitigar a ocorrência de acidentes de trânsito e fornecer informação aos motoristas.

2. Hospitais

Em ambientes hospitalares não é desejado o uso de ondas de rádio devido à interferência em alguns instrumentos, podendo gerar leituras errôneas. O LiFi, fazendo uso de ondas luminosas, seria grande aliado para a transmissão de dados nesses locais. Segundo [66], o hospital de Perpignan, na França, implantou o LiFi no seu prédio e teve seus níveis de radiação reduzidos de aproximadamente 6000 mV/m (onde costumava-se usar 700 roteadores), para 250 mV/m, nível abaixo daquele recomendado pela *World Health Organization* (WHO) que é 620 mV/m. O custo médio de implementação do LiFi em um hospital é na ordem de 300 mil dólares, investimento esse que se paga com a economia de energia em 3 a 5 anos.

3. Aeronaves

Tal como nos hospitais, a interferência eletromagnética pode prejudicar sistemas de controle e navegação em aeronaves. Dessa forma, as luminárias presentes nas cabines poderiam auxiliar neste caso. Em 2019 a Air France operou o primeiro voo do mundo com conexão LiFi. O Light Fidelity utilizado pela Air France foi desenvolvido pela Latécoère, uma das primeiras empresas de tecnologia do mundo a oferecer esse recurso. O sistema foi instalado em 12 assentos da aeronaves no voo de teste. A empresa não citou números, apenas afirmou que os usuários se conectaram em velocidades até 200 vezes superiores as do WiFi e com menor latência [68].

4. Comunicação Aquática

Frequências utilizadas em aplicações comuns de rádio têm comprimentos de onda e taxas limitados devido à alta atenuação da água, principalmente naquelas salgadas. As frequências ópticas são muito superiores às de radiofrequência, oferecendo taxas

que chegam a Gbps. Entretanto, os sinais ópticos são rapidamente absorvidos pela água, além de se espalharem mais facilmente devido à partículas suspensas e *planktons*. Diferentes frequências apresentam diferentes comportamentos em ambientes aquáticos. Logo, o ambiente e a aplicação tornam-se fatores determinantes para a escolha do comprimento de onda do sistema; por exemplo, na região próxima do vermelho a absorção é maior, enquanto que na parte próxima a violeta, é menor.

De maneira geral, para que um sistema VLC aquático obtenha sucesso no funcionamento, uma série de fatores devem ser rigorosamente observados, como: absorção, espalhamento, alinhamento e turbulência [28].

5. Agricultura

Existe a viabilidade dos AP's LiFi terem a capacidade de perceber as variações de cor na reflexão da luz em plantas e, assim, monitorar pragas e doenças em plantações.

6. Fins industriais

Conforme desenvolvido em [69], os sistemas de comunicação via luz visível se mostram interessantes no cenário da manufatura industrial, onde há muita massa metálica móvel induzindo interferências.

Foram mencionadas algumas aplicações dentre as múltiplas possibilidades. De maneira geral, cada ponto de iluminação é um potencial equipamento transmissor Li-Fi, sua aplicação estende-se para cenários onde as radiofrequências têm desempenho comprometido, menor disseminação da informação ou maior custo de implementação.

2.7 Vantagens

A utilização de técnicas VLC oferece diversas vantagens onde, aliado ao fato de ser possível prover iluminação de maneira simultânea com a comunicação, obtém-se redução no consumo de energia elétrica e redução na emissão de carbono. Pode-se ainda mencionar:

1. Segurança

Devido ao fato de a luz não atravessar paredes, diferentemente das ondas de rádio, existe garantia de que a informação permanecerá confinada no ambiente no qual o LED emissor está instalado. Dessa maneira, a interceptação dos dados só será possível por dispositivos presentes no mesmo ambiente.

2. *Attocell*

O uso de *attocells* é de grande importância ao LiFi, fornecendo grande contribuição no aumento da performance desses sistemas. Sua principal vantagem é possibilitar um sistema de rede sem fio completo com acesso multiusuário, além de permitir suas respectivas mobilidades, bem o reuso de frequências [31].

3. Capacidade

Com a utilização do OWC o sinal pode ocupar comprimentos de onda livres de licenciamento variando entre 380 nm até 750 nm para o caso do espectro de luz visível e entre 750 nm até 2.5 um, no caso do infravermelho próximo. Em outras palavras, a banda total disponível é de aproximadamente 670 THz, um fator 10.000 vezes superior se comparado ao espectro de RF. Logo, a taxa de transmissão de dados pode superar facilmente a do Wi-Fi. Além disso, a *US Federal Communications Commission* tem alertado para uma potencial crise no espectro da Wi-Fi, que está próximo de atingir o seu limite. De acordo com o teorema de Shannon-Hartley, a taxa de dados máxima é proporcional à banda disponível, conforme equação a 2.9.

$$R_{\text{máx}} = B * \log_2(1 + SNR) \quad (2.9)$$

onde $R_{\text{máx}}$ é a capacidade do canal em bits por segundo (um limitante superior teórico da máxima taxa de transferência possível de ser atingida), B é a largura de banda do canal e SNR é a relação sinal ruído.

4. Eficiência

LEDs são dispositivos do ponto de vista energético muito eficientes. Com o seu uso em larga escala, diminuiriam consideravelmente o consumo energético e promoveriam uma grande redução na emissão de carbono, além de poderem desempenhar de maneira otimizada as funções de iluminação e comunicação simultaneamente. Segundo [66], um roteador Wi-Fi gasta o equivalente a 3 lâmpadas de 60 W ligadas 24 horas por dia, logo com o LED oferecendo ambos os serviços e com o gerenciamento adequado, seria possível poupar 80% de energia.

5. Disponibilidade

Essa vantagem está atrelada ao fato de existir farta disponibilidade de LED nos dias atuais. Logo, sem grande impacto na infraestrutura, haveriam diversos potenciais emissores já instalados, sejam em carros, hospitais, ruas, residências etc.

6. Sem desvanescimento

No caso da transmissão de sinais na faixa de rádio um dos problemas enfrentados é o desvanescimento do canal causado pela propagação multipercurso, devido estarem sujeitos à grandes flutuações na magnitude e fase do sinal recebido. Por outro lado, no caso óptico, isso não se torna um limitante pois as áreas dos fotodetectores são da ordem de muitos comprimentos de onda (levando à diversidade espacial), mitigando assim o desvanescimento [70] [58].

Capítulo 3

Métodos Empregados

Conforme mencionado nos objetivos do capítulo 1, foram realizados diversos experimentos de transmissão VLC comparando resultados e performances para diferentes cenários. Nesse contexto, este capítulo expõe a metodologia empregada de quatro montagens distintas, onde foram variados os seguintes parâmetros: tipo de LED para transmissão, distância entre transmissor e receptor (intensidade luminosa), técnica de modulação empregada e o dispositivo de recepção, ora sendo um fotodetector convencional, ora contando com dispositivo portátil (*tablet*). Os experimentos permitiram obter alguns parâmetros importantes como a BER, taxa de transmissão e o perfil de intensidade luminosa. Além disso, o protótipo desenvolvido pode ser aplicado à instrução de propriedades básicas de transmissão, estudo da distribuição do sinal em ambientes com obstáculos, medição de efeitos de interferência de fundo e por fim, cálculo da região de cobertura da *attocell*. Para o desenvolvimento do protótipo, optou-se pelo uso da ferramenta Arduino devido a suas características de fácil interfaceamento para o uso com diferentes sensores, facilidade e flexibilidade na implementação, ampla disponibilidade de componentes e custo acessível. Além disso, conta com extensa comunidade de desenvolvedores com diversos tutoriais e fóruns, que podem ser encontrados em [71], facilitando a utilização. Cada uma das montagens realizadas é detalhada nas próximas seções.

3.1 Experimentos recorrendo ao LED branco

Nas montagens a seguir, os experimentos se basearam na intensidade luminosa como método de modulação e demodulação do sinal. O primeiro teste utilizou o sensor de luminosidade APDS-9960 acoplado ao Arduino executando o papel de receptor. Já no segundo, a recepção foi realizada recorrendo à capacidade da câmera de um *tablet* con-

vencional. A metodologia empregada em ambos os experimentos foi bastante similar e é melhor detalhada nas subsecções subsequentes.

3.1.1 LED branco de alto brilho para APDS-9960

3.1.1.1 Circuito Transmissor

Para elaboração do protótipo transmissor, foi escolhido um LED branco de alto brilho em série com um resistor, onde este último limita a corrente de excitação do LED. As especificações simplificadas dos componentes utilizados seguem conforme abaixo:

- LED branco alto brilho 5 mm
- Corrente máxima de 20 mA
- Tensão de alimentação na faixa 3 – 3,3 V
- Ângulo de abertura 25°
- Resistor de 220 Ω 15 MHz

Devido à tensão máxima de alimentação suportada e corrente máxima alcançada pelo LED, foi escolhido o resistor no valor de 220 Ω ; de acordo com a Lei de Ohm nas condições impostas, tem-se uma corrente de 15 mA (dentro dos limites aceitos pelo *hardware*). Além disso, vale ressaltar que o Arduino possui como opção de alimentação de seus componentes, apenas pinos para polarização em 3,3 V e 5 V. A figura 3.1 mostra a foto de um módulo (Arduino Uno) utilizado.

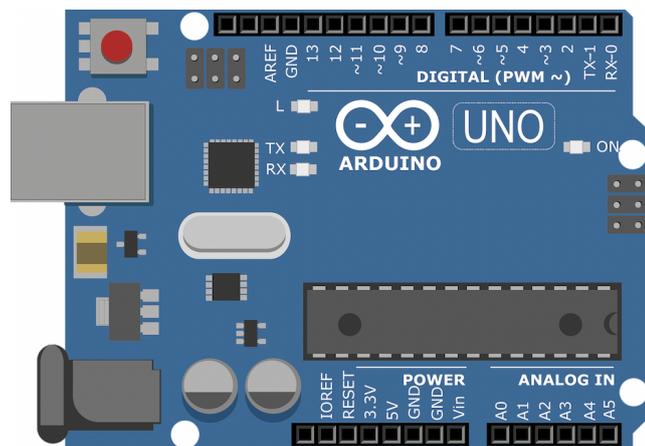


Figura 3.1: Módulo Arduino Uno [71]

O diagrama esquemático do circuito opto-eletrônico do transmissor é ilustrado na figura 3.2, onde a fonte de alimentação é oriunda de um pino de saída digital do módulo (pino 11), que foi conectado ao terminal positivo do LED. Já o resistor possui uma de suas extremidades ligada ao terminal negativo do LED e a outra, ao pino terra – *ground* (GND) do Arduino.

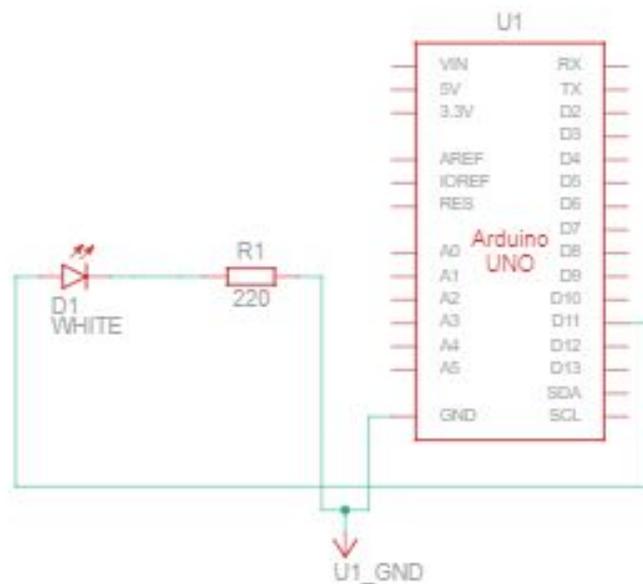


Figura 3.2: Circuito opto-eletrônico do transmissor OOK Fonte: Autoria Própria

Com o circuito acima a emissão do LED é chaveada pela presença de um bit “1” no pino de saída digital e o fluxo de dados binários nesse canal é convertido em um sinal óptico modulado.

3.1.1.2 Circuito Receptor

Para desempenhar o papel do fotodetector foi escolhido o sensor de luminosidade APDS-9960, que também pode funcionar como sensor de gestos, além de ser apto a operar na região do infravermelho, conforme mostra o ANEXO A. O sensor possui as características listadas a seguir e sua resposta espectral é mostrada na figura 3.3:

- Tensão de operação 3,3 V
- Distância de operação entre 10 cm e 20 cm
- Sensibilidade à luz ambiente e às cores RGB

- Tempo de resposta de 20 ns

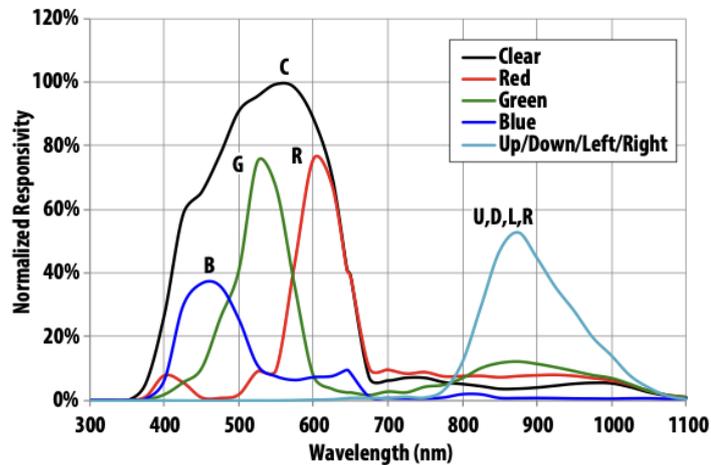


Figura 3.3: Resposta do APDS-9960 ANEXO A

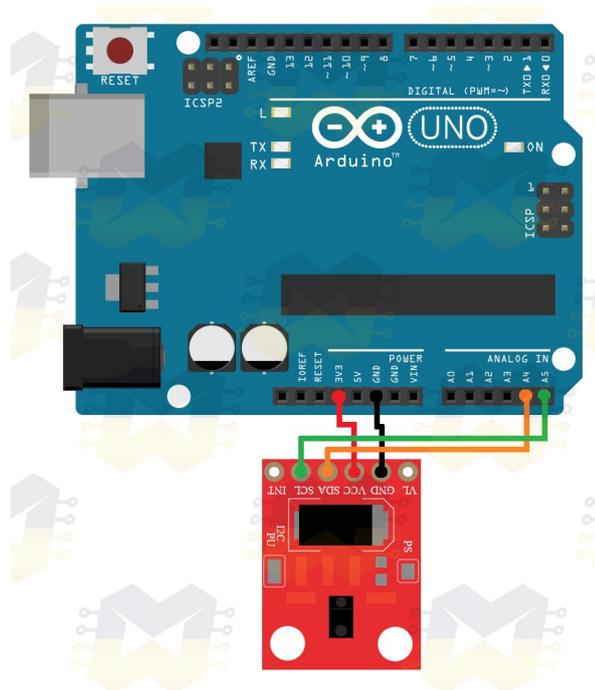


Figura 3.4: Montagem do receptor recorrendo ao APDS-9960 [72]

As características mencionadas acima credenciam aquele dispositivo a integrar um circuito cujo objetivo é simular uma transmissão LiFi. Embora as taxas atingidas pela tecnologia concentrem-se na ordem de Gbps, essas taxas não podem ser alcançadas devido ao *clock* de 16 MHz do Arduino. A boa resposta espectral na região do visível, a capacidade de diferenciar as cores RGB e ter baixo tempo de resposta, suportam a escolha do dispositivo.

O sensor foi ligado conforme recomendação do fabricante, ilustrada na figura 3.4, onde as portas analógicas A4 e A5 foram utilizadas para realizar as leituras dos valores de intensidade luminosa (lux). As portas de 3,3 V e *ground* servem para alimentação e aterramento, respectivamente.

3.1.1.3 Metodologia Empregada

A escolha da modulação OOK neste trabalho, com o uso do transmissor e receptor apresentados, define o processo de envio e recuperação de mensagens. O diagrama de blocos ilustrado na figura 3.5 mostra o diagrama esquemático simplificado do sistema.

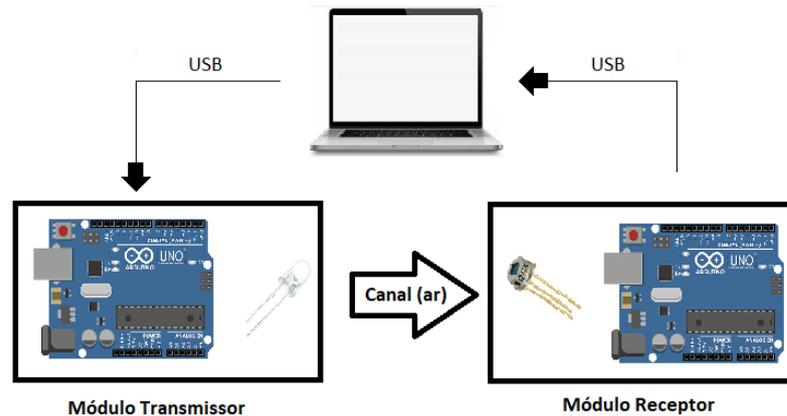


Figura 3.5: Esquemático simplificado montagem usando o LED branco e APDS-9960
Fonte: Autoria Própria

Primeiramente, foi realizada a instalação dos *softwares* Arduino e Matlab no computador, bem como a instalação de alguns pacotes auxiliares utilizados. Em seguida, uma sequência binária pseudo-aleatória (visto que não se tem controle sobre a semente que gerará os demais bits) foi gerada com auxílio do Arduino. Para o experimento proposto, teve uma dimensão de 300 bits. Em função da dimensão limitada do *buffer* no Arduino, cuja capacidade máxima é 64 bytes ou seja, 512 bits; a dimensão da sequência sugerida para a simulação tornou o processo de envio mais simples sem a necessidade de realizar sucessivas transmissões e limpezas de *buffer*. Com a sequência binária, o microcontrolador é programado de modo a controlar a corrente que chegará ao LED; mais precisamente, quando o bit enviado for “1”, o circuito deixa passar corrente e o LED acende; caso contrário, quando o bit “0” for enviado, o LED apaga e não existe corrente elétrica fluindo no dispositivo. Na extremidade receptora, ocorre o processo inverso. Quando o fotodetector experimenta presença da intensidade luminosa (variação da corrente) e mediante um limiar pré-estabelecido via código, o sensor registra o binário “1” caso o nível de in-

tensidade luminosa exceda o limiar ou o bit “0” caso não exceda. Existem duas maneiras de se escolher esse valor limiar, denominado na literatura em língua inglesa de *threshold*: via média dos valores coletados ou via observações da iluminação ambiental. No primeiro caso, todos os valores registrados pelo fotodetector são agrupados (em um vetor ou em um arquivo) para ser possível tirar uma média aritmética do conjunto de dados, esse valor de média, torna-se o limiar. No segundo caso, através de observações ambientais, são levados em conta possíveis interferências oriundas de fontes externas, tais como: iluminação solar, eventuais lâmpadas que possam estar acesas no momento das medições etc. Logo, é possível fazer uma calibração adequada do nível do limiar de maneira a minimizar a interferência do ruído de fundo. Nesse caso, quando alguns parâmetros da transmissão forem alterados (a exemplo da distância entre transmissor e receptor, ou seja, dos níveis de intensidade luminosa), o limiar será diretamente impactado, necessitando ser ajustado para maior ou para menor, a depender do caso.

Finalizado o processo de envio e recebimento da mensagem, o processamento do sinal se dá via uso do Matlab. A escolha pelo Matlab se deu devido à facilidade de integração com o Arduino, existindo diversos pacotes que permitem o interfaceamento dos programas, podendo comandar o microcontrolador diretamente pelo *software*. Dessa maneira, são necessários dois programas Matlab para dar suporte ao transmissor e ao receptor, respectivamente. Cada um deles importa as sequências binárias de interesse (enviada e recebida) para posterior comparação e cálculo da BER. Os códigos inerentes ao processo descrito estão listados nos APÊNDICES A, B, E e G, ao final deste documento.

3.1.2 LED branco de alto brilho para *Tablet*

Neste experimento, foi mantido o esquemático do circuito transmissor, porém a recepção é realizada com um aparelho *tablet* convencional. O dispositivo escolhido foi o *tablet* Samsung Galaxy Tab S6 Lite, com uma resolução de 1080 pixels a 30 fps nas câmeras dianteira e traseira. As demais especificações podem ser encontradas em [73]. Essa troca de dispositivo receptor foi relevante visto a necessidade de comprovar a viabilidade da utilização de dispositivos portáteis presentes no dia a dia nas aplicações LiFi. A foto na figura 3.6 ilustra de maneira simplificada a montagem proposta, onde se pode notar à esquerda o *tablet* e à direita o protótipo transmissor. Para melhor alinhamento entre os dispositivos envolvidos, utilizou-se um suporte em formato de L para acomodar a placa microcontroladora na horizontal e a *protoboard* na vertical e, para o caso do *tablet*, uma capa para mantê-lo fixo durante os experimentos. As luzes vermelhas ilustradas na referida

figura são indicadores de funcionamento do Arduino, enquanto que o LED utilizado para a transmissão das informações (anexo à *protoboard*), encontra-se apagado na fotografia.

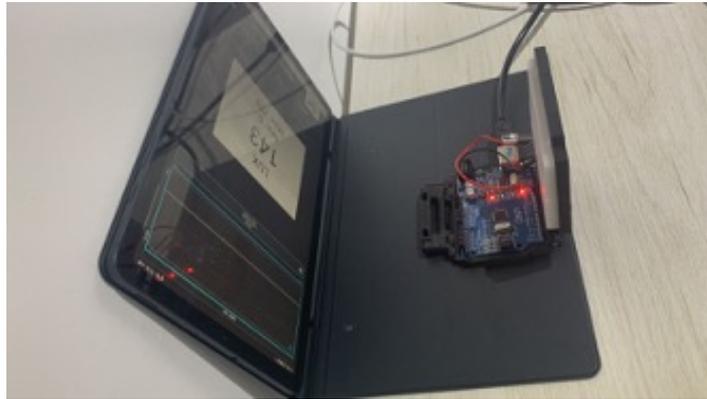


Figura 3.6: Montagem utilizando um *tablet* como receptor
Fonte: Autoria Própria

O propósito central desse arranjo experimental é utilizar a capacidade da câmara presente no dispositivo em substituição ao fotodetector. Para que os dados recebidos pelo *tablet* possam ser interpretados e processados corretamente, é necessário contar com o auxílio de um aplicativo denominado Luxímetro, aplicativo que pode ser encontrado para dispositivos Android e é desenvolvido pela *Crunchy ByteBox*. O *layout* das telas do referido aplicativo pode ser visualizado nas figuras 3.7 e 3.8, que ilustram aquela principal e aquela das configurações disponibilizadas, respectivamente. A escolha pelo aplicativo mencionado está atrelada, além da facilidade de utilização, da possibilidade de exportação dos níveis de intensidade luminosa captados ao longo do processo, em arquivos no formato *.txt* ou *.csv*, facilitando a manipulação dos dados pelo *software Matlab*.

Com aquele aplicativo foram detectados níveis de intensidade luminosa¹ emitidos pelo transmissor. O aplicativo possui algumas limitações; associadas àquelas do *tablet* utilizado resultando em um baixo número de *frames* que podem ser captados por unidade de tempo, limitando a taxa de transmissão. Apesar da aplicação estar restrita a receber um valor a cada 0,1 s, ainda assim é possível demonstrar a viabilidade do protótipo, em baixas frequências. Entende-se que para uma aplicação no mundo real, seria necessário que os dispositivos pudessem captar centenas de milhões de dados a cada 0,1 s ou que fossem integrados fotodetectores com reduzido tempo de resposta nesses aparelhos.

¹Tecnicamente o luxímetro mede a iluminância (intensidade por unidade de área) porém, devido à área constante do detector, o uso dessas grandezas foi relaxado neste texto.

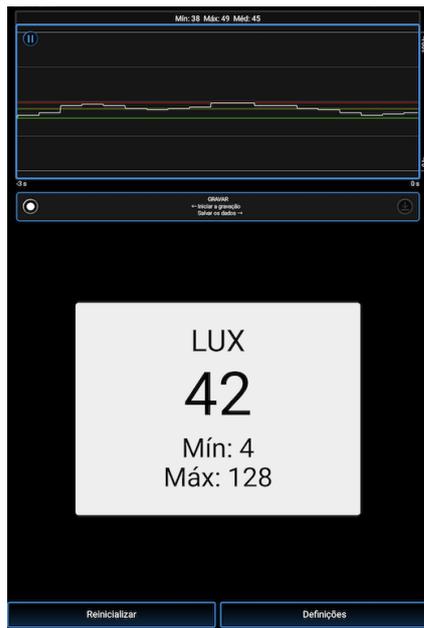


Figura 3.7: *Layout* da tela inicial Luxímetro
Fonte: Autoria Própria

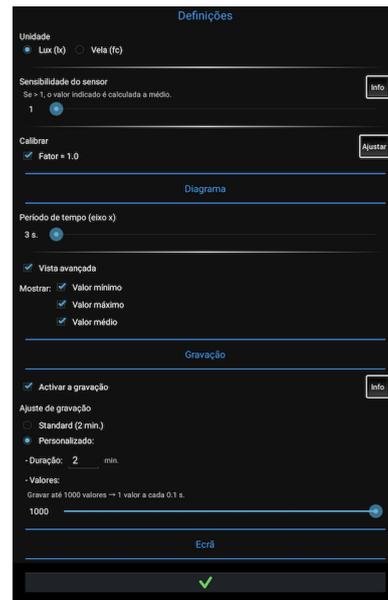


Figura 3.8: *Layout* da tela de configurações
Fonte: Autoria Própria

3.1.2.1 Metodologia Empregada

Diferentemente da situação anterior, onde para a realização da recepção podia-se extrair o limiar através da média dos valores de níveis de luminosidade coletados ou via observações ambientais, aqui a metodologia para obtenção do *threshold* será via média dos valores da iluminância (lux) coletados. A iluminância é a intensidade luminosa por unidade de área, sendo que a distância entre a fonte de luz e a superfície interfere no valor obtido. Em outras palavras, a iluminância mede a intensidade de luz atingindo determinada superfície.

O processo de transmissão repete aquele explicitado na seção 3.1.1.3, cabendo ao aplicativo Luxímetro perceber as variações dos níveis de intensidade luminosa associados ao fluxo de dados. Ao final do processo, é possível salvar todos os valores coletados em um arquivo, para posterior processamento pelo código Matlab. A manipulação dos dados importados pelo *software* baseia-se na comparação do valor instantâneo recebido com a média dos dados coletados, ou seja, caso o valor lido seja superior à média, o valor é interpretado como bit “1”, caso contrário, interpretado como bit “0”. Novamente, aqui é necessário que o módulo Matlab tenha conhecimento da sequência binária transmitida; assim deve existir a sincronização entre Arduino e Matlab para que os dados possam ser importados corretamente. Um diagrama do processo mencionado é ilustrado na figura 3.9.

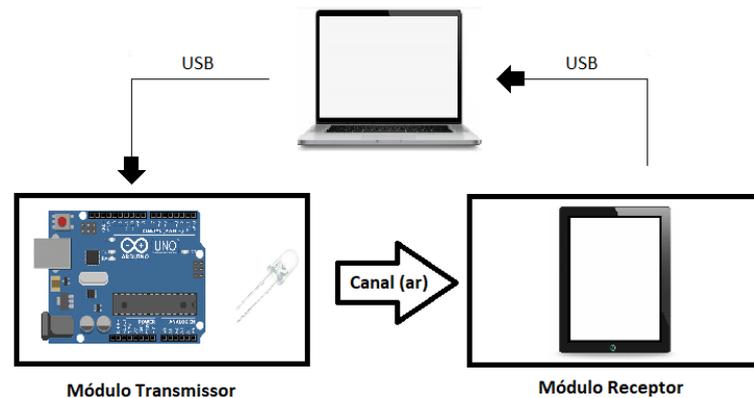


Figura 3.9: Esquemático simplificado montagem usando o LED branco e *tablet*
Fonte: Autoria Própria

3.2 Experimentos recorrendo ao LED RGB

Com o objetivo de explorar o LED RGB como ferramenta de transmissão, recorre-se à uma adaptação simplificada da modulação CSK. O CSK é a única técnica de modulação especificada no PHY III do padrão IEEE 802.15.7, cuja finalidade é operar com LED RGB de modo a permitir aumentar a eficiência espectral de modulação e aumentar a taxa de transmissão de dados.

Conforme mencionado no capítulo anterior, utilizando essa técnica de modulação é viável transmitir (via associação de uma sequência binária fixa para cada uma das três cores primárias disponíveis) uma determinada mensagem. Seria esperado que a taxa de transmissão nos experimentos recorrendo à essa técnica, seja da ordem de três vezes superior às dos experimentos utilizando a modulação OOK. Entretanto, por se tratar de uma adaptação da técnica, aqui o objetivo será compreender a influência de diferentes comprimentos de onda na transmissão, bem como estudar o comportamento do detector para as diferentes cores percebidas.

3.2.1 LED RGB de alto brilho para APDS-9960

3.2.1.1 Circuito Transmissor

Os elementos utilizados e circuito desenvolvido para o protótipo transmissor recorrendo à modulação CSK são bastante similares aos mostrados para o caso OOK, sendo a principal mudança a substituição do LED branco pelo LED RGB, que requer algumas modificações. O circuito opto-eletrónico mostrado na figura 3.10 deixa claro as modificações menciona-

das. Quanto às especificações dos componentes, estão resumidas abaixo:

- LED RGB alto brilho 5 mm Anodo Comum
- Corrente máxima de 20 mA
- Tensão de alimentação na faixa 2 – 2,2 V (Vermelho)
- Tensão de alimentação na faixa 3 – 3,4 V (Verde)
- Tensão de alimentação na faixa 3 – 3,4 V (Azul)
- Ângulo de abertura 20°- 30°
- 3 Resistores de 220 Ω 15 MHz

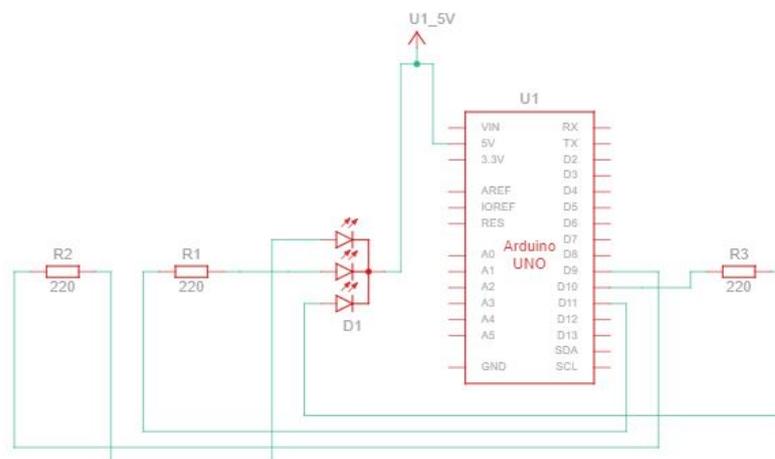


Figura 3.10: Circuito opto-eletrônico transmissor CSK
Fonte: Autoria Própria

3.2.1.2 Circuito Receptor

O circuito e os componentes do receptor são aqueles já descritos na seção 3.1.1.2, sem modificação.

3.2.1.3 Metodologia Empregada

No que diz respeito à metodologia, o processo de envio das mensagens se dá via associação de dada sequência binária, previamente estabelecida via código, a uma determinada cor do LED RGB. Cada uma das três sequências conta com 10 bits e foram repetidas ciclicamente

até atingir um total de 300 bits enviados. O valor limite foi escolhido devido além de sua multiplicidade com os 30 bits enviados a cada ciclo, mas também ser um número inferior ao tamanho máximo do *buffer* do Arduino, 64 bytes. Logo, é esperado que o LED oscile entre as três cores de sua composição até cessar o processo.

A recepção é similar àquela vista para o caso da modulação OOK, onde o fotodetector perceberá a variação nos níveis de corrente e, após conversão para níveis de luminosidade, estará apto a realizar a comparação do valor recebido com o limiar pré-estabelecido. Todavia, a programação tanto no Arduino quanto no Matlab necessitou de ajustes de modo a atribuir um limiar de decisão para cada uma das cores, pois o sensor não apresenta a mesma responsividade para cada cor.

A resposta do sensor para diferentes comprimentos de onda, conforme mostrado na figura 3.3, evidencia menor sensibilidade na região próxima ao azul, ao redor de 450 nm, assim é esperado que se mostre uma BER pior na transmissão da sequência atrelada a essa cor quando comparadas às sequências no vermelho e verde.

O processamento dos dados recebidos e sua comparação com os transmitidos utilizou o Matlab conforme mencionado na seção 3.1.1.3 com o adicional da análise de desempenho dos parâmetros de transmissão por cor.

3.2.2 LED RGB de alto brilho para *Tablet*

3.2.2.1 Metodologia Empregada

Para aproveitar as capacidades da câmera do *tablet* utilizado, aqui a transmissão ocorreu conforme mencionado na seção 3.2.1.3, cabendo ao *hardware* de recepção coletar os dados da iluminância recebida para posterior exportação em um arquivo .csv. Em particular, a média para obtenção do *threshold* precisou ser individualizada por cor, para que não ocorresse uma calibração indevida. Tendo em vista a dimensão associada a cada sequência binária no *loop* da transmissão, a média foi calculada a cada 10 bits recebidos, onde esperase que o limiar esteja adequado para as respectivas cores, à exceção de eventuais erros na recepção. Novamente, o Matlab, com conhecimento prévio da sequência binária enviada, realizou a importação dos dados para comparação futura.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos de acordo com cada uma das montagens mencionadas no capítulo 3. Uma análise comparativa, além da verificação da viabilidade de implementação do protótipo para diferentes cenários de aplicação será executada. Como ilustração inicial da transmissão de dados e erros nela ocorridos pode-se observar o gráfico na figura 4.1, que mostra uma sequência de bits transmitidos utilizando o LED RGB e detectados pelo *tablet* (mais detalhes na seção 4.1.2).

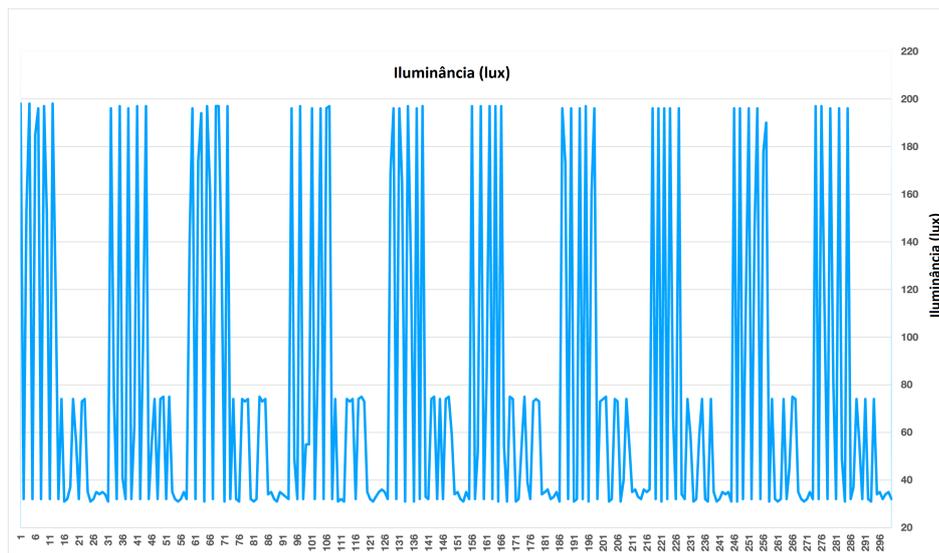


Figura 4.1: Resposta *tablet* para LED RGB Fonte: Autoria Própria

Naquele gráfico, em cada ciclo, o primeiro grupo refere-se à transmissão com o componente de luz vermelha, o segundo com aquele de luz verde e o terceiro com o componente de luz azul. O gráfico permite inicialmente observar a diferente sensibilidade do receptor (câmera) às diferentes cores, resultante da responsividade espectral do Silício nelas empregado. Além dessa diferença (que pode ainda incluir uma dependência da iluminação

fornecida pelo LED para cada componente espectral, que neste trabalho foi desprezada) aquele gráfico ilustra ainda a obtenção da taxa de erro de bit. Uma análise cuidadosa mostra ser difícil distinguir as sequências recebidas dos grupos verde e azul face àquelas transmitidas, evidenciando a ocorrência de erros de transmissão. De fato, no grupo correspondente ao azul não se observa – na escala utilizada – a separação dos bits “0” e “1”. Mesmo no grupo relativo ao verde, observa-se nitidamente a diferença no padrão recebido, por exemplo, entre a primeira, terceira e quarta repetição, ilustrando eventuais erros por recobrimento intersímbolo nos bits altos. Uma eventual redução do limiar, para melhorar a recepção da transmissão no azul resultaria em um aumento dos erros desse último tipo para aquela no verde e, eventualmente, até na cor vermelha. Assim, o protótipo aqui proposto já auxilia experimentalmente na compreensão de conceitos básicos da transmissão digital e até mesmo aqueles da responsividade espectral de materiais semicondutores.

4.1 Resultados Obtidos recorrendo ao *Tablet*

Aqui a análise será dividida para os casos onde se utilizou o LED branco como transmissor, e onde o LED RGB foi aplicado.

4.1.1 LED Branco para *Tablet*

Este experimento foi dividido em subexperimentos, onde alguns parâmetros foram variados com intuito de estabelecer comparações capazes de gerar algumas conclusões que dizem respeito ao cenário de transmissão. Dessa maneira, foram realizadas medidas para casos onde não havia nenhuma interferência de fundo, caso no qual não existem fontes artificiais externas interferindo no experimento, com exceção de sutil luz solar que permeia pela janela do local de simulação; entretanto, também foram realizadas medidas em condições críticas com presença de luminárias adicionais. Cada um dos cenários mencionados serão descritos a seguir:

- Sem Fontes Externas

Em um cenário onde todas as luzes do cômodo estão apagadas, foram realizadas medidas para quatro diferentes distâncias entre transmissor e receptor, a saber: 15 cm, 30 cm, 60 cm e 120 cm. Devido à sensibilidade do *tablet* utilizado, a distância de 120 cm foi a máxima detectada, restringindo as medições para distâncias superiores. O gráfico da figura 4.2 ilustra os resultados obtidos considerando o aumento das

distâncias entre transmissor e receptor, onde a linha contínua representa os dados obtidos pela simulação e a linha pontilhada, um ajuste linear (empírico) realizado.

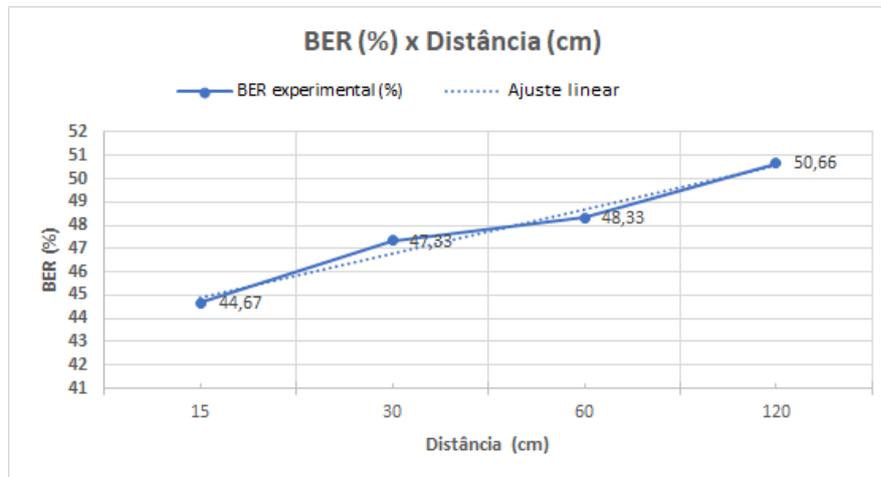


Figura 4.2: BER x Distância para transmissão de LED branco para *tablet* sem luz de fundo Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar naquele gráfico que, conforme o esperado, um aumento na distância implica em um aumento da BER, evidenciando o maior número de bits errados à medida que a potência recebida diminui. Outro fato que pode ser extraído é a semelhança da variação dos dados experimentais a uma aproximação linear, pelo menos dentro do intervalo de distâncias trabalhado. Embora a BER mensurada neste ensaio esteja aquém daquela necessária em um sistema de comunicação VLC convencional, é necessário levar em consideração as limitações do *hardware* e do *software* utilizados, onde a captura é restrita a 10 bps, valor este usado para realização de todos os testes. Além disso, analisando o estado da arte, trabalhos recentes fazendo uso de *smartphones* atingiram uma BER de 25% com taxa de aproximadamente 6 bps para uma distância de 30 cm, sem interferência de fundo [3] e acurácia de 100% para taxa de 3 bps, onde não se tem a informação da presença ou não de fontes de ruído. Nesse contexto, os resultados obtidos neste trabalho não se encontram totalmente dissociados da realidade.

- Com Fontes Externas

Aqui, na presença de iluminação artificial externa, oriunda de uma luminária de teto, os resultados apresentaram um comportamento irregular, particularmente para uma posição medida, conforme mostra o gráfico ilustrado na figura 4.3.

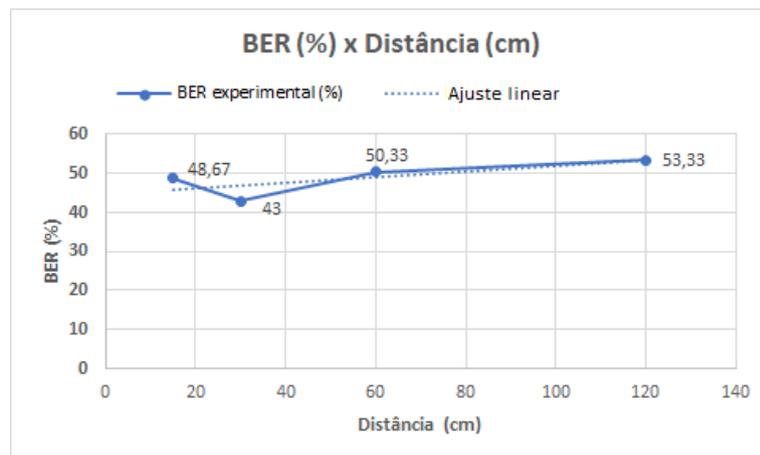


Figura 4.3: BER x Distância para transmissão de LED branco para *tablet* com luz de fundo Fonte: Autoria Própria

Esses resultados comprovam a vulnerabilidade dos sistemas de comunicação via luz visível quando expostos a fontes de interferência, que acrescentam ruído à transmissão, prejudicando a recuperação dos dados. No caso de sistemas VLC/LiFi muitas vezes é necessário a introdução de filtros pra mitigar os impactos causados pelo ruído. No uso de *tablet*, cujo *hardware* não foi projetado para a requerida aplicação VLC/LiFi, não se percebe a dependência proporcional entre distância e BER observada em condições de escuro (caso anterior). Esse fato fica evidente na posição de 30 cm, onde a BER é menor que aquela determinada à distância de 15 cm. De fato, a comparação ponto a ponto para cada distância medida, excluindo a posição de 30 cm, mostra a BER com melhor desempenho para o caso sem fontes de iluminação externa. No conjunto de medidas realizado não foi possível identificar uma causa para a anomalia em 30 cm. Adicionalmente, no caso atual, a BER apresenta valores mais elevados e menor variação ao longo do intervalo mensurado. Isso pode ser causado pela saturação do receptor *tablet*, devido à iluminação ambiente adicional, levando a um maior número de bits erroneamente detectados.

4.1.2 LED RGB para *Tablet*

Para a execução dos experimentos descritos a seguir, conforme procedimento mencionado no capítulo anterior, foi associado uma sequência de 10 bits para cada uma das cores do LED RGB. Para a cor vermelha foi arbitrada a sequência [1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0], para o verde a sequência [1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1] e por fim [1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0] para a

cor azul. Cada uma das três sequências é enviada de maneira alternada via *loop* por 10 vezes, seguindo a ordem de vermelho, verde e azul, totalizando 300 bits de mensagem. A programação foi realizada de modo a manipular a corrente que chega ao LED respeitando a cor que se deseja transmitir, bem como o nível alto (bit 1) e nível baixo (bit 0). O objetivo desse experimento é, além de avaliar o comportamento da resposta do sensor do *tablet* às diferentes cores, também analisar a BER associada. Quanto à sensibilidade do sensor de luminosidade do equipamento, o resultado obtido pode ser observado na figura 4.1 (pg. 49), onde se percebe uma melhor resposta espectral para o vermelho, seguido da daquela no verde e por fim aquela no azul sendo o menos percebido.

- Sem Fontes Externas

Os testes foram realizados sob as mesmas circunstâncias quando comparados ao caso do envio via LED branco, ou seja, sem interferência de fontes de iluminação artificiais externas. Os resultados obtidos podem ser observados através do gráfico na figura 4.4, onde novamente a posição de 30 cm mostra resultados deslocados com relação aos demais, afastando-se também quando comparados ao ajuste linear.

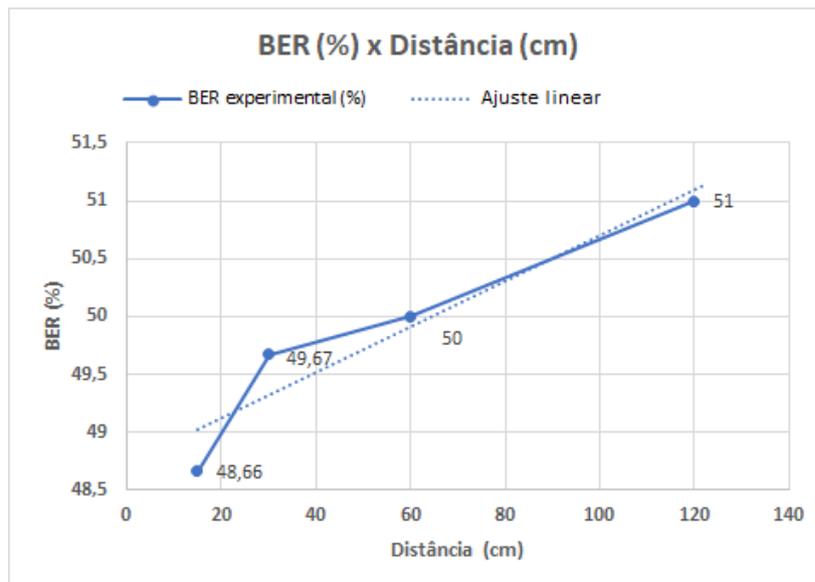


Figura 4.4: BER x Distância para transmissão de LED RGB para *tablet* sem luz de fundo
Fonte: Autoria Própria

Esse comportamento indica existirem distâncias críticas para recepção contando com os componentes internos do *tablet*. Devido ao fato de cada uma das cores estimularem respostas diferentes no sensor, o cálculo da BER foi realizado de maneira que a cada 10 bits, ou seja, após a sequência associada a uma cor, um valor médio

seja calculado para a realização da comparação do bit recebido com o limiar obtido; desse modo, cada cor terá seu próprio limiar sem sofrer influência dos demais componentes, sendo o processo mencionado repetido para cada um dos grupos de 10 bits.

- Com Fontes Externas

Para o caso onde havia presença de iluminação externa, os testes apresentaram um desempenho inferior no quesito linearidade quando comparado ao caso anterior; entretanto, realizando uma comparação ponto a ponto a partir dos resultados nas figuras 4.4 e 4.5, os valores da BER se aproximam bastante para medições à mesma distância, mostrando que a transmissão utilizando o LED RGB na presença de fontes de ruído externo não é muito impactada, diferentemente do observado para o caso do LED branco.

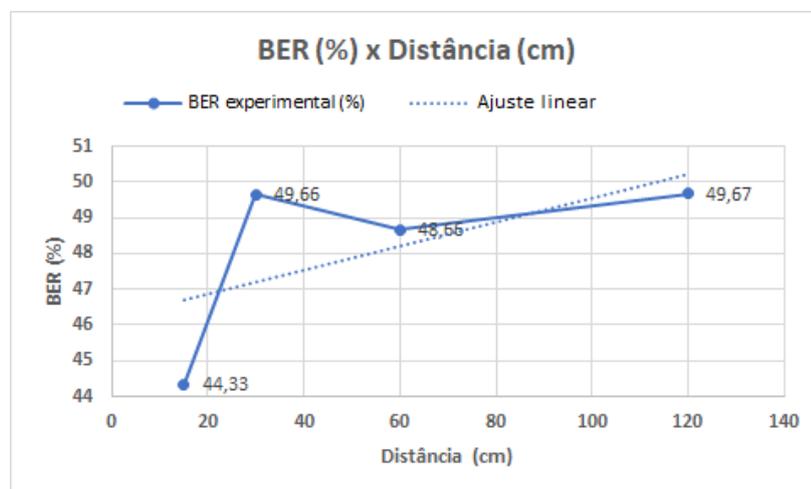


Figura 4.5: Gráfico BER x Distância para Transmissão de LED RGB para *tablet* com luz de fundo Fonte: Autoria Própria

De forma a sintetizar os resultados obtidos e ser possível estabelecer de maneira simplificada os melhores cenários de aplicação e seus respectivos transmissores mais apropriados, a figura 4.6 ilustra uma compilação dos quatro testes realizados até aqui.

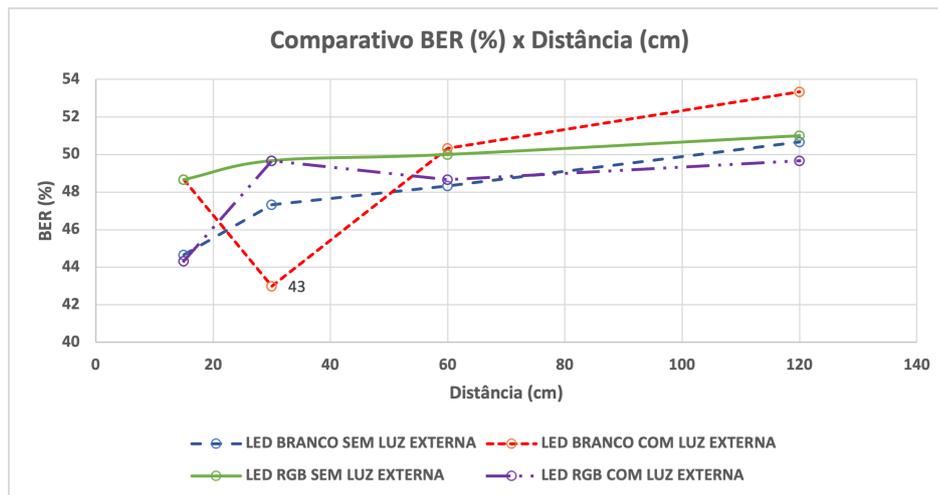


Figura 4.6: BER x distância comparativo - *tablet* Fonte: Autoria Própria

4.2 Resultados Obtidos recorrendo ao sensor APDS-9960

4.2.1 LED Branco para APDS9960

- Sem Fontes Externas

O primeiro experimento realizado foi utilizando o LED branco de alto brilho como transmissor e o sensor APDS-9960 como receptor na ausência de iluminação oriunda de fontes externas.

As simulações consistiram em determinar a BER por meio das mudanças tanto na distância entre os módulos, como na taxa de transmissão ajustada via código, cujos resultados levaram à obtenção do gráfico na figura 4.7. Através da análise dos resultados nesse gráfico, é percebido o impacto do aumento da distância entre transmissor e receptor na BER. Porém, o efeito mais notável na taxa de erro de bits se deu devido o aumento na taxa de transmissão, onde foram realizados testes para 10 bps, 100 bps e 1000 bps. Conforme se pode ali visualizar, para as taxas de 10 bps e 100 bps dobrar a distância de 30 cm para 60 cm não resultou em prejuízo significativo na transmissão; enquanto que para o caso de 1000 bps, esse incremento para as mesmas distâncias causou um aumento de 3% na BER. Testes para distâncias superiores não foram bem sucedidos, visto a baixa sensibilidade do sensor utilizado, conforme já mencionado e documentado no datasheet (parcial) presente no ANEXO A desse documento.

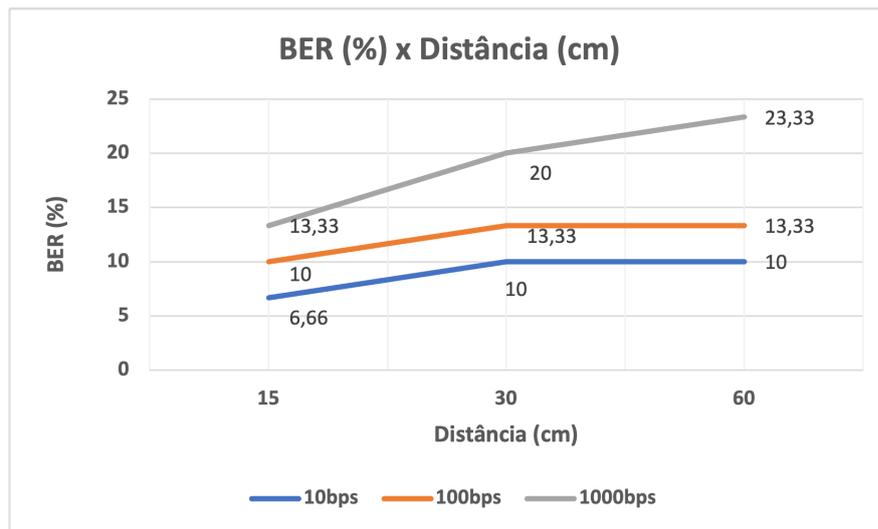


Figura 4.7: BER x distância - LED branco sem iluminação externa e sensor APDS-9960 para diferentes taxas de transmissão Fonte: Autoria Própria

- Com Fontes Externas

Aqui, o processo se deu conforme o caso anterior, porém na presença de iluminação tanto oriunda de lâmpadas presentes no local do experimento quanto de leve luz solar. Neste caso, taxas de transmissão da ordem de 10 bps não sofreram modificações na BER com o aumento da distância, mantendo-a constante ao longo dos experimentos. Já com um aumento na taxa de bits, os erros de transmissão acompanham o incremento da distância, conforme mostra o gráfico da figura 4.8.

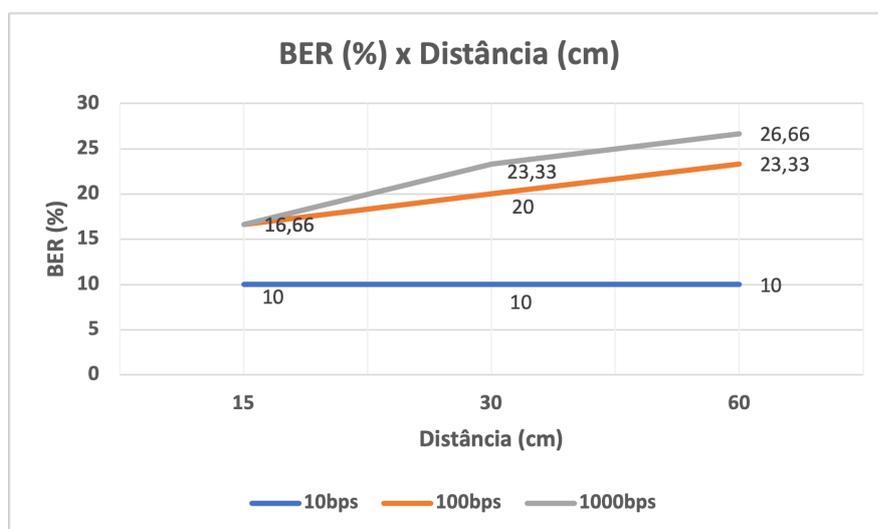


Figura 4.8: BER x distância - LED branco com iluminação externa e sensor APDS-9960 para diferentes taxas de transmissão Fonte: Autoria Própria

Após uma comparação entre os gráficos nas figuras 4.7 e 4.8, os resultados obtidos

para cenário sem iluminação externa se mostraram mais confiáveis, corroborando o fato da queda de desempenho do sistema na presença de fontes de ruído.

4.2.2 LED RGB para APDS9960

Para estes testes, o sensor apresentou muita instabilidade, causando leituras errôneas para taxas de transmissão superiores a 10 bps. Após diversas repetições, foi observado a dificuldade do sensor em acompanhar transições rápidas de 0 para 1 e de 1 para 0, além de ter seu desempenho ainda impactado com a mudança de cores, comprometendo adicionalmente a BER. Essa limitação poderia ser mitigada com o uso de sequências binárias pseudo-aleatórias mais longas, onde com o uso de mais bits de informação, teriam-se mais oportunidades de recuperação da mensagem transmitida. Outra informação que não pode ser extraída foram resultados para a distância de 60 cm, onde o sensor não detectava a luz do LED RGB. Assim, a comparação entre os cenários com influência de luz externa e sem influência, é mostrada no gráfico ilustrado na figura 4.9; onde os testes realizados sob interferência de luz externa tiveram valores de BER na ordem de duas vezes superiores àqueles sem a perturbação da luz de fundo. Nota-se também que não houve impacto no desempenho com o aumento das distâncias, fato este que pode ser explicado tanto via uma calibração adequada dos níveis de *threshold* quanto por uma possível saturação no fotodetector.

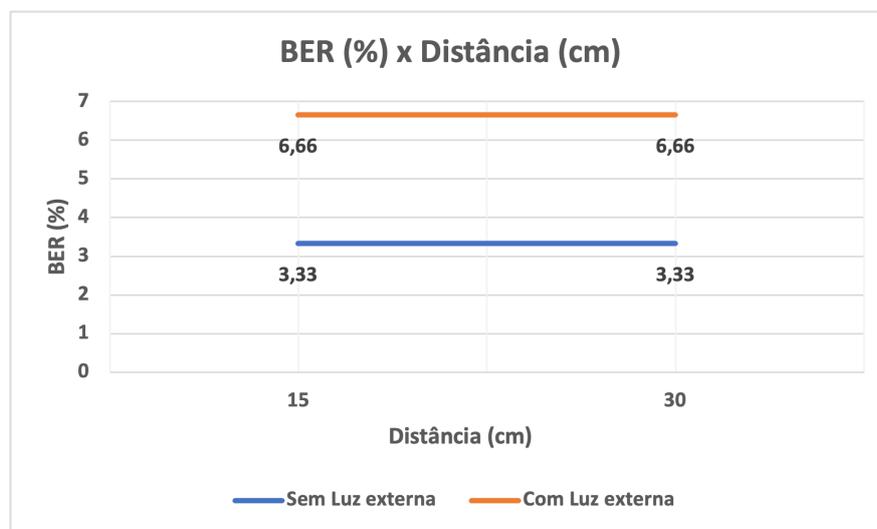


Figura 4.9: Comparação LED RGB para APDS-9960 com e sem luz de fundo Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos sob as mesmas condições para as situações usando o *tablet* como receptor ou o sensor APDS-9960, mostram a superioridade e confiabilidade da utilização

desse último, evidenciando a melhor indicação ao uso do APDS-9960 para curtas distâncias com uso de LED branco.

4.2.3 Análise do Perfil de Intensidade Luminosa

A análise desenvolvida nesta seção consiste em estudar o perfil de intensidade luminosa, viabilizada através dos receptores utilizados anteriormente. Para tal, o LED branco de alto brilho (o mesmo empregado em experimentos anteriores), foi acoplado a uma luminária no teto do cômodo onde se dá o experimento. O objetivo aqui é simular o comportamento no caso de uma transmissão que conta com uma luminária de LED convencional, onde apenas um dos seus diodos estivesse transmitindo dados na presença de luz de fundo dos demais elementos do *array*. Adicionalmente, no plano perpendicular à direção de iluminação, é possível medir a distribuição espacial da luz (perfil de campo distante).

A montagem dessa simulação pode ser vista na fotografia da figura 4.10, onde se observa a placa microcontroladora e a *protoboard* presas ao trilho fixado no teto e o LED branco preso ao *spot* através de fios de sustentação. Ambos os LEDs encontram-se ativos no momento da fotografia exposta.



Figura 4.10: Montagem para análise de perfil de intensidade luminosa Fonte: Autoria Própria

De modo a extrair a influência recebida dos demais LEDs do array, foram realizadas medidas da intensidade luminosa para os seguintes casos: LED do protótipo e LED do *spot* acesos simultaneamente (representado o caso da transmissão de dados), bem como apenas o LED pertencente ao cômodo aceso. Assim, será possível constatar, através

da diferença dos dados da iluminância de ambos os casos, se o LED do protótipo tem capacidade de ser percebido ou não pelo receptor. Dada uma distância vertical entre os módulos transmissor e receptor, arbitrada em 150 cm, a iniciar do alinhamento vertical, a distância foi variada radialmente no plano horizontal e realizadas medidas para 15 cm, 30 cm e 60 cm, conforme ilustra a figura 4.11.

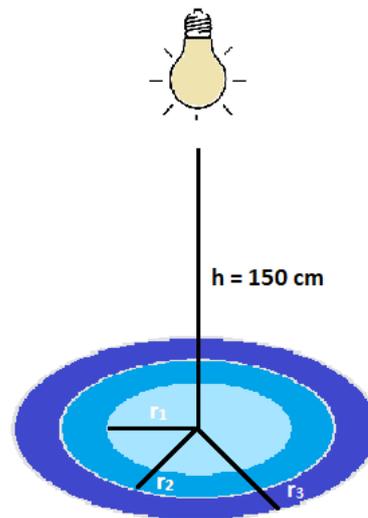


Figura 4.11: Diagrama esquemático da montagem da análise do perfil de intensidade luminosa Fonte: Autoria Própria

O experimento citado, a título de comparação, foi realizado ora contando com o *tablet*, ora com o APDS-9960 como receptores. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 4.12 e 4.13 a seguir.

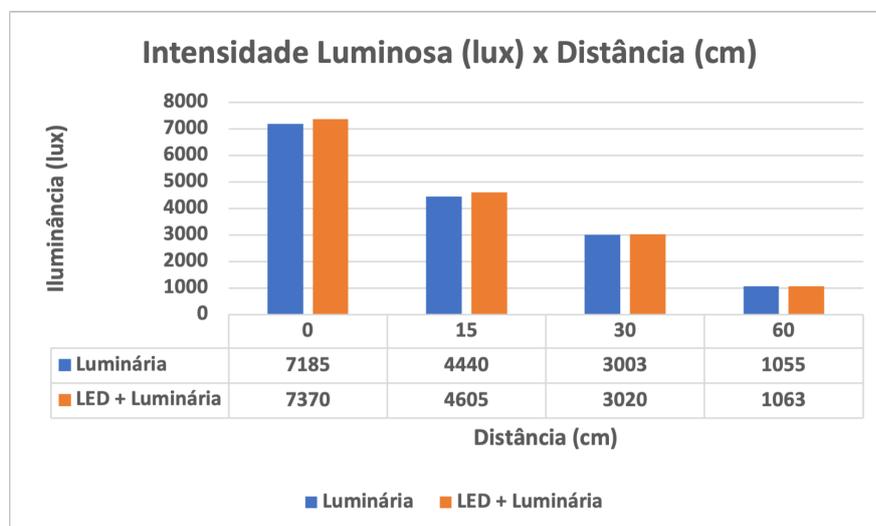


Figura 4.12: Perfil de intensidade luminosa usando o LED branco e APDS-9960 Fonte: Autoria Própria

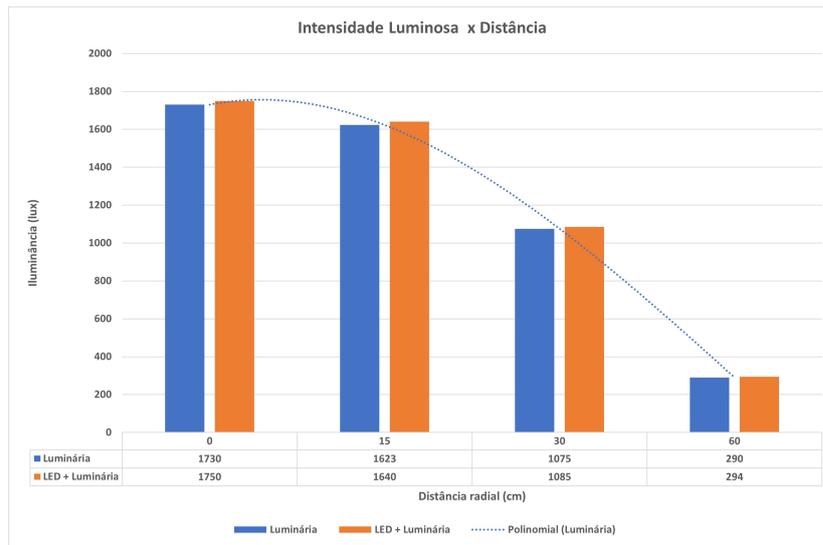


Figura 4.13: Perfil de intensidade luminosa recorrendo ao LED branco e *tablet* Fonte: Autoria Própria

A observação dos gráficos mencionados mostra que para as mesmas condições de experimentos, a maior sensibilidade à luz branca é obtida com o uso do sensor APDS-9960. Para todas as posições mensuradas, a diferença entre os valores de intensidade luminosa obtidos com o LED do protótipo são superiores quando comparados aos obtidos pelo uso do *tablet*. Na situação com o APDS-9960, os valores são aproximadamente três a quatro vezes superior para as mesmas distâncias, evidenciando a maior sensibilidade à detecção de luz.

No caso do gráfico da figura 4.12 é mais evidente a diminuição da intensidade em função da distância radial. Já na figura 4.13, essa diminuição ocorre de maneira mais sutil. Com alguma liberdade, pode-se descrever este último como algo similar com um perfil tipo “sino” que seria compatível com o tipo de emissor (LED), porém seriam necessários mais pontos de medição para se comprovar o perfil citado. Entretanto, conforme já mencionado, medições para distâncias superiores foram inviabilizadas devido à baixa sensibilidade do sensor.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Considerações Finais

O presente trabalho teve por objetivo o estudo dos principais tópicos no que diz respeito a um tipo de técnica de comunicação VLC, o LiFi. Além disso, foi objeto de interesse a realização de alguns protótipos simplificados de projeto de comunicação voltados ao ambiente educacional na área de ensino em telecomunicações. Os circuitos descritos no capítulo 3 e utilizados conforme experimentos listados no capítulo 4, permitiram extrair algumas conclusões a respeito de características associadas aos cenários de aplicação daquela tecnologia, bem como contribuir com a comunidade acadêmica no que se refere ao conhecimento dos princípios básicos de comunicação e obtenção de parâmetros importantes tratados em sala de aula.

O protótipo desenvolvido validou o conceito da transmissão de dados utilizando a luz visível (e o ar como canal óptico) sendo um mecanismo alternativo e viável de comunicação. Através de circuitos simples com componentes acessíveis no mercado da eletrônica, bem como uso de plataformas com linguagem de programação disseminadas, foi possível consolidar os conhecimentos a respeito de uma tecnologia emergente e com elevado potencial de crescimento.

Com o uso do sistema apresentado, foi possível extrair diversos parâmetros úteis para os sistemas de telecomunicações, obtendo-se informações sobre cenários de aplicação da tecnologia, desempenho da transmissão com a variação da distância entre os módulos transmissor e receptor, análise do perfil de intensidade luminosa, comportamento da responsividade dos sensores utilizados como fotodetectores para diferentes cores etc.

Apesar das limitações do *hardware* utilizado, tendo em vista que uma das prioridades

do projeto foi prover facilidade tanto na obtenção dos componentes quanto na execução, foi possível demonstrar a viabilidade da construção de sistema protótipo de comunicação VLC para fins educacionais. Dentre as limitações mencionadas têm-se o microcontrolador utilizado, onde o *clock* de 16 MHz limita a possibilidade de simular o desempenho em taxas de transmissão mais elevadas, da ordem de Gbps, conforme propõe a tecnologia LiFi; o controlador mostrou instabilidade no envio e recebimento dos dados quando se está próximo do limite de 1000 bps. Outra limitação que impediu a realização de testes com sequências binárias mais longas, é o limite imposto pela dimensão do *buffer* do Arduino, de 64 Bytes.

Com relação aos testes realizados com o *tablet*, também foram percebidas limitações inerentes ao *hardware* e ao *software* utilizados. O limite máximo de captura por unidade de tempo, limitou em 10 bps a máxima taxa de dados que poderia ser recebida. Não obstante, a viabilidade da recepção com dispositivos comumente presentes no dia a dia, sem a necessidade de qualquer confecção de circuito adicional, foi demonstrada. Mesmo numa situação condicionada por tais limitações, os resultados obtidos se aproximam bem de alguns resultados descritos na literatura, como mencionado na seção 4.1.1, pg. 51. Conforme mencionado no capítulo 3, para uma aplicação no mundo real recorrendo a um *tablet* ou *smartphone*, por exemplo, seriam necessárias sutis adaptações no *hardware* ou um aplicativo dedicado que possa acompanhar uma adequada captura de *frames* por unidade de tempo.

A comparação dos resultados obtidos demonstrou a superioridade no quesito BER do sensor APDS9960 quando comparados aos resultados do *tablet*, bem como deixou evidente o impacto da interferência de luz de fundo, trazendo para a mesma taxa de transmissão, respostas inferiores. Já na análise de perfil de intensidade luminosa, a maior sensibilidade do APDS-9960 foi novamente evidenciada conforme discutido na seção 4.2.3.

5.2 Aplicações no Ensino de Engenharia de Telecomunicações

No que tange o ensino em Engenharia de Telecomunicações, equipamentos e métodos capazes de simular comunicações via luz visível (VLC/LiFi), encontram-se, em geral – na conjuntura brasileira – ainda defasados no cenário atual. Nesse contexto, o sistema proposto permite ampliar os conhecimentos dos estudantes onde, através da montagem de circuitos eletrônicos simples, de baixo custo e execução rápida, sua utilização contribui

para consolidar de maneira prática a compreensão de conceitos abordados em sala de aula.

Para a realização da análise a seguir, foram examinadas as ementas vigentes das disciplinas do curso de Engenharia de Telecomunicações da UFF, escolhendo algumas delas em que a implementação de atividades com o protótipo desenvolvido poderiam contribuir para melhorar a formação dos estudantes. Nesse contexto, sugere-se:

- Redes de Acesso

Aqui, dentre os tópicos estudados, estão os conceitos das redes de acesso ópticas, incluindo as noções de redes de acesso sem fio, seus componentes e equipamentos, bem como o planejamento. Dessa forma, uma experiência prática poderia ser a confecção do sistema protótipo para consolidar o conhecimento no que diz respeito aos componentes ópticos utilizados e suas respectivas funções no projeto, além de permitir que o estudante dimensione a rede de acordo com a necessidade da tarefa; podendo dessa maneira, realizar medidas de desempenho para comprovar sua viabilidade. Tal como realizado, esse desempenho pode ser estudado em função da sensibilidade cromática do receptor.

- Comunicações Ópticas

Nessa disciplina, dentre os temas abordados estão as fontes luminosas, detectores, modulação, relação sinal ruído, parâmetros básicos da transmissão e sistemas ópticos. Logo, como contribuição na comunidade acadêmica, poderiam novamente ser realizadas montagens e posterior medições com intuito de abordar os tópicos mencionados, obtendo parâmetros como a BER em função da potência óptica de saída (seja variando a distância entre transmissor e receptor ou o próprio dispositivo transmissor, podendo inclusive variar as cores emitidas para maior clareza de seu impacto no desempenho do sistema), assim como ampliar a compreensão dos efeitos da interferência intersimbólica em sistemas de comunicação. Outra medida que pode ser realizada é do cálculo do perfil de intensidade luminosa, capacitando a compreensão do estudante no tocante às possíveis limitações dos componentes utilizados e auxiliando no melhor dimensionamento de enlaces.

- Medidas em Óptica

Baseado no estudo dos fundamentos e caracterização dos dispositivos ópticos, instrumentação básica para medidas em óptica, medidas de performance em sistemas ópticos etc., os alunos poderiam, por exemplo, compreender de maneira otimizada o funcionamento e caracterização dos diferentes tipos de LEDs e fotodetectores. No

âmbito da instrumentação, seria viável a identificação de diferentes comprimentos de onda ópticos com o sistema proposto, medidas de sensibilidade do receptor, bem como medições de perfil de cobertura e taxa de transmissão, avaliando assim, o desempenho do sistema.

5.3 Trabalhos Futuros

Com relação às melhorias no protótipo desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros dando continuidade ao tema, pode-se sugerir:

- Utilização de microcontrolador superior com *buffer* e *clock* de ordem mais elevadas;
- Utilização do LED RGB como mecanismo de triplicar a informação que possa ser transmitida. Para tal, deve ocorrer a mistura das cores pertencentes ao LED, cabendo ao receptor demodular e recuperar a mensagem;
- Desenvolver projetos que explorem as características intrínsecas do LiFi, como o sistema *full-duplex*, acesso multiusuário, dentre outras.
- Explorar o uso do sensor APDS9960 no infravermelho próximo, tendo em vista a eliminação do problema de interferências de fontes externas, como lâmpadas, luz solar etc.
- Simular a modulação CSK com um aplicativo (mais rápido) de identificação de cores para *smartphones* ou *tablet*.
- Realização da análise do perfil de intensidade luminosa para casos onde o LED do transmissor apresente certa angulação com relação ao eixo vertical, obtendo resultados não simétricos em relação à coordenada azimutal.

As sugestões anteriores, dentre outras possibilidades, permitiriam expandir a compreensão das características de comunicação VLC/LiFi para casos mais próximos da realidade.

No que toca à destinação educacional do protótipo, poderia ser analisada sua aplicação em turmas das disciplinas anteriormente listadas para verificar a eficácia na melhor compreensão dos conceitos associados. Um segundo foco seria verificar a aplicabilidade em cursos de educação técnica e tecnológica voltados ao setor de telecomunicações, tais como aqueles no CEFET/RJ ou Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia.

Referências

- [1] CISCO Annual Internet Report (2016–2021) White Paper. 2020. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>.
- [2] FEITOSA JR, A. *Entenda a diferença entre o 5G que já funciona no Brasil e o que está sendo leiloado agora*. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2021/11/05/entenda-a-diferenca-entre-o-5g-que-ja-funciona-no-brasil-e-o-que-esta-sendo-leiloado-agora.ghtml>>.
- [3] YOUNUS, M.; ALWAN, Z.; ALDARKAZALY, Z. Data transmission using li-fi technique. *International Journal of Advanced Science and Technology*, v. 29, n. 3, p. 7367 – 7382, 04 2020.
- [4] FARIAS, V. G. M. de. *Metodologia de Projetos para Enlaces Ópticos no Espaço Livre*. Dissertação (Mestrado) — IFPB, 2014.
- [5] PEDROSO, L. S.; ARAÚJO, M. S. T. Transmissor e receptor fotoacústico (fotofone). *Encontro de Produção Discente PUC-SP/ Cruzeiro do Sul*, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2012.
- [6] DIMITROV, S.; HAAS, H. *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-1107049420.
- [7] SEMAPHORE FLAG HISTORY. 03 2017. Disponível em: <<https://flagpolesetc.com/blog/semaphore-flag-history>>.
- [8] MORELLATO, F. *Um pouco de luz na história – Breve histórico da fibra óptica*. 2018. Disponível em: <<https://www.blog.ipv7.com.br/historia/um-pouco-de-luz-na-historia-fibra-optica/>>.
- [9] BOUCHET, O.; SIZUN, H.; BOISROBERT, C.; FORNEL, F. de; FAVENNEC, P. *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. Wiley, 2010. (ISTE). ISBN 9780470394410. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=dfUFVeGcRIC>>.
- [10] KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 113, p. 1151–1158(7), July 1966. ISSN 0020-3270. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1966.0189>>.
- [11] ANDRÉ, P. Comunicar à velocidade da luz. *Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa e Instituto de Telecomunicações*, v. 39, n. 1/2, 2012.

- [12] WIRTH, A. *Tudo Sobre Fibras Óticas: Teoria e Prática*. Altas Book, 2002. ISBN 8588745097. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261063791_Tudo_sobre_Fibras_Oticas_Editora_Alta_Books>.
- [13] GFELLER, F.; BAPST, U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*, v. 67, n. 11, p. 1474–1486, 1979.
- [14] KALINOWSKI, H. J. comunicação pessoal, Jul. 2022.
- [15] KALINOWSKI, H. J.; GARCIA, N. M. D. Rede de difração alternativa: uma solução barata. VII Simpósio Brasileiro Ensino de Ciências, Santa Maria (RS), p. 1–5, 1989.
- [16] KALINOWSKI, H. J.; GARCIA, N. M. D. Uma alternativa econômica para redes de difração no laboratório de ensino. *Cad. Cat. Ens. Fis.* **7(1)**, p. 64–72, 1990.
- [17] VIZCAYA-GUARIN, P. R.; ALVAREZ, J. C.; LUNA, J. C.; GUZMAN, A. M.; KALINOWSKI, H. J. Educational fiber optic transmission equipment with dedicated ber features. In: ALTSHULER, G. B.; THOMPSON, B. J. (Ed.). *Education in Optics*. SPIE, 1991. v. 1603, p. 490 – 495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.57888>>.
- [18] LUNA, J. C.; ET AL. Sistema de transmissão por fibra ótica para uso didático. *Journal of Communication and Information Systems*, v. 8, n. 1, p. 54–64, 1993. Disponível em: <<https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/171>>.
- [19] GARCIA, N. M. D.; KALINOWSKI, H. J. Um espectroscópio simples para uso individual. *Cad. Cat. Ens. Fis.*, v. 11, n. 2, p. 134–140, 1994.
- [20] KALINOWSKI, H. J.; FABRIS, J. L.; AZEVEDO, J. C. R. de. Multidisciplinary approach in the teaching of optical technologies for electronic engineers. *Proc SPIE 3190: Education and Training in Optics, Delft(NL)*, p. 196–199, 1997.
- [21] KALINOWSKI, H. J.; ET AL. Light, optics, action ... enhancing science's teachers knowledge in modern optics applications. *OSA Forum on Education*, p. 1–2, 1999.
- [22] KALINOWSKI, H. J.; DUMMER, O. S.; GIFFHORN, E. Produção de redes de difração por técnica fotográfica no ensino médio. *Cad. Cat. Ens. Fis.*, v. 18, n. 2, p. 249–254, 2001.
- [23] ABDALLA, H.; SOARES, A.; GARROSINI, D.; MOLINARO, L. Experiences of applying a blended learning approach to teaching optical communication systems. *International Journal of Electrical Engineering Education*, v. 49, p. 136–145, 04 2012.
- [24] CARVALHO, P. C. e Almir Pereira e J. Li-fi (light-fidelity) uma luz na evolução das comunicações. *CES Revista*, v. 29, n. 2, p. 136–57, 2015.
- [25] HE, C. Analysis on teaching reform of optical fiber communication in higher vocational schools. *Adv. Social Science, Education and Humanities Research*, p. 13–16, 01 2016.
- [26] AZIZ, A.; BADAWI, A. Education development employing latest free space optical research papers for undergraduate communication engineering students in class and examination. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, v. 11143, p. 50, 07 2019.

- [27] FUADA, S.; ADIONO, T. Visible light communication kits for education. *Journal of Education and Training*, v. 5, p. 39–49, 2018.
- [28] MATHEUS, L.; BORGES, A.; FREIRE, J.; VIEIRA, L.; VIEIRA, M.; GNAWALI, O. Comunicação por luz visível: Conceitos, aplicações e desafios. Simpósio Brasileiro De Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), XXXV, p. 247–296, 03 2017.
- [29] AHMAD, A.; KASHYAP, T. Light fidelity design for audio transmission using light dependent resistor. *i-manager's Journal on Communication Engineering and Systems*, v. 7, p. 29, 01 2018.
- [30] REHMAN, S. U.; ULLAH, S.; CHONG, P. H. J.; YONGCHAREON, S.; KOMOSNY, D. Visible light communication: A system perspective—overview and challenges. *Sensors*, v. 19, n. 5, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/5/1153>>.
- [31] HAAS, H.; YIN, L.; WANG, Y.; CHEN, C. What is lifi? *J. Lightwave Technol.*, OSA, v. 34, n. 6, p. 1533–1544, Mar 2016. Disponível em: <<http://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-34-6-1533>>.
- [32] HAAS, H. High-speed wireless networking using visible light. *SPIE Newsroom*, 04 2013.
- [33] TANAKA, Y.; KOMINE, T.; HARUYAMA, S.; NAKAGAWA, M. Indoor visible light data transmission system utilizing white led lights. *IEICE Transactions on Communications*, E86B, p. 2440–2454, 08 2003.
- [34] KARUNATILAKA, D.; ZAFAR, F.; KALAVALLY, V.; PARTHIBAN, R. Led based indoor visible light communications: State of the art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, p. 1–30, 09 2015.
- [35] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. *IEEE Std 802.15.7-2011*, p. 1–309, 2011.
- [36] MARÉ, R. M. *Proposta e avaliação de um sistema complementar de posicionamento baseado em comunicação por luz visível aplicado a sistemas inteligentes de transporte*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- [37] HAAS, H.; YIN, L.; CHEN, C.; VIDEV, S.; PAROL, D.; POVES, E.; ALSHAER, H.; ISLIM, M. S. Introduction to indoor networking concepts and challenges in lifi. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 12, n. 2, p. A190–A203, 2020.
- [38] REYES, S.; SEGURA, V. Android app of location awareness using li-fi. *Research in Computing Science*, v. 118, p. 107–114, 12 2016.
- [39] AFGANI, M.; HAAS, H.; ELGALA, H.; KNIPP, D. Visible light communication using ofdm. *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006.*, p. 6 pp.–134, 2006.

- [40] MEDEIROS, A. N. M. de; SORRENTINO, T. A. *Comunicação Wireless por luz*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, 2018.
- [41] ALBRAHEEM, L. I.; ALHUDAITHY, L. H.; ALJASER, A. A.; ALDHAFIAN, M. R.; BAHLIWAH, G. M. Toward designing a li-fi-based hierarchical iot architecture. *IEEE Access*, v. 6, p. 40811–40825, 2018.
- [42] WALL, M. *Li-fi via LED light bulb data speed breakthrough*. 2013. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/technology-24711935>>.
- [43] LTD., F. L. *Fujitsu Laboratories Successfully Develops LED Lighting Technology that Shines Data on Objects*. 2014. Disponível em: <<https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2014/1117-01.html>>.
- [44] THOMAS, Z.; KUMAR, N.; PRESHIYA, D. Automatic billing system using li-fi module. *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCS)*, p. 2216–2219, 04 2016.
- [45] BULL, A. K. *Philips anuncia lâmpada Li-Fi que transmite Internet por meio da luz*. 2018. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/03/philips-anuncia-lampada-li-fi-que-transmite-internet-por-meio-da-luz.ghhtml>>.
- [46] LEE, C.; ISLIM, M. S.; VIDEV, S.; SPARKS, A.; SHAH, B.; RUDY, P.; MCLAURIN, M.; HAAS, H.; RARING, J. Advanced lifi technology: Laser light. *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXIV*, p. 38, 02 2020.
- [47] LIFI.CO. Disponível em: <<https://lifi.co/lifi-product/lifi-xc/>>.
- [48] PURELIFI. Disponível em: <<https://purelifi.com/lifi-technology/>>.
- [49] MISHRA, A.; SUDHAKAR, A.; JITHENDER, B.; C., N. Agriculture & food: e-newsletter volume 1 -issue 7 - applications of light emitting diodes for post-harvest quality management of fruits and vegetables. 07 2019.
- [50] DIMITROV, S.; HAAS, H. *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*. Cambridge University Press, 2015. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/books/principles-of-led-light-communications/0528063BAA6863F6B6D61F6FF69F37CB>>.
- [51] DIAS, M. P. *Avaliação do Emprego de um Pré-Regulador Boost de Baixa Frequência no Acionamento de LEDs de Iluminação*. Dissertação (Mestrado) — <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/1798/1/marcelopaschoaldias.pdf>, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/1798>>.
- [52] LEE, C. G. Visible light communication. In: KHATIB, M. (Ed.). *Advanced Trends in Wireless Communications*. Rijeka: IntechOpen, 2011. cap. 17. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/16034>>.
- [53] GUILLEN, D. E. F. *Projeto e análise de desempenho de um sistema de comunicação por luz visível*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2021.

- [54] AL-KINANI, A.; WANG, C.-X.; ZHOU, L.; ZHANG, W. Optical wireless communication channel measurements and models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 3, p. 1939–1962, 2018.
- [55] SMITH, W. *Modern optical engineering*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2008. ISBN 9780070264632. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NCKHRfs90yoC>>.
- [56] FARIN, G.; HANSFORD, D. *Practical Linear Algebra: A Geometry Toolbox*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021. (Textbooks in Mathematics Series). ISBN 9781003051213. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PlcvzgEACAAJ>>.
- [57] PAIVA, R. de. Reflexão da luz. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 1, 2014.
- [58] KAHN, J.; BARRY, J. Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, v. 85, n. 2, p. 265–298, 1997.
- [59] SILVA, V. N. H. *Desenvolvimento experimental de uma nova técnica de medição da turbulência atmosférica em enlaces ópticos horizontais no espaço livre*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Fluminense - UFF, 2009.
- [60] FARFÁN, D.; JR, P.; POHL, A. Desempenho de enlace vlc com modulação ook e ofdm sob condições adequadas de iluminação. *XXXIX Simpósio Brasileiro De Telecomunicações e Processamento De Sinais*, 01 2021.
- [61] ISLIM, M. S.; HAAS, H. Modulation techniques for li-fi. *ZTE COMMUNICATIONS*, v. 14, p. 29–40, 04 2016.
- [62] OOK vs VPPM vs CSK-Difference between OOK, VPPM, CSK modulation. Disponível em: <<https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LiFi-OOK-VPPM-CSK-modulation-types.html>>.
- [63] ARNON, S. Synchronization issues in visible light communication. In: ARNON, S. (Ed.). *Visible Light Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. p. 116–132.
- [64] PRAMANIK, A.; BANERJEE, P. Measurement of real channel parameters of fpga based ofdm system. *International Conference on Electronics, Communication and Instrumentation (ICECI)*, p. 1–4, 2014. 10.1109/ICECI.2014.6767368.
- [65] LIU, W.; XU, Z. Some practical constraints and solutions for optical camera communication. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, v. 378, 03 2020.
- [66] PAULI, G.; KAMP, J. *LiFi: Communication at the Speed of Light and the Emergence of the Internet of People*. KAMP Books, 2019. ISBN 9781733717700. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bPuxzQEACAAJ>>.
- [67] AYYASH, M.; ELGALA, H.; KHREISHAH, A.; JUNGnickel, V.; LITTLE, T.; SHAO, S.; RAHAIM, M.; SCHULZ, D.; HILT, J.; FREUND, R. Coexistence of wifi and lifi toward 5g: concepts, opportunities, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 2, p. 64–71, 2016.

- [68] TECNOLOGIA usa a luz para conectar o sistema de entretenimento de bordo. 2019. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/air-france-testa-uso-de-lifi-em-voo/>>.
- [69] MUKKU, V. D.; LANG, S.; REGGELIN, T. Integration of lifi technology in an industry 4.0 learning factory. *Procedia Manufacturing*, v. 31, p. 232–238, 2019. ISSN 2351-9789. Research. Experience. Education. 9th Conference on Learning Factories 2019 (CLF 2019), Braunschweig, Germany. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919304019>>.
- [70] ALFATTANI, S. Review of lifi technology and its future applications. *Journal of Optical Communications*, v. 42, n. 1, p. 121–132, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/joc-2018-0025>>.
- [71] ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>.
- [72] OLIVEIRA, E. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-gestos-e-de-cor-apds-9960>>.
- [73] CANALTECH. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/produto/samsung/galaxy-tab-s6-lite/>>.

ANEXO A – *Datasheet* APDS-9960

APDS-9960

Digital Proximity, Ambient Light, RGB and Gesture Sensor



Data Sheet

Description

The APDS-9960 device features advanced Gesture detection, Proximity detection, Digital Ambient Light Sense (ALS) and Color Sense (RGBC). The slim modular package, L 3.94 x W 2.36 x H 1.35 mm, incorporates an IR LED and factory calibrated LED driver for drop-in compatibility with existing footprints.

Gesture detection

Gesture detection utilizes four directional photodiodes to sense reflected IR energy (sourced by the integrated LED) to convert physical motion information (i.e. velocity, direction and distance) to a digital information. The architecture of the gesture engine features automatic activation (based on Proximity engine results), ambient light subtraction, cross-talk cancelation, dual 8-bit data converters, power saving inter-conversion delay, 32-dataset FIFO, and interrupt driven I2C communication. The gesture engine accommodates a wide range of mobile device gesturing requirements: simple UP-DOWN-RIGHT-LEFT gestures or more complex gestures can be accurately sensed. Power consumption and noise are minimized with adjustable IR LED timing.

Description continued on next page...

Applications

- Gesture Detection
- Color Sense
- Ambient Light Sensing
- Cell Phone Touch Screen Disable
- Mechanical Switch Replacement

Ordering Information

Part Number	Packaging	Quantity
APDS-9960	Tape & Reel	2500 per reel

Features

- Ambient Light and RGB Color Sensing, Proximity Sensing, and Gesture Detection in an Optical Module
- Ambient Light and RGB Color Sensing
 - UV and IR blocking filters
 - Programmable gain and integration time
 - Very high sensitivity – Ideally suited for operation behind dark glass
- Proximity Sensing
 - Trimmed to provide consistent reading
 - Ambient light rejection
 - Offset compensation
 - Programmable driver for IR LED current
 - Saturation indicator bit
- Complex Gesture Sensing
 - Four separate diodes sensitive to different directions
 - Ambient light rejection
 - Offset compensation
 - Programmable driver for IR LED current
 - 32 dataset storage FIFO
 - Interrupt driven I2C communication
- I2C-bus Fast Mode Compatible Interface
 - Data Rates up to 400 kHz
 - Dedicated Interrupt Pin
- Small Package L 3.94 × W 2.36 × H 1.35 mm

Description (Cont.)

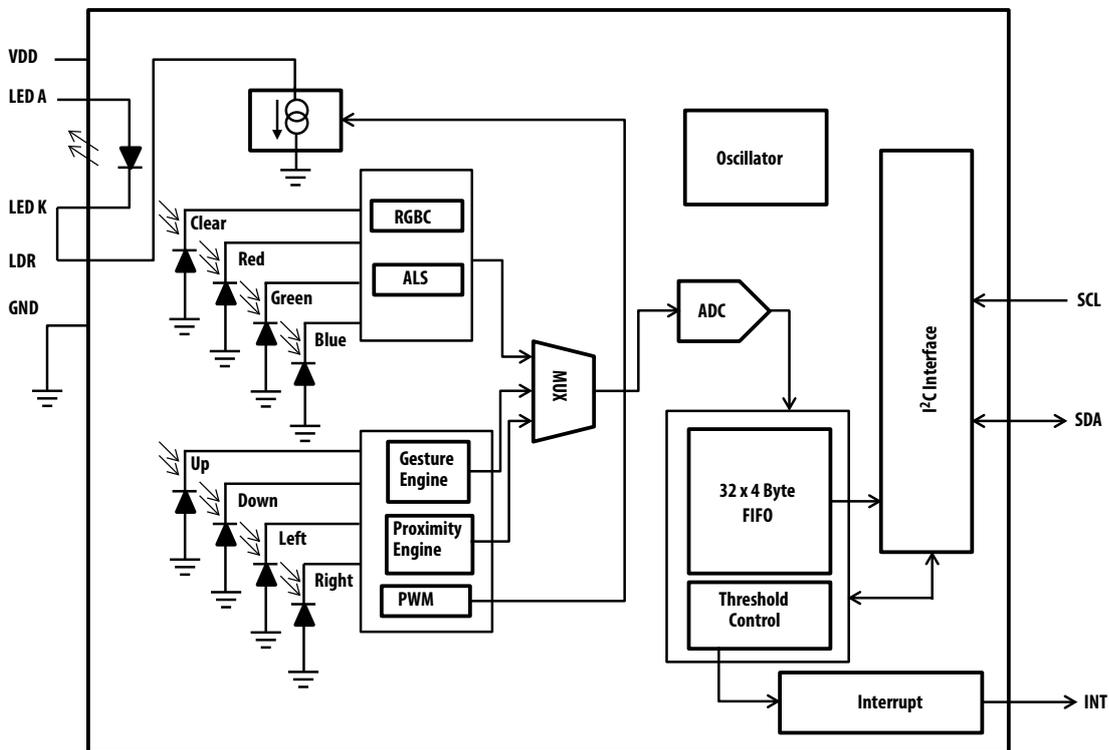
Proximity detection

The Proximity detection feature provides distance measurement (E.g. mobile device screen to user's ear) by photodiode detection of reflected IR energy (sourced by the integrated LED). Detect/release events are interrupt driven, and occur whenever proximity result crosses upper and/or lower threshold settings. The proximity engine features offset adjustment registers to compensate for system offset caused by unwanted IR energy reflections appearing at the sensor. The IR LED intensity is factory trimmed to eliminate the need for end-equipment calibration due to component variations. Proximity results are further improved by automatic ambient light subtraction.

Color and ALS detection

The Color and ALS detection feature provides red, green, blue and clear light intensity data. Each of the R, G, B, C channels have a UV and IR blocking filter and a dedicated data converter producing 16-bit data simultaneously. This architecture allows applications to accurately measure ambient light and sense color which enables devices to calculate color temperature and control display backlight.

Functional Block Diagram



I/O Pins Configuration

Pin	Name	Type	Description
1	SDA	I/O	I ² C serial data I/O terminal - serial data I/O for I ² C-bus
2	INT	O	Interrupt - open drain (active low)
3	LDR		LED driver input for proximity IR LED, constant current source LED driver
4	LEDK		LED Cathode, connect to LDR pin when using internal LED driver circuit
5	LEDA		LED Anode, connect to V _{LEDA} on PCB
6	GND		Power supply ground. All voltages are referenced to GND
7	SCL	I	I ² C serial clock input terminal - clock signal for I ² C serial data
8	V _{DD}		Power supply voltage

Absolute Maximum Ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)*

Parameter	Symbol	Min	Max	Units	Conditions
Power supply voltage ^[1]	V _{DD}		3.8	V	
Input voltage range	V _{IN}	-0.5	3.8	V	
Output voltage range	V _{OUT}	-0.3	3.8	V	
Storage temperature range	T _{stg}	-40	85	°C	

* Stresses beyond those listed under “absolute maximum ratings” may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under “recommended operating conditions” is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

Note 1. All voltages are with respect to GND.

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Operating ambient temperature	T _A	-30		85	°C
Power supply voltage	V _{DD}	2.4	3.0	3.6	V
Supply voltage accuracy, V _{DD} total error including transients		-3		+3	%
LED supply voltage	V _{LEDA}	3.0		4.5	V

Operating Characteristics, V_{DD} = 3 V, T_A = 25 °C (unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
IDD supply current ^[1]	I _{DD}		200	250	μA	Active ALS state PON = AEN = 1, PEN = 0
			790			Proximity, LDR pulse ON, PPulse = 8 (I _{LDR} not included)
			790			Gesture, LDR pulse ON, GPulse = 8 (I _{LDR} not included)
			38			Wait state PON = 1, AEN = PEN = 0
			1.0	10.0		Sleep state ^[2]
V _{OL} INT, SDA output low voltage	V _{OL}	0		0.4	V	3 mA sink current
I _{LEAK} leakage current, SDA, SCL, INT pins	I _{LEAK}	-5		5	μA	
I _{LEAK} leakage current, LDR P\pin	I _{LEAK}	-10		10	μA	
SCL, SDA input high voltage, V _{IH}	V _{IH}	1.26		V _{DD}	V	
SCL, SDA input low voltage, V _{IL}	V _{IL}			0.54	V	

Notes

- Values are shown at the V_{DD} pin and do not include current through the IR LED.
- Sleep state occurs when PON = 0 and I²C bus is idle. If Sleep state has been entered as the result of operational flow, SAI = 1, PON will be high.

Optical Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $A_{GAIN} = 16\times$, $AEN = 1$ (unless otherwise noted)

Parameter	Red Channel		Green Channel		Blue Channel		Units	Test Conditions
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Irradiance responsivity ^[1]	0	15	10	42	57	100	%	$\lambda_D = 465\text{ nm}$ ^[2]
	4	25	54	85	10	45		$\lambda_D = 525\text{ nm}$ ^[3]
	64	120	0	14	3	29		$\lambda_D = 625\text{ nm}$ ^[4]

Notes:

1. The percentage shown represents the ratio of the respective red, green, or blue channel value to the clear channel value.
2. The 465 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength $\lambda_D = 465\text{ nm}$, spectral halfwidth $\Delta\lambda_{1/2} = 22\text{ nm}$.
3. The 525 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength $\lambda_D = 525\text{ nm}$, spectral halfwidth $\Delta\lambda_{1/2} = 35\text{ nm}$.
4. The 625 nm input irradiance is supplied by a AlInGaP light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength $\lambda_D = 625\text{ nm}$, spectral halfwidth $\Delta\lambda_{1/2} = 15\text{ nm}$.

RGBC Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $A_{GAIN} = 16\times$, $AEN = 1$ (unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
Dark ALS count value		0	3	counts	$E_e = 0$, $A_{GAIN} = 64\times$, $ATIME = 0\times DB$ (100 ms)
ADC integration time step size		2.78		ms	$ATIME = 0\times FF$
ADC number of integration steps	1		256	steps	
Full scale ADC counts per step			1025	counts	
Full scale ADC count value			65535	counts	$ATIME = 0\times C0$ (175 ms)
Gain scaling, relative to $1\times$ gain setting	3.6	4	4.4		$4\times$
	14.4	16	17.6		$16\times$
	57.6	64	70.4		$64\times$
Clear channel irradiance responsivity	18.88	23.60	28.32	counts/ $(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$	Neutral white LED, $\lambda = 560\text{ nm}$

Proximity Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $PEN = 1$ (unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
ADC conversion time step size		696.6		μs	
ADC number of integration steps		1		steps	
Full scale ADC counts			255	counts	
LED pulse count ^[1]	1		64	pulses	
LED pulse width – LED on time ^[2]		4		μs	$P_{PLEN} = 0$
		8			$P_{PLEN} = 1$
		16			$P_{PLEN} = 2$
		32			$P_{PLEN} = 3$
LED drive current ^[3]		100		mA	$L_{DRIVE} = 0$
		50			$L_{DRIVE} = 1$
		25			$L_{DRIVE} = 2$
		12.5			$L_{DRIVE} = 3$
LED boost ^[3]		100		%	$LED_BOOST = 0$
		150			$LED_BOOST = 1$
		200			$LED_BOOST = 2$
		300			$LED_BOOST = 3$
Proximity ADC count value, no object ^[4]		10	25	counts	$V_{LEDA} = 3\text{ V}$, $L_{DRIVE} = 100\text{ mA}$, $PPULSE = 8$, $PGAIN = 4\times$, $P_{PLEN} = 8\text{ }\mu\text{s}$, $LED_BOOST = 100\%$, open view (no glass) and no reflective object above the module.

Table continued on next page...

Proximity Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, PEN = 1 (unless otherwise noted) (continued)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
Proximity ADC count value, 100 mm distance object [5, 6]	96	120	144	counts	Reflecting object – 73 mm × 83 mm Kodak 90% grey card, 100 mm distance, $V_{LEDA} = 3\text{ V}$, LDRIVE = 100 mA, PPULSE = 8, PGAIN = 4x, PPLEN = 8 μs , LED_BOOST = 100%, open view (no glass) above the module.

Notes:

1. This parameter is ensured by design and characterization and is not 100% tested. 8 pulses are the recommended driving conditions. For other driving conditions, contact Avago Field Sales.
2. Value may be as much as 1.36 μs longer than specified.
3. Value is factory-adjusted to meet the Proximity count specification. Considerable variation (relative to the typical value) is possible after adjustment. LED BOOST increases current setting (as defined by LDRIVE or GLDRIVE). For example, if LDRIVE = 0 and LED BOOST = 100%, LDR current is 100mA.
4. Proximity offset value varies with power supply characteristics and noise.
5. ILEDA is factory calibrated to achieve this specification. Offset and crosstalk directly sum with this value and is system dependent.
6. No glass or aperture above the module. Tested value is the average of 5 consecutive readings.

Gesture Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, GEN = 1 (unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
ADC conversion time step size [1]		1.39		ms	
LED pulse count [2]	1		64	pulses	
LED pulse width – LED on time [3]		4		μs	GPLEN = 0
		8			GPLEN = 1
		12			GPLEN = 2
		16			GPLEN = 3
LED drive current [4]		100		mA	GLDRIVE = 0
		50			GLDRIVE = 1
		25			GLDRIVE = 2
		12.5			GLDRIVE = 3
LED boost [4]		100		%	LED_BOOST = 0
		150			LED_BOOST = 1
		200			LED_BOOST = 2 [5]
		300			LED_BOOST = 3 [5]
Gesture ADC count value, no object [6]		10	25	counts	$V_{LEDA} = 3\text{ V}$, GLDRIVE = 100 mA, GPULSE = 8, GGAIN = 4x, GPLEN = 8 μs , LED_BOOST = 100%, open view (no glass) and no reflective object above the module, sum of UP & DOWN photodiodes.
Gesture ADC count value [7, 8]	96	120	144	counts	Reflecting object – 73 mm × 83 mm Kodak 90% grey card, 100 mm distance, $V_{LEDA} = 3\text{ V}$, GLDRIVE = 100 mA, GPULSE = 8, GGAIN = 4x, GPLEN = 8 μs , LED_BOOST = 100%, open view (no glass) above the module, sum of UP & DOWN photodiodes.
Gesture wait step size		2.78		ms	GTIME = 0x01

Notes:

1. Each U/D or R/L pair requires a conversion time of 696.6 μs . For all four directions the conversion requires twice as much time.
2. This parameter ensured by design and characterization and is not 100% tested. 8 pulses are the recommended driving conditions. For other driving conditions, contact Avago Field Sales.
3. Value may be as much as 1.36 μs longer than specified.
4. Value is factory-adjusted to meet the Gesture count specification. Considerable variation (relative to the typical value) is possible after adjustment.
5. When operating at these LED drive conditions, it is recommended to separate the VDD and VLEDA supplies.
6. Gesture offset value varies with power supply characteristics and noise.
7. ILEDA is factory calibrated to achieve this specification. Offset and crosstalk directly sum with this value and is system dependent.
8. No glass or aperture above the module. Tested value is the average of 5 consecutive readings.

IR LED Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
Peak Wavelength, λ_p		950		nm	$I_F = 20\text{ mA}$
Spectrum Width, Half Power, $\Delta\lambda$		30		nm	$I_F = 20\text{ mA}$
Optical Rise Time, T_R		20		ns	$I_F = 100\text{ mA}$
Optical Fall Time, T_F		20		ns	$I_F = 100\text{ mA}$

Wait Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $WEN = 1$ (unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
Wait Step Size		2.78		ms	$W_{TIME} = 0 \times FF$

AC Electrical Characteristics, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted) *

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit
Clock frequency (I ² C-bus only)	f_{SCL}	0	400	kHz
Bus free time between a STOP and START condition	t_{BUF}	1.3	–	μs
Hold time (repeated) START condition. After this period, the first clock pulse is generated	$t_{HD;STA}$	0.6	–	μs
Set-up time for a repeated START condition	$t_{SU;STA}$	0.6	–	μs
Set-up time for STOP condition	$t_{SU;STO}$	0.6	–	μs
Data hold time	$t_{HD;DAT}$	30	–	ns
Data set-up time	$t_{SU;DAT}$	100	–	ns
LOW period of the SCL clock	t_{LOW}	1.3	–	μs
HIGH period of the SCL clock	t_{HIGH}	0.6	–	μs
Clock/data fall time	t_f	20	300	ns
Clock/data rise time	t_r	20	300	ns
Input pin capacitance	C_i	–	10	pF

* Specified by design and characterization; not production tested.

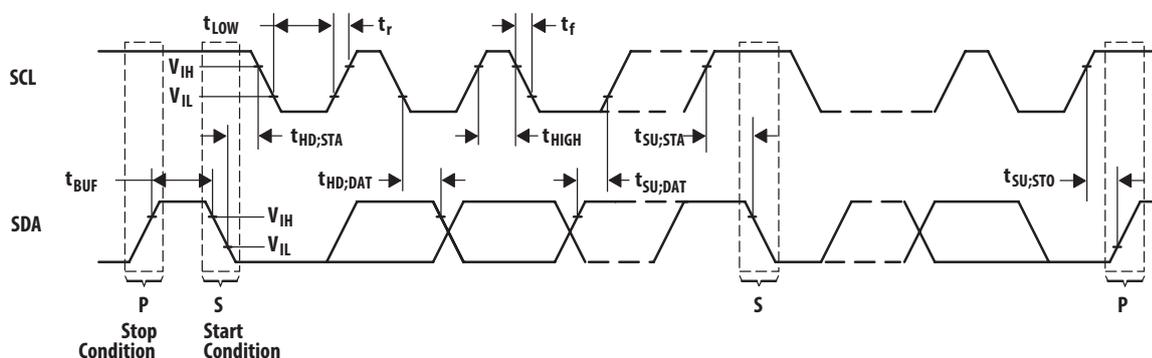


Figure 1. Timing Diagrams

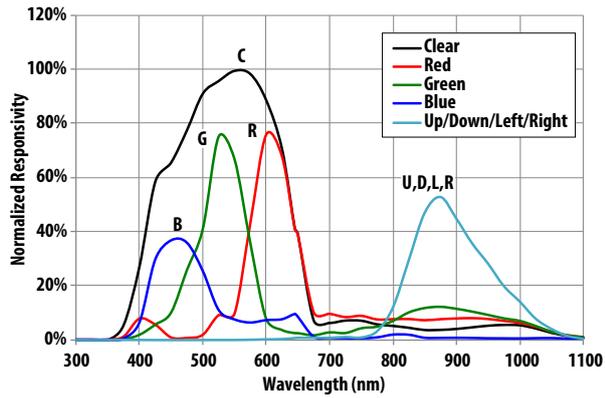


Figure 2. Spectral Response

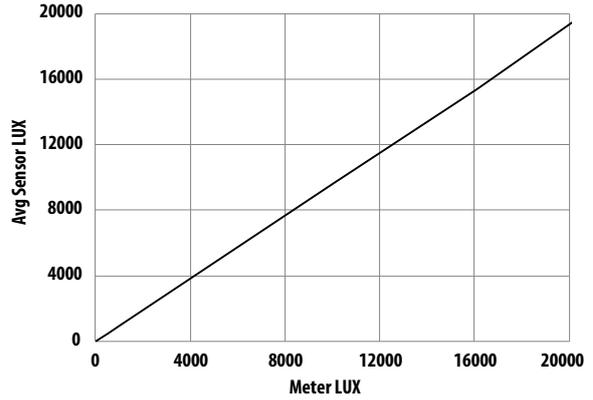


Figure 3a. ALS Sensor LUX vs Meter LUX using White Light

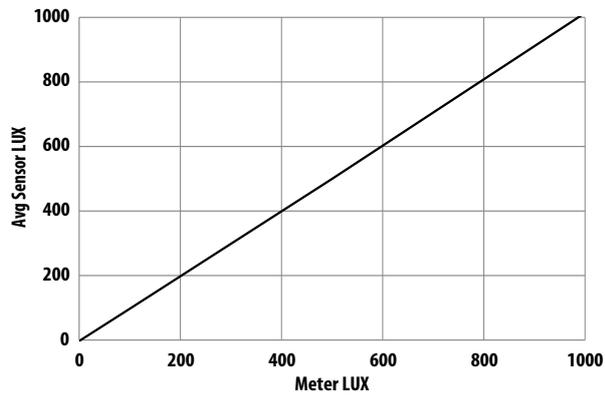


Figure 3c. ALS Sensor LUX vs Meter LUX using White Light

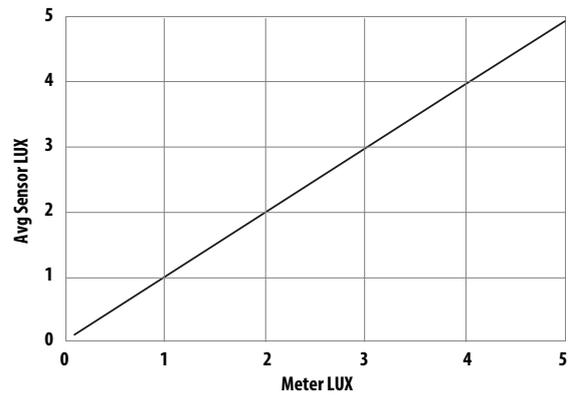


Figure 3b. ALS Sensor LUX vs Meter LUX using Incandescent Light

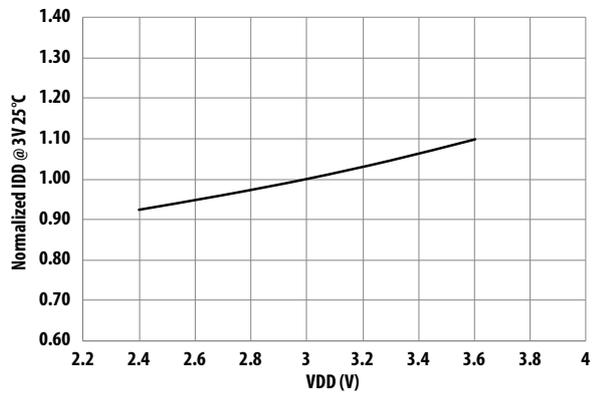


Figure 4a. Normalized IDD vs. VDD

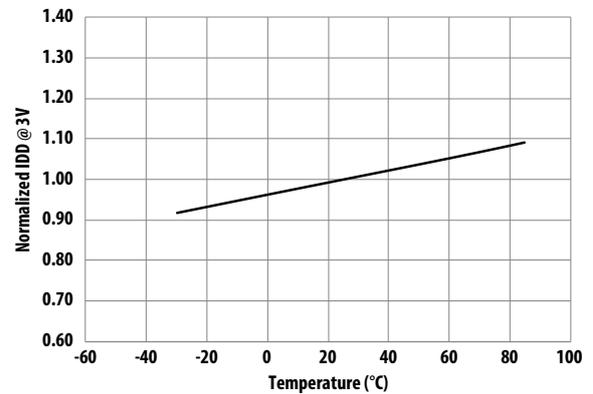


Figure 4b. Normalized IDD vs. Temperature

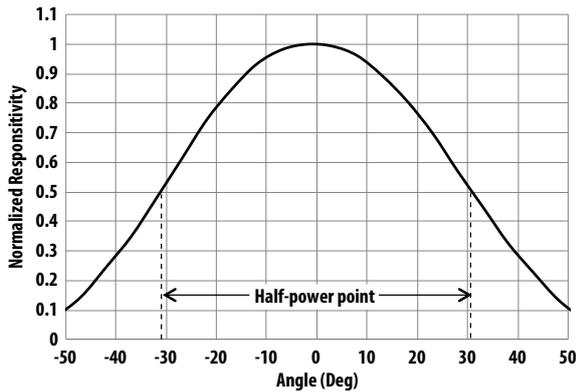


Figure 5a. Normalized PD Responsivity vs. Angular Displacement

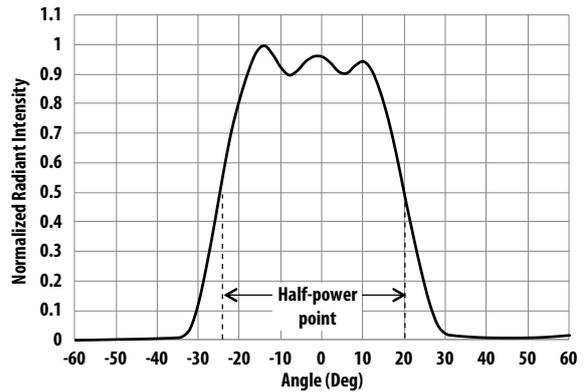


Figure 5b. Normalized LED Angular Emitting Profile

I²C-bus Protocol

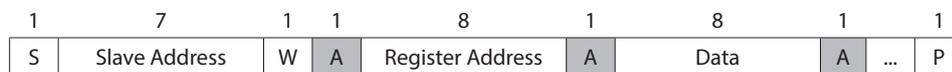
Interface and control are accomplished through an I²C-bus serial compatible interface (standard or fast mode) to a set of registers that provide access to device control functions and output data. The devices support the 7-bit I²C-bus addressing protocol.

The device supports a single slave address of 0x39 Hex using 7-bit addressing protocol. (Contact factory for other addressing options.)

- A Acknowledge (0)
- N Not Acknowledged (1)
- P Stop Condition
- R Read (1)
- S Start Condition
- Sr Repeated Start Condition
- W Write (0)
- ... Continuation of protocol
- Master-to-Slave
- Slave-to-Master

The I²C-bus standard provides for three types of bus transaction: read, write, and a combined protocol. During a write operation, the first byte written is a command byte followed by data. In a combined protocol, the first byte written is the command byte followed by reading a series of bytes. If a read command is issued, the register address from the previous command will be used for data access. Likewise, if the MSB of the command is not set, the device will write a series of bytes at the address stored in the last valid command with a register address. The command byte contains either control information or a 5-bit register address. The control commands can also be used to clear interrupts.

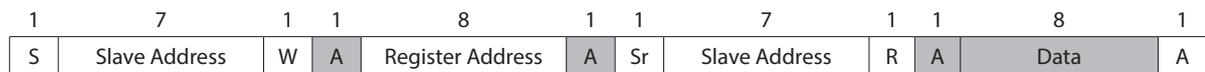
The I²C-bus protocol was developed by Philips (now NXP). For a complete description of the I²C-bus protocol, please review the NXP I²C-bus design specification at <http://www.i2c-bus.org/references/>.



I²C-bus Write Protocol



I²C-bus Read Protocol



I²C-bus Read Protocol - Combined Format

I²C-bus Protocol

APÊNDICE A – Código Matlab Transmissor - LED Branco e RGB

```
1  %%Objetivo: Coletar dados da serial e salvar em arquivo, vetor ou
2  % matriz para posterior comparação com a sequência recebida
3
4  close all
5  clear
6  clc
7
8  arduino = serial('/dev/cu.usbserial-120', 'BaudRate', 9600);
9  arduino.OutputBufferSize = 64;
10
11  fopen(arduino);
12
13  x = [];
14  while (1)
15      for i=1:300
16          x(i) = fscanf(arduino, "%i");
17      end
18      break
19  end
20
21  fclose(arduino);
22  [linha,coluna] = size(x);
23  numero_bits = linha*coluna;
24  tamanho_pacote = 10;
25  qtd_pacotes = numero_bits/tamanho_pacote;
26  matriz = ones(qtd_pacotes-1,tamanho_pacote);
27  for i = 2:qtd_pacotes
28      a = x(1+(tamanho_pacote*(i-1)):tamanho_pacote*i);
29      matriz(i,:) = a;
30  end
31
32
33  save('entrada.mat', "x");
34
35
36
37
38
```

APÊNDICE B – Código Matlab Receptor - APDS-9960

```
1   close all
2   clear
3   clc
4
5   arduino = serial('/dev/cu.usbserial-130','BaudRate',9600);
6   arduino.OutputBufferSize = 64;
7
8   load("entrada.mat");
9
10  fopen(arduino);
11
12  y = [];
13  while (1)
14      for i=1:300
15          y(i) = fscanf(arduino,"%i");
16      end
17      break
18  end
19
20
21  fclose(arduino);
22  [linha,coluna] = size(y);
23  numero_bits = linha*coluna;
24  tamanho_pacote = 10;
25  qtd_pacotes = numero_bits/tamanho_pacote;
26  matriz2 = ones(qtd_pacotes,tamanho_pacote);
27  for i = 1:qtd_pacotes
28      b = y(1+(tamanho_pacote*(i-1)):tamanho_pacote*i);
29      matriz2(i,:) = b;
30  end
31
32  %%cálculo da BER
33
34  [ne,berr] = biterr(x,y);
35  final = ["ERRO= ",num2str(ne)," ; BER= ", num2str(berr*100),"%"];
36  disp(final);
37
```

APÊNDICE C – Código Matlab Receptor Tablet - LED Branco

```
1  matriz = xlsread("120cm_ook_luz.xlsx");
2  vetor_aux = matriz(:,2);
3  vetor = vetor_aux(1:300);
4  media = mean(vetor);
5  maximo = max(vetor);
6  minimo = min(vetor);
7
8  vetor2 = [];
9  for i = 1:length(vetor)
10     if vetor(i) > media
11         vetor2(i) = 1;
12     else
13         vetor2(i) = 0;
14     end
15 end
16
17 %cálculo da BER
18
19 [ne,berr] = biterr(x,vetor2);
20 final = ["ERRO= ",num2str(ne)," ; BER= ", num2str(berr*100),"%"];
21 disp(final);
22
23
24
```

APÊNDICE D – Código Matlab Receptor Tablet - LED RGB

```

1  entrada = xlsread("60cm_csk_comluz.xlsx"); %%varia de acordo com seq
2  % de interesse
3  vetor_aux = entrada(:,2);
4  vetor = vetor_aux(1:300);
5  [lin,col] = size(vetor);
6  numero_bits = lin*col;
7  bits_por_linha = 10;
8  qtd_linhas = numero_bits/bits_por_linha;
9  matriz2 = ones(qtd_linhas,bits_por_linha);
10 for i = 1:qtd_linhas
11     A = vetor(1+(bits_por_linha*(i-1)):bits_por_linha*i);
12     matriz2(i,:) = A;
13 end
14
15 media = mean(matriz2,2);
16
17 for i=1:qtd_linhas
18     vetor_aux2 = matriz2(i,:);
19 end
20
21 tamanho = length(vetor_aux2);
22 tamanho2 = length(media);
23 matriz_vazia = ones(tamanho2,tamanho);
24 for j = 1:tamanho
25     for z = 1:tamanho2
26         vetor_aux2 = matriz2(z,:);
27         if vetor_aux2(j)>media(z)
28             matriz_vazia(z,j) = 1;
29         else
30             matriz_vazia(z,j) = 0;
31         end
32     end
33 end
34
35 B = matriz_vazia';
36 vetor_final = reshape(B,1,[]);
37 %cálculo da BER
38
39 [ne,berr] = biterr(x,vetor_final);
40 final = ["ERRO= ",num2str(ne)," ; BER= ", num2str(berr*100),"%"];
41 disp(final);

```

APÊNDICE E – Código Arduino Transmissor - LED Branco

```

#define tamanho 290
#define tamanho2 300 //tamanho + 10 bits do cabeçalho
//int delay_time = 1000;
int pin = 9;
int entrada[tamanho];
int cabeçalho[10] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1};
int aux[tamanho2];
int i = 0;
int j = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  //Define a porta do led como saída-
  pinMode(9, OUTPUT);

  for (i = 0; i < tamanho; i++) {
    entrada[i] = random(2);
  }
  //int entrada[tamanho] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

  memcpy( aux, cabeçalho, sizeof(cabeçalho) );
  memcpy( aux + (sizeof(cabeçalho) / sizeof(int)), entrada, sizeof(entrada) );
}

void loop()
{

  while (j < tamanho2) {

    Serial.println("posição:" + (String)j + " bit:" + (String)aux[j]);
    if (aux[j] == 1) {
      digitalWrite(pin, HIGH);
      //Serial.println("1");
      delay(3);
    }
    if (aux[j] == 0)
      digitalWrite(pin, LOW);
    //Serial.println("0");
    delay(3);
    j++;
  }

  digitalWrite(pin, LOW);
}

```

APÊNDICE F – Código Arduino Transmissor - LED RGB

```

int R = 9;
int G = 10;
int B = 11;
int R_cab[10] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1};
int R_seq[10] = {1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0};
int G_seq[10] = {1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1};
int B_seq[10] = {1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0};
int j = 0;
int z = 0;
int n = 10;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(R, OUTPUT);
  pinMode(G, OUTPUT);
  pinMode(B, OUTPUT);
}

void loop() {

  for (j = 0; j < n; j++) { //for para repetir a sequencia das 3 cores n vezes.
    //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
    for (z = 0; z < 10; z++) { //for para percorrer bit a bit de R_seq
      Serial.println(R_cab[z]);
      if (R_cab[z] == 1) {
        digitalWrite(R, LOW);
        digitalWrite(G, LOW);
        digitalWrite(B, LOW);
        delay(100);
      }
      else {

        digitalWrite(R, HIGH);
        digitalWrite(G, HIGH);
        digitalWrite(B, HIGH);
        delay(100);
      }
    }

    ////////////////////////////////////////////////////////////////////VERMELHO////////////////////////////////////////////////////////////////
    for (z = 0; z < 10; z++) { //for para percorrer bit a bit de R_seq
      Serial.println(R_seq[z]);
      if (R_seq[z] == 1) {
        digitalWrite(R, LOW);
        digitalWrite(G, HIGH);
        digitalWrite(B, HIGH);
        delay(100);
      }
      else {

        digitalWrite(R, HIGH);
        digitalWrite(G, HIGH);
        digitalWrite(B, HIGH);
        delay(100);
      }
    }

    ////////////////////////////////////////////////////////////////////VERDE////////////////////////////////////////////////////////////////
    for (z = 0; z < 10; z++) { //for para percorrer bit a bit de G_seq
      Serial.println(G_seq[z]);
      if (G_seq[z] == 1) {
        digitalWrite(R, HIGH);
        digitalWrite(G, LOW);

```

```

    digitalWrite(B, HIGH);
    delay(100);

}
else {
    digitalWrite(R, HIGH);
    digitalWrite(G, HIGH);
    digitalWrite(B, HIGH);
    delay(100);
}

}
////////////////////////////////////////AZUL////////////////////////////////////////
for (z = 0; z < 10; z++) { //for para percorrer bit a bit de B_seq
    Serial.println(B_seq[z]);
    if (B_seq[z] == 1) {
        digitalWrite(R, HIGH);
        digitalWrite(G, HIGH);
        digitalWrite(B, LOW);
        delay(100);

    }
    else {
        digitalWrite(R, HIGH);
        digitalWrite(G, HIGH);
        digitalWrite(B, HIGH);
        delay(100);

    }

}

}
digitalWrite(R, HIGH);
digitalWrite(G, HIGH);
digitalWrite(B, HIGH);
exit(0);
}

```

APÊNDICE G – Código Arduino Receptor - LED Branco

```

#include <Wire.h>
#include <SparkFun_APDS9960.h>

SparkFun_APDS9960 apds = SparkFun_APDS9960();
uint16_t ambient_light = 0;
uint16_t red_light = 0;
uint16_t green_light = 0;
uint16_t blue_light = 0;
int contador;
int i;
int tamanho = 300;
float limiar = 13;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  if ( apds.init() ) {

    Serial.println(F("APDS-9960: Inicialização completa!"));
  } else {

    Serial.println(F("APDS-9960: Algo deu errado durante a inicialização!"));
  }

  if ( apds.enableLightSensor(false) ) {
    Serial.println(F("O sensor de luz está funcionando!"));
  } else {
    Serial.println(F("Algo deu errado durante a unidade do sensor de luz!"));
  }

  // Aguarde a inicialização e calibração terminar
  delay(5);
}

void loop() {
  //Serial.println(ambient_light);
  if ( !apds.readAmbientLight(ambient_light) ||
        !apds.readRedLight(red_light) ||
        !apds.readGreenLight(green_light) ||
        !apds.readBlueLight(blue_light) ) {
    Serial.println("Erro ao ler os leitores de luminosidade");
  } else {
    if (ambient_light > limiar && contador < 10) {
      delay(1999);

      for (i = 0; i < 10; i++) {
        if (ambient_light > limiar) {
          //Serial.println("1");
          contador++;
          delay(delay_leitura);
        }
        else {
          contador = 0;
        }
      }

      if (contador == 10) {

        for (i = 0; i < 300; i++) {
          delay(1);
          apds.readAmbientLight(ambient_light);
          if (ambient_light > limiar) {
            Serial.println("1");
          }
        }
        else {

```

```
Serial.println("0");
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

APÊNDICE H – Código Arduino Receptor - LED RGB

```

#include <Wire.h>
#include <SparkFun_APDS9960.h>

SparkFun_APDS9960 apds = SparkFun_APDS9960();
uint16_t ambient_light = 0;
uint16_t red_light = 0;
uint16_t green_light = 0;
uint16_t blue_light = 0;
int contador;
int i;
int tamanho = 300;
float limiar = 120;
float limiar_red = 93;
float limiar_blue = 93;
float limiar_green = 70;
int delay_leitura = 5;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  if ( apds.init() ) {

    Serial.println(F("APDS-9960: Inicialização completa!"));
  } else {

    Serial.println(F("APDS-9960: Algo deu errado durante a inicialização!"));
  }

  if ( apds.enableLightSensor(false) ) {
    Serial.println(F("O sensor de luz está funcionando!"));
  } else {
    Serial.println(F("Algo deu errado durante a unidade do sensor de luz!"));
  }
  delay(5);
}

void loop() {

  if ( !apds.readAmbientLight(ambient_light) ||
        !apds.readRedLight(red_light) ||
        !apds.readGreenLight(green_light) ||
        !apds.readBlueLight(blue_light) ) {
    Serial.println("Erro ao ler os leitura dos valores de luminosidade");
  } else {

    if (ambient_light > limiar && contador < 10) {
      delay(98);

      for (i = 0; i < 10; i++) {
        if (ambient_light > limiar) {
          contador++;
          delay(delay_leitura);
        }
      }
      else {
        contador = 0;
      }
    }

    if (contador == 10) {

      for (i = 0; i < 10; i++) {
        delay(100);
        apds.readAmbientLight(red_light);
        if (red_light > limiar_red) {
          Serial.println("1");
        }
      }
    }
  }
}

```

```
    }
    else {
        Serial.println("0");
    }
}
for (i = 0; i < 10; i++) {
    delay(100);
    apds.readAmbientLight(green_light);
    if (green_light > limiar_green) {
        Serial.println("1");
    }
    else {
        Serial.println("0");
    }
}
for (i = 0; i < 10; i++) {
    delay(100);
    apds.readAmbientLight(blue_light);
    if (blue_light > limiar_blue) {
        Serial.println("1");
    }
    else {
        Serial.println("0");
    }
}
}
}
}
```

APÊNDICE I – Trabalho Publicado Referente ao Tema - I

Projeto de Protótipo Educacional para LiFi usando Arduíno

Amanda Rühlemann Barreira
PPG em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense
24210-240 Niterói, RJ
aruhlemann@id.uff.br

Hypolito José Kalinowski
Dept. Engenharia de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense
24210-240 Niterói, RJ
<https://orcid.org/0000-0003-1226-4903>

Resumo—*Light Fidelity (LiFi)* é um tipo de solução tecnológica que promove a transferência de informações através da luz modulada. Com o uso adequado de dispositivos para executar o processo de transmissão, tipicamente LEDs (Diodo Emissor de Luz) e receptores que tenham boa sensibilidade ao LED utilizado, é possível promover comunicação confiável e quando desejado, iluminação de maneira simultânea. Este artigo apresenta as principais características dos sistemas LiFi, bem como, apresenta um protótipo simplificado para uso educacional com auxílio da ferramenta Arduíno.

Index Terms—LiFi, LED, Arduíno

I. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a crescente demanda por uso de dados móveis, torna-se necessário cada vez mais o estudo de mecanismos alternativos que possam suprir esse mercado em ascensão. Nesse contexto, o uso de sistemas que façam uso do espectro visível ou infravermelho próximo, espectro este não licenciado, tornam-se relevantes no cenário atual.

O espectro de radiofrequência (RF) abaixo dos 10 GHz vêm se mostrado insuficiente para atender ao crescente número de aplicações do cotidiano, logo uma solução encontrada foi a de migrar para frequências mais elevadas [1], obtendo assim, maior largura de banda em comparação à faixa de rádio, cerca de 10.000 vezes maior [2], o que as conferem possibilidades de taxas de transmissão mais elevadas.

Harald Haas, em 2011, cunhou pela primeira vez um tipo específico de comunicação utilizando espectro visível, denominado LiFi [3] e demonstrou publicamente seu protótipo. Na ocasião, Haas realizou a transmissão de um vídeo com o uso de LEDs para transmissão de dados. Periodicamente, ele bloqueava o meio entre o transmissor e o receptor, onde optou por um painel solar e, nesses momentos o vídeo era interrompido, conforme se esperava.

Seguindo aquela tendência, este artigo descreverá, para fins educacionais, as etapas e os componentes necessários para a confecção de um sistema protótipo simplificado de comunicação LiFi, visando fortalecer os conhecimentos de base transmitidos a estudantes de telecomunicações. Ressalte-se que essas novas tecnologias em geral têm pouca cobertura laboratorial no nível de graduação e o desenvolvimento de

protótipos de baixo custo, facilmente implementáveis com componentes disponíveis no comércio local, é uma atividade atrativa, explorada anteriormente, p.ex., por Luna *et al.* [4].

O restante do artigo será organizado da seguinte maneira: evolução dos trabalhos realizados na área, além das principais características intrínsecas à tecnologia LiFi serão detalhadas na seção 2. A seção 3 se encarregará da elaboração do protótipo, sendo transmissor e receptor. Ainda na seção 3, serão discriminados motivos aos quais se optou por determinados componentes em detrimento de outros. Por fim, a seção 4 trará a conclusão e direções para futuros aprimoramentos deste documento.

II. TECNOLOGIA LiFi

LiFi é considerado um tipo de tecnologia de comunicação via luz visível, VLC (*Visible Light Communication*) – embora tecnicamente possa ser facilmente estendida para a região espectral do infravermelho próximo – trazendo consigo muitas das características da luz visível. Camadas de complexidade foram adicionadas ao LiFi, agregado novas possibilidades e eliminando algumas limitações do VLC. Dessa forma, o LiFi é considerado um sistema de comunicação bidirecional completo, podendo ser ponto a multiponto ou multiponto a ponto [1]. Além do mais, suporta multiusuários e suas respectivas mobilidades [2].

A. Evolução da Tecnologia

No início dos anos 2000, as lâmpadas de LED passaram a ser consideradas para aplicações envolvendo VLC; em 2003 foi realizado um experimento com uma lâmpada de LED branca em ambiente *indoor*, atingindo taxas de 400 Mbps [5]. Esse trabalho de Tanaka *et al.*, serviu de inspiração para trabalhos posteriores, onde foram acrescentadas algumas adaptações e inovações, variando técnicas de modulação, tipos de lâmpadas LED etc., com o intuito de atingir taxas de transmissão mais elevadas.

Ao longo dos anos, novos projetos foram realizados e taxas da ordem de 1 Gb/s foram atingidas com uso de chips com tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e *driver* com capacidade para 4 canais [9].

Em 2018, a Philips anunciou a *Philips Lighting*, sendo a primeira companhia global a comercializar luminárias com a tecnologia LiFi. A promessa da empresa foi de uma conexão estável e rápida com velocidades que chegariam a 30 Mbps sem comprometer a iluminação. O usuário poderia transmitir vários vídeos com qualidade HD (*High Definition*) enquanto ainda realizaria videochamadas [10].

Atualmente o mercado conta com dispositivos comercialmente disponíveis, compatíveis com diversos sistemas operacionais, de tamanhos reduzidos e de taxas de transmissão bastante atrativas. Além do mais, muito se discute sobre a implementação do VLC em redes como o 5G, visto que a maioria do tráfego atual encontra-se em ambientes *indoor*, podendo assim, fazer uso da infraestrutura já existente.

B. Vantagens

As principais vantagens dos sistemas VLC quando comparadas às comunicações via RF são a grande disponibilidade de lâmpadas LED na iluminação pública, assim, grande parte da infraestrutura pode ser aproveitada para implementação da rede. Outras vantagens que merecem destaque são: segurança nos enlaces, visto que a luz é bloqueada por paredes opacas, alta largura de banda e possibilidade de reuso de frequências devido ao uso de células com dimensões bastante reduzidas quando comparadas às *femtocells* utilizadas em sistemas RF [6]. A título comparativo, a tabela I destaca as principais diferenças entre os sistemas de radiofrequência e os que fazem uso de VLC, a fim de evidenciar as vantagens mencionadas.

Tabela I
COMPARAÇÃO ENTRE RF E VLC. ADAPTADO DE [7]

	RF	VLC
Espectro	300 GHz	400 THz
Infraestrutura	Ponto de Acesso	Iluminação
Segurança	Baixa	Alta
Cobertura	Alta	Limitada
Complexidade do Sistema	Alta	Baixa
Interferência Eletromagnética	Sim	Não

C. Aplicações

Intimamente ligadas às vantagens dos sistemas LiFi estão suas aplicações. Considerando que, de maneira geral, cada ponto de iluminação é um potencial equipamento transmissor, suas aplicações estendem-se para cenários onde as radiofrequências não são recomendadas ou provocam efeitos de interferência. Dessa maneira, as tecnologias LiFi podem ser facilmente implementadas em algumas aplicações tais como: sistemas de trânsito – visto o crescimento da frota de automóveis com faróis de LED, bem como os semáforos e outdoors, permitindo aumento da conectividade; hospitais – pois em algumas unidades de tratamento crítico a interferência das ondas de rádio em equipamentos de controle e suporte de vida podem provocar falhas, ruído e leituras errôneas – sistemas operando com luz não gerariam este inconveniente; fins educacionais, conforme proposto pelo artigo – tendo em vista a possibilidade de obtenção de parâmetros importantes

trabalhados em sala de aula, como: taxa de transmissão, BER (*Bit Error Rate*), bem como a medição do perfil de intensidade luminosa na opto-célula; dentre outras.

D. Arquitetura e Princípio de Funcionamento

A arquitetura de um sistema LiFi consiste de três elementos fundamentais: transmissor, receptor e o canal óptico. A figura 2 representa o princípio de funcionamento da tecnologia, que consiste em um fonte de luz (LED) que emite pulsos de luminosos (imperceptíveis aos olhos humanos, seja pela frequência de modulação, seja pela região espectral fora da faixa de maior sensibilidade). Os dados de entrada são convertidos para formato binário e através do *driver*, a corrente que chega ao LED pode ser manipulada, influenciando a intensidade de iluminação desejada. Essa codificação dos dados em luz seguem o princípio de transmissão binária, onde o bit “1” representa o estado de LED ligado e bit “0” o estado desligado. Uma vez que os pulsos percorrem o canal ótico e atingem os receptores, eles são filtrados e amplificados para minimizar a interferência e ruídos provenientes do canal ou de fontes externas. Posteriormente, ocorre o processo inverso à modulação, onde a informação luminosa é convertida em corrente, possibilitando assim a recuperação da informação [8].

Existe grande esforço em projetos de pesquisa com o objetivo de integrar os *smartphones* às redes VLC. Tendo em vista a existência de uma variedade de sensores embutidos nesses equipamentos, incluindo o de luminosidade, é viável fazer uso de dispositivos como a câmera desempenhando o papel de fotodetector e o LED flash fotográfico como transmissor, p.ex., sem necessidade de *hardware* adicional [11]. Controle a nível de pixels poderia converter a tela em um eficiente transmissor CSK (*Color Shift Keying*), contribuindo para taxas elevadas de comunicação.

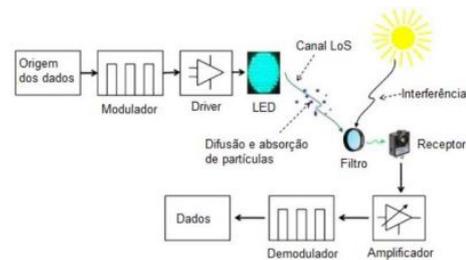


Figura 1. Arquitetura LiFi. Adaptado de [8]

E. Técnicas de Modulação

As técnicas de modulação são elementos fundamentais em um projeto LiFi. Algumas das técnicas já utilizadas nas comunicações móveis são utilizadas aqui, necessitando apenas de algumas modificações para que sejam levados em conta os requisitos de iluminação. As técnicas mais comumente utilizadas são descritas abaixo:

1) *OOK – On-Off Keying*: Essa técnica é considerada a mais conhecida e de mais fácil implementação, fornecendo um bom equilíbrio entre complexidade e performance [1]. Seu princípio de funcionamento consiste no deslocamento da amplitude, onde na presença de uma portadora (estado do LED ligado) a representação é dada pelo bit “1” e, na ausência de portadora (estado de LED desligado), a representação ocorre com o bit “0”.

O processo de acender e apagar do LED precisa ser imperceptível aos olhos humanos, sendo assim, alguns ajustes precisam ser realizados nesta modulação para atender a este fato. Nesse contexto, algumas medidas foram propostas na recomendação IEEE 802.15.7 envolvendo a redefinição dos níveis de ON/OFF e inserção de períodos de compensação [13]. Na primeira delas, os bits “0” e “1” podem representar outros níveis de intensidade luminosa e não somente 0% e 100%, respectivamente. Essa técnica é capaz de manter a mesma taxa de dados, porém o alcance diminuiria em níveis baixos de escurecimento [1]. Já a segunda técnica consiste na inserção de períodos de compensação no sinal modulado, dependendo do nível de escurecimento desejado [1].

2) *VPPM – Variable Pulse Position Modulation*: A modulação VPPM é a combinação das técnicas *PPM – Pulse Position Modulation* e *PWM – Pulse Width Modulation* [13], onde cada uma delas agrega de maneira diferente. A PPM consiste em dividir a duração do símbolo em *slots* de mesma duração e um pulso é transmitido em um desses slots, sendo que sua posição determina seu valor, ou seja, o “0” é representado por um pulso positivo no início do período seguido de pulso negativo e o “1” é representado por um pulso negativo no início do período seguido de um pulso positivo. Já a PWM permite que o escurecimento seja ajustado de acordo com a largura do pulso, gerando uma relação diretamente proporcional entre largura do pulso e nível de intensidade luminosa. Então, de maneira similar ao OOK, os bits “1” e “0” podem representar quaisquer outros níveis de intensidade, não somente 100% e 0%, respectivamente.

3) *OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*: Aqui a informação a ser transmitida é dividida em subportadoras ortogonais entre si, onde em cada uma delas podem ser aplicadas técnicas de modulação diferentes, sendo *PSK – Phase Shift Keying* e *QAM – Quadrature Amplitude Modulation* algumas delas. Por se tratar de uma técnica com múltiplas portadoras, a OFDM, quando comparada às técnicas mencionadas anteriormente, oferece suporte à taxas de transmissão mais elevadas.

O sinal oriundo da modulação OFDM é por natureza bipolar e complexo. Sendo assim, para que seja possível aplicá-lo ao universo VLC, onde há presença de LEDs, são necessárias algumas adaptações para tornar esse sinal positivo e real. Diversas estratégias podem ser adotadas, sendo algumas delas a aplicação de uma polarização positiva de corrente contínua para geração de sinal unipolar, chamado *DCO-OFDM (DC biased optical OFDM)* [1]; como também a imposição de simetria Hermitiana para uso apenas das subportadoras ímpares, *ACO-OFDM (asymmetrically clipped optical OFDM)*, e as

pares zeradas para obtenção de sinal real [14].

No que diz respeito ao suporte ao escurecimento, foi proposto o *RPO-OFDM (Reverse polarity optical OFDM)*, onde ocorre uma combinação com a técnica PWM para alteração da largura do pulso [1].

4) *CSK – Color Shift Keying*: Esta técnica foi desenvolvida exclusivamente para atender as características da VLC, sendo necessário neste caso, o uso de LED RGB (*red blue green*) como emissor de luz. Seu princípio de funcionamento e sua implementação são mais complexos se comparados às técnicas anteriores, porém com o uso de maior número de LEDs, as possibilidades para modulação e detecção do sinal são ampliadas. Ela baseia-se no diagrama de cromaticidade CIE1931, onde existe uma tabela espectral relacionada, mostrada na tabela II, dividida em 7 bandas de comprimentos de onda, onde a origem RGB pode ser escolhida. Com o auxílio dessas ferramentas, é possível fazer uma correlação entre os dados binários de entrada e um par de coordenadas de cromaticidade (x,y). Nesse momento, com o uso de equações apropriadas, são determinadas as intensidades para as quais os LEDs precisam ser ajustados. Logo, os níveis de corrente do LED são determinados para ajustar a intensidade luminosa desejada, mantendo uma cor percebida média constante.

Tabela II
TABELA MODULAÇÃO CSK

Banda (nm)	Código	Centro	(x,y)
380-478	000	429	0.169, 0.007
478-540	001	509	0.011, 0.733
540-588	010	564	0.402, 0.597
588-633	011	611	0.669, 0.331
633-679	100	656	0.729, 0.271
679-726	101	703	0.734, 0.265
726-780	110	753	0.734, 0.265

III. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento do protótipo, optou-se pelo uso da ferramenta Arduino devido a suas características de fácil interfaceamento para o uso de diferentes sensores, facilidade e flexibilidade na implementação, ampla disponibilidade de componentes e custo acessível. Além disso, existe uma extensa comunidade de desenvolvedores com diversos tutoriais e fóruns, que podem ser encontrados em [15], facilitando a implementação. Os diagramas esquemáticos dos circuitos opto-eletrônicos desenvolvidos, são ilustrados conforme figura 2, sendo 2a o módulo transmissor e 2b o módulo receptor.

A. Transmissor

Conforme discutido na seção II-D, onde foi tratada da arquitetura de um sistema LiFi, o transmissor precisa estar apto a receber a informação de entrada oriunda de uma fonte de sinal (em trabalho futuro serão utilizados módulos em *Phyton* e *Matlab* no ambiente de um *smartphone*), realizar a conversão binária e enviar para o LED através de um circuito apropriado.

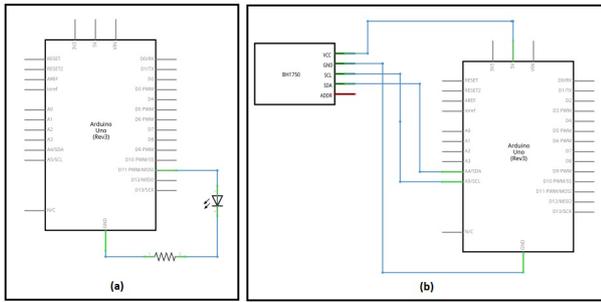


Figura 2. Diagrama dos circuitos do transmissor (a) e receptor (b) LiFi

Neste projeto optou-se pela escolha de um *hardware* simples, porém eficaz. Foi escolhido um LED branco de alto brilho em série com um resistor, que limita a corrente de excitação do LED. A figura 3 mostra uma foto da montagem do LED (no *protoboard*) já acoplado ao módulo Arduino.

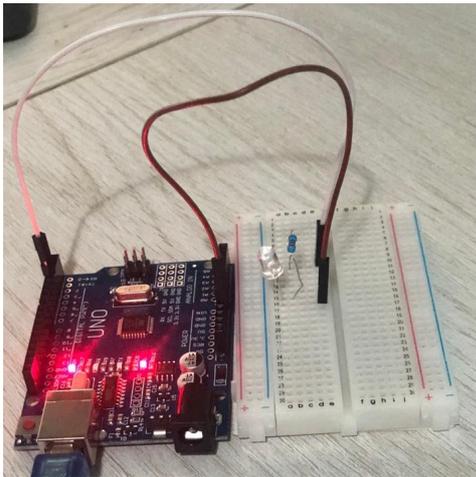


Figura 3. Fotografia da montagem do transmissor LiFi

As especificações simplificadas utilizadas são:

- LED branco alto brilho 5 mm
- Corrente máxima de 20 mA
- Tensão de alimentação na faixa 3 – 3,3 V
- Ângulo de abertura 25°
- Resistor de 220 Ω 15 MHz

No caso de operar com um conjunto de LEDs para realizar o transmissor, seria necessário ampliar o projeto de modo a produzir um *driver* capaz de amplificar a corrente para alimentar todo o conjunto. Para o atual protótipo simplificado não existe essa preocupação e a corrente do circuito é suficiente para acionar o LED.

Outra possibilidade, sem mudanças significativas no atual projeto, seria a substituição do LED branco por um modelo RGB. Essa mudança é relevante pois esse tipo de LED consiste em 3 elementos individuais – vermelho, verde e azul, permitindo a utilização de três canais de cores diferentes, cada

um com uma largura de banda aproximada de 15 MHz, com taxas de transmissão mais elevadas [12]. Essa opção permitiria estender a aplicação do protótipo para modulação CSK, fornecendo melhor embasamento aos estudantes utilizando tal protótipo.

B. Receptor

O conjunto receptor necessita atender alguns pré-requisitos de modo que a informação possa ser recuperada corretamente. Para elaboração do projeto, devido à disponibilidade de componentes no mercado local, foi escolhido um sensor de luminosidade BH1750, interface serial de comunicação I2C, com as seguintes características:

- Resposta espectral próxima ao olho humano
- Tempo de resposta de 16 ms
- Ampla faixa de captação (1 lux - 65535 lux)
- Amplificador operacional interno integrado

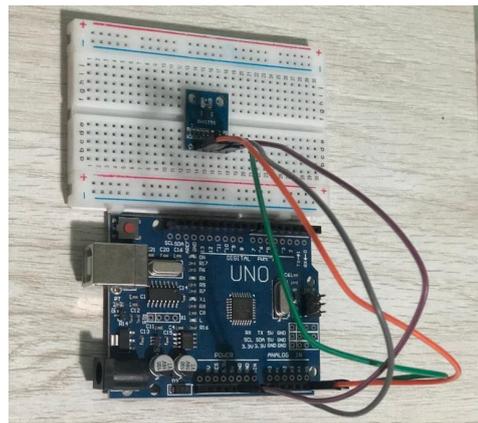


Figura 4. Fotografia do receptor LiFi conectado ao módulo de controle Arduino

Os atributos listados acima credenciam o sensor em questão, a desempenhar sem necessidade de qualquer outro componente, o papel de receptor ótico neste protótipo, embora não adaptado para implementação *full* LiFi pois seu tempo de resposta limita sua banda a algumas dezenas de Hz, comprometendo a taxa de transmissão. Sendo assim, como o intuito é atingir taxas mais elevadas, outros componentes serão utilizados na implementação final como, por exemplo, o fotodetector 3DU33 que já permitiria implementação de comunicações em baixa frequência (100 kpbs).

Uma vez detectados os valores de intensidade luminosa, o próximo passo seria a integração com módulos de *software* para estudar a definição de um limiar (*threshold*) para identificação dos bits “1” e “0” na cadeia de dados a fim de recuperar a informação enviada. Esse valor limiar pode ser obtido tanto através de medições de calibração ambiental quanto pela definição de uma média nos valores coletados. Porém, para uma calibração mais confiável, é sugerido que esse parâmetro seja obtido via testes, contribuindo para a formação dos estudantes envolvidos no processo. A figura 4 mostra a montagem do módulo proposto.

Mesmo com a limitação na taxa de transmissão, o sistema desenvolvido pode ser aplicado à instrução de propriedades básicas da transmissão LiFi, incluindo (com a duplicação dos elementos) a comunicação bidirecional. Uma outra aplicação é o estudo da distribuição do sinal através dos ambientes, que é normalmente prejudicada pela diferente refletividade de paredes, teto, chão e pela presença de mobiliário ou da movimentação de pessoas em regiões de alto tráfego. Em geral, no projeto de ambientes utilizando LiFi procura-se determinar a posição ótima dos emissores/receptores de modo a compensar o espalhamento causado pelos diversos obstáculos presentes. Nesse contexto, com a utilização dos módulos projetados, seria viável a obtenção desta posição ótima além da obtenção da região de cobertura da *attocell*. Além do mais, o protótipo permitirá a extração da relação BER em função da distância entre os módulos, bem como sua relação com a potência óptica. Outra contribuição, é a medição de efeitos de interferência de fundo após anexar o LED do protótipo a um dos LEDs de iluminação convencionais. Esse tipo de determinação pode ser facilmente instruída com o protótipo atual, novamente realçando a formação dos estudantes em características específicas para projeto de redes LiFi.

Com as alterações propostas é esperado que o projeto corresponda de maneira satisfatória aos testes que serão realizados, permitindo instrução das propriedades básicas da transmissão VLC/LiFi com baixa BER e taxa de transferência de dados da ordem de até ≈ 100 kbps.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram discutidos o princípio de funcionamento dos sistemas VLC, mais especificamente do LiFi, as arquiteturas básicas dos sistemas transmissores e receptores, vantagens e aplicações. Além disso, foi possível demonstrar a viabilidade da construção de um sistema protótipo de comunicação que faça uso da luz visível, utilizando a plataforma Arduino. O protótipo apresentado é de simples elaboração, com poucos componentes e de baixo custo, tornando factível futuras simulações para uma avaliação do desempenho do sistema proposto. Também foram previstas algumas possíveis melhorias no projeto para atingir objetivos mais amplos, mesmo dependendo da aquisição de *hardware* adicional é esperado um ganho no desempenho do protótipo.

Como sugestões adicionais para trabalhos futuros, além da implementação deste projeto sob as condições pré-estabelecidas com o uso do *Matlab* para o processamento, têm-se:

- Uso de um *array* de LEDs ou LED RGB, conferindo melhor desempenho ao sistema;
- utilização de fotodetectores com tempo de resposta na ordem de ns, para testar o desempenho em taxa de transmissão semelhantes à de sistemas LiFi;
- estudo de técnicas de modulação mais robustas, a exemplo CSK;
- adicionar um módulo *WiFi* (*Wireless Fidelity*) para prever redundância na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?," *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, p. 1533-1544, 2016.
- [2] H. Haas et al., "Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 2, p. A190-A203, 2020.
- [3] H. Haas, "High-speed wireless networking using visible light," *SPIE Newsroom* (2013). doi: 10.1117/2.1201304.004773.
- [4] J.C. Luna, J.C. Alvarez, P. Viscaya-Guarin, A.M. Guzmán and H.J. Kalinowski, "Sistema de Transmissão por Fibra Ótica para uso Didático," *Rev. Soc. Bras. Telecomunicações*, vol. 8(1), p. 53-69, 1993.
- [5] Y. Tanaka, T. Komin, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Indoor visible light data transmission system utilizing white led lights," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E86B, p. 2440-2454, 2003.
- [6] S.U. Rehman, S. Ullah, P.H.J. Chong, S. Yongchareon, D. Komosny, "Visible Light Communication: A System Perspective—Overview and Challenges," *Sensors*, vol. 19, p. 1153, 2019.
- [7] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally and R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17(3), p. 1649-1678, 2015.
- [8] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, and R. D. Roberts, "Traffic light to vehicle visible light communication channel characterization," *Appl. Opt.*, vol. 51, p. 6594-6605, 2012.
- [9] S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, K. Cameron, N.J. Venugopalan Nair, Aravind & R. Henderson, D. Tsonev, M. Ijaz, Z. Chen, H. Haas, E. Xie, J. McKendry, J. Hermsdorf, E. Gu, M. Dawson, D. Brien, "High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, p.1, 2015.
- [10] A.K. Bull, "Philips anuncia lâmpada Li-Fi que transmite Internet por meio da luz. 2018. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/03/philips-anuncia-lampada-li-fi-que-transmite-internet-por-meio-da-luz.ghtml>
- [11] M. Younus, Z. Alwan, Z. Aldarkazaly, (2020). "Data Transmission Using Li-Fi Technique."
- [12] P.H. Pathak, X. Feng, P. Hu, P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17(4), p. 2047-2077, 2015.
- [13] M.S. Islim, H. Haas, "Modulation Techniques for Li-Fi," *ZTE COMMUNICATIONS*, vol. 14, p. 29-40, 2016.
- [14] L.E. Pinto, C.P. Albuquerque, "A Técnica de Transmissão OFDM," *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, vol. 5(1), 2002.
- [15] <https://www.arduino.cc/>

APÊNDICE J – Trabalho Publicado Referente ao Tema - II

Educational LiFi far field measuring set using Arduino

Amanda R. Barreira¹, Hypolito J. Kalinowski¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense
24210-240 Niterói, Brazil

LiFi (*Light Fidelity*) is one solution for the transfer of information using visible light as carrier [1]. It has some advantages as compared to radio frequency services due to the wide, unlicensed, spectral range [2].

Standard LED illumination spots, nowadays present almost everywhere at indoor and outdoor public spaces, can further enhance *LiFi* access [3]. It can also be a solution for network services in spaces who require tight restrictions to RF immunity or security.

LiFi employs optical *attocells*, which are illuminated by the sources at the base stations. Material absorption and reflection from walls and ceiling, as well from the furniture or equipment can lead to signal degradation or interference between different users in nearby cells.

We employed Arduino standard components to realize an optical transmitter, to be assembled in a base station location, and an optical receiver, which can be used to measure the light distribution in a floor plan, measuring the far field intensity from the transmitter. Albeit using low frequency optical devices, data transmission can be also simulated in order to give students a hands-on insight on the network planning. The control of the transmitter and receiver is implemented using Matlab Mobile software.

The transmitter uses a standard GAV VD 1 white LED that is directly activated (*OOK - On Off Keying*) by the Arduino, using a simple conditioning circuit and Matlab Mobile procedure. In order to simulate the more advanced *CSK - Colour Shift Keying* modulation [2], a RGB LED can be used in the source assembly.

The receiver is assembled around an BH1750fvi optical sensor with a response time of 16 ms and wide illumination range (1 – 65535 lux). The data transmission can be enhanced using an 3DU33 photo-detector, able to data rates in the order of 100 kbps.

In laboratory experiments, the transmitter and receiver are positioned as required by the intended measurement and data transmission is simulated using a pseudo aleatory sequence. The received sequence can be latter compared to the transmitted one in order to determine the BER as a function of the optical power, distance between optical modules, data rate and interfering mechanisms.

The optical head of the transmitter can also be attached to one of the illuminating LEDs present in the laboratory to replicate a more realistic LiFi base station. The optical receiver unit can be used to measure the signal strength in the presence of the illumination light, which provides information about the effect of interfering background. At moment the measurements are limited to about 10–15 cm due to the used LED and photo-detector modules. However, a further enhancement can be made using an amplified photo-detector, which can provide measurements with ceiling lights.

[1] H. Haas, SPIE Newsroom (2013), doi:10.1117/2.1201304.004773.

[2] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, *J. Lightwave Technol.* **34**, 1533 (2016).

[3] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, *IEICE Trans. Commun.* **E86B**, 2440 (2003).