

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rodrigo Fuchs Miranda

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ  
UTILIZANDO DISPOSITIVO DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

Santa Maria, RS  
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Miranda, Rodrigo Fuchs

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ  
UTILIZANDO DISPOSITIVO DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE /  
Rodrigo Fuchs Miranda.- 2022.

71 p.; 30 cm

Orientador: Carlos Henrique Barriquello

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Comunicação óptica sem fio 2. Comunicação por luz  
visível 3. Dispositivo de rádio definido por software 4.  
Iluminação no estado sólido I. Barriquello, Carlos  
Henrique II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, RODRIGO FUCHS MIRANDA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Rodrigo Fuchs Miranda**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ UTILIZANDO  
DISPOSITIVO DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Engenharias IV, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**. Defesa realizada por videoconferência.

ORIENTADOR: Prof. Carlos Henrique Barriquello

Santa Maria, RS  
2022

---

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Rodrigo Fuchs Miranda. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: rodrigo.fmir@gmail.com

**Rodrigo Fuchs Miranda**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ UTILIZANDO  
DISPOSITIVO DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Engenharias IV, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 30 de agosto de 2022:**

---

**Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Gustavo Weber Denardin, Dr. (UTFPR) (videoconferência)**

---

**Lucas Teixeira, Dr. (UFSM) (videoconferência)**

Santa Maria, RS  
2022

## AGRADECIMENTOS

*Ao desenvolver do tempo desse mestrado recebi todo tipo de suporte possível, em sua maioria, de prontidão para ajudar. De forma geral quero agradecer aos grupos e instituições GEDRE, NUPEDDE, UFSM, CAPES, professores, colegas, parentes e amigos. Em especial, aos professores que fazem parte diariamente desse desafio, meu Prof. orientador Carlos Barriquello, que sempre proporciona ensinamentos e questionamentos por horas a fio, Prof. Marco Dalla Costa, Prof. Vitálio Reguera, também para o cofundador do GEDRE Ricardo Nederson do Prado, cuja motivação dada na época da minha graduação permanece firme até hoje. Em especial, aos colegas da pós-graduação Igor Barbosa e Jean Santis pelo companheirismo diário e incentivo mútuo de trabalho, obrigado também para os colegas da graduação, que também compartilham seu tempo para ajudar. Em especial aos meus pais que sempre deram suporte e liberdade às minhas decisões. E mais especial ainda, para minha companheira Priscila Roatt, que dividiu todas as alegrias e dificuldades comigo.*

*Que você viva em tempos interessantes  
e sobre ombros de gigantes.*

*(Autor desconhecido)*

## RESUMO

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ UTILIZANDO DISPOSITIVO DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

AUTOR: Rodrigo Fuchs Miranda

ORIENTADOR: Carlos Henrique Barriquello

Esse trabalho apresenta o projeto de um sistema de comunicação óptica sem fio, utilizando dispositivo de rádio definido por software e iluminação no estado sólido. Uma plataforma de testes é desenvolvida, demonstrando as considerações de projeto para os elementos propostos do sistema de comunicação, de forma a identificar os gargalos que podem limitar a máxima taxa de dados do enlace de comunicação.

Entre os elementos importantes para o projeto estão as normativas, por esse motivo, é feita a revisão das mesmas e escolhida uma delas para servir de exemplo no protótipo de testes. Ainda, com a utilização do software GNU Radio o resultado é uma plataforma de testes flexível, com avaliação em tempo real de métricas como largura de banda e razão sinal-ruído, podendo ser usada em uma gama de aplicações de comunicações óptica sem fio.

**Palavras-chave:** Comunicação óptica sem fio. Comunicação por luz visível. Dispositivo de rádio definido por software. GNU Radio. Iluminação no estado sólido

## ABSTRACT

### DESIGN OF A VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM USING UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL

AUTHOR: Rodrigo Fuchs Miranda  
ADVISOR: Carlos Henrique Barriquello

The main target of this paper is to present the development steps of a Optical Wireless Communication (OWC) system applied to solid-state lighting (SSL) with frequency suitable to an universal software radio peripheral (USRP) hardware. The goal is establish a testbed, according to the frequency response limits of the hardware used, and with the help of GNU Radio Software, make a real-time evaluation of the performance metrics of the communication link, as well, identify the bottlenecks that will affect the Signal to Noise Ratio (SNR) and BandWidth (BW). The standards in this area are also reviewed and one of them is chosen as examples to validate the testbed.

**Keywords:** GNU Radio. Optical Wireless Communication. Solid-state lighting. Universal software radio peripheral. Visible Light Communication.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético. ....	16
Figura 2.2 – Aplicações possíveis com OWC. ....	18
Figura 2.3 – LED azul com camada de fósforo ....	19
Figura 2.4 – Relações de propagação. ....	21
Figura 4.1 – Sistema OWC deste trabalho. ....	27
Figura 4.2 – Curva característica de tensão por corrente dos LEDs RGB. ....	28
Figura 4.3 – LEDs de cores separados montados em um dissipador. ....	29
Figura 4.4 – Módulo com 48 LEDs RGB. ....	29
Figura 4.5 – Diagrama de raios. ....	31
Figura 4.6 – Arquitetura de um USRP genérico. ....	32
Figura 4.7 – Circuito bias-T. ....	34
Figura 4.8 – Visão superior dos protótipos de circuito bias-T para 1 a 4 LEDs. ....	36
Figura 4.9 – Visão inferior dos protótipos de circuito bias-T para 1 a 4 LEDs. ....	36
Figura 4.10 – Protótipo do circuito bias-T para 48 LEDs. ....	37
Figura 4.11 – Parâmetros típicos de fotodiodos. ....	39
Figura 4.12 – Resposta espectral de um fotodiodo PIN. ....	41
Figura 4.13 – Curva de resposta do fotorreceptor em relação à corrente no LED. ....	43
Figura 4.14 – Curva de resposta em tensão do fotodiodo para transmissão por luz com visada. ....	44
Figura 5.1 – Configuração experimental em bancada de testes. ....	45
Figura 5.2 – Aquisição do experimento 1.1, apresenta potência máxima do sinal de -22.87dBm. ....	47
Figura 5.3 – Aquisição do experimento 1.2, apresenta potência máxima do sinal de -24.62dBm. ....	48
Figura 5.4 – Envoltória do sinal OFDM no tempo para frequência de portadora em 20MHz. ....	49
Figura 5.5 – Comportamento do sinal no tempo para frequência de portadora em 50MHz. ....	50
Figura 5.6 – Varredura de 20 a 100MHz com LED ligado. ....	51
Figura 5.7 – Varredura de 20 a 100MHz com LED ligado e com barreira entre emissor e receptor. ....	52
Figura 5.8 – Varredura de 20 a 100MHz com LED desligado. ....	53
Figura 5.9 – Varredura de 10 a 60MHz com LED ligado e barreira entre emissor e receptor. ....	54
Figura 5.10 – Imagens padrão testes de comunicação. ....	55
Figura 5.11 – Imagens padrão colorida resultantes da comunicação por luz. ....	55
Figura 5.12 – Imagens padrão preto e branco resultantes da comunicação por luz. ..	56
Figura 5.13 – Espectro do bias-T com capacitor de 2.2uF. ....	57
Figura 5.14 – Espectro do bias-T com capacitor de 150nF. ....	57
Figura 5.15 – Experimento de medida de potência média do sinal. ....	58
Figura 5.16 – Medição de SNR para portadora em 20MHz. ....	59
Figura 5.17 – Medição de SNR para portadora em 50MHz. ....	60
Figura 5.18 – Valores máximos de largura de banda para cada bloco do sistema implementado. ....	60
Figura 5.19 – Erros de <i>overflow</i> ....	61

Figura A.1 – Blocos utilizados para o transmissor. ....	66
Figura A.2 – Blocos utilizados para o receptor. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações do USRP transmissor. ....	33
Tabela 4.2 – Especificações do USRP receptor. ....	33
Tabela 4.3 – Valores calculados para os circuitos bias-T considerando carga de 1 a 4 LEDs. ....	36
Tabela 4.4 – Valor calculado para o circuito bias-T considerando carga de 48 LEDs. .	37
Tabela 4.5 – Parâmetros da técnica OFDM para a norma IEEE 802.11a. ....	38
Tabela 4.6 – Especificações do fotorreceptor. ....	43
Tabela 5.1 – Equipamentos utilizados. ....	45
Tabela 5.2 – Experimento 1.1. ....	46
Tabela 5.3 – Experimento 1.2. ....	47
Tabela 5.4 – Experimento 2 - Varredura. ....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADC</i>	<i>Analog to Digital Converter</i>
<i>AGC</i>	Controle Automático de Ganho, do inglês, <i>Automatic Gain Control</i>
<i>AWGN</i>	Ruído Aditivo Gaussiano Branco, do inglês, <i>Additive White Gaussian Noise</i>
<i>BLW</i>	<i>Baseline Wander</i>
<i>BPSK</i>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
<i>CSK</i>	<i>Color Shift Keying</i>
<i>DAC</i>	<i>Digital to Analog Converter</i>
<i>DDC</i>	<i>Digital Down Conversion</i>
<i>DLL</i>	<i>Data Link Layer</i>
<i>DUC</i>	<i>Digital Up Conversion</i>
<i>ESIM-OFDM</i>	<i>Enhanced Subcarrier Index Modulation – Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>FEC</i>	<i>Forward Error Correction</i>
<i>FOV</i>	Campo de Visão, do inglês <i>Field Of View</i>
<i>FPGA</i>	<i>Field Programmable Gate Array</i>
<i>FSO</i>	Comunicação Óptica no Espaço Livre, do inglês, <i>Free-Space Optical communication</i>
<i>GPP</i>	Processador de Uso Geral, do inglês <i>General Purpose Processor</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<i>IF</i>	Frequência Intermediária, do inglês <i>Intermediate Frequency</i>
<i>IoT</i>	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
<i>ISI</i>	Interferência Intersimbólica, do inglês <i>Intersymbol Interference</i>
<i>ITU-T</i>	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
<i>LD</i>	Diodo Laser, do inglês <i>Laser Diode</i>
<i>LED</i>	Diodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light-Emitting Diode</i>
<i>Li-Fi</i>	<i>Light Fidelity</i>

<i>LOS</i>	<i>Line-Of-Sight</i>
<i>MAC</i>	<i>Medium Access Control</i>
<i>MIMO</i>	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas, do inglês <i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>NIC</i>	Controlador de Interface de Rede, do inglês, <i>Network Interface Controller</i>
<i>NLOS</i>	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
<i>OFDM</i>	Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais, do inglês, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>OLED</i>	LEDs orgânico, do inglês, <i>Organic LED</i>
<i>OOK</i>	<i>On– Off Keying</i>
<i>OWC</i>	Comunicação Óptica Sem Fio, do inglês, <i>Optical Wireless Communication</i>
<i>PFR</i>	<i>Packet Failed Ratio</i>
<i>PHY</i>	<i>Physical Layer</i>
<i>QAM</i>	Modulação por Amplitude em Quadratura, do inglês, <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>RF</i>	Radiofrequência
<i>RLL</i>	<i>Run-Length Limited</i>
<i>SDR</i>	Rádio Definido por Software, do inglês, <i>Software Defined Radio</i>
<i>SISO</i>	<i>Single-Input and Single-Output</i>
<i>SoC</i>	<i>System on Chip</i>
<i>SSL</i>	Iluminação no Estado Sólido, do inglês <i>Solid-State Lighting</i>
<i>SNR</i>	Razão Sinal/Ruído, do inglês, <i>Signal to Noise Ratio</i>
<i>SRF</i>	Frequência de Auto-Ressonância, do inglês, <i>Self Resonant Frequency</i>
<i>TIA</i>	Amplificador de Transimpedância, do inglês <i>Transimpedance Amplifier</i>
<i>TG7a</i>	<i>Task Group 7a</i>
<i>TG13</i>	<i>Task Group 13</i>
<i>USRP</i>	Dispositivo de Rádio Controlado por Software, do inglês, <i>Universal Software Radio Peripheral</i>

<i>VLC</i>	Comunicação por Luz Visível, do inglês, <i>Visible Light Communication</i>
<i>VPPM</i>	<i>Variable Pulse Position Modulation</i>
<i>WPAN</i>	Comunicação Sem Fio de Curto Alcance, do inglês <i>Wireless Personal Area Network</i>
<i>TIA</i>	Amplificador de Transimpedância, do inglês <i>Transimpedance Amplifier</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>15</b>
2.1	HISTÓRIA CONTEMPORÂNEA DA COMUNICAÇÃO POR LUZ	15
2.2	CARACTERÍSTICAS DA LUZ E A TECNOLOGIA OWC	16
2.3	FONTE DE LUZ	17
2.4	CANAL DE COMUNICAÇÃO	20
2.5	INTEGRAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E O USRP	22
<b>3</b>	<b>NORMATIVAS</b>	<b>24</b>
3.1	HISTÓRICO DAS NORMAS	24
3.2	IEEE 802.15.7	24
3.3	IEEE 802.15 (TG13)	25
3.4	IEEE 802.15 (TG7A)	25
3.5	IEEE 802.11.bb	25
3.6	ITU-T G.9991	26
<b>4</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA OWC</b>	<b>27</b>
4.1	FONTE DE LUZ	28
4.2	USRP	31
4.3	BIAS-T	34
4.4	GNU RADIO	37
<b>4.4.1</b>	<b>Modulação</b>	<b>38</b>
4.5	FOTORRECEPTOR	39
<b>4.5.1</b>	<b>Resposta dinâmica</b>	<b>39</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>40</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Noise Equivalent Power(NEP)</b>	<b>41</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Largura de banda</b>	<b>42</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Medição do fotorreceptor</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>45</b>
5.1	EXPERIMENTO 1 - ANÁLISE DO SINAL	46
5.2	EXPERIMENTO 2 - VARREDURA	50
5.3	EXPERIMENTO 3 - TRANSMISSÃO DE IMAGENS	54
5.4	EXPERIMENTO 4 - BIAS-T	57
5.5	EXPERIMENTO 5 - MEDIÇÃO DE SNR E BW	59
5.6	ERROS DE TRANSMISSÃO	61
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>63</b>
7.1	SISTEMA ÓPTICOS DE ENTRADA	63
7.2	TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS	63
<b>7.2.1</b>	<b>Modulações</b>	<b>63</b>
<b>7.2.2</b>	<b>MIMO</b>	<b>64</b>
7.3	CAMADA MAC	64
7.4	TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIA	65
	<b>APÊNDICE A – BLOCOS DO GNU RADIO</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entre as grandes mudanças da sociedade para áreas urbanas repletas de elementos tecnológicos, estão as redes de comunicações, que crescem conforme uma demanda cultural e disponibilidade tecnológica. A conectividade dessas áreas nos colocam em uma nova era da informação, que depende de meios para se propagar. Além dos meios de propagação como cabos metálicos e fibras ópticas, que são meios confinados, temos o espaço aberto, o ar, que é um meio não confinado, onde ondas eletromagnéticas se espalham e se encontram.

Esse espaço, para redes de comunicação sem fio que utilizam Radiofrequência (RF), é um recurso limitado que é concedido e regulamentado pelo estado. E, em um futuro onde nossa cultura da conectividade se mantém, esse recurso pode se tornar escasso ou de difícil acesso. A tecnologia de Comunicação Óptica Sem Fio (OWC), do inglês *Optical Wireless Communication*, surge como principal alternativa para esses problemas, já que ocupa uma faixa do espectro eletromagnético distante dos meios de comunicação sem fio tradicionais, impossibilitando de causar interferência, e também não exige regulamentação pelo estado.

A natureza da luz permite que a transmissão da comunicação possa ser facilmente suprimida ou direcionada por meios físicos, diferente da RF que geralmente se propaga para todos os lados. Também, a conveniência das atuais fontes de iluminação utilizarem o Diodo Emissor de Luz (LED), do inglês *Light-Emitting Diode*, permite que essa tecnologia seja aplicada facilmente de forma mais de forma escalonada.

Considerando essas justificativas, o principal objetivo deste trabalho é apresentar o projeto e implementação de um sistema de OWC, no espaço aberto, utilizando um Dispositivo de Rádio Definido por Software (USRP), do inglês *Universal Software Radio Peripheral*, de forma a servir como plataforma de testes para aplicações diversas.

Por conseguinte, esse projeto deverá apresentar flexibilidade a ponto de suportar diversas aplicações em OWC. Para isso, é preciso explorar os limites de desempenho dos componentes do sistema envolvidos, principalmente em termos de largura de banda. Entre os objetivos secundários, estão, exemplificar parâmetros de escolha de cada item que compõe o sistema de OWC e as principais limitações que devemos levar em conta para se ter uma comunicação pela luz de fato.



## 2 DESENVOLVIMENTO

As exigências de um mundo moderno demonstram uma preocupação crescente em estabelecer canais de comunicações entre locais de todo o mundo e do espaço. Cabos submarinos conectam continentes, satélites e sondas espaciais se comunicam pelo ar e pelo espaço, dispositivos portáteis enviam e recebem informações de forma imperceptível o tempo inteiro em nossa volta.

A área de comunicação por luz pode englobar essas modalidades citadas e outras mais, por isso, neste capítulo é apresentado um breve histórico desse tipo de comunicação e são definidos os princípios básicos de funcionamento dos elementos que compõem esse sistema, delimitando o tema para facilitar o entendimento acerca do deste trabalho.

Este documento está separado da seguinte maneira: O capítulo 2 introduz alguns conceitos e elementos que fazem parte da comunicação por luz, delimitando parte do tema. O capítulo 3 apresenta um resumo das normativas mais relevantes para OWC. No capítulo 4 é apresentado o modelo de sistema OWC proposto, e detalhado os componentes do mesmo. No capítulo 5, então, o sistema é apresentado implementado em bancada e uma sequência de testes é feita para exemplificar o funcionamento do projeto, são exibidos alguns problemas encontrados na aplicação desses conceitos. Após uma conclusão, são apresentados propostas de trabalhos futuros no capítulo 7.

### 2.1 HISTÓRIA CONTEMPORÂNEA DA COMUNICAÇÃO POR LUZ.

A primeira revolução tecnológica dessa área iniciou-se em 1880 quando foi inventado o *Photophone*. De um lado do aparelho estava Alexander Graham Bell que através de um feixe de luz do próprio sol como portador, transmitiu som por uma distância de centenas de metros para seu assistente Charles Sumner Tainter em que utilizaram um conjunto de espelhos e a propriedade cristalina do elemento químico selênio para realizar a emissão e recepção do sinal (BELL, 1880).

Mais de um século depois, Gfeller e Bapst (1979) demonstraram detalhadamente talvez a primeiro sistema de comunicação com LED Infravermelho, que mais tarde, em 1980 se tornaria talvez a forma de comunicação por luz sem fio mais conhecida da humanidade, através do controle remoto para televisão, fabricada pela empresa canadense Viewstar (BESCHLOSS, 2013).

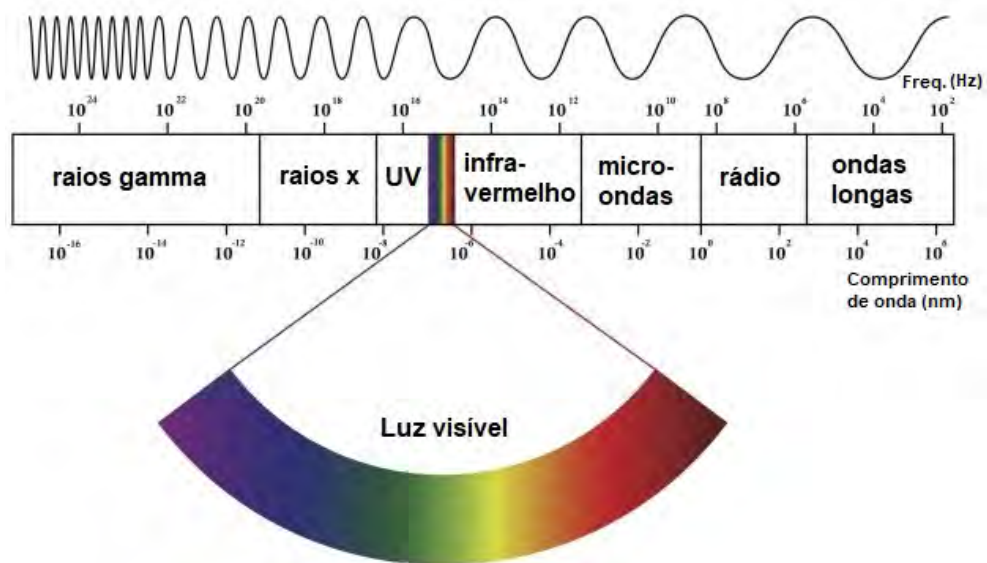
Um dos conceitos mais recentes dessa história está descrito no trabalho de (PANG; KWAN; CHAN, 1999) em que é proposto utilizar LED de sinalização de tráfego como transmissor de sinais de áudio para um fotorreceptor. Desde então a tecnologia difundiu de tantas maneiras que logo foram criadas normas de utilização para implementação dos sis-

temas, que veremos com mais detalhes no capítulo 3.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DA LUZ E A TECNOLOGIA OWC

A luz é uma forma de radiação eletromagnética cuja frequência é visível ao olho humano, existem frequências não visíveis que são chamadas de infravermelho e ultravioleta (UV), como podemos ver na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: autor.

Todo o espectro de luz pode ser usado para a comunicação, o que vai depender exclusivamente se o receptor de luz reage ao comprimento de onda do emissor de luz. Quando pretende-se referir a comunicação no espaço aberto, e a todo o espectro de luz, ou seja, o domínio óptico, geralmente é utilizado o termo 'OWC'. Enquanto apenas o espectro visível é englobado ao tema tratado, é utilizado o termo Comunicação por Luz Visível (VLC), do inglês *Visible Light Communication*. Neste trabalho será utilizada expressamente a sigla OWC em vez de de VLC já que poderemos tratar tanto de uma luz visível quanto de uma invisível ao olho humano.

A tecnologia de OWC combina iluminação e comunicação por dados (informação medida em bits ou bytes) em aplicações como iluminação em geral, sinalização de tráfego, veículos, celulares, máquinas industriais, painéis, etc. Esse tipo de comunicação pode ter objetivos civis ou militares e permite novas soluções para problemas de comunicação que encontramos em RF, tal como segurança, consumo de energia e uma possível saturação de uso do espectro (UCAR et al., 2016; KARUNATILAKA et al., 2015). Atualmente, uma

tecnologia semelhante viabiliza quase toda a rede de internet global, todavia, por um meio conduzido por fibras ópticas, o novo desafio é tornar essa tecnologia viável pelo espaço aberto. Algumas aplicações são exemplificadas na figura 2.2.

As principais variações dessas tecnologias que podem alterar bruscamente o projeto são relativos a: mobilidade, quantidade e tipos de emissores ou fotorreceptores, nível de ruído do ambiente, para todos esses casos, o tema será delimitado ou simplificado nos capítulos seguintes.

Uma das dificuldades que a tecnologia de OWC enfrenta se refere ao *Uplink*, que é um sinal de retorno que viabiliza um dispositivo conectar-se a uma rede de internet por exemplo. Atualmente para contornar esse problema é utilizado infravermelho, RF e até refletores para realizar esse *link* (DEMIRKOL et al., 2019).

A aplicação de OWC fica mais crítica em ambientes onde se há necessidade de luz natural, pois ela induz ruído adicional no fotorreceptor. Obviamente, se a luz for desligada a comunicação é cortada, para contornar isso existe a possibilidade de realizar a comunicação apenas com luz invisível, ou seja infravermelho (HOEHER, 2019).

### 2.3 FONTE DE LUZ

Nessa seção será feita uma breve análise das fontes de luz mais utilizadas para OWC e as características que as tornam interessantes, ou não, para a nossa aplicação. A fonte de luz será o dispositivo final do sistema emissor, onde se dará a transmissão dos dados por parte do circuito e é um fator decisivo no projeto de um sistema de OWC. Também é o dispositivo que dá sentido ao nome da tecnologia VLC já que é o meio utilizado para a geração de luz visível.

Entre as considerações mais importantes de escolha para a fonte de luz para um projeto de OWC estão: a resposta em frequência, a potência óptica, o ângulo de meia potência, densidade de corrente e encapsulamento (LUAN; QIAN, 2017).

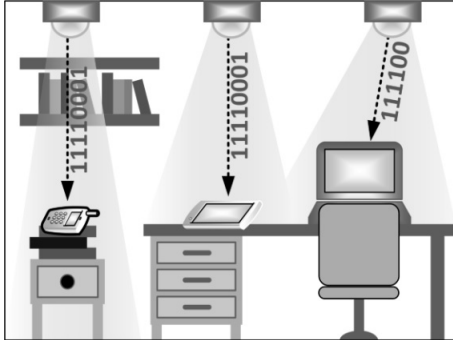
Considerando esses fatores, a Iluminação no Estado Sólido (SSL), do inglês *Solid State Lighting*, domina essa área da comunicação, pois diferente de outras tecnologias, a SSL é capaz de emitir diferentes intensidades em um intervalo de tempo muito curto, ao mesmo tempo essa diferença de intensidade é imperceptível ao olho humano, tornando-a também adequada tanto para o propósito de iluminação, quanto para comunicação (PATHAK et al., 2015).

Os dispositivos SSLs mais abordados na literatura são o LED branco, o LED RGB e o Diodo Laser (LD), do inglês *Laser Diode*, não necessariamente nessa ordem de importância, esses três podem abranger uma vasta margem de aplicações como veremos a seguir.

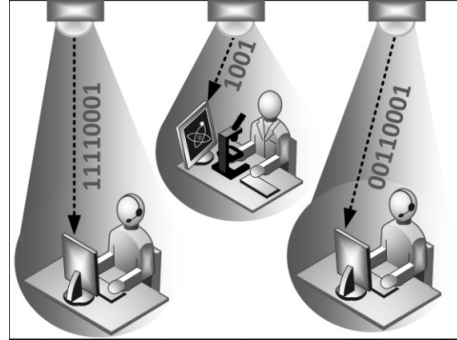
O LED branco é notavelmente o LED mais difundido comercialmente e apresenta

Figura 2.2 – Aplicações possíveis com OWC.

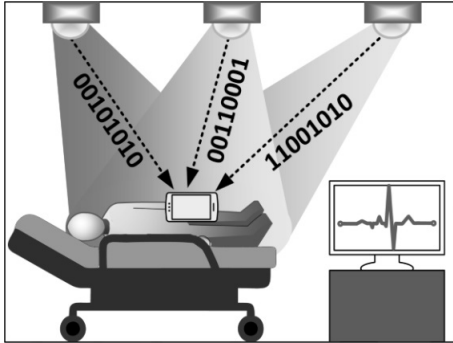
(a) Residencial.



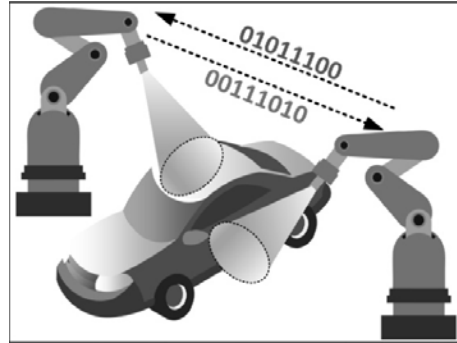
(b) Escritório.



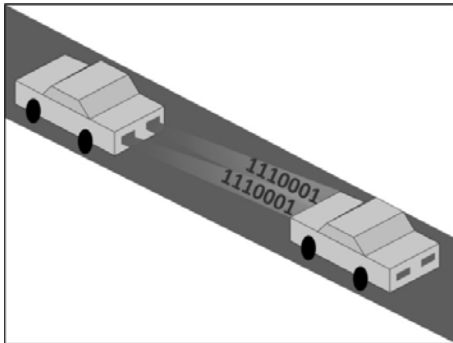
(c) Hospitalar.



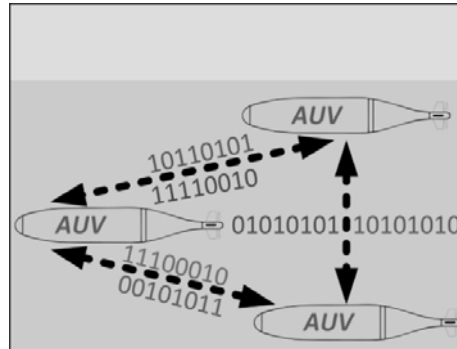
(d) Fabril.



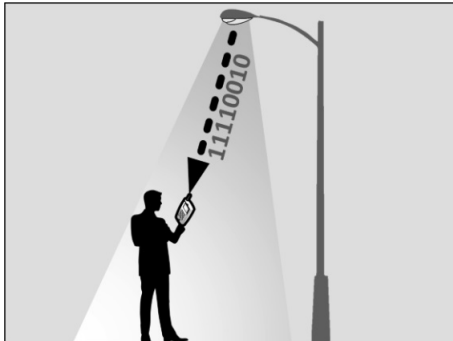
(e) Veicular.



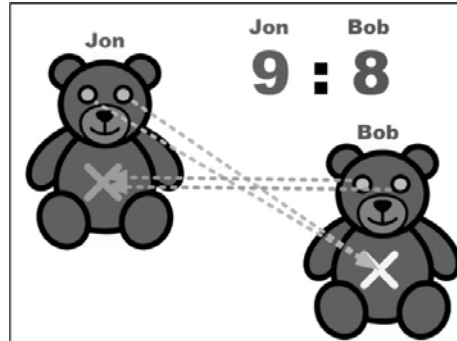
(f) Submerso.



(g) Iluminação pública.



(h) Entretenimento.



Fonte: Adaptado de Hoehner (2019).

baixo custo. E por ser apenas um circuito integrado, também apresenta pouca complexidade para ser implementado em sistemas OWC. O LED de luz branca é resultado de um semicondutor azul coberto por uma camada de fósforo amarelo, que faz a conversão da luz azul para luz branca (figura 2.3).

Figura 2.3 – LED azul com camada de fósforo



Fonte: Adaptado de Fulight (2014).

Porém, em termos de comunicação essa camada de fósforo limita a resposta dinâmica da luz relativa ao sinal elétrico, de acordo com Li2014a a frequência de corte do desse tipo de LED está perto dos 4MHz, o que limita muito a taxa de transmissão do sistema. Porém, ainda é possível ter uma melhor aproveitamento dessa largura de banda se utilizarmos técnicas de melhorias como a pré-equalização, que insere ganhos na amplitude do sinal. No entanto, a eficiência dessa técnica varia de acordo com a impedância da carga (YEH; LIU; CHOW, 2013).

Outras técnicas adicionais por parte do circuito receptor ajudam a garantir a largura de banda do sinal como a pós-equalização e circuito de realimentação (*feedback*), como por exemplo, um circuito de Controle Automático de Ganho (AGC), do inglês *Automatic Gain Control*, com a penalidade de aumento da complexidade do sistema (COELHO, 2017).

Em relação ao LED RGB, existe uma previsão que essa tecnologia pode dominar o futuro da iluminação, conseqüentemente da comunicação por luz. Devido à constante evolução de eficácia luminosa, estima-se que no ano de 2030, LEDs com cores misturadas que geram a luz branca, podem ultrapassar o LED azul com camada de fósforo nesse quesito (SCOPACASA, 2021). Também, existe a vantagem que os LEDs de cores misturados podem apresentar uma melhor qualidade de cor (VIK, 2021). Por conta da frequência de corte em torno de dezenas de GHz, e outras vantagens citadas, o LED RGB é um promissor candidato para compor as luminárias tanto para iluminação, quanto para comunicação (LI et al., 2014).

O LD pode ser melhor que o LED para a comunicação, devido a sua maior largura de banda, podendo atingir taxas de comunicação acima de  $100Gb/s$  enquanto os LEDs

podem atingir até  $10\text{Gb/s}$  (YU et al., 2021). Porém os LDs podem ser prejudiciais para o olho humano devido a radiação que pode induzir um dano térmico (BARRY, 1994). Além do mais, devido a característica de construção do LD, a sua emissão na forma de amplificação de luz por emissão estimulada de radiação, apresenta a vantagem de coerência da luz, ou seja, apresenta um valor de fase definido e pode ser aproveitado para aumentar a taxa de dados, diferente dos LEDs que não apresentam essa característica.

Entre outras fontes luz que podem fazer parte de um sistema de comunicação por luz, aparecem os  $\mu$ -LED que trabalha com o limite de 300MHz para sua resposta em frequência, porém ainda não são um produto comercial para iluminação. E temos os LEDs orgânicos (OLED), do inglês *Organic LED*, entretanto, este apresenta uma estreita largura de banda e pouca eficiência luminosa (MAPUNDA et al., 2020).

## 2.4 CANAL DE COMUNICAÇÃO

Um canal de comunicação é o meio físico por onde ocorre a transmissão de dados entre dois pontos, e majoritariamente para OWC, esse canal é modelado com Ruído Aditivo Gaussiano Branco (AWGN), do inglês *Additive White Gaussian Noise* (KOMINE; NAKAGAWA, 2004), por ser uma boa aproximação para o limite teórico da capacidade desse canal, que é dado pelo teorema de Shannon-Hartley na equação 2.1 para um canal limitado em largura de banda (SHANNON, 1949).

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

Onde  $C$  representa a capacidade do canal em  $\text{bits/sec}$ .  $SNR$  é a Razão Sinal/Ruído (SNR), do inglês *Signal to Noise Ratio*. Então, podemos afirmar que a capacidade do canal está proporcionalmente relacionada à largura de banda do canal ( $BW$  em  $\text{Hz}$ ).

Nos extremos do canal de comunicação temos os elementos emissor e receptor, onde, dentro da tecnologia de OWC um emissor pode ser qualquer elemento que gere luz a partir de um sinal modulado, e o receptor qualquer dispositivo que consegue responder ao sinal modulado a partir da luz recebida. Para esse segundo, pode ser até o próprio LED (SINDHUBALA; VIJAYALAKSHMI, ; GALAL et al., 2020), tanto como câmeras ou sensores de imagem, até superfícies com OLEDs (HAIGH et al., 2014).

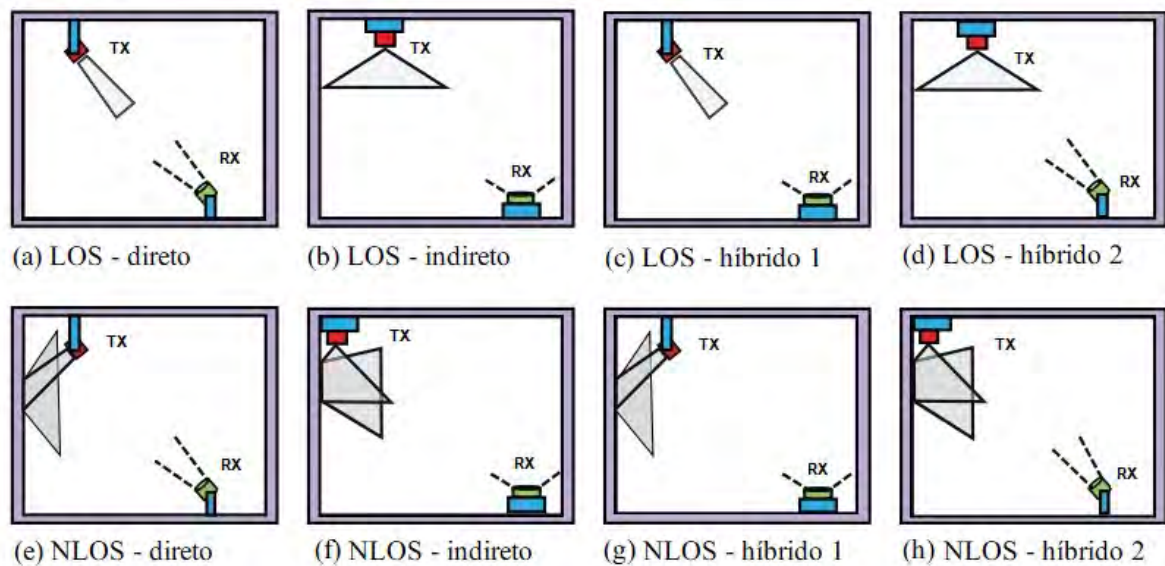
É importante salientar que neste trabalho, quando utiliza-se o termo emissor, refere-se ao elemento descrito nesta seção e quando utiliza-se o termo 'circuito emissor' ou mesmo 'sistema emissor' são incluídos mais elemento que fazem parte da geração do sinal de comunicação que serão detalhados no capítulo 4. O mesmo vale para o termo 'receptor', quando se tem o 'circuito receptor' e o 'elemento receptor'. Geralmente um circuito receptor inclui um amplificador de baixo ruído que pode ser um Amplificador de

Transimpedância (TIA), do inglês *Transimpedance Amplifier*, um circuito de AGC, circuito de sincronização, processamento de sinal digital entre outros componentes.

No livro de Alexander (1997) o fotorreceptor é citado como o 'coração' da parte receptora de um sistema OWC. Esse componente óptico-eletrônico, idealmente, deveria detectar a luz incidente e responder na mesma frequência ou velocidade que o sinal é gerado, porém, veremos que essa resposta é limitada principalmente pela capacitância intrínseca do dispositivo.

Neste trabalho vamos considerar apenas um par emissor e receptor, o que define esse tipo de comunicação como de Uma Entrada e Uma Saída (SISO), chamada no inglês de *Single-Input and Single-Output*. Este caso por si classifica mais duas relações de propagação: com Linha de Visada (LOS), do inglês *Line-Of-Sight*, e Sem Linha de Visada (NLOS), do inglês *Non-Line-Of-Sight*. Ainda, na questão de direção dos dispositivos, podem ser classificados em três categorias, conforme exibido na figura 2.4.

Figura 2.4 – Relações de propagação.



Fonte: Editado de Tae-Gyu (2012).

Intuitivamente podemos inferir que um caminho com linha de visada direta entre o emissor e fotorreceptor terá mais potência óptica transmitida. O caminho indireto somado às reflexões em obstáculos e paredes, apesar de ser o caminho com menor potência, ainda é viável para aplicações que exigem mobilidade entre os comunicantes (TAE-GYU, 2012). No entanto, para delimitar o tema, vamos considerar apenas a situação com visada direta, o que nos define um ângulo chamado de Campo de Visão (FOV), do inglês *Field Of View* (FAHAMUEL; THOMPSON; HAAS, 2013; CHAURASIA et al., 2020; TAE-GYU, 2012). E também que o emissor e fotorreceptor estarão parados, ou seja, sem mobilidade.

Nas últimas considerações para o canal de comunicação podemos definir um en-

lace de comunicação, que é quando ao menos dois dispositivos se comunicam. No caso de domínio óptico, pode ser modelado como um canal de *Poisson*, onde o transmissor envia uma intensidade de sinal  $\lambda(t)$  e o fotorreceptor faz uma detecção direta desse sinal. O resultado no fotorreceptor é uma sobreposição de valores  $K$  para cada sinal emitido, conforme a equação 2.2. Essa é umas das principais características da comunicação por luz, e o motivo que limita os tipos de modulações que podemos fazer e influenciam até a segurança da comunicação (BLINOWSKI, 2015).

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^K \lambda_i(t) \quad (2.2)$$

## 2.5 INTEGRAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E O USRP

De alguma forma em um sistema de OWC precisamos adicionar o sinal que contém informação junto à luz. Existem algumas maneiras de fazer isso, como apresentado nos trabalhos de Loose et al. (2022) e Teixeira (2020) em que se realiza uma extensa análise sobre conversores lineares, comutados e híbridos de duplo propósito com o olhar sobre eficiência energética e a taxa de transmissão de dados. Entre as conclusões, entendeu-se que para as topologias e trabalhos estudados, existe um limiar de escolha entre eficiência energética e a taxa de transmissão. Conclui-se também que, em geral, conversores comutados tem melhor eficiência para baixa taxa de dados e conversores lineares tem um melhor desempenho para taxas maiores de transmissão.

Na busca por uma opção adicional, foi observado diversos trabalhos que fizeram o uso de um circuito bias-T para fazer o acoplamento dos sinais: (HSU et al., 2017; SUNG; CHOW; YEH, 2014; ZHAO et al., 2018; HUANG et al., 2018), porém não demonstram especificações de projeto. Segundo (STRATIL et al., 2016) o maior obstáculo para projetar um circuito bias-T é quando se requer alta corrente para o lado DC e grande largura de banda para o lado RF. Já no livro de (HOEHER, 2019) o circuito bias-T é citado apresentando dois limitantes: baixa profundidade de modulação (quando projetado para pequenos sinais) e o efeito 'DC wander' também chamado de '*Baseline Wander*' (BLW), esse último, é relacionado à eficiência energética da transmissão.

Um USRP é um transceptor de RF reconfigurável comumente utilizado como plataforma de testes para experimentar diferentes sistemas de comunicações e estudos para melhoria de desempenho (HANDAGALA; LEESER, 2020). Em resumo, o USRP irá transmitir e receber sinais, dado uma frequência de portadora, uma taxa de amostragem, uma largura de banda e um ganho.

As entradas e saídas de um USRP são projetadas para uma impedância de  $50\Omega$  e



geralmente são acopladas antenas, nesse caso, vamos utilizar meios conduzidos, então necessita-se uma proteção adicional para não prejudicar o aparelho.

Então, considerando o fator de isolamento e facilidade de implementação, foi escolhido o circuito bias-T como elemento somador para a iluminação e a comunicação.

### 3 NORMATIVAS

Uma normativa é importante para garantir a padronização. No caso da OWC atuando em conjunto com a iluminação, precisamos garantir os dois propósitos da luminária ou lâmpada, o que pelas normativas atuais tratam essas tecnologias de formas separadas. Para delimitar o tema, neste capítulo é feita uma revisão histórica das normativas atreladas à OWC e pontuados os fatores mais relevantes para o presente trabalho.

Existem atualmente pelo menos duas importantes normativas para a tecnologia de OWC que abrange a nossa aplicação, uma é a 802.15.7 desenvolvida pelo comitê de padronização IEEE 802, que define normas para redes metropolitanas e locais (IEEE, 2022). A outra é desenvolvida pela *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T).

#### 3.1 HISTÓRICO DAS NORMAS

A primeira normativa internacional para OWC desenvolvida foi a IEEE 802.11 no ano de 1997, inicialmente com foco em comunicação infravermelho. Com a criação dos LEDs azuis aplicados em iluminação em torno dos anos 2000, naturalmente a norma foi abrangendo a parte visível do espectro e se adaptando para maiores taxas de transmissão. Em 2011 foi concluída a primeira normativa para Comunicação Óptica no Espaço Livre (FSO), do inglês *Free-Space Optical communication*, nomeada como IEEE 802.15.7, que faz parte da normativa IEEE 802.15 que trata de Comunicação Sem Fio de Curto Alcance (WPAN), do inglês *Wireless Personal Area Network*. Visando abranger mobilidade e a área industrial, a norma 802.15.7 foi reescrita formando a IEEE 802.15.13 que ainda está para ser publicada (PURWITA; HAAS, 2020).

#### 3.2 IEEE 802.15.7

Uma das primeiras normas para VLC, foi publicada em 2011 para WPAN e específica a Camada Física (PHY), do inglês *Physical Layer*, a camada MAC, do inglês *Medium Access Control*, para comunicação *indoor* e *outdoor*. Foram definidas três camadas física diferentes (I, II e III), cada uma com taxa de dados, distância etc. A norma também abrange modulações OOK, do inglês *OnOff Keying*, VPPM, do inglês *Variable Pulse Position Modulation* e CSK, do inglês *Color Shift Keying*, que suporta combinações de cores em sete bandas diferentes.

A normativa ainda suporta códigos usados para reduzir os erros no canal de comunicação, do tipo FEC, do inglês *Forward Error Correction* e RLL, do inglês *Run-Length Limited*. A camada MAC abrange três topologias, *star*, *peer-to-peer*, e *broadcast*, também é a camada responsável por definir tarefas básicas como suporte à mobilidade, estabilização de cor, dimerização. Em 2018 essa norma foi revisada e definiu a abrangência do comprimento de onda da luz de  $10.000nm$  a  $190nm$ . A camada física ganhou mais especificações e define a subcamada MAC para diferentes ambientes e aplicações.

### 3.3 IEEE 802.15 (TG13)

Essa norma, ainda em desenvolvimento pelo Grupo de Trabalho 13 (TG13), do inglês *Task Group 13*, também define requisitos para a camada PHY e MAC para comunicação por luz com comprimento de onda entre  $190nm$  e  $10.000nm$ . Entre as limitações da norma para essa tecnologia, estão a taxa máxima dados a  $10Gbit/s$  a uma distância de até  $200m$ . A norma ainda inclui adaptações para variações das condições do canal e manutenção da conectividade para mobilidade. A norma promete adaptação também para Li-Fi, do inglês *Light Fidelity* em que refere-se a sistemas de comunicação com luz em alta velocidade, de forma similar como acontece no Wi-Fi (BULBUL et al., 2021).

### 3.4 IEEE 802.15 (TG7A)

O Grupo de Trabalho 7a (TG7a), do inglês *Task Group 7a*, responsável pela norma ainda em desenvolvimento, especifica requisitos para comunicação óptica com alta taxa de dados e longa distância para câmeras, ou sensores de imagens. Sua principal aplicação é para a comunicação veicular, então, entre suas especificações incluem alta mobilidade (até  $350km/h$ ), adaptação para variações de condições do canal de comunicação, redução de cintilamento, longa distância (até  $200m$ ). Também utiliza a técnica OFDM e promete taxa de dados de até  $100Mbit/s$  (TG7A, 2022).

### 3.5 IEEE 802.11.bb

Essa normativa, ainda em desenvolvimento, trata de especificar mudanças para a camada MAC e PHY em acordo com a normativa já existente IEEE 802.11, que atualmente suporta canais de até  $160MHz$  de largura de banda, com Modulação por Amplitude em Quadratura (QAM), do inglês *Quadrature Amplitude Modulation*, de até 1024 QAM. E

permite um melhor aproveitamento do espectro utilizando modulação por Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM), do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. Porém, sua abrangência engloba apenas a região do infravermelho de  $800nm$  a  $1.000nm$ .

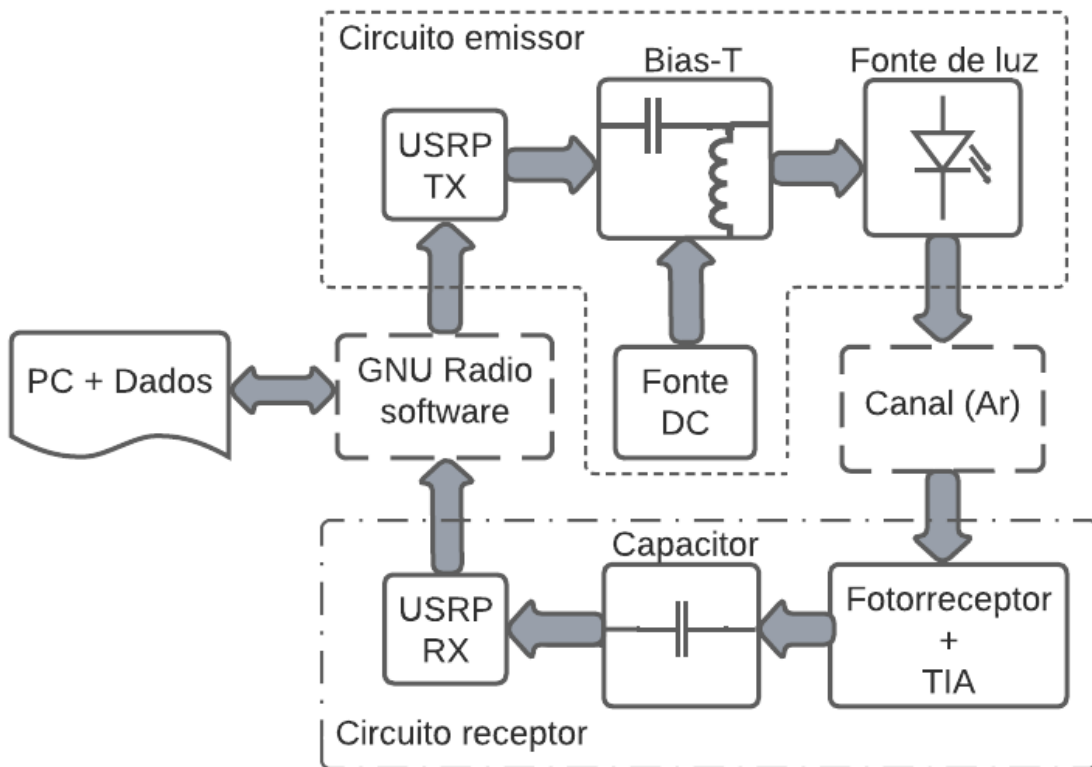
### 3.6 ITU-T G.9991

Essa normativa especifica as arquiteturas de sistemas PHY, MAC e *Data Link Layer* (DLL) para comunicação óptica sem fio de alta velocidade para interiores utilizando luz visível e infravermelho. Apesar de a primeira publicação ser em 2019, vem adicionando emendas conforme a tecnologia e as necessidades evoluem. As bandas de cores definidas pelas normas estão entre  $380nm$  e  $780nm$  para o infravermelho a faixa está entre  $800nm$  e  $1.675nm$  (ITU, 2019).

#### 4 PROJETO DO SISTEMA OWC

O sistema OWC proposto nesse trabalho tem a configuração conforme a figura 4.1 em que cada bloco possui limitações que serão exploradas nas seções seguintes. Um dos principais requisitos impostos nesse projeto é o valor de largura de banda, por ser um limite teórico superior do canal de comunicação, juntamente com o SNR. Então para cada bloco apresentado do sistema, será explorado principalmente o que diz respeito a essas duas características.

Figura 4.1 – Sistema OWC deste trabalho.



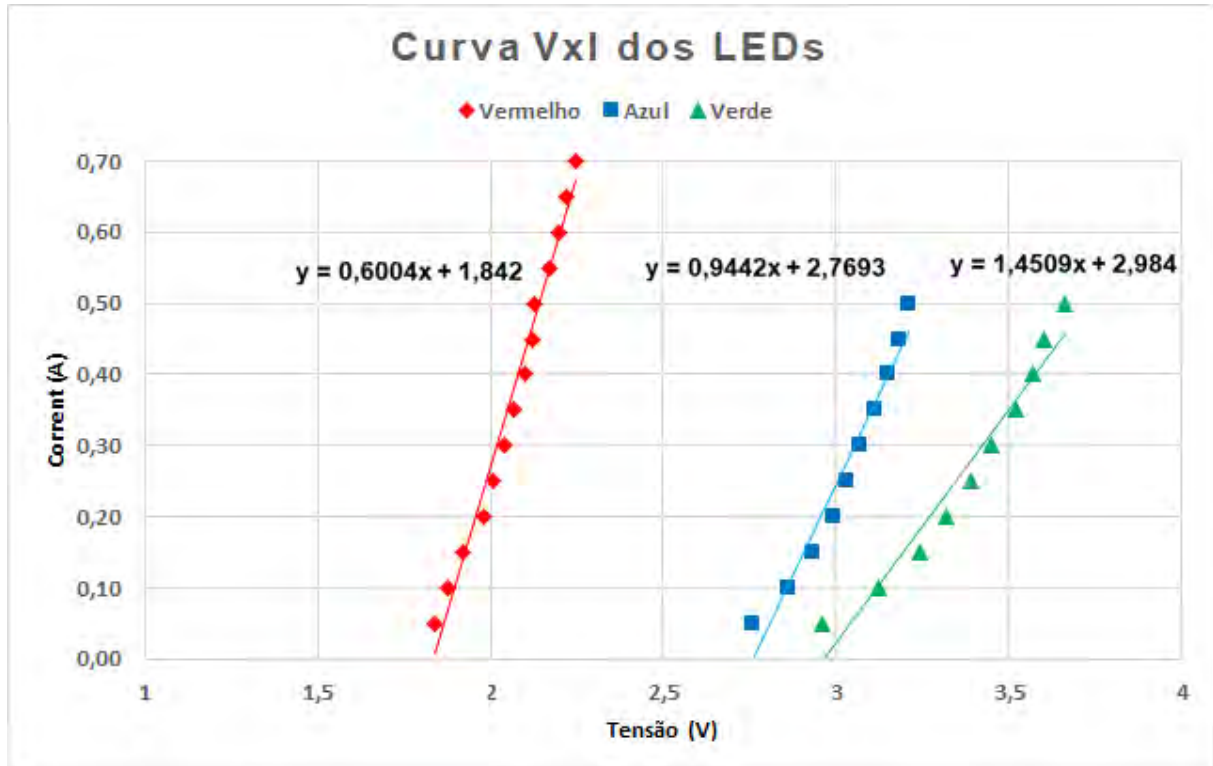
Fonte: Autor.

Uma das escolhas mais importantes para iniciar o desenvolvimento de um sistema OWC é a definição de aplicação. Como neste trabalho temos como objetivo satisfazer diversas possibilidades de aplicação, dentre essas possibilidades foi escolhida uma aplicação com a largura de banda sendo mesma do Wi-Fi, que definido pela norma IEEE 802.11g como  $20MHz$  ou  $40MHz$ , em que ao mesmo tempo também define a técnica de modulação como OFDM.

#### 4.1 FONTE DE LUZ

Pelas razões citadas na seção 2.3 selecionamos LEDs da marca Cree® modelo XLamp® XR-C nas cores vermelho, verde e azul para compor nosso sistema OWC. Em seguida, para modelar os LEDs foi utilizado a técnica de linearização dos pontos de operação, para se obter a resistência dinâmica de cada LED (figura 4.2).

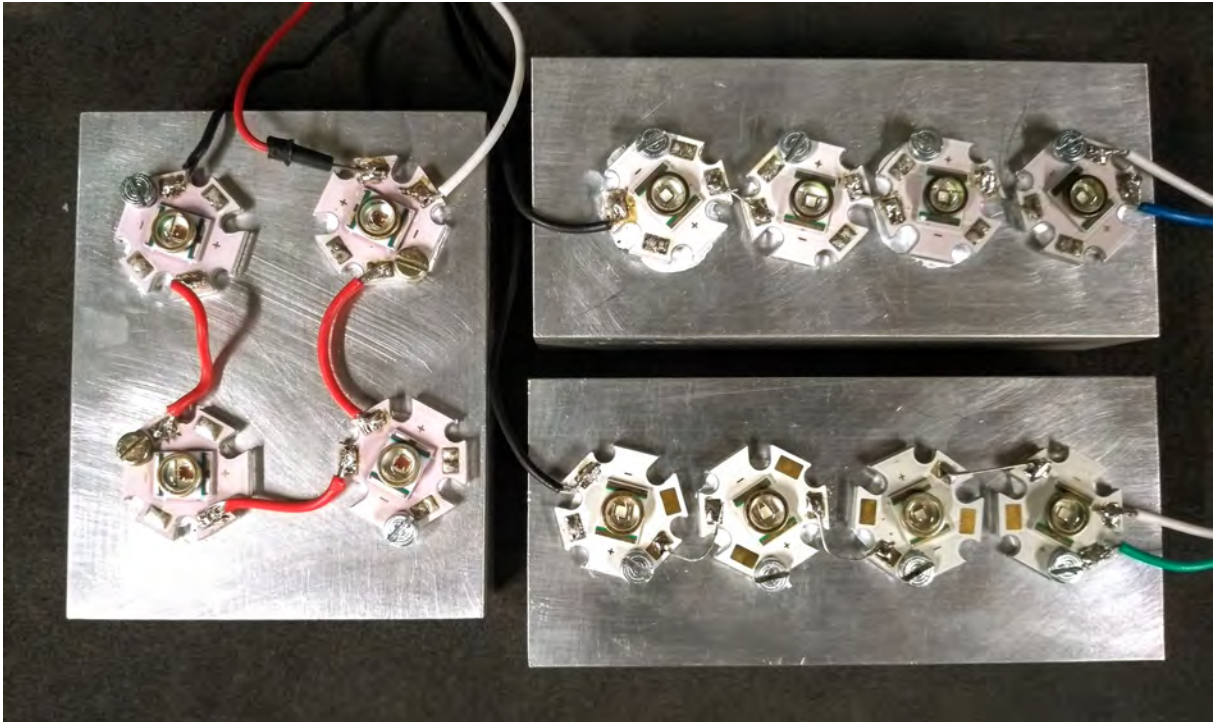
Figura 4.2 – Curva característica de tensão por corrente dos LEDs RGB.



Fonte: Autor.

Na figura 4.3 estão dispostos os LEDs montados com cores separadas, cada cor em uma combinação em série de quatro LEDs, com a opção também de poder ligar apenas um LED individualmente.

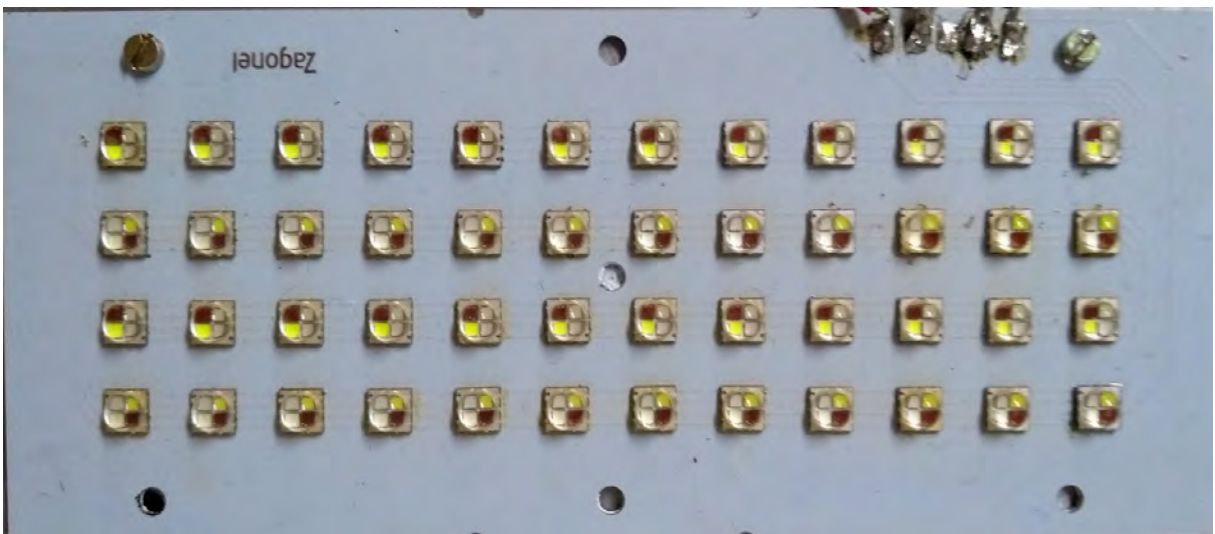
Figura 4.3 – LEDs de cores separados montados em um dissipador.



Fonte: Autor.

No entanto, por questão de disponibilidade, não foi possível montar um conjunto de LEDs em uma quantidade maior com o modelo citado, então, foi utilizado outro modelo de LED, o XLamp XM-L Color LEDs, do tipo RGB integrado no mesmo chip e em uma placa disposta com 48 LEDs, conforme a figura 4.4.

Figura 4.4 – Módulo com 48 LEDs RGB.



Fonte: Autor.

Foi definido anteriormente que a quantidade de luz que chega no fotorreceptor é um fator decisivo para a comunicação, e para quantificar essa potência óptica recebido utilizamos a equação 4.1.

$$P_r = E_e(d) \cdot A_e(\varphi). \quad (4.1)$$

Onde  $E_e(d)$  é a irradiância recebida no sensor, calculado através da equação 4.2 com unidade em  $W/m^2$  e  $d$  é a distância entre o emissor e fotorreceptor.  $A_e$  é a área efetiva fotossensível do fotorreceptor, dada pela equação 4.3.

$$E_e(d) = \frac{R(\phi)}{d^2}. \quad (4.2)$$

$$A_e(\varphi) = A \cdot \cos(\varphi), \text{ se } 0 \leq \varphi \leq FOV. \quad (4.3)$$

Considerando a Lei de Lambert para espectrofotometria, a intensidade de radiação é dada pela equação 4.4.

$$R(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cdot \cos^m(\phi) \cdot P_{LED}. \quad (4.4)$$

Onde  $P_{LED}$  é a potência total irradiada pelo LED, dada pela equação 4.5

$$P_{LED} = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda. \quad (4.5)$$

Onde  $P(\lambda)$  é a distribuição de potência espectral. Ainda em 4.6,  $m$  é a ordem da emissão lambertiana, que depende do ângulo de meia potência do LED ( $\varphi_{1/2}$ ).

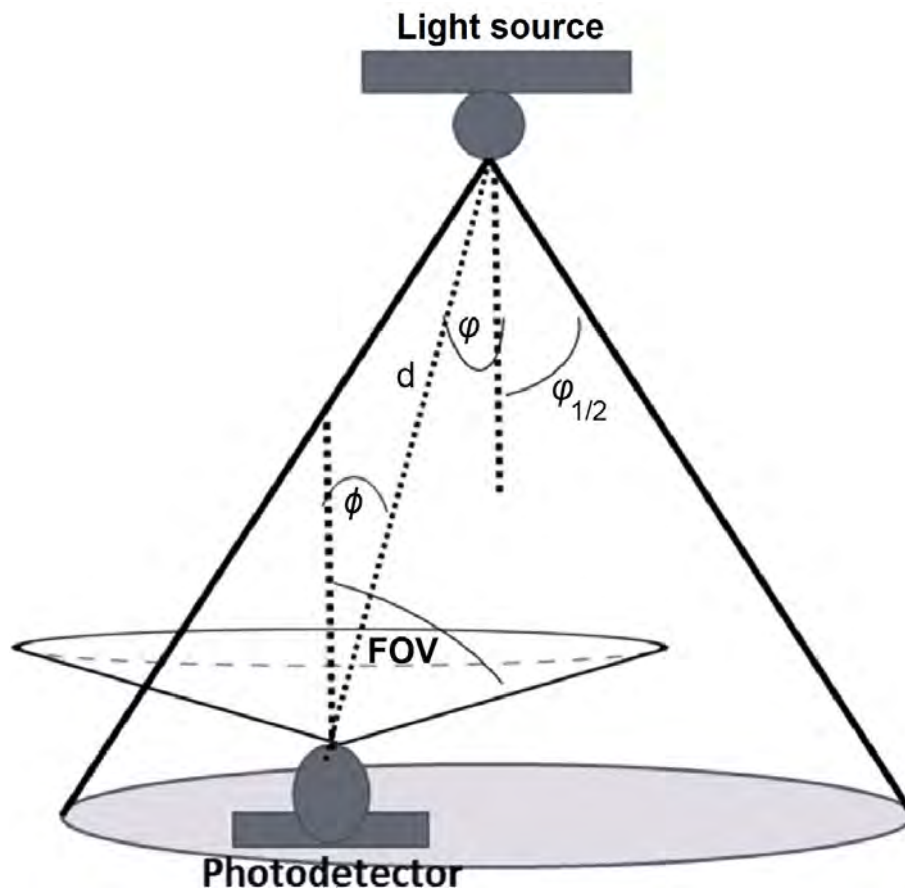
$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))} \quad (4.6)$$

Então, considerando-se uma relação de comunicação LOS, com uma resposta em frequência relativamente plana, com ângulo de radiação incidente  $\varphi$  e ângulo de irradiância  $\phi$ , a expressão do ganho pode ser dado pela equação 4.7. Onde o coeficiente  $(m+1)A_e/2\pi \cdot d^2$  garante que a integração da intensidade radiante sobre a superfície esférica seja igual à potência óptica total. Essa configuração proposta é detalhada na figura 4.5.

$$H_{LOS} = \frac{(m+1) \cdot A_e}{2\pi \cdot d^2} \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\varphi), \text{ se } 0 \leq \varphi \leq FOV. \quad (4.7)$$



Figura 4.5 – Diagrama de raios.



Fonte: Editado de Khalifeh et al. (2018)..

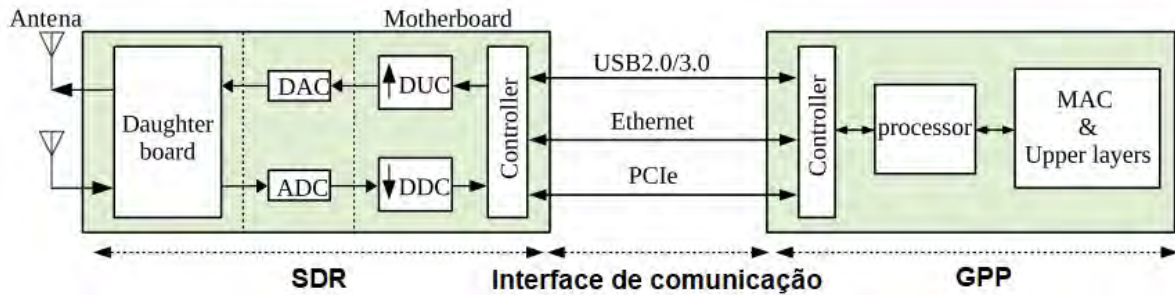
Todos esses aspectos nos mostram que o ângulo e a distância definem um fator relevante na potência óptica transmitida entre o emissor e fotorreceptor. Por hora vamos ignorar esses fatores, definindo de forma que os comunicantes estão muito próximo um do outro e transmitem a máxima potência óptica permitida pelos dispositivos.

É importante salientar que a análise individual dessas cores deve-se ao fato de utilizamos apenas um elemento fotorreceptor e os aspectos de iluminação da fonte de luz, como a capacidade de gerar luz branca, não sendo considerados.

## 4.2 USRP

A estrutura de um USRP pode ser exemplificada pela figura 4.6, separado por três partes: Rádio Definido por Software (SDR), do inglês *Software Defined Radio*, interface de comunicação e o Processador de Uso Geral (GPP), do inglês *General Purpose Processor*.

Figura 4.6 – Arquitetura de um USRP genérico.



Fonte: Molla et al. (2022).

O SDR normalmente é constituído por uma parte analógica de entrada operando em RF, chamada também de Placa Filha, do inglês *Daughterboard*, e segue por uma parte digital operando em Frequência Intermediária (IF), do inglês *Intermediate Frequency*, através de um *Digital Up Conversion* (DUC) e um *Digital Down Conversion* (DDC) que fazem parte da Placa Mãe, do inglês *Motherboard*, onde atuam convertendo a frequência, baseado em amostragem do sinal.

No USRP utilizado a *Daughterboard* é integrada ao dispositivo, porém existem modelos onde ela pode ser substituída e como trata-se da parte analógica de entrada, também tem uma limitação em largura de banda. A *Motherboard* caracteriza a taxa máxima de amostragem do aparelho e a resolução *Analog to Digital Converter* (ADC) e *Digital to Analog Converter* (DAC) que fazem a conversão analógico para digital e o oposto.

A interface de comunicação também é um importante aspecto que deve ser considerado, o seu limitador de taxa de transferência de dados é definido por norma para cada Controlador de Interface de Rede (NIC), do inglês *Network Interface Controller*, utilizado, geralmente USB 2.0 e 3.0, Ethernet e PCIe.

O GPP como o nome já sugere, é um dispositivo programável que realizará instruções por software em um processador, que pode ser um Laptop convencional. Com o GPP podemos programar as camadas digitais PHY e MAC em uma linguagem de maior ou menor nível, utilizando por exemplo o software GNU Radio para modular um sinal. O desempenho do GPP é limitado pelo processador utilizado. Caso a necessidade de processamento seja maior, é possível, em alguns modelos, programar diretamente em *Field Programmable Gate Array* (FPGA) que é um dispositivo lógico programável que suporta a implementação de circuitos digitais e é parte interna do USRP.

Podemos exemplificar o caminho do sinal da seguinte forma: primeiro ele é adquirido de forma analógica por uma entrada na *Daughterboard*, é digitalizado por um ADC e amostrado através de um DDC obtendo o sinal amostrado em banda base digital. Essas amostras são transmitidas para o GPP por uma interface de comunicação e processado em um software que oferece ferramentas para visualização.

Levando em conta essas considerações, o aparelho utilizado no trabalho é o USRP-

2944 da *National Instruments*<sup>®</sup> e nas tabelas 4.1 e 4.2 são mostradas as especificações do mesmo.

Tabela 4.1 – Especificações do USRP transmissor.

Parâmetro	Valor
Faixa de frequência	10MHz a 6GHz
Máxima potência de saída	50mW a 100mW
Máxima potência de saída	17dBm a 20dBm
Máxima largura de banda	160MHz
Máxima taxa de amostragem I/Q	200MS/s
Resolução de conversão A/D	16bit

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Especificações do USRP receptor.

Parâmetro	Valor
Faixa de frequência	10MHz a 6GHz
Máxima potência de entrada	-15dBm
Máxima largura de banda	160MHz
Máxima taxa de amostragem I/Q	200MS/s
Fator de ruído	5dB a 7dB
Resolução de conversão A/D	14bit

Fonte: Autor.

É claro que o USRP é um aparelho robusto e custoso para usar em uma aplicação definitiva, geralmente ele é utilizado com o propósito de testar projetos de comunicação, como no nosso caso. A partir de um propósito bem definido é possível implementar o sistema testado através do USRP em uma forma embutida, tamanho reduzido e baixo consumo de energia, como um *System on Chip* (SoC) por exemplo, que é basicamente um circuito integrado com todas as funções necessárias compactadas (MOLLA et al., 2022).

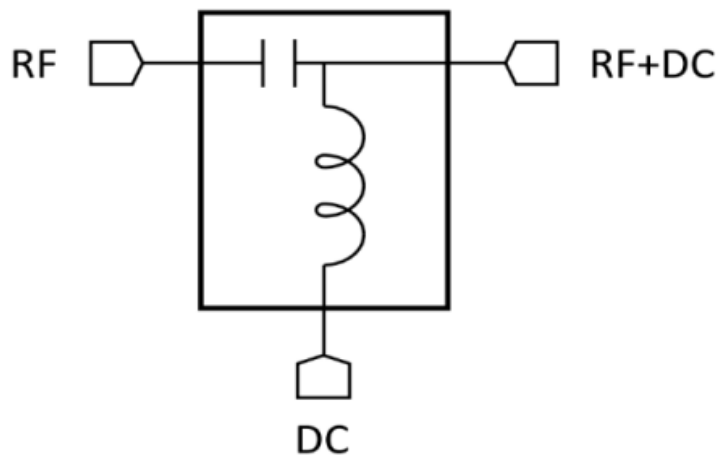
Para garantir o máximo desempenho do sistema, alguns parâmetros limitantes entre os blocos de comunicação devem estar em concordância entre si. Esses parâmetros são bem explorados por Molla et al. (2022), entre eles: frequência de operação, largura de banda, taxa de símbolos, taxa de bits e latência. Ainda no mesmo trabalho citado, os autores comparam diversos USRPs com padrões de Wi-Fi com os quais o desempenho do USRP deste trabalho atinge uma das maiores taxas de transmissão.

Devido às limitações de potência do aparelho, o *front-end* é implementada de forma analógica com um circuito chamado *bias-T* e o mesmo será desenvolvido na seção seguinte.

### 4.3 BIAS-T

O bias-tee ou bias-T é um circuito passivo da categoria dos *diplexer* com três portas (figura 4.7). O qual utilizamos para somar um sinal DC a um sinal de alta frequência, geralmente na faixa do RF. Para um projeto ideal de um bias-T, a entrada RF que contém um capacitor deverá apresentar baixa impedância para um sinal de RF e alta impedância para um nível DC.

Figura 4.7 – Circuito bias-T.



Fonte: Autor.

Neste trabalho o circuito bias-T será usado em duas situações. A primeira será para somar o sinal em alta frequência que sai do USRP-TX ao nível DC de alimentação do LED. A segunda será para bloquear o nível DC proveniente do fotorreceptor em direção ao USRP-RX, pois o mesmo, por se tratar de um aparelho de rádio, normalmente recebe sinais em torno de  $mV$  e nosso fotorreceptor amplificado pode prover uma tensão de saída com amplitude máxima de  $10V$ .

Então, para calcular o valor do capacitor desse circuito vamos utilizar a equação 4.8 proveniente da reatância capacitiva.

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} \quad (4.8)$$

Onde  $f$ , será considerada frequência mínima de entrada, ou seja,  $10MHz$ , considerando a margem de trabalho do USRP. Para o valor da reatância do capacitor vamos considerar a equação 4.9, ou seja, consideramos a proporção de 1 : 100 suficiente para caracterizar baixa impedância.  $R_{eq}$  representa o valor resistivo do LED, de acordo com o

valor angular da equação linearizada apresentada na figura 4.2.

$$X_C = \frac{R_{eq}}{100} \quad (4.9)$$

Para calcular o indutor, utilizaremos a equação da reatância indutiva 4.10.

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f} \quad (4.10)$$

Para  $X_L$  vamos considerar a proporção de 100 : 1 para caracterizar um caminho de alta impedância, sendo assim, temos a equação 4.11.

$$X_L = R_{eq} \cdot 100 \quad (4.11)$$

Uma das técnicas para aumentar ainda mais a impedância no caminho do indutor, sem ter que aumentar o valor de indutância do mesmo, é através da adição de um ferrite *bead* em série, pois o mesmo apresenta uma baixa resistência DC e uma alta impedância para altos valores de frequência (HICKS; ERICKSON, 2008). Esses valores obtidos do capacitor e indutor representam a margem inferior da frequência de trabalho, os limitantes da margem superior dependerão das propriedades parasitas dos materiais utilizados (WOLKE, 2017).

Existem ainda outros detalhes práticos que podem interferir no projeto do bias-T, como a corrente de saturação do indutor e as frequências de auto-ressonância do indutor e capacitor que podem resultar em um comportamento não esperado nas frequências de trabalho. Por questões práticas, vamos nos limitar em apenas definir a corrente de saturação do indutor e trabalhar fora da Frequência de Auto-Ressonância (SRF), do inglês, *Self Resonant Frequency*, dos componentes que apresentam esse valor no seu respectivo *datasheet*.

Então, determinados os parâmetros de projetos para nosso bias-T foram montadas placas para dois conjuntos de LEDs diferentes, os primeiros circuitos foram projetados para 1 a 4 LEDs, considerando como carga mínima para este trabalho. O segundo conjunto foi projetado para a combinação de 48 LEDs RGB em série, considerado como carga máxima neste projeto. Os valores para carga mínima são descritos na tabela 4.3 e as imagens dos protótipos estão nas figuras 4.8 e 4.9.

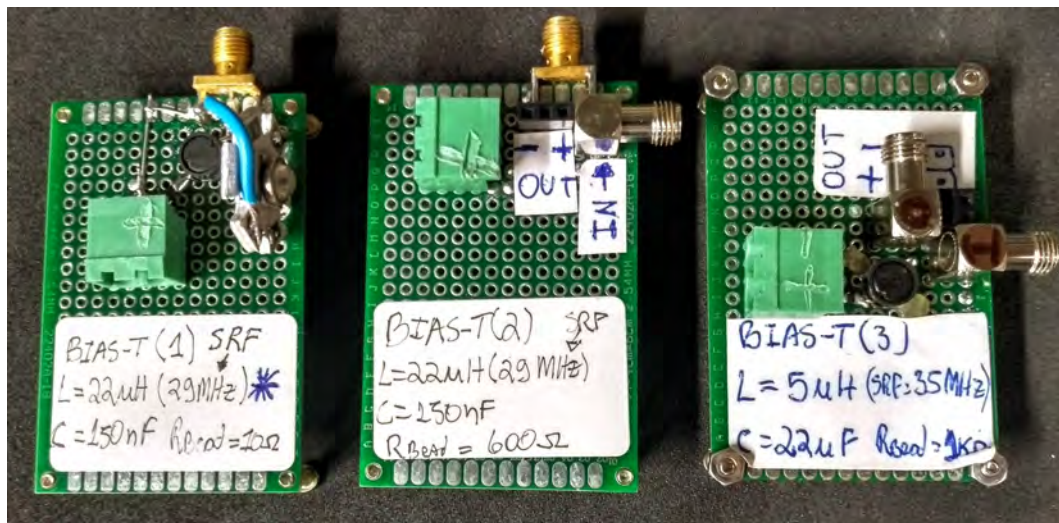
Na tabela acima, os circuitos são denominados por 1, 2 e 3. Os circuitos 1 e 2 foram projetados para 4 LEDs. O circuito 3 abrange os LEDs unitários para as três cores. No entanto, nos testes realizados os circuitos serviram sem prejuízo para a comunicação para qualquer combinação de cores para 1 a 4 LEDs. O limite de tensão é definido pelo capacitor, que é de 50V para os modelos utilizados.

Tabela 4.3 – Valores calculados para os circuitos bias-T considerando carga de 1 a 4 LEDs.

Bias-T	1	2	3
Capacitor	$150nF$	$150nF$	$2.2\mu F$
Indutor	$22\mu H$	$22\mu H$	$5\mu H$
R bead	$10\Omega$	$600\Omega$	$1k\Omega$
SRF (L)	$29MHz$	$29MHz$	$35MHz$
I (sat.)	$1.05A$	$1.05A$	$1.6A$

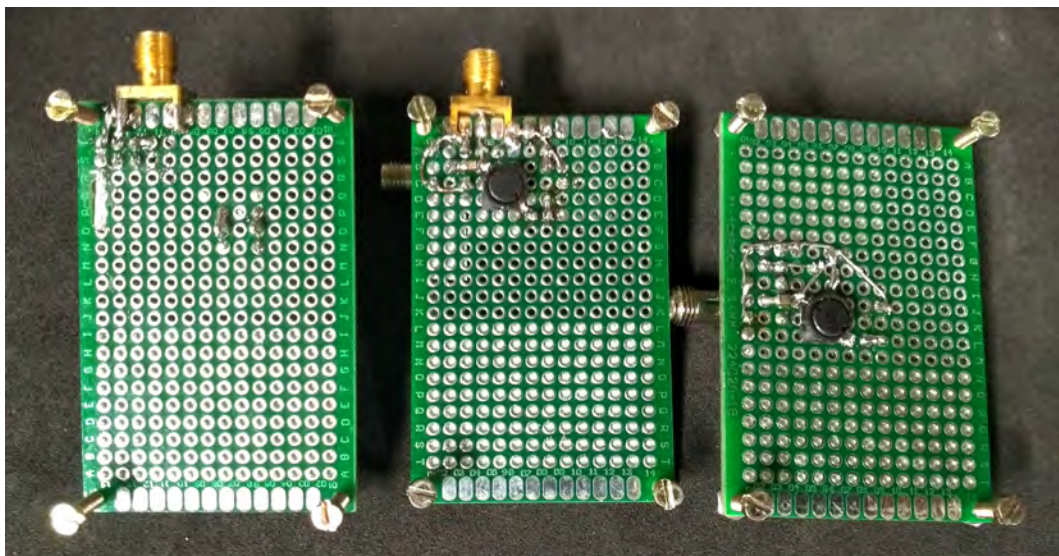
Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Visão superior dos protótipos de circuito bias-T para 1 a 4 LEDs.



Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Visão inferior dos protótipos de circuito bias-T para 1 a 4 LEDs.



Fonte: Autor.



Da mesma forma os parâmetros do circuito considerado para a carga máxima são descritos na tabela 4.4.

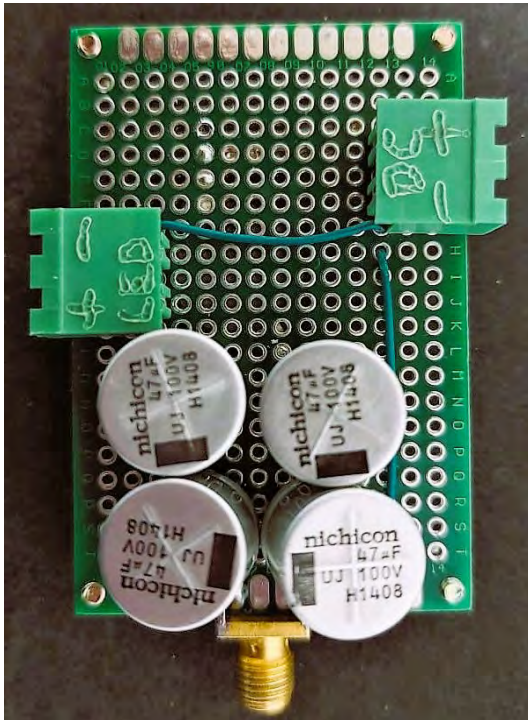
Tabela 4.4 – Valor calculado para o circuito bias-T considerando carga de 48 LEDs.

<b>Bias-T</b>	<b>4</b>
<b>Capacitor</b>	$47\mu F$
<b>Indutor</b>	$47\mu H$
<b>R bead</b>	$1k\Omega$
<b>SRF (L)</b>	$8MHz$
<b>I (sat.)</b>	$4.2A$

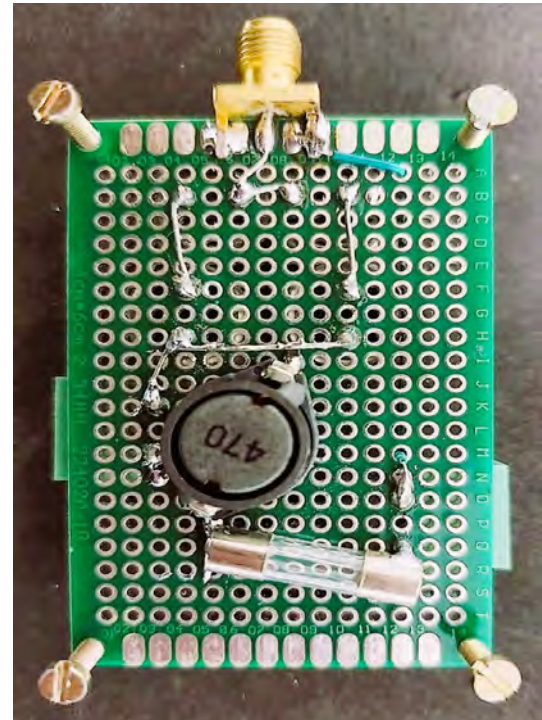
Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Protótipo do circuito bias-T para 48 LEDs.

(a) Visão superior.



(b) Visão inferior.



Fonte: Autor.

O conjunto de 48 LEDs requer uma tensão de 150V e por isso foi feita a combinação de capacitores em série e em paralelo conforme a figura 4.10.

#### 4.4 GNU RADIO

O GNU Radio é um software de código aberto que oferece ferramentas de desenvolvimento através de blocos de processamento implementados na linguagem C++ com

funções de programação escritos na linguagem Python para efetuar processamento de sinais digitais (KHARADI, 2016). O que é muito conveniente para implementação em um dispositivo de rádio definido por software.

Esse software nos permite implementar toda a parte de processamento digital, que para a maioria dos padrões faz parte da camada de protocolo MAC e toda a camada PHY de um modelo OSI (Open Systems Interconnection), definido pela ISO/IEC 7498-1.

Para a implementação do nosso sistema OWC nesse software, utilizamos a plataforma colaborativa GitHub onde mantém hospedado uma seção de exemplos (GITHUB, 2022) para serem utilizados no GNU Radio. Entre esses exemplos utilizaremos os arquivos que implementam a técnica OFDM para transmissão e outro para recepção, que foram unidos em um só arquivo e adaptados. O funcionamento dos blocos é detalhado por Sowjanya (2019) e as modificações impostas são mínimas, porém, explicadas na capítulo de resultados experimentais e o diagrama de blocos inserido no apêndice A.

#### 4.4.1 Modulação

A técnica de transmissão utilizada neste trabalho e implementado no GNU Radio é a OFDM, que se justifica não só por estar nas normas, mas por ser vastamente usada em tecnologias Wi-Fi por ter uma alta eficiência espectral. Os parâmetros utilizados estão descritos na tabela 4.5. A norma para a OFDM ainda cita a modulação BPSK, do inglês *Binary Phase Shift Keying* como mandatório para a parte do *header* que é o cabeçalho da mensagem a ser transmitida. E a modulação QPSK, do inglês *Quadrature Phase Shift Keying*, para o *payload*, sendo que essa modulação pode ser de até 16-QAM, conforme a norma.

Tabela 4.5 – Parâmetros da técnica OFDM para a norma IEEE 802.11a.

Parâmetro	Valor
Largura de banda	20MHz
Subportadoras	64
Espaçamento das subportadoras	312kHz
Tempo do símbolo	4μs
Tempo de guarda	1,6μs

Fonte: Autor.



## 4.5 FOTORRECEPTOR

Na consideração por tipos de fotorreceptores, em quase a totalidade dos trabalhos pesquisados se usam apenas dois tipos: fotodiodo PIN e o Fotodiodo de Avalanche (APD), do inglês *Avalanche Photodiode*, ambos são baseados na interação da radiação óptica e matéria, que é chamada de efeito fotoelétrico. A sigla PIN representa as camadas 'p' e 'n' do semiconductor e o 'i' é uma região intrínseca entre elas onde ocorre a passagem de carga elétrica. O APD tem uma construção semelhante, porém ocorre o fenômeno avalanche que multiplica o ganho de corrente.

Existem alguns indicadores importantes do fotodiodo para um bom projeto, como sensibilidade ( $S$ ), responsividade ( $\rho$ ), a eficiência quântica ( $\eta$ ), corrente escura, capacitância, frequência de corte ( $f_c$ ), área do detector ( $A_e$ ) e custo. Na figura 4.11 temos exemplos de parâmetros de fotodiodos PIN e ADP para três materiais diferentes: Silício, em inglês *Silicon*, Germânio, em inglês *Germanium* de Arseneto de Índio e Gálio (InGaAs).

Figura 4.11 – Parâmetros típicos de fotodiodos.

Parameter	Silicon		Germanium		InGaAs	
	PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Wavelength range [nm]	400-1100		800-1800		900-1700	
Peak [nm]	900	830	1550	1300	1550	1550
Responsivity $\mathcal{R}$ [A/W]	0.6	77-130	0.65-0.7	3-28	0.75-0.97	
Quantum efficiency [%]	65-90	77	50-55	55-75	60-70	60-70
Gain	1	150-250	1	5-40	1	10-3
Excess noise factor	—	0.3-0.5	—	0.95-1	—	0.7
Bias voltage [-V]	45-100	220	6-10	20-35	5	30
Dark current [nA]	1-10	0.1-1.0	50-500	10-500	1-20	1-5
Capacitance [pF]	1.2-3	1.3-2	2-5	2-5	0.5-2	0.5
Rise time [ns]	0.5-1	0.1-2	0.1-0.5	0.5-0.8	0.06-0.5	0.1-0.5

Fonte: Mapunda et al. (2020).

Essa figura exhibe os principais parâmetros de um fotodiodo, e segundo Fuada2018 na escolha desses parâmetros para o projeto, irão aparecer conflitos de escolha, nos limitando a selecionar dois ou três parâmetros que mais se adequam ao projeto. Para melhor ajudar no entendimento dos parâmetros, nas subseções abaixo estão alguns considerados mais importantes.

### 4.5.1 Resposta dinâmica

Podemos caracterizar a resposta dinâmica dos fotorreceptores PIN de acordo com a resposta ao impulso  $\tau$  ou com a frequência de corte  $f_c$  para um sinal modulado em alta frequência (FUADA; PRATAMA; ADIONO, 2017). Se consideramos que o fotorreceptor

tenha o mesmo tempo de subida e descida do sinal, próximo das funções  $[1 - e^{-t/\tau_0}]$  e  $[e^{-t/\tau_0}]$  e com a constante de tempo  $\tau_0$ , a resposta ao impulso será:

$$t = t_r = t_f = 2,2 \cdot \tau_0 \quad (4.12)$$

Para um modulação senoidal com valores constantes de amplitude e frequência igual a  $\omega = 2\pi f$ , a frequência de corte  $f_c$  se dá quando esse valor decaí 3 dB, o mesmo vale para a corrente gerada pela luz  $I(\omega)$ . Então, a frequência de corte é limitada pela constante de tempo do circuito RC equivalente do fotorreceptor, dado por:

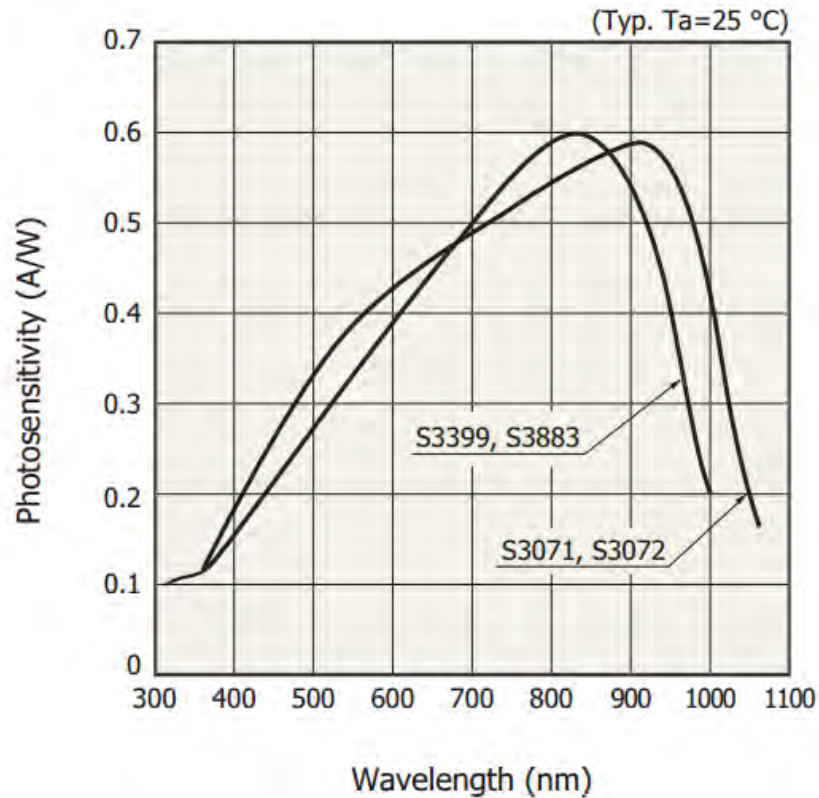
$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_t \cdot C_d} \quad (4.13)$$

Onde  $R_t$  é soma total das resistências em série e da carga resistiva do fotorreceptor,  $C_d$  é a soma da capacitância de junção  $C_j$  e da capacitância distribuída. Esses parâmetros intrínsecos se comportam como um filtro passa baixa para o sinal (HOEHER, 2019), logo um possível limitante superior para nosso sistema de comunicação.

#### 4.5.2 Sensibilidade

A sensibilidade é definida pela relação entre a corrente gerada na saída do fotodiodo em ( $A$ ) e a potência óptica incidente em ( $W$ ). Um exemplo desse parâmetro retirado de um *datasheet* é mostrado na figura 4.12.

Figura 4.12 – Resposta espectral de um fotodiodo PIN.



Fonte: Hamamatsu (2014)

Em que a sensibilidade é mais alta na região do infravermelho entre  $800\text{nm}$  e  $950\text{nm}$ , comportamento típico de fotodiodos de silício.

#### 4.5.3 Noise Equivalent Power (NEP)

O NEP é o valor de potência de entrada de um sinal que resulta em um SNR unitário para  $1\text{Hz}$  de largura de banda de saída, que equivale a  $0,5\text{s}$  de tempo de integração (HOEHER, 2019). Resumindo, é um valor de escolha que deverá ser o menor possível pois representa uma métrica de sensibilidade do fotorreceptor.

$$NEP = \frac{\text{Energia Incidente} \cdot A_f}{SNR \cdot \sqrt{\Delta_f}} \quad (4.14)$$

Na equação (4.14) o NEP aumenta proporcionalmente com aumento de  $A_f$ , mas diminui quanto maior for o SNR. Se considerarmos um canal óptico com um ruído do tipo AWGN,

podemos expressar o SNR como (4.15):

$$SNR = \frac{(R_\lambda \cdot P_r)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{termico}^2} \quad (4.15)$$

Onde  $R_\lambda$  é o valor de responsividade do fotorreceptor,  $P_R$  é a potência média recebida,  $\sigma_{shot}^2$  e  $\sigma_{termico}^2$  são respectivamente o ruído *shot* e térmico. O ruído *shot* é oriundo da iluminação ambiente.

#### 4.5.4 Largura de banda

Partindo do preceito de escolha de projeto, dada uma largura de banda mínima, é possível escolher um fotorreceptor com a maior área ativa possível  $A_f$  (parte fotossensível do dispositivo) através da equação (4.16), desde que os requerimentos de  $f_c$  sejam atingidos através da constante de tempo  $RC$ .

$$BW = \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_r + \tau_{RC})} \quad (4.16)$$

Onde  $\tau_r$  e  $\tau_{RC}$  representam o tempo de transmissão e tempo de descarga respectivamente.

A ideia de ter a maior  $A_f$  no fotorreceptor parte do pressuposto de maximizar a potência óptica atingida no dispositivo ( $P_{in}$ ), possibilitando também uma maior distância entre o emissor e receptor. No entanto, se a área  $A_f$  é aumentada, a capacidade do dispositivo de receber luz de interferência também aumentará, o que afeta o SNR. Mas interferências causadas por outras fontes de luz podem ser reduzidas usando diversos métodos de processamento de sinais ou filtros, como equalização ou códigos de correção de erros (SAHA et al., 2012; GOUR; KUMAR, 2016; GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2013).

Levando em conta esses parâmetros, para o presente projeto foi escolhido o dispositivo PDA10A2 da ThorLabs<sup>®</sup>, as especificações do mesmo estão presentes na tabela 4.13. É importante salientar que esse dispositivo não é apenas um fotorreceptor, por possuir um amplificador embutido, pode ser caracterizado como um circuito receptor.

Tabela 4.6 – Especificações do fotorreceptor.

	Valor
Responsividade em 730 nm	$0,44A/W$
Área ( $A_f$ )	$0,8mm^2$
Largura de banda	$0 - 150MHz$
Ganho de transimpedância	$1 \cdot 10^4V/A$ (acima de $5k\Omega$ ) $5 \cdot 10^3V/A$ (para $50\Omega$ )
NEP em 730nm	$2,92 \cdot 10^{-11}W/\sqrt{Hz}$

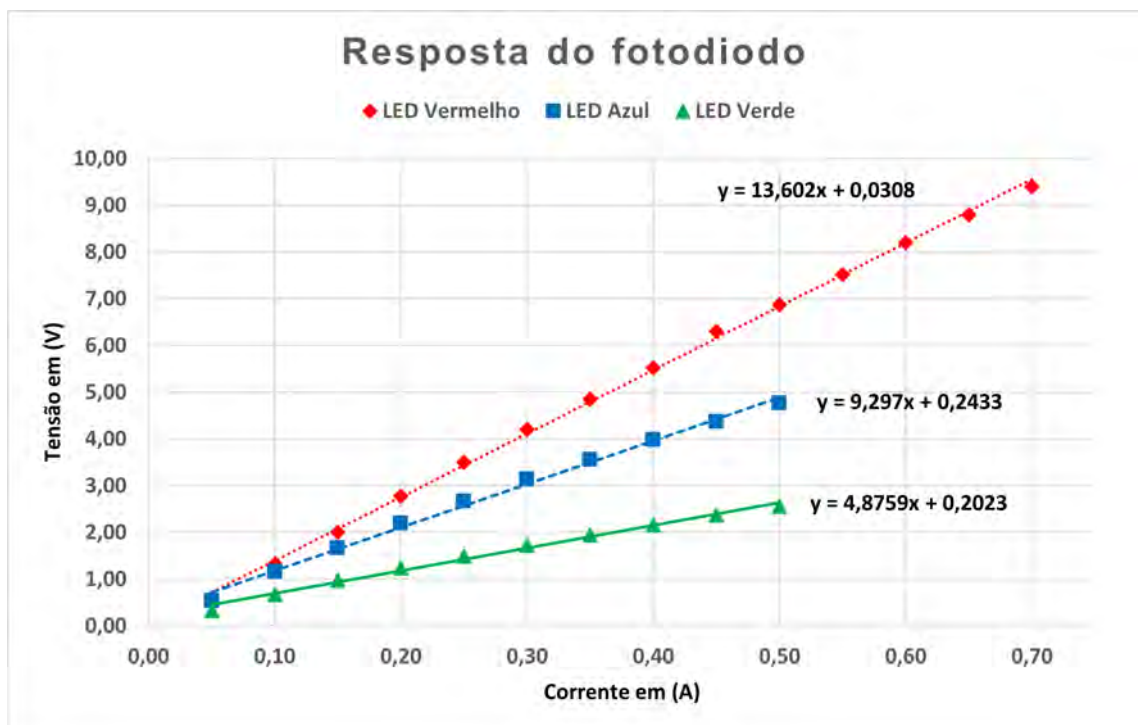
Fonte: Autor.

#### 4.5.5 Medição do fotorreceptor

Feita a escolha do fotorreceptor, foram realizados testes com o mesmo para verificar a resposta de acordo com a corrente dos LEDs e a resposta de quando se varia a distância entre o emissor e receptor.

Na figura 4.13 foi mantida uma distância fixa entre o LED e o fotorreceptor, em seguida o LED foi mantido na sua máxima corrente nominal até estabilização térmica, e logo após a corrente foi reduzida para obter os pontos de medições.

Figura 4.13 – Curva de resposta do fotorreceptor em relação à corrente no LED.

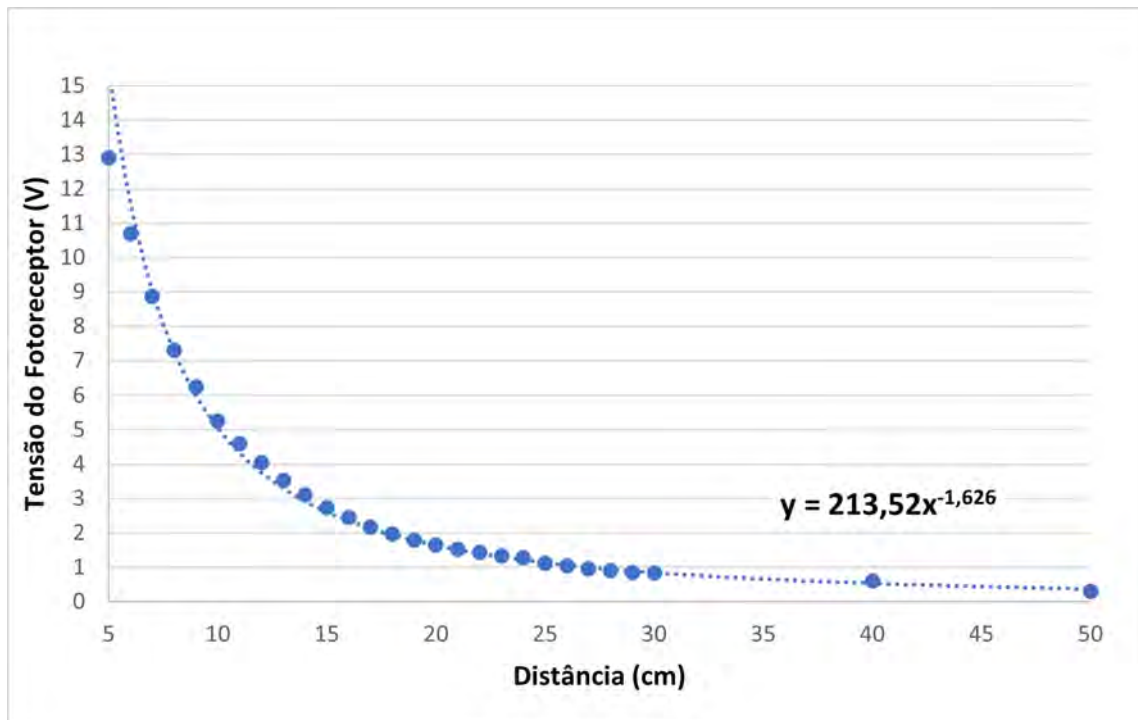


Fonte: Autor.

Conforme a figura, para essas condições de medição, existe uma linearidade da resposta do fotorreceptor.

E na figura 4.14 a corrente no LED foi mantida constante, e a distância entre o emissor e receptor foi aumentada.

Figura 4.14 – Curva de resposta em tensão do fotodiodo para transmissão por luz com visada.



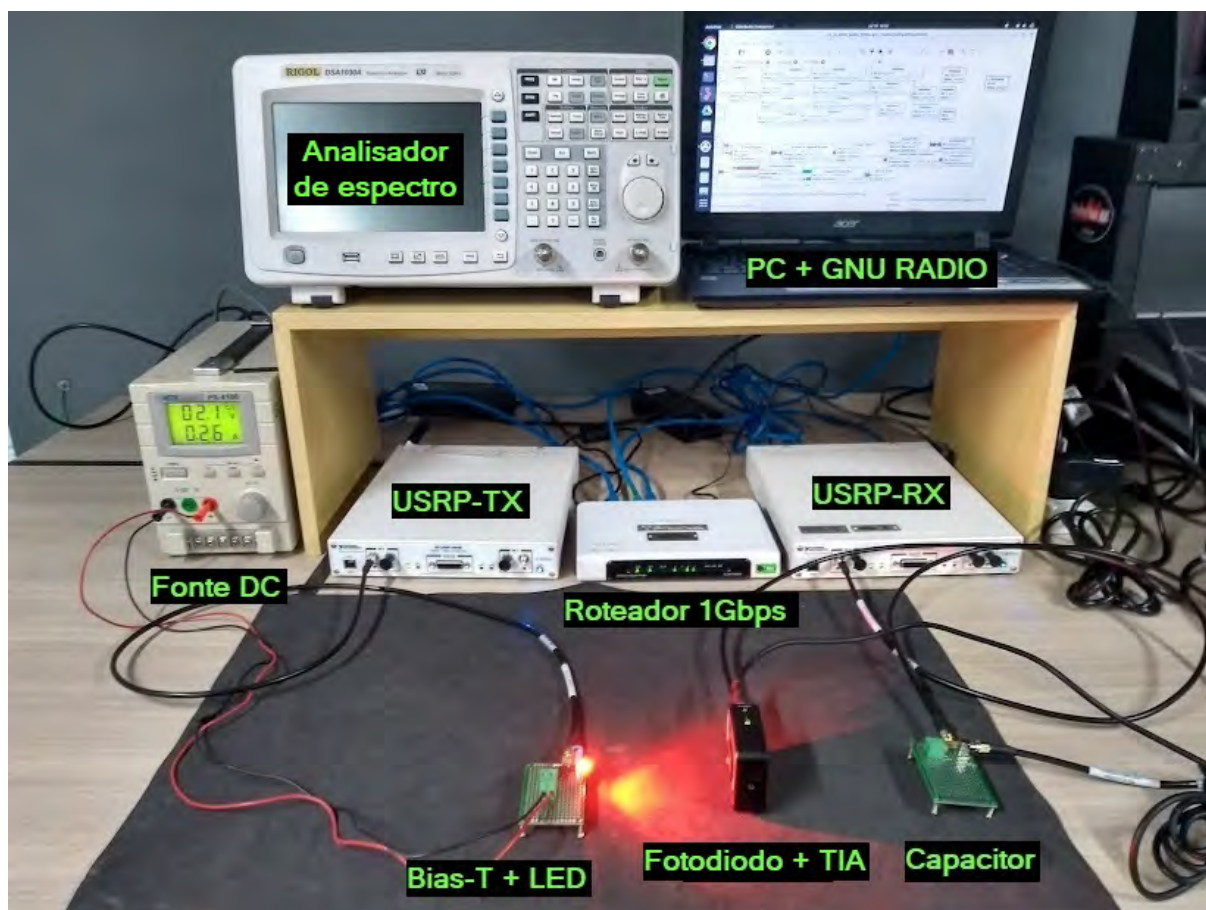
Fonte: Autor.

Em ambos testes as condições de medições foram feitas em cima de uma mesa com ambiente não controlado que podem afetar as medições, o efeito mais visível ocorreu na figura 4.14 onde o valor exponencial da equação não segue o dito na equação 4.2. Porém, feito uma análise dos dados observou-se que com o aumento da distância a exponencial aproxima-se do valor de referência. O resultado dessas medições nos confirma o que foi visto na seção 4.1 em que para uma aplicação final, a escolha da distância e ângulos entre o emissor e receptor é crucial para efeitos tanto de comunicação, quanto para iluminação.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi montado em bancada, conforme na figura abaixo, um sistema OWC relativo ao esquemático apresentado na figura 4.1 cujos componentes estão listados na tabela 5.1.

Figura 5.1 – Configuração experimental em bancada de testes.



Fonte: Autor.

Tabela 5.1 – Equipamentos utilizados

Equipamento	Modelo
Analisador de espectro	Rigol DSA1030A
USRP	National Instruments 2944
Fotodetector	ThorLabs PDA10A2
Roteador	TP-LINK WR1043ND
PC	Acer Aspire ES1-572-37PZ
Fonte de tensão	ICEL PS-4100
LED	Cree XLamp XR-C RBG
Cabo coaxial SMA-SMA	NI 156923A-01

Fonte: Autor.

Os blocos 'PC + GNU Radio' fazem a comunicação com o USRP-TX e USRP-RX através de cabos de rede por protocolo Ethernet dispostos em um roteador. Os USRPs enviam e recebem o sinal para os transceptores através de cabos coaxiais e conectores tipo SMA. O LED é alimentado por uma fonte DC através de cabos de cobre comuns. O analisador de espectro é utilizado para as medições de largura de banda e SNR de forma instantânea em uma faixa de frequência.

Com essa cama de testes montada, abaixo são descritos os experimentos executados em ordem cronológica, com o intuito de demonstrar com fidelidade as etapas experimentais e os problemas encontrados ao desenvolver e testar esse sistema proposto.

### 5.1 EXPERIMENTO 1 - ANÁLISE DO SINAL

Para as primeiras aquisições, foi utilizado o analisador de espectro para visualizar os valores do sinal na entrada do USRP-RX, ou seja na saída do fotorreceptor, após o capacitor do bias-T. Foram feitas medidas com a portadora nas frequências para 10MHz, 20MHz, 30MHz e 50MHz com ganho máximo na saída do USRP-TX, os dados são transmitidos com técnica OFDM com origem em um arquivo de áudio com duração de *3min* com repetição na reprodução, os demais parâmetros estão descritos nas tabelas 5.2 e 5.3. O principal objetivo dessas medições é verificar a máxima potência de sinal que será enviado ao USRP-RX para garantir que não danificará o aparelho.

Tabela 5.2 – Experimento 1.1.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Taxa de amostragem	<i>2MS/s</i>
Largura de banda	<i>2MHz</i>
Corrente no LED	<i>200mA</i>
Cor do LED	Vermelho
Distância entre emissor e receptor	<i>5cm</i>
Frequência da portadora	<i>20MHz</i>

Fonte: Autor.

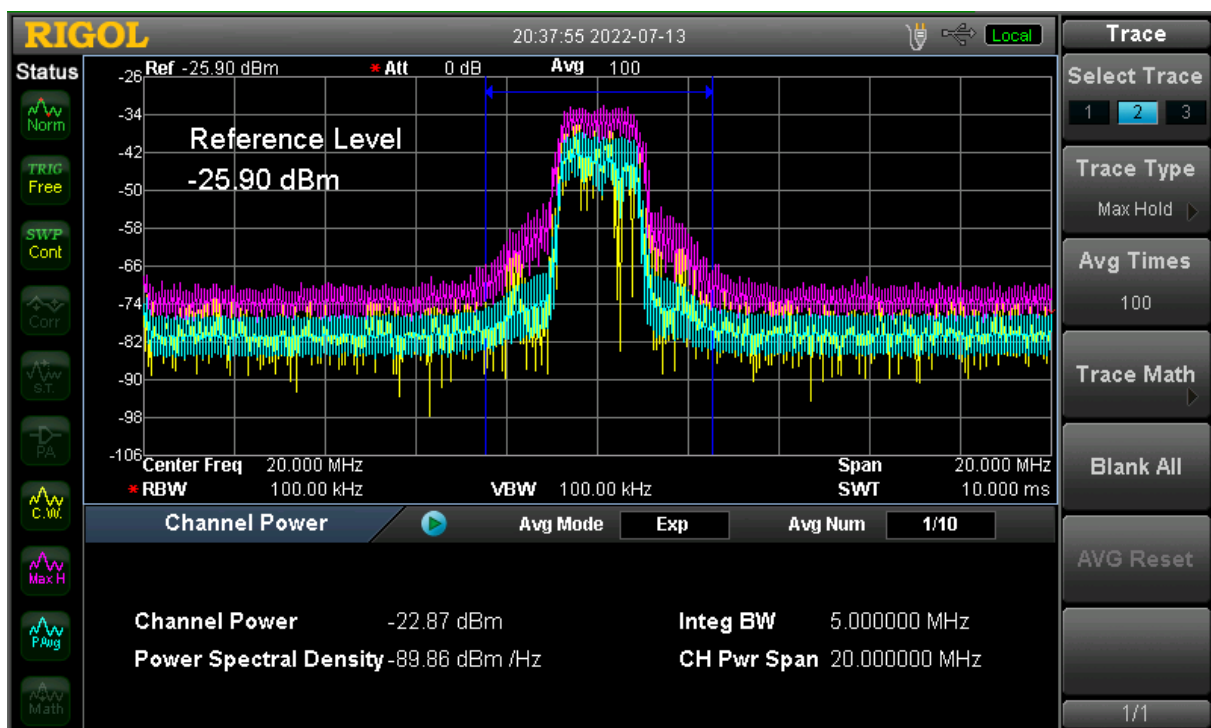


Tabela 5.3 – Experimento 1.2.

Parâmetro	Valor
Taxa de amostragem	9MS/s
Largura de banda	9MHz
Corrente no LED	200mA
Cor do LED	Vermelho
Distância entre emissor e receptor	5cm
Frequência da portadora	20MHz

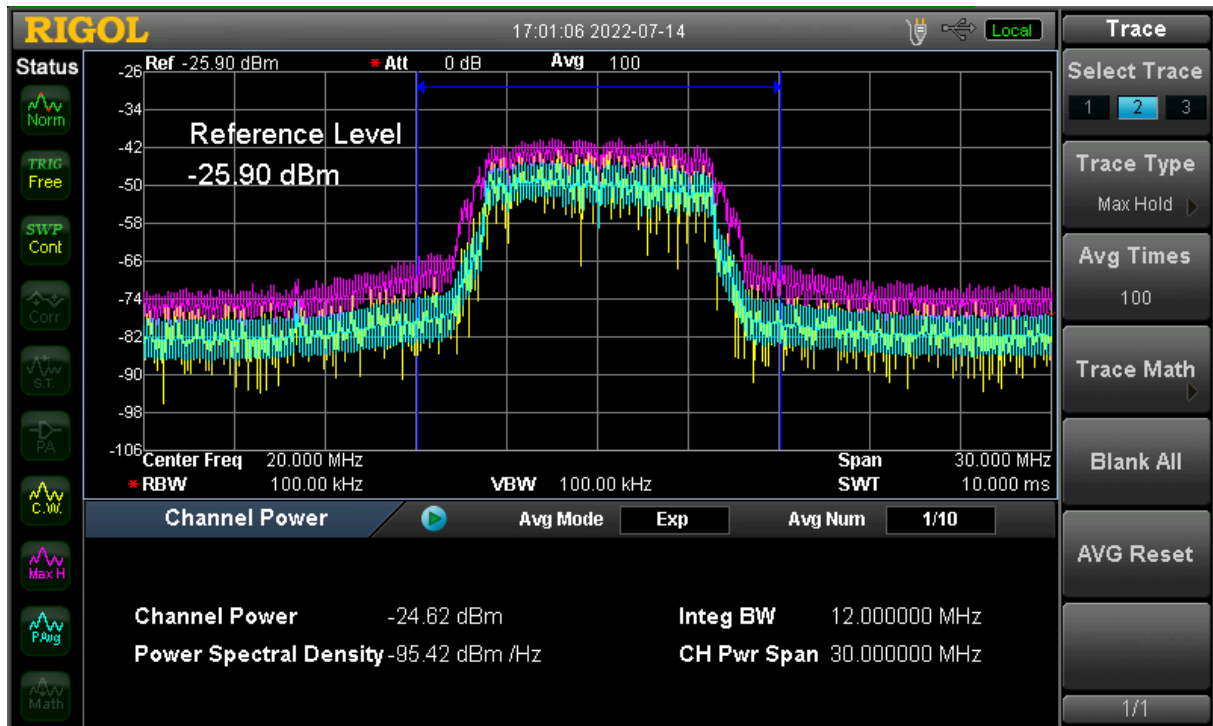
Fonte: Autor.

Figura 5.2 – Aquisição do experimento 1.1, apresenta potência máxima do sinal de -22.87dBm.



Fonte: Autor.

Figura 5.3 – Aquisição do experimento 1.2, apresenta potência máxima do sinal de -24.62dBm.



Fonte: Autor.

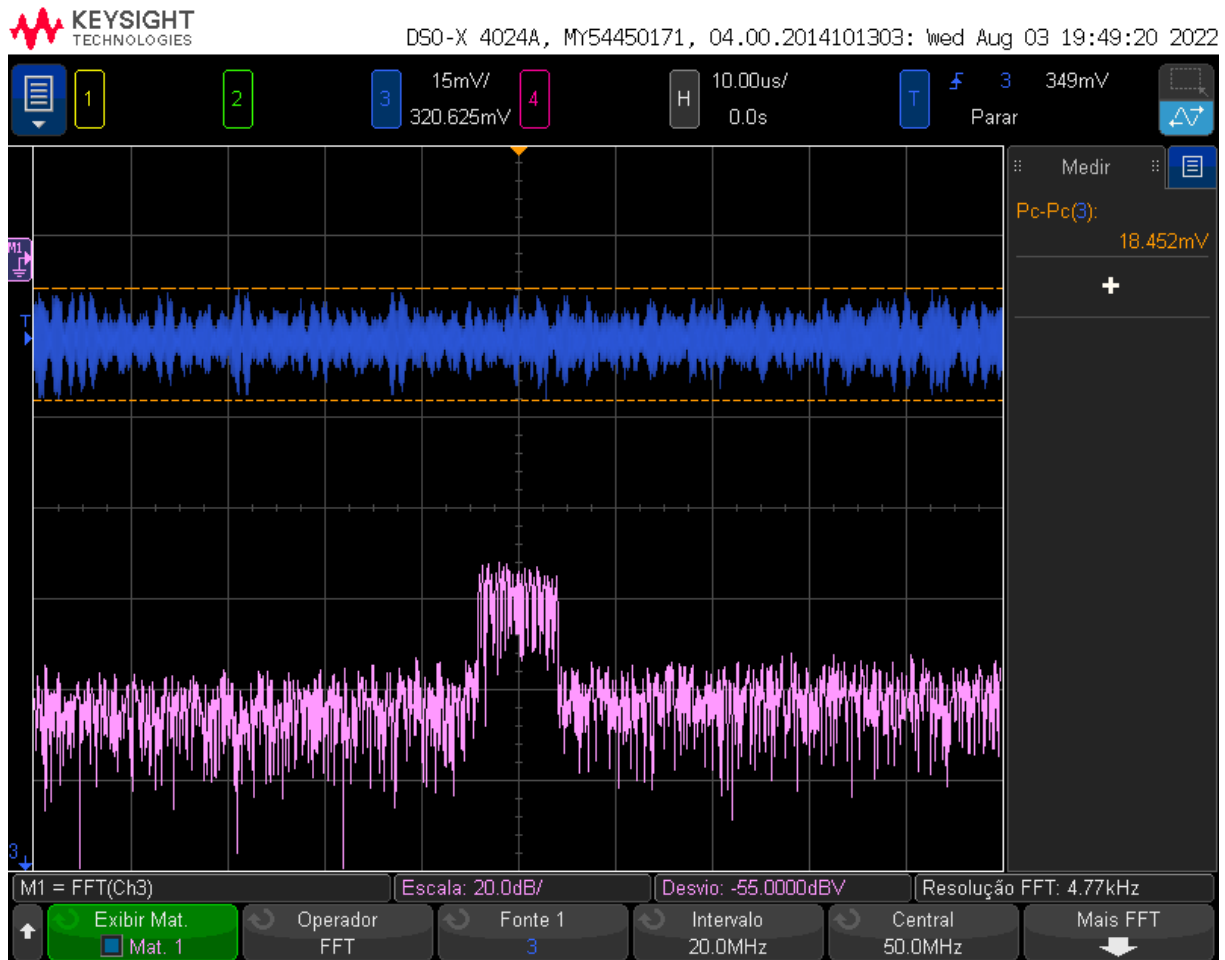
Os resultados que apresentam maior potência são os com a portadora em  $20\text{MHz}$ , provavelmente pela melhor resposta em frequência do LED. No experimento 1.2 com o mesmo valor de portadora, mas com a largura de banda aumentada, observa-se que o sinal espalha a potência, por isso um decréscimo de  $1.75\text{dBm}$ . Ainda como complemento nesse experimento, foi utilizado um osciloscópio modelo DSOX4024A da Keysight Technologies®, para analisar o sinal recebido no domínio do tempo para valores da portadora em  $20\text{MHz}$  e  $50\text{MHz}$ , a taxa de amostragem do sinal foi fixada em  $1\text{MS}/s$  para a mesma largura de banda.

Figura 5.4 – Envoltória do sinal OFDM no tempo para frequência de portadora em 20MHz.



Fonte: Autor.

Figura 5.5 – Comportamento do sinal no tempo para frequência de portadora em 50MHz.



Fonte: Autor.

O que podemos observar com essas imagens no domínio do tempo é a envoltória do sinal OFDM, onde, em  $50MHz$  a amplitude é atenuada devido ao limite da resposta em frequência do LED, o resultado desse fenômeno em uma transmissão são perdas da informação devido ao baixo SNR. Para uma transmissão de áudio por exemplo, foi possível escutar falhas na continuidade da transmissão.

## 5.2 EXPERIMENTO 2 - VARREDURA

Ao decorrer dos experimentos foi observado que devido à proximidade dos USRPs, e o posicionamento dos demais componentes, parte do sinal gerado estava sendo transmitido de forma irradiada pelas trilhas do sistema, que atuam como antenas transmissoras e receptoras que somam ao valor final recebido pelo USRP. A potência média desse sinal vai variar de acordo com a frequência da portadora transmitida. Para descontar essa influência do sinal eletromagnético irradiado precisamos então mensurar o valor médio de

potência do sinal recebido com o LED desligado, em seguida com o LED ligado, e deduzir essa a diferença.

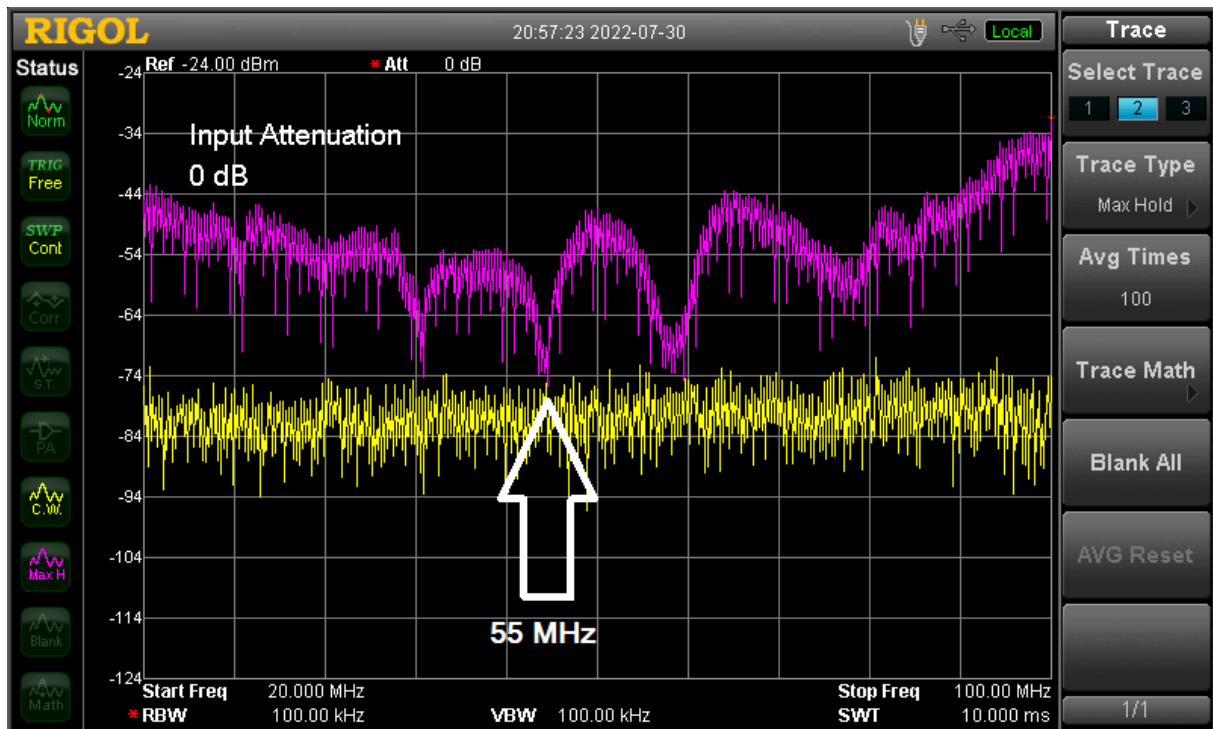
Primeiramente para visualizar em que frequências essa interferência está ocorrendo, foi configurando um transmissão de acordo com os parâmetros da tabela 5.4, e foi feita uma variação de frequência da onda portadora, começando em  $20\text{MHz}$  até  $100\text{MHz}$  com intervalos de 20 segundos para cada  $1\text{MHz}$ , primeiro com o LED desligado (figura 5.8), após com o LED ligado (figura 5.6), e ainda outro teste de prova com o LED ligado, porém com uma barreira que impede a passagem de luz do emissor para o receptor (figura 5.7).

Tabela 5.4 – Experimento 2 - Varredura

Parâmetro	Valor
Taxa de amostragem	$1\text{MS}/s$
Largura de banda	$1\text{MS}/s$
Corrente no LED	$500\text{mA}$
Cor do LED	Vermelho
Distância entre emissor e receptor	$5\text{cm}$

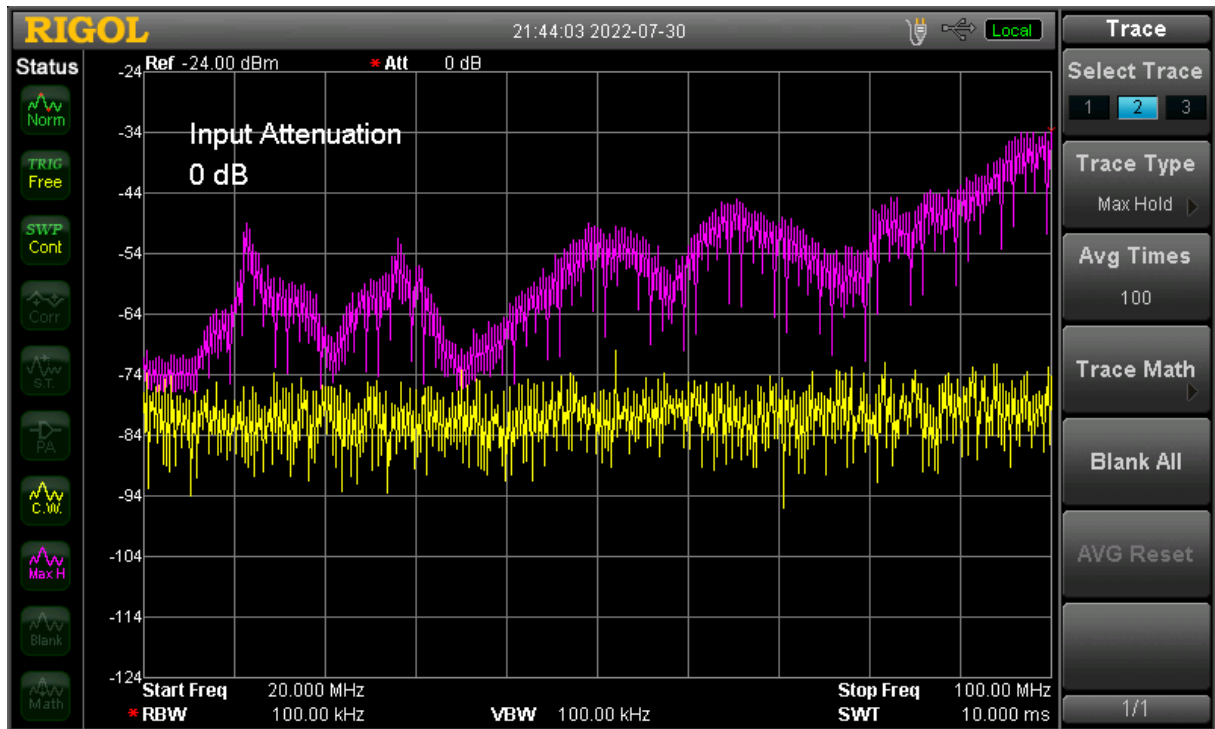
Fonte: Autor.

Figura 5.6 – Varredura de 20 a  $100\text{MHz}$  com LED ligado.



Fonte: Autor.

Figura 5.7 – Varredura de 20 a 100MHz com LED ligado e com barreira entre emissor e receptor.



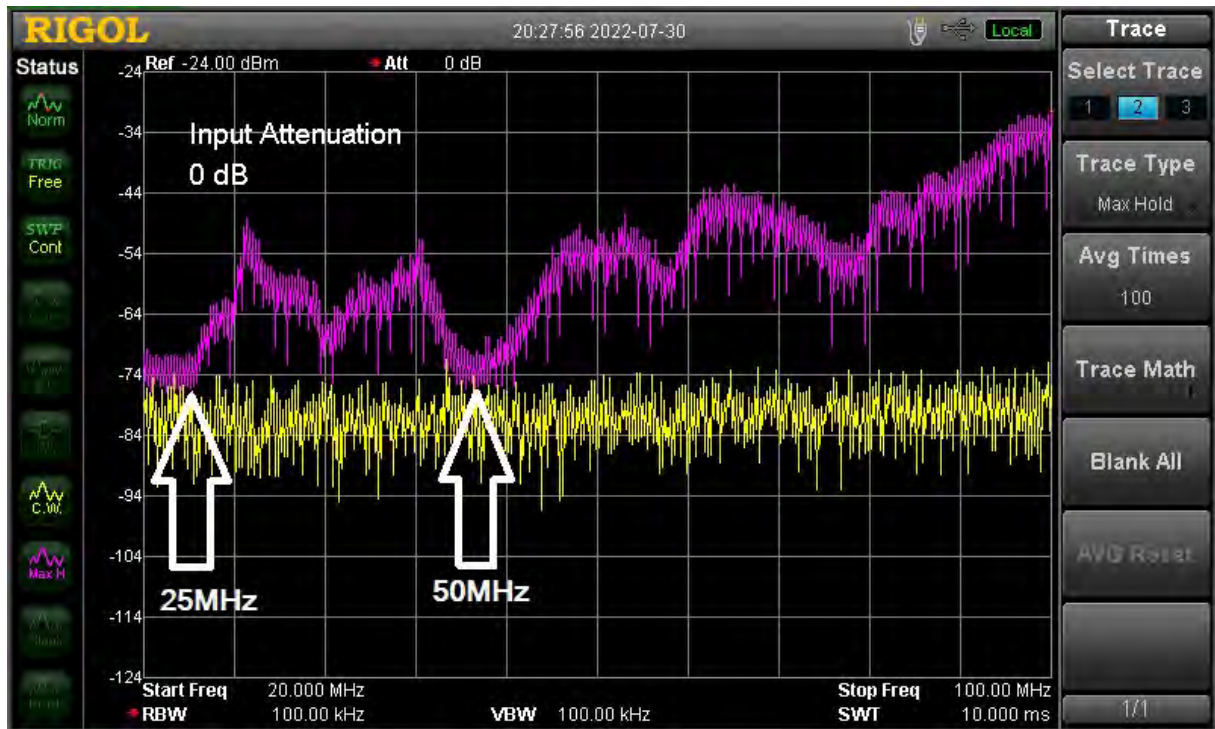
Fonte: Autor.

O formato em roxo nas imagens representam a função 'Max Hold' do analisador de espectro que retém o máximo valor em  $dB$  adquirido no intervalo proposto de 20 segundos. O formato em amarelo é representa os valores amostrados normalmente pelo analisador de espectro, ou seja, de forma contínua, que representam também o ruído ambiente de um momento qualquer, que tende a se manter constante ao decorrer do experimento.

Através desse experimento podemos notar que as únicas frequências que o LED não sofre de interferência irradiada são abaixo de  $25MHz$  e entorno de  $50MHz$  acordo com a figura 5.8. Então, experimentos feitos fora das frequências assinaladas devem ter seus valores de potência média deduzidas para apresentarem o valor real de potência transmitida pelo LED.

Já na figura 5.6 foi assinalada a frequência máxima de resposta do LED estudado, sendo definido o valor de  $55MHz$  como o limiar desse estudo.

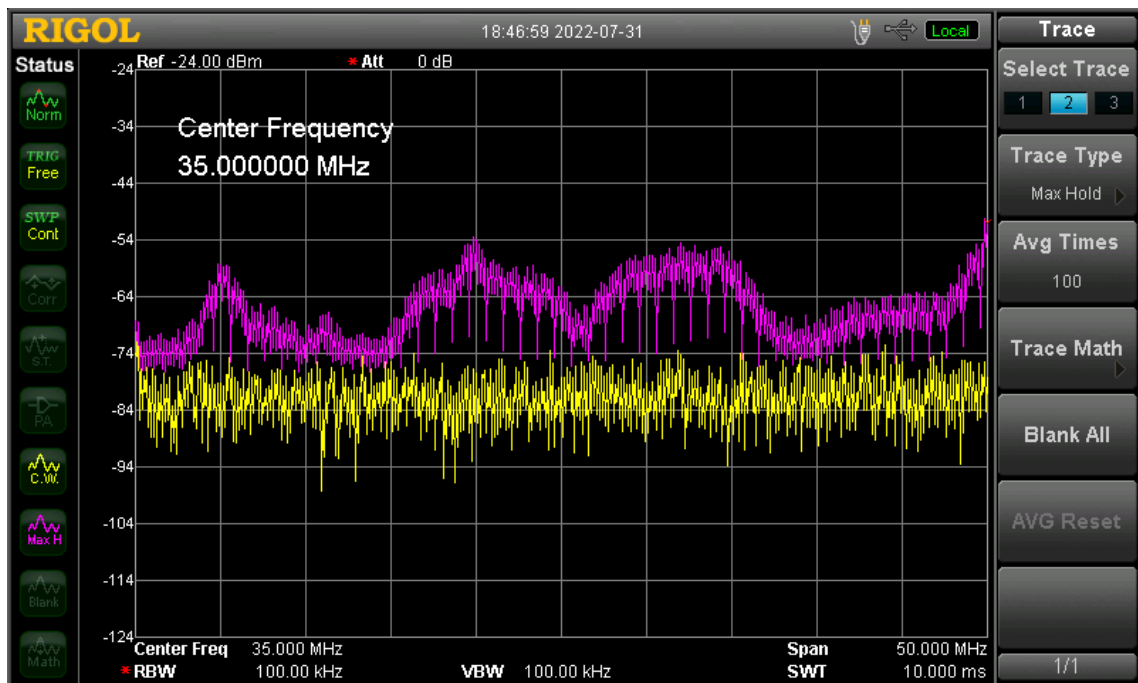
Figura 5.8 – Varredura de 20 a 100MHz com LED desligado.



Fonte: Autor.

Para uma melhor resolução, foi feita a figura 5.9 com os mesmos parâmetros da experiência anterior, porém a faixa analisada agora foi de 10MHz a 60MHz com espaçamento de 5MHz a cada divisão do eixo horizontal das imagens.

Figura 5.9 – Varredura de 10 a 60MHz com LED ligado e barreira entre emissor e receptor.



Fonte: Autor.

O que nos mostrou que ainda em torno de 15MHz existe uma parcela do sinal contornando o caminho principal.

### 5.3 EXPERIMENTO 3 - TRANSMISSÃO DE IMAGENS

Para validar a efetividade da comunicação, foram transmitidas imagens padrão em preto e branco com 1 bit por pixel e colorido com 4 bits por pixel, ambos na resolução 320x240, conforme a figura 5.10.

O objetivo dessas transmissões são para visualizar o efeito causado e não calcular os bits perdidos, porque, diferente da transmissão por arquivo de áudio, os arquivos de imagens, algumas vezes perdiam a primeira parte da imagem, devido ao mesmo erro de sincronismo, decidiu-se então, por desprezar esse tipo de análise de erros de bits.

Para a transmissão dessas imagens utilizou-se das frequências da portadora com menor interferência de RF conforme o experimento 2, e não se observou diferença para essas frequências. Entretanto, no subtítulo de cada imagens estão os valores de largura de banda, e fizeram a diferença nos resultados.

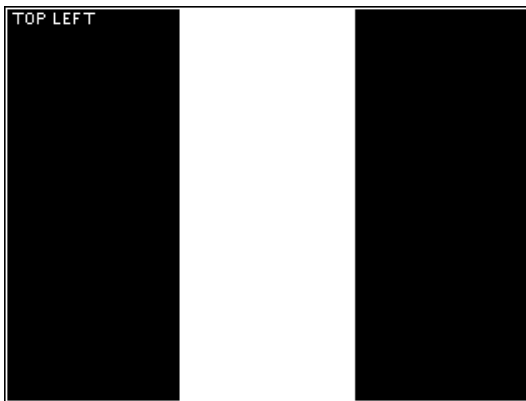
O que se observa além do ruído, como bem destacado na figura 5.11d é um grande corte na imagem, que por vezes acontecia, hora não, acredita-se por ser um erro de sincronismo.

Na figura 5.12d observa-se um erro diferente dos demais, porém a causa acredita-

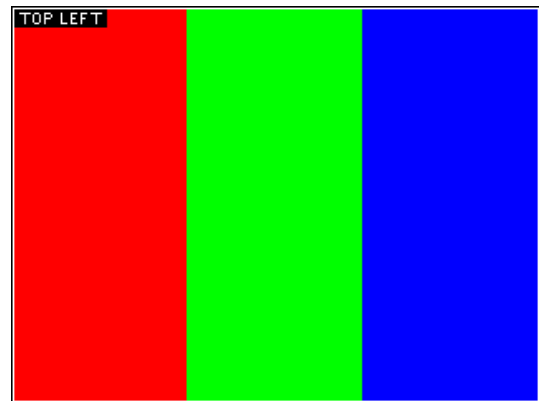


Figura 5.10 – Imagens padrão testes de comunicação.

(a) Preto e branco 320x240 1bpp.



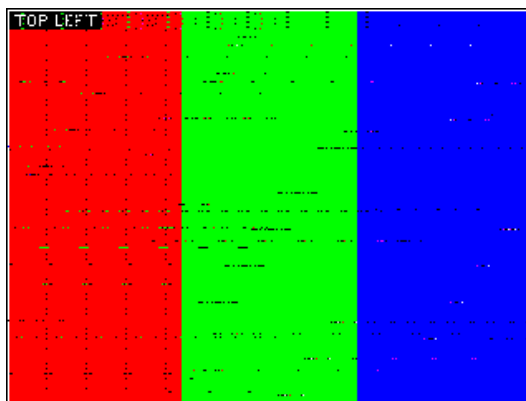
(b) Colorido 320x240 4bpp.



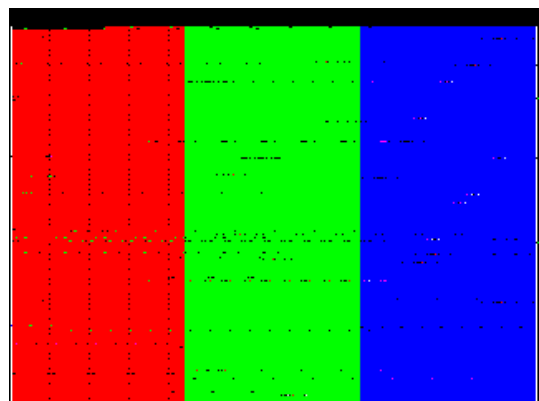
Fonte: Autor.

Figura 5.11 – Imagens padrão colorida resultantes da comunicação por luz.

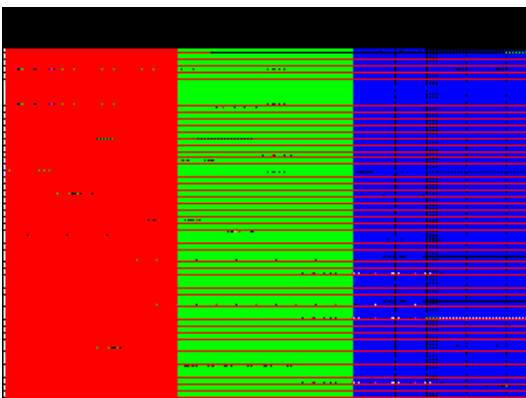
(a)  $BW = 1MHz$ .



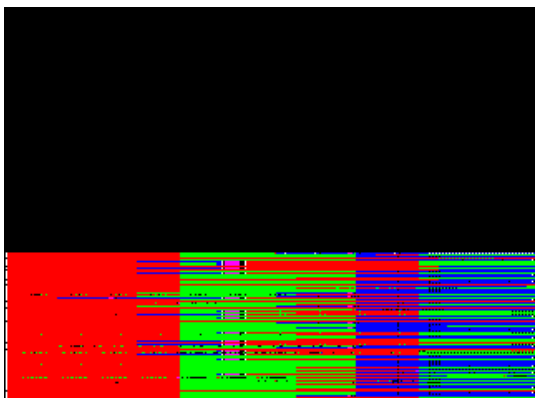
(b)  $BW = 2MHz$ .



(c)  $BW = 4MHz$ .



(d)  $BW = 8MHz$ .



Fonte: Autor.

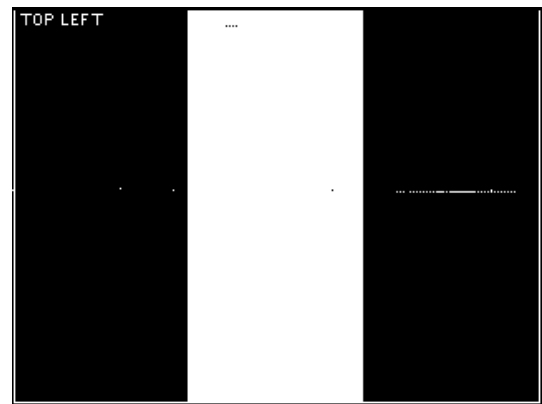
se que seja a mesma dos erros anteriores, e deve ser resolvido com a otimização do fluxograma desenvolvido no GNU Radio.

Figura 5.12 – Imagens padrão preto e branco resultantes da comunicação por luz.

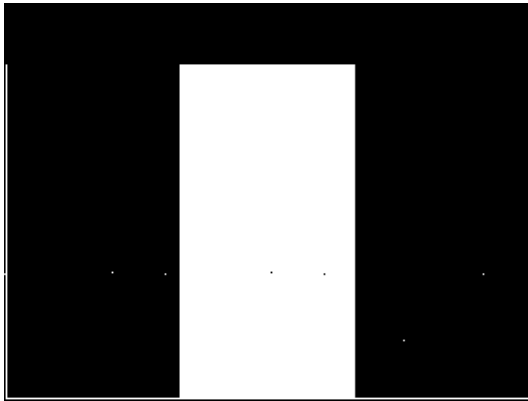
(a)  $BW = 1MHz$ .



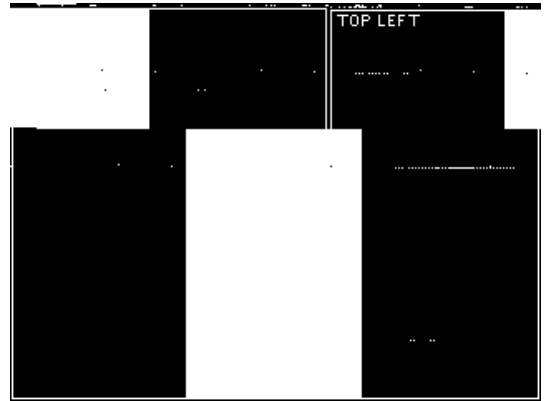
(b)  $BW = 2MHz$ .



(c)  $BW = 4MHz$ .



(d)  $BW = 8MHz$ .

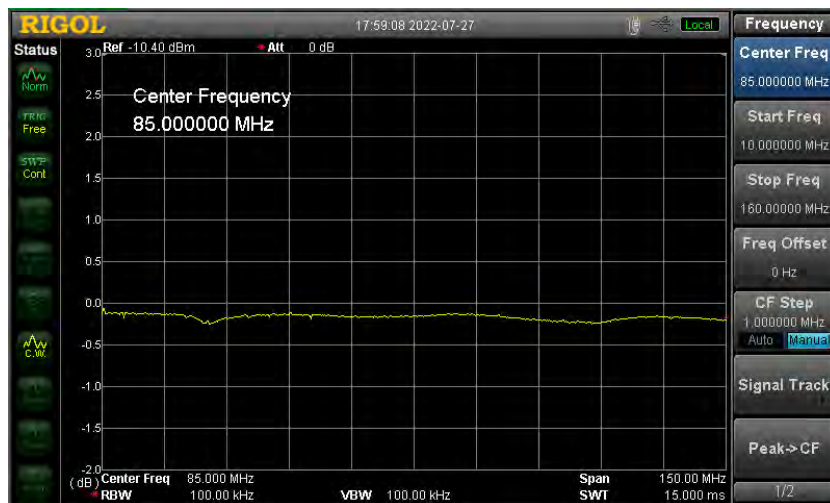


Fonte: Autor.

#### 5.4 EXPERIMENTO 4 - BIAS-T

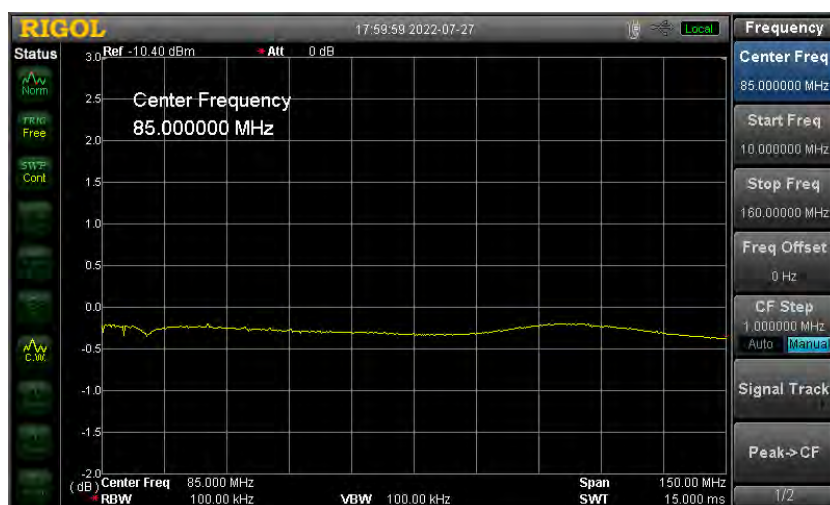
Basicamente, o circuito bias-T deve somar os sinais DC e RF com perdas mínimas nas frequências de trabalho. Com a ajuda do analisador de espectro, foi feita uma verificação do caminho RF do bias-T que engloba os conectores SMA, as trilhas e o capacitor em série. Para fazer essa verificação primeiro foi utilizado a função 'Normalize' com apenas os cabos SMA conectados no analisador de espectro, esse processo é importante para retirar a influência externa nas medidas. Logo em seguida com o bias-T conectado foram efetuadas as medidas com a faixa de frequência entre  $10\text{MHz}$  e  $160\text{MHz}$  e os resultados podemos conferir nas figuras 5.13 e 5.14.

Figura 5.13 – Espectro do bias-T com capacitor de  $2.2\mu\text{F}$ .



Fonte: Autor.

Figura 5.14 – Espectro do bias-T com capacitor de  $150\text{nF}$ .



Fonte: Autor.

Como podemos observar, a influência desse circuito pode gerar um decaimento da potência do sinal entre  $-0.1dB$  e  $-0.4dB$  aproximadamente.

Conforme calculado na seção 4.3 os valores das reatâncias do capacitor e indutor vão depender do valor da carga final, ou seja, os LEDs. Então, quanto menor o valor de carga, maior será a potência média de sinal recebida pelos LEDs.

Para verificar esse efeito, foram feitos testes de comunicação com os conjuntos de LEDs RGB separadamente, com parâmetros constantes de frequência de portadora, largura de banda, corrente nos LEDs e distância entre emissor e receptor. Então, posicionando e acionando um dos LEDs em frente ao fotorreceptor foi aferido o valor médio da potência do sinal recebido em  $dBm$ , em seguida, acionam-se os outros três LEDs, conforme a figura 5.15. Constatou-se que o valor médio diminuía em média  $2.5dBm$  para os LEDs azuis e verdes, e  $0.5dBm$  para os LEDs vermelhos. Entende-se então que quanto menor a resistência dinâmica do LED, maior será a potência média recebida, resultando em maior SNR.

Figura 5.15 – Experimento de medida de potência média do sinal.

(a) Apenas um LED como carga do bias-T.



(b) Quatro LEDs como carga do bias-T.

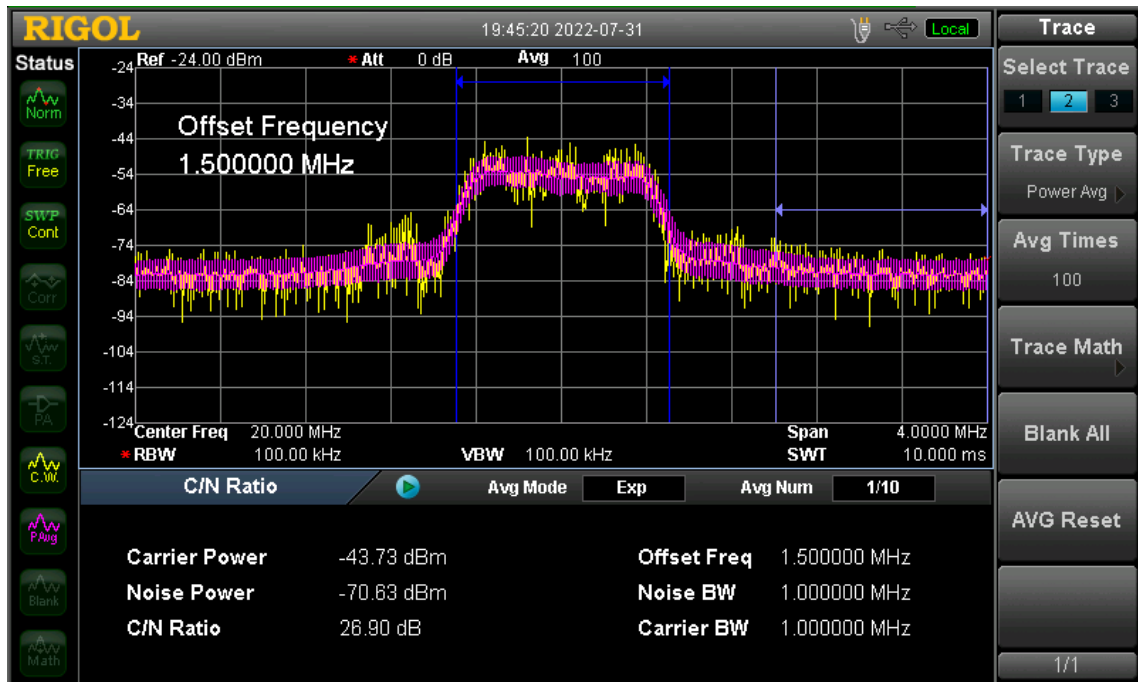


Fonte: Autor.

## 5.5 EXPERIMENTO 5 - MEDIÇÃO DE SNR E BW

Vimos que a análise da potência do sinal comparado ao nível de potência de ruído é um dos fatores mais preponderantes para a comunicação, sendo assim foram feitas aquisições durante a transmissão de áudio com largura de banda de  $1\text{MHz}$ , conforme as figuras 5.16 e 5.17.

Figura 5.16 – Medição de SNR para portadora em  $20\text{MHz}$ .

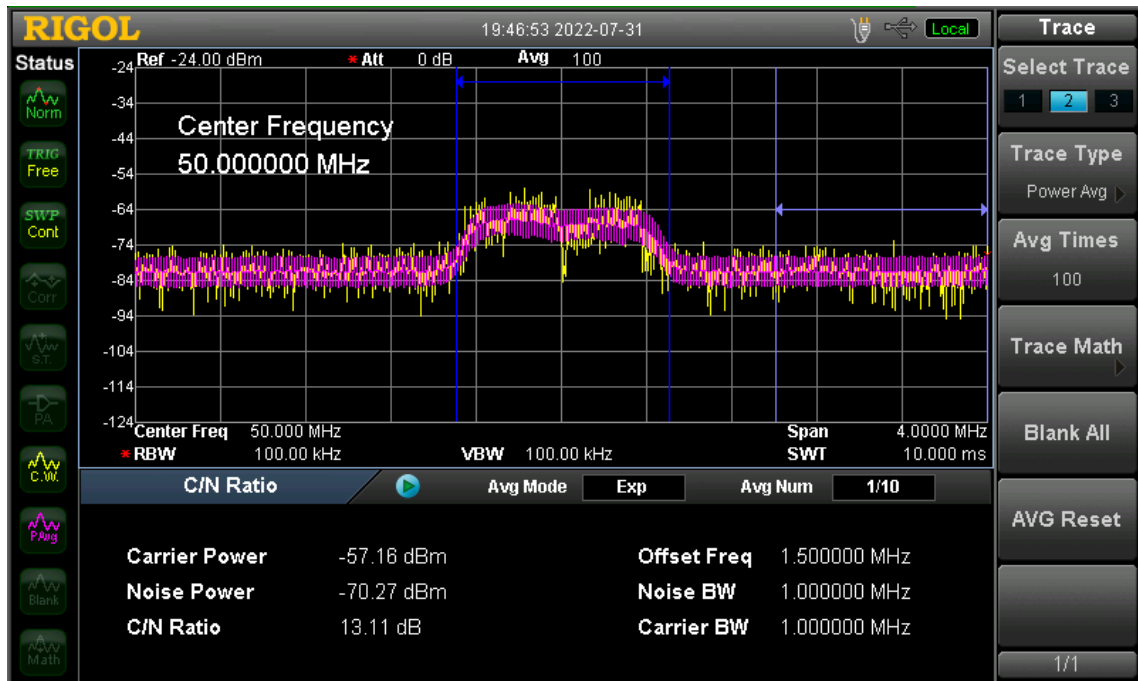


Fonte: Autor.

Para a medição de SNR foi utilizada uma função do analisador de espectro que define a largura de banda do sinal, a largura de banda do ruído, e um de espaçamento entre essas bandas, conforme a parte inferior das figuras 5.16 e 5.17 denotados respectivamente por 'Carrier BW', 'Noise BW' e 'Offset Freq'. Notamos que entre essas duas frequências de portadora, há uma diferença de quase o dobro em  $dB$  e  $20x$  em valores de potência, esse comportamento é resultado especialmente da resposta em frequência do LED.

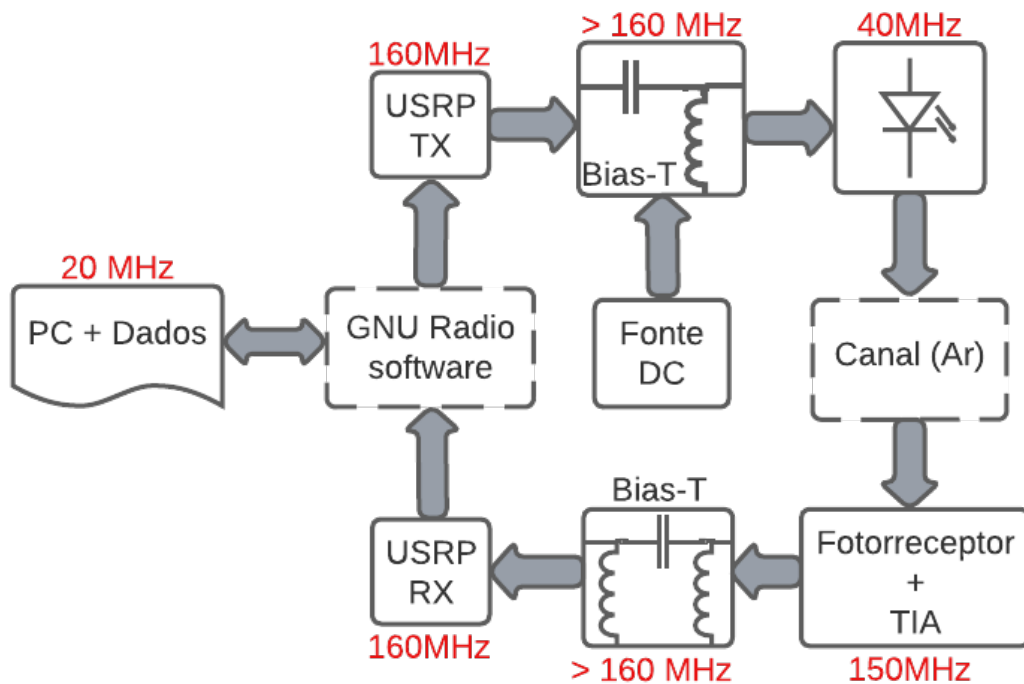
Esse resultado serve para mostrar que nossa medição de SNR pode ser feita em tempo real, de forma a contornar o problema de processamento por parte do PC. Porém em termos de SNR é simplesmente simbólico pois em uma aplicação real outras considerações devem ser levadas em contas, como já dito na seção 4.1. Então, em termos de BW, como resultado final do sistema OWC temos a figura 5.18, mostrando os limites encontrados de acordo com o bloco.

Figura 5.17 – Medição de SNR para portadora em 50MHz.



Fonte: Autor.

Figura 5.18 – Valores máximos de largura de banda para cada bloco do sistema implementado.



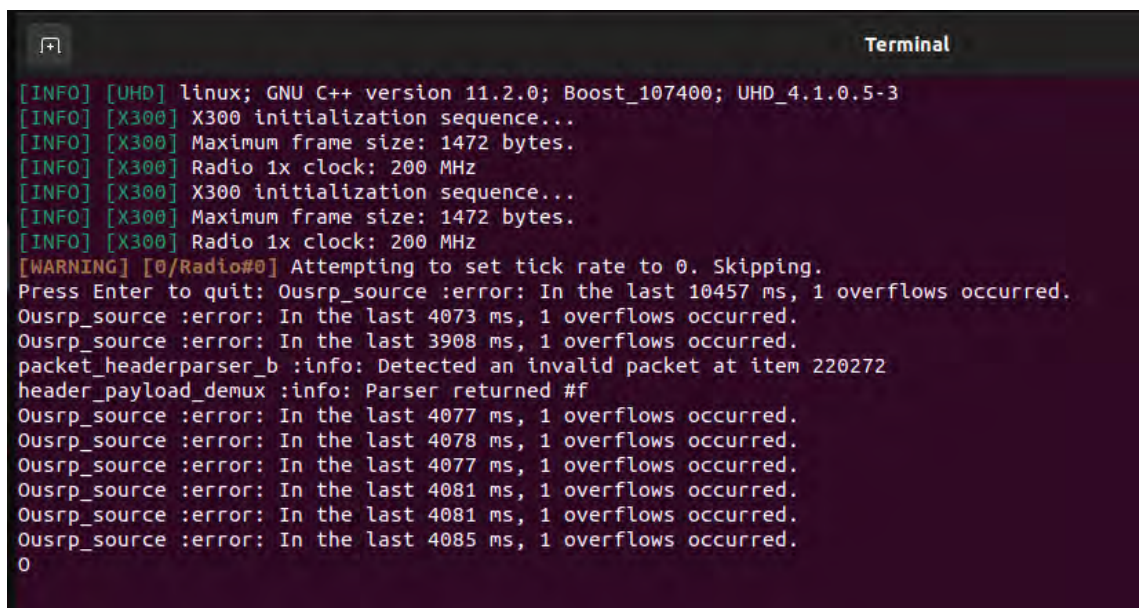
Fonte: Autor.

## 5.6 ERROS DE TRANSMISSÃO

Na figura 5.19 temos alguns erros ocorrido durante a transmissão, exibidos no terminal de comandos, que segundo o manual do fabricante (RESEARCH, 2022) ocorre erros de *overflow* (letra 'O' no terminal de transmissão) no receptor devido à falta de capacidade de processamento do PC para a parte da recepção do sinal.

Sobre o erro de *'invalid packet'* provavelmente é um erro de sincronismo. Segundo Sowjanya (2019), a técnica OFDM é sensível para erros de sincronização.

Figura 5.19 – Erros de *overflow*



```

Terminal
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.2.0; Boost_107400; UHD_4.1.0.5-3
[INFO] [X300] X300 initialization sequence...
[INFO] [X300] Maximum frame size: 1472 bytes.
[INFO] [X300] Radio 1x clock: 200 MHz
[INFO] [X300] X300 initialization sequence...
[INFO] [X300] Maximum frame size: 1472 bytes.
[INFO] [X300] Radio 1x clock: 200 MHz
[WARNING] [0/Radio#0] Attempting to set tick rate to 0. Skipping.
Press Enter to quit: Ousrp_source :error: In the last 10457 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4073 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 3908 ms, 1 overflows occurred.
packet_headerparser_b :info: Detected an invalid packet at item 220272
header_payload_demux :info: Parser returned #f
Ousrp_source :error: In the last 4077 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4078 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4077 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4081 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4081 ms, 1 overflows occurred.
Ousrp_source :error: In the last 4085 ms, 1 overflows occurred.
0

```

Fonte: Autor.



## 6 CONCLUSÃO

Considerando a crescente demanda das redes de comunicações globais, assim como a maior conectividade entre aparelhos e o advento da tecnologia 5G e a internet das coisas, é de se esperar que novas tecnologias sejam desenvolvidas para ajudar a suprir essa demanda. O presente trabalho, espera-se, contribuir com esse desenvolvimento, através da concatenação dos conceitos de OWC aplicados em um sistema embasado de forma teórica e testado de forma experimental.

As normas revisadas costumam aproveitar o trabalho já existente e utilizam definições feitas para tecnologias semelhantes (POPADIĆ; KOČAN, 2021). Essa é uma das razões de pensamento de construção desse trabalho, e o porquê é utilizada a técnica OFDM com parâmetros oriundos da norma IEEE 802.11a. A principal diferença entre as normativas é o foco de aplicação. Para a maioria das especificações é possível fazer alterações através da utilização do software GNU Radio, com alguns blocos de códigos.

Entre outras conclusões, foi demonstrado que para esse sistema de OWC proposto foi observado que o principal limitante se encontra no LED, com uma largura de banda em torno de  $40MHz$ , todavia, com implementação de um sistema de transmissão MIMO, utilizando três cores, esse limite pode subir para  $120MHz$ . Mesmo este sendo o gargalo para a resposta em frequência, o principal limitante encontrado na prática é referente à capacidade de processamento do PC, que não vamos considerar como uma limitação crítica pois é resolvido com a troca do PC.

Segundo os parâmetros de transmissão para o Wi-Fi geração 5 (WIKIPEDIA, 2022) a taxa de transmissão da dados para uma largura de banda de  $40MHz$  pode chegar a  $800Mbit/s$  e para uma largura de banda de  $160MHz$ , o valor vai até  $3466.8Mbit/s$ .

Os experimentos demonstram também que existe uma dificuldade durante a comunicação com USRP em separar o sinal irradiado do sinal transmitido pela luz propriamente, então o ideal é fazer medições de forma a isolar apenas o valor de transmissão óptico, em um ambiente controlado.

O circuito bias-T apresenta a característica de dependência da carga, ou seja, pode haver necessidade de reprojeto do circuito, como apresentado para os dois casos considerados. Em casos onde há grande profundidade de modulação, somados a alta corrente requerida para a fonte de luz também é um limitante. Porém, para a nossa aplicação o circuito não apresentou problemas e teve baixa atenuação para o caminho do sinal RF.

Apesar de problemas não calculados surgirem no decorrer do trabalho, foi possível realizar comunicação sem fio, por luz visível com sucesso. Foram transferidos áudio e imagens de forma satisfatória com modulação dita por norma, porém com uma largura de banda reduzida devido à limitação de processamento, o sistema final com indicações máximas de largura de banda estão descritos em vermelho na figura 5.18.



## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Aqui são listados algumas possibilidades de complemento para otimizar o desempenho do sistema atual, e em seguida possibilidades de aplicações.

- Adição de uma camada MAC com incremento de análise de erros e estimação do canal aprimorada. Atualmente modulação implementada no GNU Radio é uma adaptação e não segue fielmente as normas.
- Utilização de um PC com maior poder de processamento, para aproveitar toda a largura de banda disponível.

Entre as aplicações, no trabalho de Haas et al. (2020) são listados, de forma sistemática, as possibilidades de estudos em OWC. O autor apresenta três grandes áreas: terrestre (ambiente externo e interno), subaquático e espacial, e as subáreas: dispositivos e componentes, sistemas ópticos de entrada, modelo de canais, técnicas de transmissão de dados, camada MAC, técnicas de redução de interferência e suporte à mobilidade, redes e protocolos. Essa forma de divisão será usado a seguir para dividir as aplicações.

### 7.1 SISTEMA ÓPTICOS DE ENTRADA

Nos trabalhos de Kim, Baek e Nahm (2017) e Kim (2018) são feitas abordagens de direcionamento do feixe óptico, mostrando que é possível ter um ótimo ganho em valores de SNR.

### 7.2 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS

#### 7.2.1 Modulações

Na literatura existem diferentes linhas de esforços para otimizar a comunicação por luz com a visão pelo lado da modulação do sinal. Em geral estima-se aproveitar as lógicas já existentes, com pequenas adaptações acrescentadas. Por exemplo, na questão de um prefixo de mensagem feito para mitigar erros de ISI ocorridos por reflexão das ondas, pode ter valor reduzido, já que a velocidade da luz é muito maior do que uma onda de radiofrequência.

No trabalho de Wu et al. (2018) é proposto uma análise de índice de modulação aplicado em comunicação utilizando LEDs, o que afetaria uma parcela considerável de energia a ser otimizada para comunicação.

Nguyen et al. (2014) apresenta um melhoramento de um algoritmo de codificação de canal chamada de *Packet Failed Ratio* (PFR) para OFDM e é implementado no GNR Radio. Os resultados mostram que o aumento da quantidade de FFT vai fornecer uma melhora em termos de perdas de pacotes se comparado com OFDM tradicional.

Sena e Fernandes (2017) mostram que a modulação *Enhanced Subcarrier Index Modulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (ESIM-OFDM) aplicado para um canal AWGN com distorções não lineares pode ter mais eficiência energética e menor taxa de erros se comparado com a técnica OFDM tradicional.

### 7.2.2 MIMO

Múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), do inglês *Multiple Input Multiple Output*, é um esquema onde o canal de comunicação é otimizado, utilizando múltiplos emissores e receptores de forma a oferecer uma melhor eficiência espectral das comunicações ponto a ponto, essa técnica é muito útil principalmente se utilizados LEDs RGB com modulação CSK, aumento muito a capacidade de comunicação do sistema (HRANILOVIC, 2005).

Outra abordagem é considerada no trabalho de Raj, Jaiswal e Dixit (2019), onde o ângulo de meia potência do LED é otimizado considerando as reflexões das paredes, resultando em uma distribuição aprimorada, tanto para comunicação quanto para iluminação, porém considera uma distribuição muito uniforme, onde serviria apenas para novos projetos, sem reutilizar o já existente.

### 7.3 CAMADA MAC

Protocolos de segurança podem ser adicionados na camada MAC. O aspecto natural da luz que não permite ultrapassar barreiras físicas pode proporcionar segurança em uma rede de comunicações que utiliza esse meio.

Porém, qualquer feixe de luz que por ventura for capturado por um invasor da rede, pode causar comprometimento das informações se a rede não tiver protocolos de segurança que garantem confidencialidade, integridade e autenticidade da transmissão. Um enlace de comunicação pode ser comprometido com a saturação do mesmo ao enviar muitos feixes de luz para um mesmo receptor, conforme o processo de *Poisson* destacado na equação 2.2.

De acordo com a norma IEEE 802.15.7 a subcamada MAC é responsável para prover segurança na comunicação, porém trata apenas de questões de criptografia que segundo Rohner et al. (2015) é um método insuficiente para garantir integridade da informação. Ainda, segundo Arfaoui et al. (2020) a segurança no sistema OWC é ainda mais deficitária quando tratado de sistema de Internet das Coisas (IoT), do inglês *Internet of Things*, devido às limitações de processamento dos mesmos. Então, esses são apenas alguns dos problema de segurança em aberto que necessitam mais pesquisas sobre o tema.

#### 7.4 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIA

Os trabalhos de K. e B. (2017) são mostradas técnicas de mitigação de ruído ambiente, tendo uma melhora nos valores de SNR medidos.

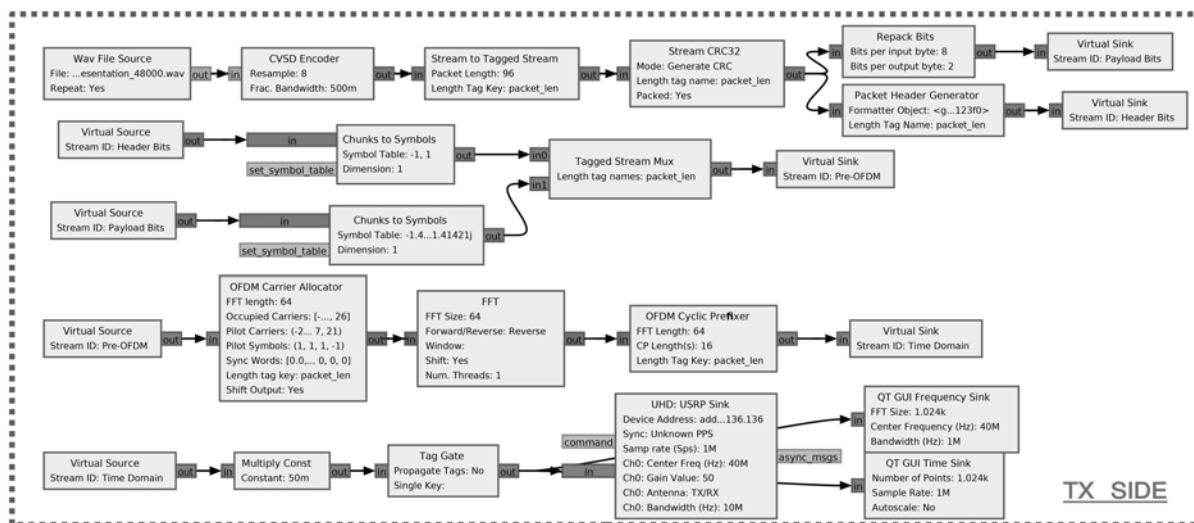
Hsu et al. (2017) Utiliza um filtro adaptativo para melhorar a taxa de dados para LEDs brancos.

Fuada et al. (2018) apresenta uma análise matemática dos principais componentes que afetam a característica do ruído em para amplificadores de transpedância.

No trabalho de Gour e Kumar (2016) é apresentado uma técnica de correção de erros chamada de *Hadamard Coding*, prometendo melhor desempenho para sistemas baseados em LED. Ainda, uma série de trabalhos ainda contribuem com estratégias de ruído de ambiente interno, luz solar, filtros ópticos, etc.

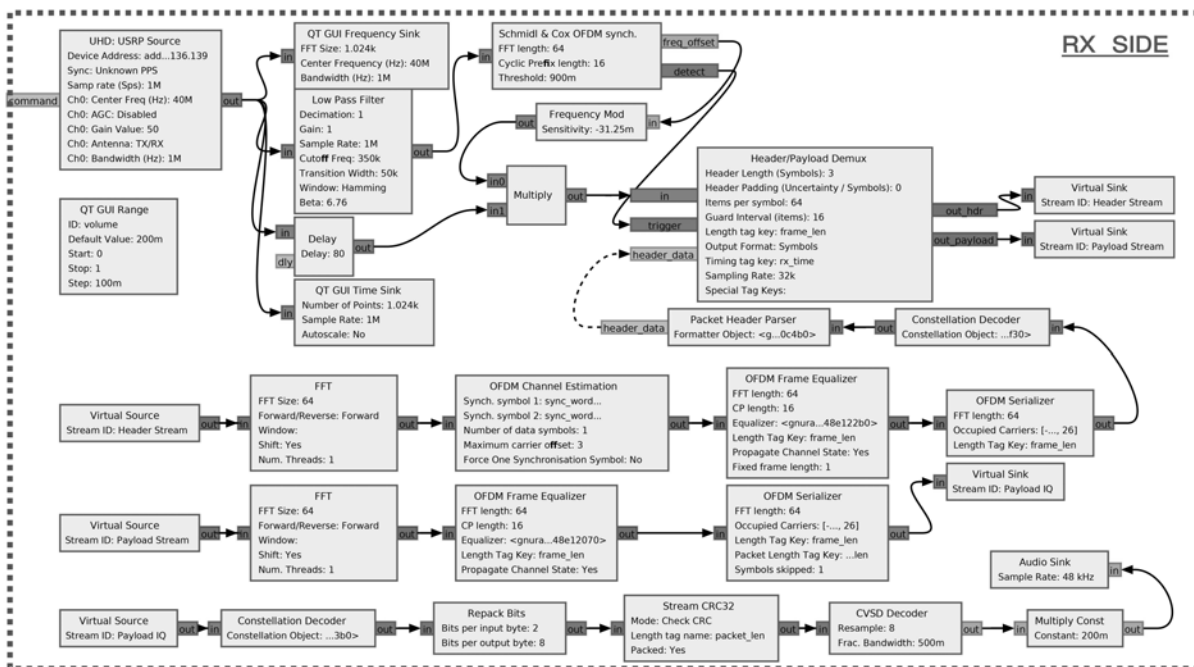
## APÊNDICE A – BLOCOS DO GNU RADIO

Figura A.1 – Blocos utilizados para o transmissor.



Fonte: Autor.

Figura A.2 – Blocos utilizados para o receptor.



Fonte: Autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, S. B. **Optical Communication Receiver Design**. [S.l.: s.n.], 1997. ISBN 0819420239.

ARFAOUI, M. A. et al. Physical Layer Security for Visible Light Communication Systems: A Survey. **IEEE Commun. Surv. Tutorials**, v. 22, n. 3, p. 1887–1908, 2020. ISSN 1553877X.

BARRY, J. R. Wireless Infrared Communications. **Wirel. Infrared Commun.**, v. 9219, n. 97, 1994.

BELL, A. G. Alexander Graham Bell's. 1880.

BESCHLOSS, S. **Object of Interest Remote Control**. 2013. Disponível em: <<https://www.newyorker.com/tech/annals-of-technology/object-of-interest-remote-control>>.

BLINOWSKI, G. Security issues in visible light communication systems. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier Ltd., v. 28, n. 4, p. 234–239, 2015. ISSN 24058963. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.039>>.

BULBUL, Y. et al. Analysis and Optimization of the Network Throughput in IEEE 802.15.13 based Visible Light Communication Networks. **IEEE Int. Black Sea Conf. Commun. Netw. Anal.**, 2021.

CHAURASIA, A. et al. Statistical analysis of SNR and optical power distribution in an indoor VLC System. **J. Phys. Conf. Ser.**, v. 1706, n. 1, 2020. ISSN 17426596.

COELHO, A. K. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE SINAIS OFDM COM PRÉ-ÊNFASE**. 2017. Tese (Doutorado), 2017.

DEMIRKOL, I. et al. Powering the Internet of Things through Light Communication. **IEEE Commun. Mag.**, IEEE, v. 57, n. 6, p. 107–113, 2019. ISSN 15581896.

FAHAMUEL, P.; THOMPSON, J.; HAAS, H. Study, analysis and application of optical OFDM, single carrier (SC) and MIMO in intensity modulation direct detection (IM/DD). **IET Conf. Publ.**, v. 2013, n. 619 CP, 2013.

FUADA, S.; PRATAMA, A.; ADIONO, T. Analysis of Received Power Characteristics of Commercial Photodiodes in Indoor Los Channel Visible Light Communication. **Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.**, v. 8, n. 7, p. 164–172, 2017. ISSN 2158107X.

FUADA, S. et al. Noise Analysis of Transimpedance Amplifier (TIA) in Variety Op Amp for use in Visible Light Communication (VLC) System. **Int. J. Electr. Comput. Eng.**, v. 8, n. 1, p. 159–171, 2018. ISSN 20888708.

FULIGHT. **Optoelectronic materials**. 2014. Disponível em: <<https://www.fulightopto.com/remote-phosphor-tech>>.

GALAL, M. et al. Characterization of RGB LEDs as Emitter and Photodetector for LED-to-LED Communication. **2020 12th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP 2020**, p. 2–7, 2020.

GFELLER, F. R.; BAPST, U. Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. **Proc. IEEE**, IEEE, v. 67, n. 11, p. 1474–1486, 1979. ISSN 15582256.

GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. **Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB®**. [S.l.]: CRC Press, 2013. 1–514 p. ISBN 9781439852354.

GITHUB. **GNU Radio github repository**. 2022. Disponível em: <<http://github.com/gnuradiognuradio>>.

GOUR, S.; KUMAR, S. Reduction of optical background noise impact in light-emitting diode (LED)-based optical wireless communication systems by Hadamard Codes. **Adv. Intell. Syst. Comput.**, v. 397, p. 919–927, 2016. ISSN 21945357.

HAAS, H. et al. Optical wireless communication. **Phil.Trans. R. Soc. A**, Royal Society Publishing, v. 378, n. 2169, jan 2020. ISSN 1364503X.

HAIGH, P. A. et al. Visible light communications: real time 10 Mb/s link with a low bandwidth polymer light-emitting diode. **Opt. Express**, v. 22, n. 3, p. 2830, 2014. ISSN 10944087.

HAMAMATSU. **Large area, high-speed Si PIN photodiodes**. [S.l.], 2014. Cat. No. KPIN1044E06.

HANDAGALA, S.; LEESER, M. Real Time Receiver Baseband Processing Platform for Sub 6 GHz PHY Layer Experiments. **IEEE Access**, v. 8, p. 105571–105586, 2020. ISSN 21693536.

HICKS, B.; ERICKSON, B. Bias-T Design Considerations for the LWA. p. 1–16, 2008.

HOEHER, P. A. **Visible Light Communications Theoretical and Practical Foundations**. [S.l.]: Hanser Publications, 2019. 2074 p. ISBN 9783446462069.

HRANILOVIC, S. **Wireless optical communication systems**. [S.l.]: Springer, 2005. 1–197 p. ISBN 0387227849.

HSU, C.-W. et al. Adaptive filtering for white-light LED visible light communication. **Opt. Eng.**, v. 56, n. 1, p. 16115, 2017. ISSN 0091-3286.

HUANG, Y. et al. Influence of Current Density and Capacitance on the Bandwidth of VLC LED. **IEEE Photonics Technol. Lett.**, v. 30, n. 9, p. 773–776, 2018. ISSN 10411135.

IEEE. **IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ieee802.org>>.

ITU. **High-speed indoor visible light communication transceiver System architecture, physical layer and data link layer specification**. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=13781{&}lang>>.

K., S.; B., V. Simulation of VLC system under the influence of optical background noise using filtering technique. **Mater. Today Proc.**, Elsevier Ltd, v. 4, n. 2, p. 4239–4250, 2017. ISSN 22147853. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.127>>.

KARUNATILAKA, D. et al. LED based indoor visible light communications: State of the art. **IEEE Commun. Surv. Tutorials**, v. 17, n. 3, p. 1649–1678, 2015. ISSN 1553877X.

KHALIFEH, A. F. et al. An experimental evaluation and prototyping for visible light communication. **Comput. Electr. Eng.**, v. 72, p. 248–265, 2018. ISSN 00457906.

KHARADI, H. M. R. Audio File Transmission using GNU RADIO and USRP. 2016.

- KIM, S. M. Visible light communication employing optical beamforming: A review. **Curr. Opt. Photonics**, v. 2, n. 4, p. 308–314, 2018. ISSN 25087274.
- KIM, S. M.; BAEK, M. W.; NAHM, S. H. Visible light communication using TDMA optical beamforming. **Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.**, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, v. 2017, n. 1, 2017. ISSN 16871499.
- KOMINE, T.; NAKAGAWA, M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. **IEEE Trans. Consum. Electron.**, v. 50, n. 1, p. 100–107, 2004. ISSN 00983063.
- LI, H. et al. High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit. **IEEE Photonics Technol. Lett.**, v. 26, n. 2, p. 119–122, 2014. ISSN 10411135.
- LOOSE, F. et al. Efficient Hybrid Buck Converter for Visible Light Communication in LED Drivers. **IEEE**, v. 69, n. 2, p. 1877–1887, 2022.
- LUAN, T.; QIAN, K. Research on influencing factors of LED frequency response. **AIP Conf. Proc.**, v. 1864, n. August 2017, 2017. ISSN 15517616.
- MAPUNDA, G. A. et al. Indoor Visible Light Communication: A Tutorial and Survey. **Wirel. Commun. Mob. Comput.**, v. 2020, 2020. ISSN 15308677.
- MOLLA, D. M. et al. Software Defined Radio Platforms for Wireless Technologies. **IEEE Access**, IEEE, v. 10, p. 26203–26229, 2022. ISSN 21693536.
- NGUYEN, D. V. D. V. et al. A real-time COFDM transmission system based on the GNU Radio - USRP N210 platform. **Proc. 8th Int. Conf. Ubiquitous Inf. Manag. Commun. ICUIMC 2014**, 2014.
- PANG, G.; KWAN, T.; CHAN, C. H. LED traffic light as a communications device. **IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC**, p. 788–793, 1999.
- PATHAK, P. H. et al. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. **IEEE Commun. Surv. Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2047–2077, 2015. ISSN 1553877X.
- POPADIĆ, M.; KOČAN, E. LiFi Networks: Concept, Standardization Activities and Perspectives. **2021 25th Int. Conf. Inf. Technol. IT 2021**, n. February, p. 16–19, 2021.
- PURWITA, A. A.; HAAS, H. IQ-WDM for IEEE 802.11bb-based LiFi. In: **IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.** Seoul, Korea (South): [s.n.], 2020.
- RAJ, R.; JAISWAL, S.; DIXIT, A. Optimization of LED Semi-Angle in Multipath Indoor Visible Light Communication Links. **Int. Symp. Adv. Networks Telecommun. Syst. ANTS**, v. 2019-Decem, p. 1–6, 2019. ISSN 21531684.
- RESEARCH, E. **USRP Hardware Driver and USRP Manual Version: 4.2.0.0-143-g2ad30980f**. 2022. Disponível em: <[https://files.ettus.com/manual/page\\_general.html](https://files.ettus.com/manual/page_general.html)>.
- ROHNER, C. et al. Security in Visible Light Communication: Novel Challenges and Opportunities. **Sensors & Transducers**, v. 192, n. 9, p. 9–15, 2015. Disponível em: <<http://www.sensorsportal.com>>.
- SAHA, N. et al. Mitigation of interference using OFDM in visible light communication. **Int. Conf. ICT Converg.**, p. 159–162, 2012. ISSN 21621233.

SCOPACASA, V. **Perspectiva Histórica e Tendência Futura da Iluminação LED**. 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=rC2eUq5G3b0>>.

SENA, A.; FERNANDES, C. Análise de Sistemas OFDM com Modulação por Índice e Amplificador de Potência Não Linear. p. 313–317, 2017.

SHANNON, C. E. Communication in the Presence of Noise. **Proc. IRE**, v. 37, n. 1, p. 10–21, 1949. ISSN 00968390.

SINDHUBALA, K.; VIJAYALAKSHMI, B. Visible light communication using LED as receiver with the effect of ambient light. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11082-017-1280-4>>.

SOWJANYA, P. S. P. Real-time data transfer based on software defined radio technique using gnu radio/usrp. **Int. J. Eng. Adv. Technol.**, v. 9, n. 1, p. 279–288, 2019.

STRATIL, T. et al. Design and Testing of High Power Wideband Bias-T for Broadband over Visible Light using Software-Defined Radio. 2016.

SUNG, J.-Y.; CHOW, C.-W.; YEH, C.-H. Is blue optical filter necessary in high speed phosphor-based white light LED visible light communications? **Opt. Express**, v. 22, n. 17, p. 20646, 2014. ISSN 10944087.

TAE-GYU, K. **Visible-light communications**. John Wiley & Sons, 2012. v. 9780521197. 351–368 p. ISBN 9780511979187. Disponível em: <->.

TEIXEIRA, L. **Analysis of the Luminous Efficacy of Lighting Systems With INTEGRATED COMMUNICATION**. 2020. Tese (Doutorado) — UFSM, Santa Maria, 2020.

TG7A, T. G. 7a. **IEEE 802.15 WSN Task Group 7a (TG7a) Higher Rate, Longer Range Optical Camera Communications (OCC) Task Group**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ieee802.org/15/pub/TG7a.html>>.

UCAR, S. et al. SecVLC: Secure visible light communication for military vehicular networks. **MobiWac 2016 - Proc. 14th ACM Int. Symp. Mobil. Manag. Wirel. Access, co-located with MSWiM 2016**, p. 123–129, 2016.

VIK, M. **Color Rendering of Light Sources - Current Development**. 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=rvqglbLLAN0>>.

WIKIPEDIA. **IEEE 802.11be**. 2022. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11be](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11be)>.

WOLKE, A. **284 Basics of RF Bias Tees including applications and examples**. 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=lxgpm-UXTNY>>.

WU, Z.-Y. et al. Modulation index dependence of intensity modulation bandwidth in visible light communications. **Opt. Lett.**, The Optical Society, v. 43, n. 19, p. 4570, oct 2018. ISSN 0146-9592.

YEH, C.-H.; LIU, Y.-L.; CHOW, C.-W. Real-time white-light phosphor-LED visible light communication (VLC) with compact size. **Opt. Express**, v. 21, n. 22, p. 26192, 2013. ISSN 10944087.

YU, T. C. et al. Visible light communication system technology review: Devices, architectures, and applications. **Crystals**, v. 11, n. 9, 2021. ISSN 20734352.



ZHAO, Y. et al. LED-based high-speed visible light communications. n. January 2018, p. 17, 2018. ISSN 1996756X.