UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

ALAF DO NASCIMENTO SANTOS

SISTEMA MULTIPLATAFORMA PARA RECEPÇÃO DE DADOS VIA TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

VITÓRIA

2022

Alaf do Nascimento Santos

SISTEMA MULTIPLATAFORMA PARA RECEPÇÃO DE DADOS VIA TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

Parte manuscrita da Proposta do Projeto de Graduação do aluno **Alaf do Nascimento Santos**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória

2022

Alaf do Nascimento Santos

SISTEMA MULTIPLATAFORMA PARA RECEPÇÃO DE DADOS VIA TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

Parte manuscrita da Proposta do Projeto de Graduação do aluno **Alaf do Nascimento Santos**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 11 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Me. Higor Araújo Fim Camporez
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Me. Renan Costa Lazaro
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer individualmente a cada pessoa que contribuiu de alguma forma nesses meus anos de formação, porém me faltariam palavras para tal. A todos vocês, minha eterna gratidão.

À minha família, amigos, namorada, colegas de trabalho e professores. Cada um de vocês foi muito importante para que eu fosse forte enquanto graduando em Engenharia Elétrica em meio a tantos desafios da vida adulta.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Esta monografia é fruto de trabalhos realizados ao longo de minha formação, passando por projetos de iniciação científica e tecnológica, além de estágios na área de sistemas embarcados e sistemas de telecomunicações, resultando na atual proposta. Por essa razão, me sinto grato a cada um que contribuiu um pouco em cada uma dessas etapas.

Em especial, agradeço a meu professor orientador Dr. Jair Adriano Lima Silva e a meu coorientador Me. Higor Araújo Fim Camporez pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. De mesma forma, sou grato pela equipe a qual fiz parte no Laboratório de Telecomunicações da Universidade Federal do Espirito Santo, foram bons momentos de pesquisa e desenvolvimento.

Agradeço à FAPES, por apoiar o projeto “Aplicação da Tecnologia de Comunicação por Luz Visível em Monitorização de Recém Nascidos de Alto Risco”, o qual foi parte do Programa Pesquisa para o SUS: Gestão Compartilhada em Saúde (PPSUS) e um dos projetos mais gratificantes dos quais fiz parte durante minha graduação.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro no desenvolvimento do projeto "SmaL: Receptor de Dados Codificados via Luz por Meio de Smartphones", o qual foi fundamental para que este trabalho de conclusão de curso fosse possível.

Por fim, agradeço à UFES por me proporcionar uma formação de qualidade.

RESUMO

Dispositivos que trabalham na faixa de radiofrequência (RF) têm sua capacidade limitada devido ao espectro disponível ser licenciado e existir uma demanda por conectividade com crescimento exponencial. Neste contexto, sistemas de comunicação via luz visível (VLC, do inglês *Visible Light Communication*) apresentam vantagens a serem exploradas. Comunicações VLC e RF podem ser complementares, formando redes híbridas ou heterogêneas, aprimorando ainda mais o desempenho da comunicação. Aplicações de VLC em ambientes fechados não demandam alto consumo energético e, além disso, a tecnologia reutiliza a energia necessária na iluminação para comunicação. Contudo, para VLC consolidar-se como tecnologia revolucionária, os custos e facilidades dos dispositivos deverão ser semelhantes aos existentes em produtos Wi-Fi. Pretende-se, portanto, desenvolver no âmbito deste projeto de graduação, uma aplicação multiplataforma baseada em dispositivo *plug-and-play* que tornará possível receber, em diferentes aparelhos, dados contendo informações utilizadas para modular fontes de luz. Esse tipo de dispositivo, capaz de adicionar funcionalidades a aparelhos como computadores, são conhecidos como *dongle* e podem ser encontrados no mercado com diferentes funções. Neste trabalho, inicialmente é apontado o cenário atual das redes de comunicação sem fio baseadas em RF, em especial suas limitações. Em seguida é apresentada a tecnologia VLC como uma solução inovadora e, finalmente, a proposta de democratização da mesma através de um sistema multiplataforma de recepção de dados em tempo real via VLC baseado em comunicação serial, utilizando-se um protótipo de *dongle VLC*, desenvolvido no escopo deste trabalho, capaz de tornar possível a recepção de dados em computadores através da comunicação por luz visível, no qual pode-se obter erro nulo para enlaces entre 30 e 280 centímetros.

Palavras-chave: Comunicação Via Luz Visível. Modulação OOK. Codificação Manchester. *Light Fidelity (Li-Fi). Plug and Play* (PnP).

ABSTRACT

Devices working in the radio spectrum, or radio frequency (RF), have limited capacity because available spectrum is licensed and there is a demand for connectivity with an exponential growth. In this context, communication systems via visible light, VLC systems, have advantages to be explored. VLC and RF communications can be complementary, forming hybrid or heterogeneous networks, further enhancing communication performance. Indoor VLC applications do not demand high energy consumption and in addition the technology uses energy from local lighting for communication. However, for VLC to establish itself as a revolutionary technology capable of activating or stimulating the economies, the complexity and costs of the devices must be similar to those existing in Wi-Fi products. Therefore, it is intended to develop, within the scope of this graduation project, a multiplatform application based on a plug-and-play device that will make it possible to receive, in different devices, data containing information from modulated light sources. This type of device, capable of adding functionality to computers, are known as dongles and can be found with different functions. In this work, initially, the current scenario of wireless communication networks based on RF, in particular its limitations, will be discussed. Next, VLC technology is presented as an innovative solution and, finally, the proposal to democratize it through a multiplatform real time data reception system via VLC based on serial communication, using a VLC dongle prototype, developed in the scope of this work, which can make possible the reception of data in computers through communication by visible light, in which null errors can be obtained for VLC links between 30 and 280 centimeters.

Keywords: Visible Light Communication (VLC). On-Off Keying (OOK) Modulation. Manchester Coding. Light Fidelity (Li-Fi). Plug and Play (PnP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustrações do sistema de comunicação. 20
Figura 2 – Modulação OOK. 23
Figura 3 – Codificação Manchester - Padrão IEEE 802.3. 25
Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicações elétricas. 27
Figura 5 – Esquemático de LED. 28
Figura 6 – Exemplos de fotossensores. 29
Figura 7 – Lente biconvexa. 30
Figura 8 – Padrão IEEE-754. 33
Figura 9 – Fluxograma de aplicações desenvolvidas. 37
Figura 10 – Transmissor desenvolvido. 39
Figura 11 – Fluxo da informação no *setup*. 39
Figura 12 – Protocolo desenvolvido. 40
Figura 13 – Protótipo de Receptor Desenvolvido. 41
Figura 14 – Esquemático do Circuito de Recepção. 42
Figura 15 – Diagrama de blocos do Circuito de Recepção. 42
Figura 16 – Fluxograma do *software* embarcado em SAMD21. 43
Figura 17 – Fluxograma da aplicação *web*. 45
Figura 18 – Página inicial - *SmaL Web Version*. 46
Figura 19 – Escolha de porta - *SmaL Web Version*. 46
Figura 20 – Exibição de dados na interface - *SmaL Web Version*. 47
Figura 21 – Mensagem de aviso de dispositivo desconectado - *SmaL Web Version*. . 47
Figura 22 – Estilo de "Última Leitura" não atual - *SmaL Web Version*. 48
Figura 23 – Gráfico de oximetria - *SmaL Web Version*. 48
Figura 24 – *App* em iPhone 12 Pro. 49
Figura 25 – Circuito de lâmpada de LED simplificado. 52
Figura 26 – Tensão de entrada do circuito de lâmpada de LED simplificado. 52
Figura 27 – Tensão de saída do circuito de lâmpada de LED simplificado. 53
Figura 28 – Corrente de entrada do circuito de lâmpada de LED simplificado. . . . 53
Figura 29 – Corrente de saída do circuito de lâmpada de LED simplificado. 54
Figura 30 – Transformada de Fourier da tensão de entrada. 54
Figura 31 – Transformada de Fourier da tensão de saída. 55
Figura 32 – Transformada de Fourier da tensão de saída do OPT101. 55
Figura 33 – Filtro passa-baixa passivo simulado. 56
Figura 34 – Resultado da simulação para f = 2 kHz. 57
Figura 35 – Resultado da simulação para f = 10 Hz. 58
Figura 36 – Sinal do fotossensor e saída do filtro passa-baixa. 59

Figura 37 – Análise do efeito de ruído sobre o comparador. 60
Figura 38 – Saídas do fotossensor e do comparador. 60
Figura 39 – *Setup* utilizado no experimento. 62
Figura 40 – Taxa de Erro x Distância para $R_f = 860\ k\Omega$. 64
Figura 41 – Taxa de Erro x Distância para $R_f = 157\ k\Omega$. 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de taxa de erro para $R_f = 860\ k\Omega$. 63
Tabela 2 – Levantamento de taxa de erro para $R_f = 157\ k\Omega$. 64
Tabela 3 – Levantamento de taxa de erro sobre mesa de trabalho. 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	*Analog to Digital Converter*
API	*Application Programming Interface*
ASK	*Amplitude Shift Keying*
BER	*Bit Error Rate*
CSS	*Cascading Style Sheets*
DC	*Direct Current*
DMA	*Direct Memory Access*
GPIO	*General-Purpose Input/Output*
HL7	*Health Level 7*
HTML	*HyperText Markup Language*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IoT	*Internet of Things*
LabTel	Laboratório de Telecomunicações
LED	*Light-Emitting Diode*
Li-Fi	*Light Fidelity*
OOK	*On-Off Keying*
OWC	*Optical Wireless Communications*
PnP	*Plug and Play*
PLC	*Power Line Communications*
PPSUS	Programa de Pesquisa para o SUS
PWM	*Pulse-Width Modulation*
RF	Radiofrequência
RGB	*Red, Green, Blue*

RPi	*Raspberry Pi*
SmaL	*Smart Light*
UART	*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VLC	*Visible Light Communications*
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 14
1.1 Apresentação . . . 14
1.2 Justificativa . . . 16
1.3 Objetivos . . . 17
1.3.1 Objetivo Geral . . . 17
1.3.2 Objetivos Específicos . . . 17
1.4 Trabalhos Relacionados . . . 18
1.5 Procedimentos Metodológicos . . . 19
1.5.1 Classificação da Pesquisa . . . 19
1.5.2 Arquitetura Proposta . . . 19
1.5.2.1 SmaL PnP . . . 21
1.5.2.2 *SmaL Web Version* . . . 21

2 REFERENCIAL TEÓRICO . . . 22
2.1 Conceitos de Comunicações Digitais . . . 22
2.1.1 Conversão Entre Sinais Analógicos e Digitais . . . 22
2.1.2 Modulação de Amplitude OOK . . . 23
2.1.3 Codificação Manchester . . . 23
2.1.4 Taxa de Erro de Bit . . . 25
2.2 Comunicação por Luz Visível . . . 26
2.2.1 Diodos Emissores de Luz . . . 27
2.2.2 Fotossensores . . . 28
2.2.3 Lentes . . . 29
2.3 Filtros . . . 31
2.3.1 Filtros Analógicos . . . 31
2.3.2 Filtros Digitais . . . 32
2.4 Padrões e Protocolos . . . 33
2.4.1 Padrão IEEE 754 . . . 33
2.4.2 Protocolo HL7 . . . 33
2.4.3 Protocolo UART . . . 34
2.5 Sistemas Embarcados . . . 35
2.5.1 Acesso Direto à Memória . . . 35

3 HISTÓRICO DO PROJETO . . . 37

4 O TRANSMISSOR . . . 39

5 O RECEPTOR 41
5.1 Descrição da Eletrônica 41
5.2 Arquitetura de Software 42
5.2.1 Sistema Embarcado 42
5.2.2 Sistema *Web* 44
5.2.3 Comunicação Serial 49

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 51
6.1 Desenvolvimento do Filtro 51
6.1.1 LEDs em Iluminação Convencional 51
6.1.2 Filtro Analógico 56
6.1.3 Filtro Digital 58
6.2 Análise de Sinal ao Longo do Circuito 59
6.3 Experimentos Realizados no *Setup* VLC 61
6.4 Análise de Erro x Distância 62

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 68

APÊNDICES 72

APÊNDICE A – SIMULAÇÃO DE SINAIS NO MATLAB 73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Devido ao crescimento exponencial da tecnologia, em conjunto com as chamadas Revoluções Industriais, a vida das pessoas e a forma como se estruturam as sociedades vêm sofrendo mudanças e evoluindo para acompanhar as inovações emergentes. A Primeira Revolução Industrial, ocorrida na segunda metade do século XVIII, deu início ao modelo industrial de produção. Quanto à Segunda Revolução (1850 – 1945), esta foi caracterizada por um desenvolvimento em diversas áreas, podendo-se citar a indústria química, elétrica, de petróleo e aço. Em seguida, a Terceira Revolução Industrial (1950 – 2010) foi marcada pela substituição gradual de sistemas analógicos por sistemas digitais, como o uso de microcomputadores e criação da *internet*, além de diversas questões históricas envolvidas e que tiveram efeitos diretos no meio científico e no desenvolvimento tecnológico, como a produção informatizada, que possibilita novos métodos de agricultura, e a invenção do telefone celular (SAKURAI; ZUCHI, 2018; PASQUINI, 2020).

Dado que a história das telecomunicações é fortemente marcada por sistemas cabeados, principalmente nas aplicações industriais, a criação do telefone celular abriu um novo caminho para o desenvolvimento das comunicações sem fio. No início dos anos 80 foi implementada a primeira geração de telefonia móvel, o 1G. Este foi um ponto importante para o que mais tarde se tornaria uma das áreas de pesquisa e desenvolvimento de maior impacto nas industrias e estilo de vida moderno (SANTOS, 1999). Hoje vive-se o que se pode chamar de Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0 e, neste ponto, já existem no mínimo 4 gerações de telefonia móvel bem consolidadas e que possuem seu funcionamento baseado no espectro de radiofrequência (RF) (SHARMA, 2013). Tal desenvolvimento em telefonia móvel se dá em paralelo ao declínio do uso da telefonia fixa e aumento da demanda no uso de dados (SILVA, 2018). Por essa razão, estima-se que nos próximos anos a faixa de RF estará em saturação e alternativas de tecnologias de comunicação se fazem necessárias.

Muitas empresas, centros de pesquisa e universidades reconhecem que as tecnologias de automação e comunicações são a base da manufatura industrial e um importante impulsionador para a Indústria 4.0. Esse conceito foi introduzido pela primeira vez na Alemanha e, desde que o governo alemão anunciou a Indústria 4.0 como uma das principais iniciativas de sua estratégia de alta tecnologia em 2011, o tópico tornou-se famoso no

mundo inteiro (AL., 2016).

Atualmente existem diversos assuntos relativos à telecomunicações, eletrônica, computação, mecânica e informática diretamente ligados ao desenvolvimento não só da industria, mas da forma de viver das sociedades humanas. Aqui, temas de pesquisa como tecnologias de comunicação móvel, desenvolvimento de hardware e robótica ganham um papel extremamente importante na intersecção dessas áreas, encontra-se o conceito de internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*).

A Internet das Coisas compreende a conectividade de dispositivos conectados à *Internet*. Trata-se de levar conectividade para sensores, geladeiras e outros dispositivos da vida cotidiana e/ou industrial. O objetivo para tal se encontra no levantamento de dados para diferentes possibilidades de tomada de decisão, como por exemplo o planejamento do momento para dar-se manutenção em um determinado equipamento, sem grandes prejuízos (LI; XU; ZHAO, 2018). Esse conceito de interconexão digital é visto como um dos fundamentos da Quarta Revolução Industrial e, segundo dados de Schwab, presidente do Fórum Econômico Mundial e autor do livro "A Quarta Revolução Industrial", o conceito está ligado diretamente ao de Indústria 4.0, sendo um modelo empresarial com o objetivo utilizar as tecnologias atualmente disponíveis para gerar conhecimento e produtividade (SAKURAI; ZUCHI, 2018).

Frequentemente os aparelhos que fazem uso do conceito de IoT têm sua comunicação feita via RF e, por essa razão, também estão sujeitos às interferências nessa faixa de espectro causada pela saturação da mesma (DATTA et al., 2020a).

Majoritariamente as indústrias possuem barreiras metálicas em suas instalações e, portanto, o uso de RF apresenta grande atenuação, muitas vezes impossibilitando a comunicação, além do risco de incêndio em áreas classificadas, devido ao efeito pelicular que gera aquecimento no metal ou interferência em aparelhos que trabalham na mesma faixa de espectro, como em hospitais (SCHMITZ et al., 2013).

Para suprir a demanda existente por causa do constante crescimento de dispositivos conectados e devido à restrições geradas por limitações no uso de RF, pesquisas envolvendo outros meios de comunicação se fazem necessárias. Atrelada à esta demanda, a tecnologia de comunicação por luz visível (VLC, do inglês *Visible Light Communication*) tem se mostrado um caminho promissor a se seguir nas pesquisas e desenvolvimentos voltados às novas tecnologias que tangem as comunicações móveis e a indústria 4.0. No VLC, é possível fazer-se uso das infraestruturas de sistemas de iluminação existente, há uma facilidade de delimitar-se o sinal de luz e existe a possibilidade de se trabalhar em ambientes com

restrições ao RF, tais como regiões hospitalares. Nesse ponto, o Li-Fi, do inglês *Light Fidelity*, surge para complementar as formas de comunicação sem fios convencionais. A tecnologia Li-Fi pertence à família VLC e trata-se de uma rede óptica sem fio que faz uso da luz para transmitir dados. A informação é codificada por meio da flutuação de um sinal de luz emitido por um LED (ZWAAG et al., 2021).

Ademais, a faixa de radiofrequência é licenciada e, portanto, os dispositivos que nela trabalham são limitados de acordo com a legislação vigente em cada país. É importante ressaltar que VLC surge como uma tecnologia complementar ao RF e não como um substituto, portanto deve atuar nos pontos em que existem lacunas nas aplicações e soluções atuais de radiofrequência. Os requisitos de energia em VLC são baixos, pois a tecnologia reutiliza a energia necessária na iluminação para comunicação, porém a implementação de novos paradigmas deve ser acessível e não se pode deixar para trás de uma só vez toda tecnologia existente para que se faça a transição para um novo modelo de rede móvel.

Na busca por tecnologias capazes de tornar a comunicação por luz visível compatível com os dispositivos atuais, preferencialmente, atendendo à toda sociedade, este trabalho surge para propor um receptor VLC acessível. Visa-se o desenvolvimento de uma aplicação *web* capaz de decodificar informação utilizada para modular transmissores VLC a partir de um dispositivo eletrônico externo. No mais, almeja-se um sistema de baixo custo e fácil utilização, do tipo PnP (do inglês, *Plug-and-Play*), tornando assim possível a utilização de aparelhos da atualidade em sistemas de comunicação via luz visível.

1.2 Justificativa

Até o ano de 2023, mais de 13 bilhões de dispositivos estarão conectados e aproximadamente 70% da população mundial terá conectividade móvel (CISCO, 2021). Tais previsões tornam evidente que, por causa do aumento de equipamentos e dispositivos se comunicando através do espectro de radiofrequência (RF), nos próximos anos a largura de banda de RF disponível não será suficiente para suprir toda a demanda por acesso sem fio. Para atender esta exigência, a comunicação por luz visível (VLC) é um método alternativo capaz de reduzir a carga de comunicação baseada em RF, especialmente em comunicações internas.

Estima-se que 70% da comunicação seja feita em ambientes fechados. Nesses ambientes, o uso de LEDs para iluminação tem crescido devido as suas baixas taxas de consumo de energia, e longo período de vida útil (ERGUL; DINC; AKAN, 2015). Sabendo que os custos relacionados à sistemas de comunicação por luz visível, que é uma área em constante

desenvolvimento e alvo de pesquisas pelo mundo inteiro, ainda são altos e precisam ser mais acessíveis para que esta tecnologia possa concorrer com soluções já existentes, ou complementá-las através de redes híbridas e heterogêneas, deve-se atacar as barreiras entre o desenvolvimento e a popularização da tecnologia, destacando-se, portanto, os custos e facilidade de uso.

Por tornar possível o reaproveitamento de computadores e aparelhos da atualidade, que, no geral, não possuem um suporte nativo para trabalho com comunicação VLC, dado que esta é uma tecnologia nova, o presente trabalho busca a pesquisa e desenvolvimento de uma interface entre a nova tecnologia de comunicação e dispositivos incompatíveis até o momento, como um adaptador para tais equipamentos. Para tal, pretende-se desenvolver hardware e software que permita a recepção via luz visível em diferentes plataformas. Dado o desafio, pode-se dizer que a principal justificativa para este trabalho se encontra na busca por facilidade de uso em soluções VLC, sem encarecimento significativo das mesmas, podendo assim, atender demandas industriais e, futuramente, domésticas, para que se possa contornar problemas e limitações existentes nas tecnologias cabeadas e de radiofrequência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A proposta deste projeto de graduação tem como objetivo geral implementar um receptor de dados codificados conforme a tecnologia VLC baseado em aplicação web integrada com dispositivo PnP (*dongle VLC*) capaz de interagir com computadores de diferentes arquiteturas de *hardware* e *software*.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para tornar tal desenvolvimento possível, uma serie de objetivos específicos devem ser atendidos e são listados a seguir:

- projetar *dongle VLC* para recepção do sinal de luz e envio de informação via porta USB;

- implementar aplicação web para tratamento e decodificação das informações recebidas na porta USB;
- realizar análises de parâmetros de qualidade e performance do protótipo desenvolvido.

1.4 Trabalhos Relacionados

Existem diversos projetos de pesquisa e trabalhos na literatura envolvendo a tecnologia de comunicação por luz visível, uma vez que esta é uma área de estudo que está crescendo em diferentes países. Isso se justifica na necessidade de comunicação que tem crescido e se tornado cada vez mais exigente por parte das necessidades da vida moderna.

Em meio a esse cenário, surgem trabalhos relacionados ao que foi desenvolvido no presente trabalho. Para ilustrar este campo de estudo, escolheu-se dois *setups* da literatura com características em comum com o sistema desenvolvido nesse projeto de graduação.

O primeiro trabalho possui título "Project of a Communication System by Visible Light Communication (VLC) Based on LED Lighting"(em português, Projeto de um Sistemas de Comunicação por Luz Visível Baseado em Iluminação LED) (SOUZA et al., 2013). Nesse trabalho um LED alimentado em 5 V é utilizado para enviar informações via luz com alcance de 25 cm. No receptor utilizado, há um fotossensor OPT101, o qual faz a interface entre o domínio óptico e o domínio elétrico. A saída do fotossensor é utilizada como entrada em um circuito comparador, o qual possui como referência um sinal PWM utilizado para transformar o sinal recuperado em uma onda quadrada. Essa onda quadrada é amostrada em um microcontrolador PIC16F877A, onde é feita a recuperação dos dados.

Para o presente trabalho, o uso de circuito comparador na recuperação de sinal, bem como do fotossensor OPT101 foram abordagens adotadas e que apresentaram um resultado satisfatório no que tange a proposta de sistema de recepção.

O segundo trabalho tem título "Designing Embedded Visible Light Communication System Adaptable to Fluctuations in Light Intensity"(em português, Projetando Sistema Embarcado para Comunicação por Luz Visível Adaptável a Flutuações na Intensidade da Luz) (DATTA et al., 2020b). Nesse trabalho também utilizou-se o fotossensor OPT101 e um sistema de transmissão baseado em Raspberry Pi e LED, sendo possível comunicação com até 41 cm de distância entre o transmissor e o receptor. Dentre os pontos abordados no trabalho, é importante destacar o estudo de eficiência do canal VLC, da potência óptica no receptor e o circuito de recepção desenvolvido.

A principal característica deste trabalho e que foi adotada no circuito desenvolvido no projeto de graduação se deu no desenvolvimento de um circuito de "cancelamento da luz ambiente". No presente trabalho isso se dá por meio de um filtro passa-baixas que torna possível a recuperação de uma onda quadrada na saída do comparador da recepção semelhante ao sinal modulante de saída no transmissor.

1.5 Procedimentos Metodológicos

1.5.1 Classificação da Pesquisa

Inicialmente fez-se necessário um levantamento do estado da arte, para embasar o trabalho, seguido de estudos sobre as tecnologias e ferramentas necessárias para o desenvolvimento do sistema proposto em paralelo com a evolução da tecnologia. Em seguida, realizou-se uma série de experimentos em ambiente digital, testes de validação da codificação, modulação, protocolo de comunicação e aplicação desenvolvida. Neste ponto, adotou-se um cenário ideal, sem presença de ruídos e sinais indesejados do ambiente, para posteriormente verificar-se a performance do protótipo em um cenário real, durante experimentos em laboratório, para validação do receptor. Em resumo, o sistema de recepção foi divido em partes e avaliado por meio de simulações e testes em ambiente de desenvolvimento computacional, em seguida foram feitos avaliações do protótipo desenvolvido em laboratório.

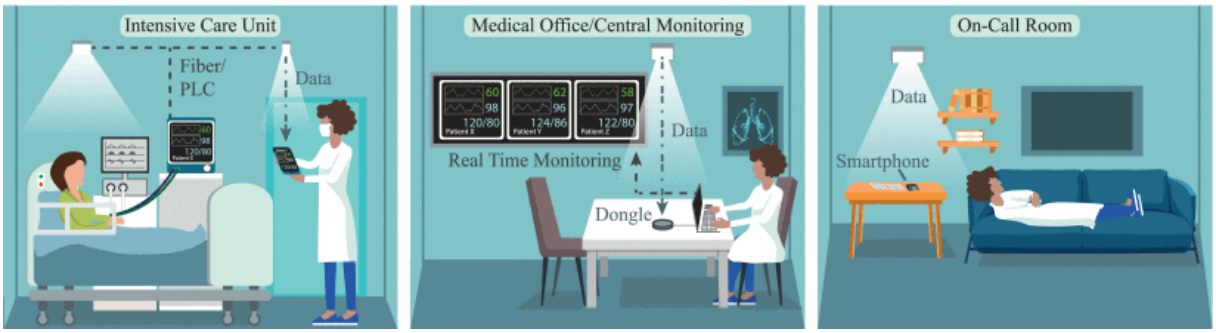
Dados os métodos anteriormente apresentados, quando analisada a natureza deste trabalho, pode-se dizer que trata-se de uma pesquisa **aplicada**. Isso é verdade, uma vez que os resultados obtidos são aplicados na implementação de uma solução tecnológica para um problema de acessibilidade em torno de uma tecnologia emergente. No que tange seus objetivos, esta pesquisa é classificada como **exploratória**, visto que busca atender uma lacuna existente no mercado de tecnologias de comunicação sem fio. No que diz respeito às etapas de trabalho e procedimentos adotados, é proposta uma pesquisa **experimental**, dado que existe uma arquitetura alvo e especificações de projeto a serem atendidas e estudadas qualitativamente (GOMES; GOMES, 2019; PRODANOV; FREITAS, 2013).

1.5.2 Arquitetura Proposta

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolver um sistema de recepção multiplataforma, de maneira compatível com computadores de diferentes configurações de *hardware* e *software*, tais como diferentes sistemas operacionais ou arquiteturas de processamento.

A Figura 1 ilustra o sistema almejado. Atentando-se ao receptor *dongle*, da ilustração do centro, é importante saber que, no escopo deste trabalho, o mesmo pode ser dividido em subsistemas, sendo eles o componente de *hardware*, doravante denominado **SmaL PnP** e o componente de *software* ***SmaL Web Version***, onde a palavra "SmaL" é uma abreviação do inglês *Smart Light*.

Figura 1 – Ilustrações do sistema de comunicação.



Fonte: (ZWAAG et al., 2021)

A Figura 1 mostra aplicações de sistemas de comunicação VLC completos, com transmissão através de uma lâmpada de LED e recepção em *tablets*, *smartphones* e computadores. Este último é parte do objetivo principal deste trabalho, o qual possui o auxílio de um dispositivo eletrônico conectado ao computador via porta USB (*dongle*), tal como o apresentado. Dado que será trabalhado principalmente na recepção, se faz necessário o acesso ao resto da arquitetura para se desenvolver e validar o protótipo proposto. Para tal, no Laboratório de Telecomunicações da UFES, o LabTel, existe uma bancada de trabalho específica para experimentos em torno de comunicação por luz visível, na qual existem equipamentos de medicação e um sistema de testes para demonstrações e prova de conceito em funcionamento. Fez-se uso desse espaço para desenvolvimento deste projeto de graduação, bem como dos equipamentos presentes no mesmo. Vale ressaltar que esta bancada está em constante evolução e o resultado deste trabalho contribuirá para que esta possa ir para além dos muros da universidade e, futuramente, ser aplicada em diferentes ambientes, nos quais fará a diferença como complemento para as soluções de comunicação sem fio existentes. Para o sistema multiplataforma de recepção proposto, é importante entender quais são as principais características que estão no escopo deste projeto, bem como qual é sua composição. Nas subseções 1.5.2.1 e 1.5.2.2 são resumidas os dois principais componentes da solução proposta.

1.5.2.1 SmaL PnP

Este subsistema é representado na Figura 1 como um *dongle*, conectada ao computador via cabo USB. O **SmaL PnP** é dispositivo de uso simples que tem como proposta ser um *dongle VLC* capaz de tornar diferentes computadores compatíveis com a tecnologia VLC. No dispositivo, a luz chega até o fotodetector presente no circuito de recepção, passa por um filtro digital do tipo passa-baixas e um circuito comparador, para então ser lido em uma entrada digital do sistema de decodificação baseado em microcontrolador. Este, após tratamento do sinal amostrado, por meio da comunicação serial, envia, através da porta USB, a informação em pacotes de 192 bits. A informação recebida no computador é interpretada e exibida através da aplicação ***SmaL Web Version***.

1.5.2.2 *SmaL Web Version*

O desenvolvimento da aplicação ***SmaL Web Version*** foi voltado para interpretação dos dados recebidos via comunicação serial com o *dongle VLC* apresentado anteriormente, a qual é acessada via navegador web e faz a aquisição dos dados que chegam na porta serial definida ao conectar-se o **SmaL PnP** ao computador do usuário. Estes dados passam por uma série de tratamentos para que seja possível a recuperação da informação transmitida e então retorná-la para o usuário através da interface da aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos de Comunicações Digitais

2.1.1 Conversão Entre Sinais Analógicos e Digitais

Para que seja possível decodificar o sinal de luz que chega ao receptor VLC, se faz necessário um processamento digital. Contudo, antes de entender como se faz esse processamento e porque usar sinais digitais, deve-se entender o que são os sinais analógicos. Em resumo, um sinal continuo no tempo e na amplitude é chamado sinal analógico; enquanto que, um sinal discreto no tempo e com valores discretos na amplitude é conhecido como sinal digital (ALBUQUERQUE; ALBUQUERQUE, 2002).

O mundo que conhecemos fora das máquinas e computadores é de característica analógica. Tais grandezas analógicas estão presentes no nosso dia por toda parte e não diferente com a luz que enxergamos (NUNES et al., 2006). Para os autores:

> Nem a natureza nem os seres humanos utilizam sinais digitais para se comunicar no dia a dia. O mundo real consiste numa infinidade de sinais analógicos, que não são ou não podem ser entendidos em linguagem de máquina. Para que nossos computadores, celulares e quaisquer dispositivos eletrônicos possam trabalhar, é necessário que haja uma conversão desses sinais analógicos na forma digital.

No ponto de vista do receptor VLC, a informação chega em um fotodetector de forma analógica e é convertida em um sinal de corrente. Contudo, para tratar-se a informação na aplicação, deve-se fazer a conversão de tal sinal do mundo analógico para o mundo digital. Essa conversão é feita por meio de um conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog to Digital Converter*).

O uso de ADCs pode ser classificado em 5 grandes áreas, ou arquiteturas, principais de aplicação: aquisição de dados, medição industrial de precisão, banda de voz e áudio, altas velocidades e, por fim, aplicações de controle em malha fechadas. Existem diferentes tipos de ADCs e cada um possui suas vantagens e desvantagens, essas particularidades variam para cada aplicação do conversor. Apesar das diferenças, esses componentes

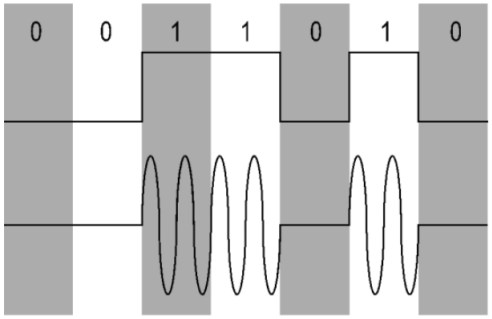
possuem o objetivo de transformar uma grandeza analógica, normalmente de corrente ou tensão, em um valor digital, conhecido como valor de saída ADC, ou simplesmente valor de ADC. O valor de ADC deve ser interpretado de acordo com informações do fabricante, fornecidas normalmente em *datasheets* ou manuais, respeitando-se as limitações do conversor (RAPUANO et al., 2005).

Para aplicação prevista neste trabalho, será utilizado um ADC para transformar o sinal de corrente fornecido pelo fotodetector em um sinal digital a ser decodificado na aplicação e então exibido para o usuário da mesma.

2.1.2 Modulação de Amplitude OOK

A modulação por chaveamento Liga/Desliga (OOK, do inglês *On–off keying*) consiste em suprimir a portadora para nível lógico baixo e transmistir a portadora para nível lógico alto, isso pode ser observado na Figura 2. OOK é uma sigla no inglês que traduz literalmente para chaveamento ligado-desligado. Como seu nome sugere, o foco desse tipo de modulação é modular um sinal digital através da presença ou não de uma portadora. Por conta disso, a modulação OOK é considerada um tipo de modulação por chaveamento de amplitude (ASK, do inglês *Amplitude-shift keying*), sendo o tipo mais básico de ASK dado que a amplitude da portadora será nula ou não. A modulação definida deve ser considerada tanto no transmissor como no receptor, portanto diz-se que os métodos de modulação e demodulação de sinal são simétricos (CARVALHO, 2009; SCHMITZ et al., 2013).

Figura 2 – Modulação OOK.



Fonte: (SCHMITZ et al., 2013).

2.1.3 Codificação Manchester

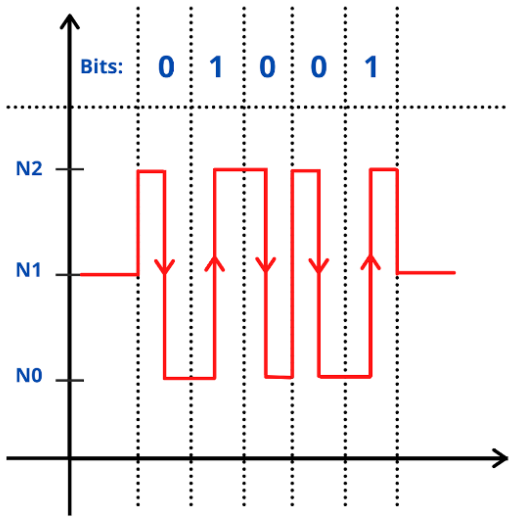
O Padrão IEEE 802.15.7 reforça a indicação do uso de codificação RRL, do inglês *Run-length limited Coding*, que pode ser traduzido como codificação por comprimento de

execução, do tipo Manchester, ou simplesmente código Manchester. O Manchester é uma codificação de linha, na qual um bit é definido por uma sequência de nível lógico alto seguido de nível lógico baixo ou o contrário. É um tipo de código NRZ (do inglês, *non return to zero*) e por conta disso o efeito de uma componente de corrente contínua no sinal é devidamente reduzido. Além disso, tal codificação é interessante para sincronismo do receptor, uma vez que é uma forma de codificação com a qual pode-se gerar e transmitir um sinal de *clock* juntamente aos pacotes enviados (REGUERA, 2019; ZHU et al., 2015).

Existem duas maneiras pelas quais esse código pode ser representado. A primeira é pelo padrão sugerido por G.E. Thomas, sendo esse a primeira implementação de um código Manchester. Nesse caso é sugerido que para o bit 0 o sinal siga a ordem baixo-alto (transição positiva), ou seja, durante a primeira metade do sinal ele estará em nível lógico baixo e na segunda metade do sinal em nível lógico alto. Para o bit 1 a ordem é o contrário, alto-baixo (transição negativa). Esse sinal pode ser realizado através da operação lógica XNOR entre o sinal de entrada e o sinal de clock, lembrando que o sinal de clock deve ter período igual a metade do tempo de bit do sinal de dados (MAITY; MAITY; ROY, 2012).

Outra convenção adotada para codificação Manchester é a determinada pelos padrões IEEE 802.4 e 802.3. Nela o sinal será alto-baixo (transição negativa) para bit 0 e o baixo-alto (transição positiva) para bit 1. Claramente, a diferença para o padrão G.E. Thomas é que um é o direto oposto da outra, sendo assim, a implementação lógica desse código é a simples negação do padrão anterior. Negando a porta XNOR nós temos a porta XOR por padrão que é utilizado para codificar o sinal de informação juntamente com o sinal de clock. Na Figura 3 está representada a codificação Manchester no padrão IEEE 802.3, ela está deslocada em torno de N1 para representar o nível DC utilizado no transmissor do projeto. Note que as transições positivas representam bit 1 e as transições negativas denotam os bits 0.

Figura 3 – Codificação Manchester - Padrão IEEE 802.3.



Fonte: Produção do próprio autor.

2.1.4 Taxa de Erro de Bit

A taxa de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*) é um indicador utilizado em comunicações digitais para quantificar o desempenho de um sistema. Dado pela equação 2.1, o conceito é simplesmente de se fazer a razão entre o número de bits errados e o número total de bits recebidos (BREED, 2003).

$$BER = \frac{\text{Erros}}{\text{Número total de Bits}} \tag{2.1}$$

Um valor de BER baixo, significa um sistema com poucos erros, enquanto um valor de BER alto, representa uma maior quantidade de erros durante a comunicação. Na literatura, para tecnologia VLC, encontra-se comumente valores de BER satisfatórios com ordens de grandeza de entre 10^-4 e 10^-7 a depender da aplicação. Diferentes fatores podem afetar a BER, sendo o ruído introduzido durante a propagação no canal de comunicação o principal agente causador de baixos desempenhos no levantamento da BER (BREED, 2003).

2.2 Comunicação por Luz Visível

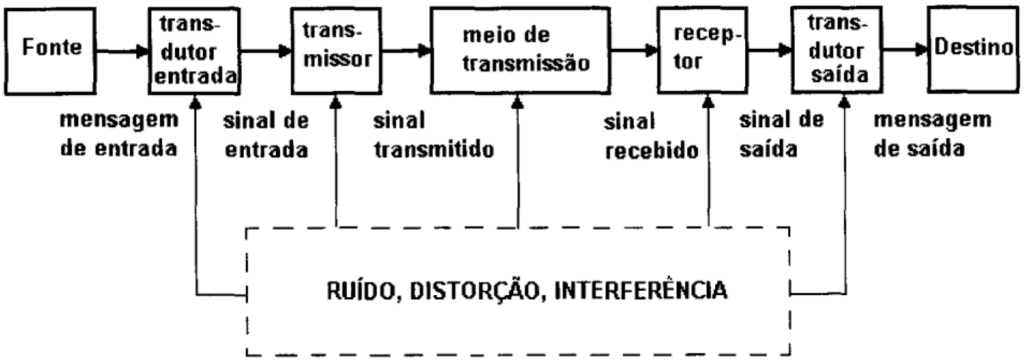
A tecnologia de comunicação por luz visível (VLC, do inglês *Visible Light Communication*) é uma das comunicações ópticas sem fio, ou OWC (*Optical Wireless Communications*), que mais tem sido alvo de pesquisas por todo mundo nas últimas décadas, seja na indústria, seja na academia. Uma vez que existe uma demanda crescente de alternativas ao espectro de radiofrequência (RF) para conectividade nas mais diversas aplicações e áreas (VEGNI; LITTLE, 2012; BEDOR, 2017).

O uso da faixa de espectro de luz visível traz consigo o benefício claro de ser uma nova banda de frequência para a implementação de novas tecnologias, sem saturar ainda mais a faixa de RF, onde operar nessas frequências permite novas soluções que podem ser integradas organicamente em nosso dia a dia (VEGNI; LITTLE, 2012). A luz visível faz parte dos ambientes nos quais habitamos e a existência de dispositivos que tomem proveito disso pode mudar a maneira como compartilhamos informação.

VLC é uma tecnologia de comunicação sem fio de curto alcance que possui potencial para grandes taxas de dados, uma vez que está situada na faixa de espectro entre 400 e 700 nm. Utilizando-se de LEDs modulados em altas frequências, é possível eliminar o efeito de *flickering*, que é a variação de luz perceptível ao olho humanao ao transmitir-se informação. Segundo o IEEE 802.15.7 uma frequência de pelo menos 200 Hz deve ser utilizada para que sejam eliminados os problemas causados pelo *flicker* sobre o olho humano (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012; ISMAIL; SALIH, 2020).

Para implementação de sistemas de comunicação VLC, faz-se necessário o uso de técnicas amplamente conhecidas na área das telecomunicações. A arquitetura básica de um sistema como tal consiste em um transmissor, um canal de comunicação e um receptor. Tais componentes do sistema podem ser subdivididos e possuem suas particularidades, porém para fins de simplificação, considere o diagrama observado na Figura 4. No diagrama apresentado, o transmissor fará uso de LEDs, os quais passarão por um processo de modulação para que seja possível emitir luz codificada conforme um determinado protocolo. O receptor deverá receber tal informação de luz, através de um fotodetector e então decodificar a informação. Por fim, quanto ao canal de comunicação, em VLC, normalmente, se trata do espaço livre (ar) (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012; REGUERA, 2019). A Figura 4 ainda contém elementos de distorção, interferência e ruído, além dos transdutores que são de extrema importância nas aplicações práticas de telecomunicações.

Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicações elétricas.



Fonte: (CARVALHO, 2009)

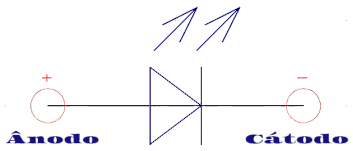
Visando um devido entendimento da implementação do sistema de comunicação por luz visível proposto neste trabalho, se faz necessário uma apresentação dos conceitos fundamentais relacionados as comunicações digitais, teoria de filtros analógicos e digitais, diferentes padrões e protocolos, além de uma base de sistemas embarcados. No mais, o resto desta seção tratará de termos comuns no estudo da tecnologia VLC, tais como LEDs, fotossensores e lentes.

2.2.1 Diodos Emissores de Luz

Um diodo emissor de luz, ou LED, é um componente eletrônico capaz de gerar luz. Por ser um diodo, trata-se de um dispositivo do tipo bipolar no qual existe um terminal chamado ânodo e um terminal cátodo, no qual, a depender de sua polarização, haverá ou não passagem de corrente pelo mesmo e, consequentemente, a emissão ou não de luz (SCOPACASA, 2008).

A Figura 5 ilustra a representação de um LED em circuitos eletrônicos. Pode-se verificar a polaridade do LED por meio da identificação de seus terminais, sendo o terminal negativo identificado pelo cátodo e o terminal positivo pelo ânodo.

Figura 5 – Esquemático de LED.



Fonte: Produção do próprio autor.

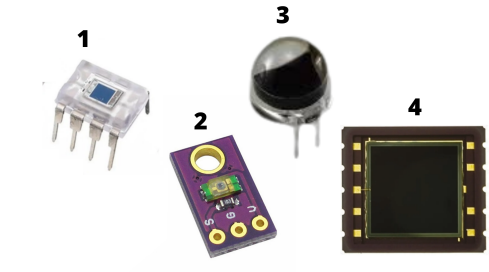
Em VLC, os LEDs são usados no lado do transmissor. Os circuitos de modulação são conectados diretamente a esses componentes, gerando uma emissão de luz controlada por um sinal modulante contendo a informação que se deseja transmitir (DATTA et al., 2020a).

2.2.2 Fotossensores

Fotossensores, também conhecidos como fotodetectores, são dispositivos sensíveis a luz nos quais, geralmente, uma variação de luz de entrada gera uma variação de corrente de saída de mesma proporção, realizando-se assim uma conversão entre domínio óptico e elétrico. Em sistemas de comunicações ópticas, devido às altas frequências da portadora (luz), a corrente de saída no circuito fotodetector será proporcional à potência média da onda incidente sobre a área efetiva do fotossensor (CONCEIÇÃO, 2015).

A Figura 6 mostra alguns fotossensores tipicamente utilizados em VLC. Com identificação 1 está o sensor de luz ambiente OPT101 da Texas Instruments. O segundo sensor de luz ambiente é o TEMT6000 da fabricante Vishay Semiconductors. Por fim, com identificação 3 e 4, estão, respectivamente, os fotodiodos da Hamamatsu S6968 e S5107.

Figura 6 – Exemplos de fotossensores.



Fonte: Produção do próprio autor.

1. OPT101 - fotodiodo monolítico e amplificador de transimpedância;
2. TEMT6000 - fototransistor;
3. S6968 - fotodiodo;
4. S5107 - fotodiodo.

Em VLC, os fotossensores são usados no lado do receptor. Estes componentes recebem o sinal de luz e o convertem do domínio óptico para o domínio elétrico para que seja possível demodular o sinal desejado e então recuperar-se a devida informação. Nesses sistemas, deve-se filtrar ruídos e flutuações que são detectados pelo fotossensor, devido à luzes ambientes e variações de distância entre o receptor e o transmissor (mudança do comprimento do canal) (DATTA et al., 2020a). Uma forma de melhorar a performance de um fotodetector em aplicações de VLC é se fazer uso de lentes para focalização da luz sobre a superfície do sensor.

2.2.3 Lentes

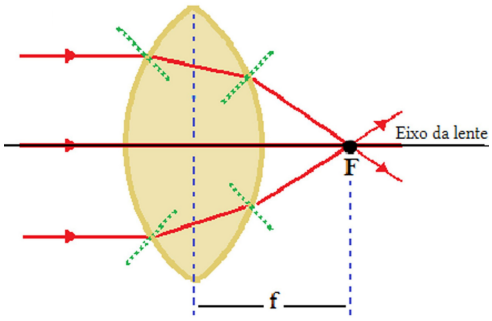
Sistemas ópticos possuem diversas classificações a depender dos tipos de componentes utilizados e, sobretudo, do objetivo principal do sistema. Muitas vezes um sistema óptico pode ser subdividido e então ramificam-se ainda mais as suas possibilidades de classificação de acordo com características do mesmo. As principais classificações para esses sistemas é a que divide os mesmos em refratores e refletores.

No que tange os sistemas ópticos refratores, as lentes formam um conjunto de dispositivos importante para as mais diferentes aplicações. Esses mecanismos obedecem a Lei de Snell

e, geralmente, são delimitadas por duas superfícies curvas que causam refração na luz que passa pela lente (PIMENTEL; CAMPANHA, 1993).

Dentre os diferentes tipos de lentes, as ditas convexas se apresentam como uma opção atrativa em aplicações de VLC. Essas lentes são capazes de gerar as mais variadas formas de refração na luz. Por exemplo, uma lente biconvexa, é formada por dois lados de mesma curvatura e é capaz de direcionar a luz para o centro da esfera formada pela curvatura da lente. Na Figura 7 é exemplificada uma lente biconvexa, na qual, em vermelho, tem-se os raios de luz incidentes e, em verde, estão as retas normais às superfícies de contato, além do foco em **F** e distância focal **f** (LONGHI; COLVERO, 2018; GONÇALVES; ARAUJO; RODRIGUES, 2019).

Figura 7 – Lente biconvexa.



Fonte: Adaptado de (GONÇALVES; ARAUJO; RODRIGUES, 2019)

Em aplicações VLC, deve-se fazer o estudo da melhor lente a ser utilizada. Essa escolha precisa ser baseada na arquitetura do sistema e em requisitos de projeto, além de considerar as limitações existentes (por exemplo se o uso será *indoor* ou *outdoor*). Esta lente deve gerar o melhor ponto de trabalho no fotodetector escolhido, para que se tenha uma melhor qualidade no sinal recebido e então se possa recuperar a informação com maior eficácia e confiabilidade (SUSHANTH; CHOCKALINGAM, 2018)

2.3 Filtros

2.3.1 Filtros Analógicos

Filtros, mais precisamente analógicos, no contexto deste trabalho, são subsistemas físicos que trabalham com tempo contínuo realizando relações de entrada e saída em diversos tipos de sistemas em aplicações de engenharia elétrica (telecomunicações, eletrônica, instrumentação, etc). Comumente estas relações de entrada e saída são representadas por uma função de transferência caracterizada por uma faixa de passagem e uma de rejeição; mas existem ressalvas como por exemplo o filtro "passa-tudo", o qual trabalha em modificações na fase de um sinal (CARVALHO, 2009; SU, 2012).

Um filtro analógico faz uso de elementos lineares no tempo e trabalha sobre sinais analógicos. Esses sinais variam continuamente no tempo e podem assumir qualquer valor em um intervalo finito de intensidade, ou seja, não são digitalizados em sua amplitude em função do tempo. Os filtros mais conhecidos e utilizados nas mais diversas aplicações são: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. Os primeiros avanços significativos em filtros começaram no século XX principalmente em aplicações de telefonia por meio de métodos empíricos (CARVALHO, 2009; SU, 2012).

Existem diferentes métodos e técnicas de implementação desses filtros, porém em todos os casos, sua característica principal irá acompanhar sua denominação. Um filtro passa-baixas, atenua as frequências mais altas e "deixa passar" as frequências mais baixas; um filtro passa-altas atenua as frequências mais baixas e "deixa passar" as frequências mais altas; um filtro passa-faixa "deixa passar" um intervalo, ou faixa, de frequências e atenua os extremos superiores e inferiores do intervalo de passagem; por fim, um filtro rejeita-faixa atenua um intervalo, ou faixa, de frequências e "deixa passar" os extremos superiores e inferiores do intervalo de rejeição (CARVALHO, 2009).

A teoria de filtros é extensa e não poderia ser detalhada no escopo deste trabalho, porém vale ressaltar que o desenvolvimento de filtros analógicos, em resumo, pode ser feito por técnicas de filtros passivos e ativos. O primeiro, utiliza-se somente de elementos passivos de circuitos elétricos como resistores, indutores e capacitores de maneira a gerar-se uma função de transferência que atenda aos requisitos de projeto definidos. Por outro lado, filtros ativos fazem uso de elementos capazes de fornecer energia ao circuito (ativos), como por exemplo os amplificadores operacionais (SU, 2012).

2.3.2 Filtros Digitais

A teoria de filtros se estende para o mundo digital, utilizando-se de técnicas de processamento de sinais. Os chamados filtros digitais alcançam desempenhos melhores que os filtros analógicos, com uma perda no quesito de custo, uma vez que filtros analógicos geralmente são mais baratos que filtros digitais. Em suma, um filtro digital é um sistema que terá como entrada um sinal de tempo discreto e uma saída também discreta no tempo realizando alguma operação de filtragem de sinal análoga às descritas para filtros analógicos (ANTONIOU, 2018).

Existem duas principais classificações para filtros digitais, sendo elas:

1. Filtros de resposta a impulso finita (FIR);
2. Filtros de resposta a impulso infinita (IIR).

Os filtros do tipo FIR trabalham com convolução da resposta a impulso com o sinal de entrada, qualquer filtro linear possível pode ser implementado por esta metodologia. Os filtros do tipo IIR trabalham de forma recursiva, são mais rápidos que filtros FIR, porém podem se tornar instáveis (YNOGUTI, 2009).

As aplicações de filtros digitais vão desde sistemas de comunicação até o processamento de sinais biológicos. Para tal, comumente estes filtros são desenvolvidos com o auxílio de sistemas embarcados (ANTONIOU, 2018).

No protótipo desenvolvido, para separação entre o sinal desejado e o ruído resultante das lâmpadas de LEDs externas ao transmissor VLC, utilizou-se de um filtro digital biquad (filtro linear recursivo de segunda ordem, com dois pólos e dois zeros) baseado em um microcontrolador ARM embarcado em uma placa de desenvolvimento MCUDev Black STM32F407ZGT6.

2.4 Padrões e Protocolos

2.4.1 Padrão IEEE 754

O padrão IEEE 754, cuja primeira versão foi criada em 1985, é um padrão técnico que determina maneiras para representação de pontos flutuantes com o intuito de corrigir alguns erros encontrados em outras formas de representação de pontos flutuantes da época. Neste padrão são utilizados 32 bits para representação de um número real de precisão simples (*float*). Esse caso é exemplificado na Figura 8, na qual o pacote é dividido em 3 partes: um bit de sinal, 8 bits de expoente e 23 bits de mantissa. O bit de sinal indica qual o sinal, negativo ou positivo, do número. Os 8 bits de expoentes possuem um *bias* que é somado ao valor real do expoente do número em notação científica em base 2. Finalmente, a mantissa guarda o valor que multiplica 2 elevado ao valor guardado no expoente levando em consideração o *bias* (MARKSTEIN, 2008).

Figura 8 – Padrão IEEE-754.

Fonte: Produção do próprio autor.

No exemplo dado, tem-se a representação do valor decimal 7.5, que em binário, seguindo o padrão IEEE 754, torna-se 01000000111100000000000000000000. Portanto, diz-se que $7.5_{10} = 01000000111100000000000000000000_2$.

2.4.2 Protocolo HL7

O protocolo HL7 é um protocolo amplamente utilizado em comunicações envolvendo dados clínicos. HL7 é um acrônimo para *Health Level Seven* e tem como objetivo a padronização de mensagens em aparelhos hospitalares contendo informações sobre um determinado paciente e sua saúde, dentre outras utilidades em engenharia clínica (HEALTH; SERVICES et al., 2003).

O uso de HL7 no projeto se dá pela flexibilidade e compatibilidade que este proporciona ao

protótipo desenvolvido quando se pensa em aplicações médicas. Este protocolo surgiu para criar padrões, diretrizes e metodologias flexíveis e com uma boa relação custo-benefício para permitir a interoperabilidade do sistema de informação e compartilhamento de dados de saúde (HEALTH; SERVICES et al., 2003).

Sua estrutura foge do escopo deste trabalho, porém será utilizado na aplicação prática do sistema VLC desenvolvido apresentada nos experimentos realizados em laboratório para validação da tecnologia. Contudo, pode-se resumir a missão do HL7 como sendo o fornecimento de uma estrutura abrangente e padrões relacionados para a troca, integração, compartilhamento e recuperação de informações eletrônicas de saúde que apoiem a prática clínica e a gestão, prestação e avaliação de serviços de saúde (HEALTH; SERVICES et al., 2003).

2.4.3 Protocolo UART

O protocolo de comunicação UART, do inglês *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, apresenta-se como a principal solução para comunicação serial entre sistemas computacionais. O controlador UART recebe bytes de dados e os transmite como bits individuais de forma sequencial (serial). No destino, um segundo chip controlador UART remonta os bits em bytes e assim é possível recuperar a mensagem transmitida (DURDA, 1996).

Como o nome sugere, a comunicação usada pela UART é assíncrona. Por essa razão, se faz necessária uma sincronização entre o transmissor e receptor. No geral, um bit de *start* é utilizado antes da mensagem desejada e ao término da mensagem um bit de *stop* informa o fim do envio. Comumente se faz uso de um bit de paridade para confirmação da integridade da mensagem recebida. Nesse tipo de comunicação, informações como velocidade de transmissão devem ser configurados igualmente no transmissor e no receptor para que se possa recuperar os dados sem maiores problemas (DURDA, 1996).

A comunicação UART é base para padrões como o RS-232 e o RS-422, não sendo diferente para as portas seriais dos computadores da atualidade e, portanto, base para comunicação serial utilizada neste trabalho.

2.5 Sistemas Embarcados

Os sistemas embarcados atuais estão em constante evolução e são caracterizados pela presença de, no mínimo, um microprocessador ou microcontrolador responsável por executar funções específicas para as quais foi programado. Para entender-se tais sistemas, faz-se necessária uma introdução de terminologias importantes no que tange essa área. Começando-se por circuitos integrados, até os chamados microcontroladores, a próxima parte desta seção se dedicará a introduzir tais conceitos baseados no livro *Introduction to microprocessors and microcontrollers* de John Crisp.

Um circuito integrado, também conhecido como "chip", é descrito por Crisp (2003) como um circuito eletrônico feito de um bloco sólido de material semicondutor que torna possível a construção de circuitos complexos e com pequeno volume. O autor ainda define um microprocessador como um circuito integrado base para criação de sistemas como de portão automático, além de projeto de microcomputadores e microcontroladores (CRISP, 2003).

Um microcomputador é um sistema composto por pelo menos um microprocessador com circuitos externos adicionais para memória e operações matemáticas. Já um microcontrolador é um sistema baseado em microprocessador de chip único capaz de realizar tarefas de cálculo e lógica, como um microcomputador, porém com um único circuito integrado pois os periféricos necessários para o mesmo estão embutidos em um único encapsulamento. Comumente, tais periféricos são memórias EEPROM, Flash, SRAM, comparadores, etc (CRISP, 2003).

2.5.1 Acesso Direto à Memória

Em sistemas embarcados com requisitos de tempo real, a velocidade e o momento adequado para execução de uma tarefa são primordiais. No caso do projeto desenvolvido não é diferente. Há requisitos a serem atendidos por parte do microcomputador utilizado no lado da transmissão, fazendo-se necessário o uso de uma técnica de acesso direto à memória (DMA, do inglês *Direct Memory Access*).

O DMA torna possível a implementação de métodos de transmissão mais precisos, uma vez que esta permite a escrita em uma GPIO através de acesso direto sem passar pela supervisão do processador. A transferência de dados através do DMA torna a leitura e gravação de informação uma tarefa mais rápida e evita sobrecarga do processador, além

de reduzir o ciclo de *clock* necessário para tais serviços (FRANCO, 2016).

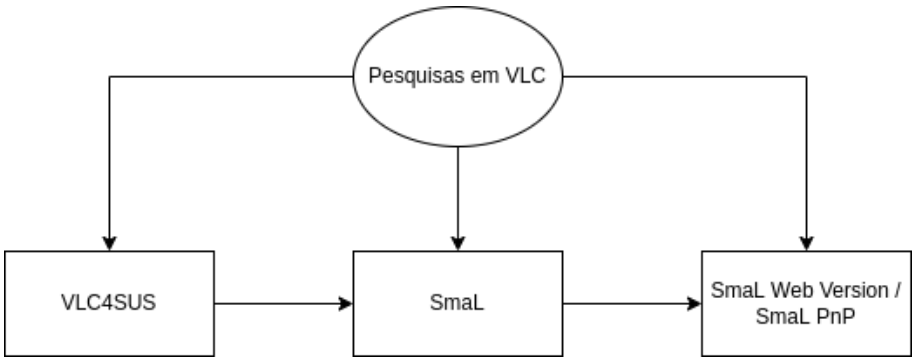
No lado do transmissor utilizado no desenvolvimento deste projeto, havia uma problemática em torno do acesso às GPIOs da *Raspberry Pi* utilizada. A situação indesejada se encontrava na interrupção, mesmo que por poucos milissegundos, do controle de nível em do pino de saída do microcomputador por parte do próprio sistema operacional e outros processos mais prioritários. Isso resultava em perdas de pacotes e inconfiabilidade de dados. Para resolver o problema, inicialmente fez-se a mudança do nível de prioridade do *software* de transmissão, porém processos de mesmo nível ainda recebiam prioridade em alguns momentos, uma vez que somente 4 núcleos estão disponíveis no processador utilizado. Por fim, o uso de DMA tornou possível uma redução significativa dos erros encontrados na transmissão de informação através do ar livre.

3 HISTÓRICO DO PROJETO

O LabTel vem desenvolvendo pesquisas em comunicações ópticas sem fio há alguns anos, sendo um dos principais projetos o "Aplicação da Tecnologia de Comunicação por Luz Visível em Monitorização de Recém Nascidos de Alto Risco" o qual teve por objetivo a aplicação da tecnologia VLC em ambientes hospitalares. Tais pesquisas contribuíram para o meio científico no que tange o VLC utilizando técnicas de modulação CE-OFDM (ZWAAG et al., 2018) e OOK (ZWAAG et al., 2022), além de estudos acerca do efeito *flicker* (ZWAAG et al., 2019) e integração das tecnologias VLC-PLC (LAZARO et al., 2022).

A Figura 9 mostra o fluxograma das aplicações desenvolvidas até obter-se o protótipo apresentado ao longo deste trabalho e melhor discutido nos capítulos 4, 5 e 6. Vale destacar que as pesquisas envolvendo VLC no LabTel geraram publicações científicas, dissertações de mestrado, projetos de graduação e relatórios de iniciação científica, sendo uma área que merece constante investimento e atenção pois tem potencial para ser uma parte importante do futuro das tecnologias de comunicações sem fio.

Figura 9 – Fluxograma de aplicações desenvolvidas.



Fonte: Produção do próprio autor.

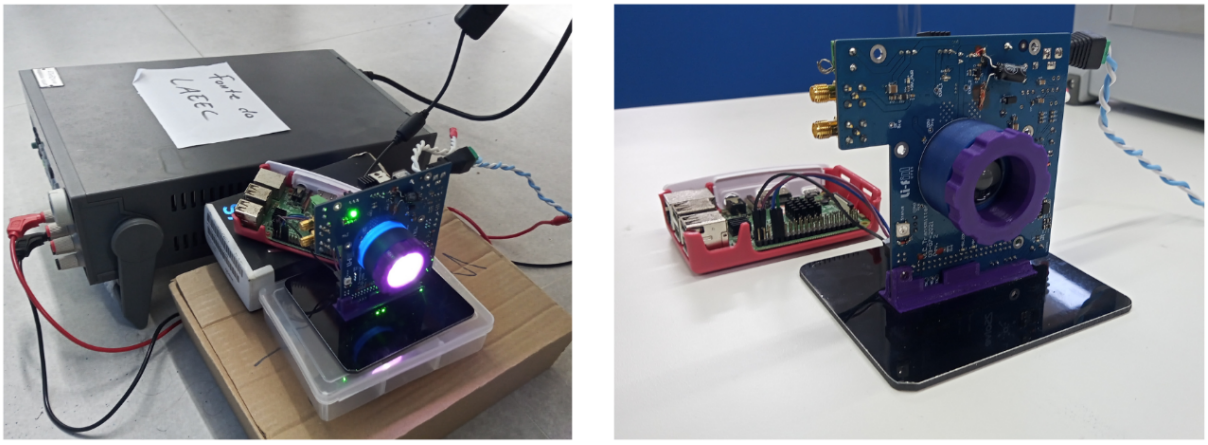
Tomando como referência o ano de 2019, com o desenvolvimento de uma aplicação mobile simples para validação da possibilidade de recepção de dados via luz visível em um celular de sistema operacional Android contendo um sensor de luminosidade próprio, doravante denominada **VLC4SUS**, o qual trabalhou com baixas frequências (em torno de 5 à 10 Hz). Em seguida, no ano de 2020, iniciou-se o desenvolvimento, ainda para *smartphones* Android, de uma segunda versão do aplicativo, chamado **SmaL**, para o qual foi desenvolvido um dispositivo *Plug and Play* (PnP) de baixo custo, que deveria ser conectado ao aparelho via cabo OTG e comunicação serial para que este pudesse trabalhar adequadamente com

maiores taxas de amostragem e assim possibilitar um sistema com redução significativa de *flicker* e maiores pacotes de dados em menos tempo de transmissão, uma vez que aqui as frequências de operação estão acima dos 200 Hz. Por fim, o projeto evoluiu para o que se tem como fruto deste e outros trabalhos desenvolvidos pelo laboratório com uma equipe multidisciplinar, neste ponto denominou-se os dois principais subsistemas do lado da recepção em homenagem à solução desenvolvida na segunda abordagem de VLC em celulares desenvolvida, ou seja, o aplicativo **SmaL** é o principal precedente à aplicação ***SmaL Web Version*** e o *dongle* **SmaL PnP**. Atualmente a frequência de operação utilizada é de 2 kHz, podendo ser incrementada a partir da adequações à nível de *software* e/ou *hardware*. Os detalhes e funcionamento do *setup* desenvolvido podem ser verificados em video *online* no canal no Youtube do LabTel.

4 O TRANSMISSOR

O transmissor utilizado é baseado em um microcomputador *Raspberry Pi* (RPi) e foi desenvolvido no LabTel em parceria com a empresa 2Solve Engenharia e Tecnologia. A Figura 10 mostra fotos do mesmo.

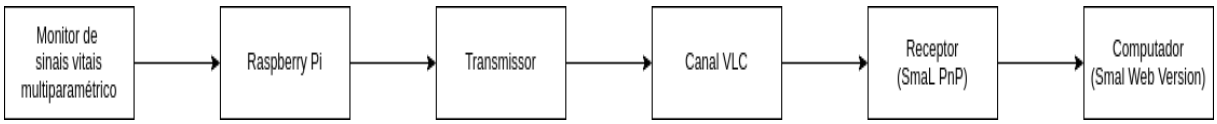
Figura 10 – Transmissor desenvolvido.



Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxo da informação, ilustrado na Figura 11, começa com a coleta de dados e empacotamento das mesmas através do monitor multiparamétrico, em conjunto com o transmissor, e termina na exibição dos dados no computador através da aplicação *web*.

Figura 11 – Fluxo da informação no *setup*.



Fonte: Produção do próprio autor.

No que tange o lado do transmissor, a RPi faz a leitura de dados via Ethernet a partir de pacotes de acordo com o protocolo HL7, gerados pelo monitor multiparamétrico, e então gera sinais elétricos em modulação OOK (sinal modulante) conforme protocolo próprio e codificação Manchester, como mostra a Figura 12. Como ilustrado, os pacotes possuem uma sequência de início com 8 bits, todos eles sendo bit 1, seguida de 6 sub-pacotes de 32 bits, cada um contendo informação de um valor decimal (float) de 32 bits segundo o padrão IEEE 754 e, por fim, um bit de paridade que assume valor 1 para uma sequência par de bits 1 no pacote e valor 0 se a sequência for ímpar.

Figura 12 – Protocolo desenvolvido.

Início 8 bits	FLOAT 1 32 bits	FLOAT 2 32 bits	FLOAT 3 32 bits	FLOAT 4 32 bits	FLOAT 5 32 bits	FLOAT 6 32 bits	Paridade 1 bit

Fonte: Produção do próprio autor.

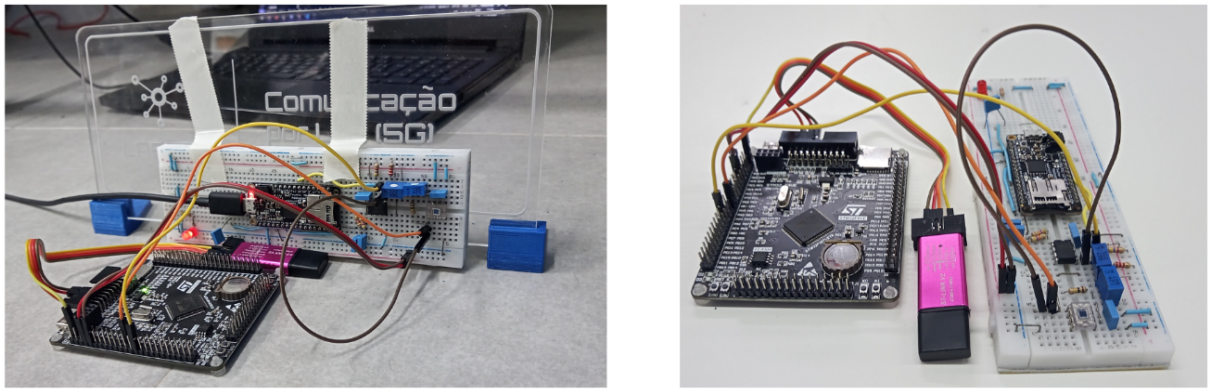
Os pacotes gerados internamente na RPi, contendo as informações fornecidas via HL7, são utilizados para gerar o sinal modulante que passará para a placa principal do transmissor. O controle do pino de saída da RPi (GPIO) é feito através da técnica de DMA para evitar-se uma sobrecarga do processador e também garantir um bom desempenho do sistema em tempo real. Em seguida, a eletrônica do transmissor faz o deslocamento do sinal de saída da RPi por meio da adição de um nível DC ao mesmo e então o sinal deslocado é utilizado na modulação da luz para que o LED do transmissor possa enviar informação através do ar livre até o receptor desenvolvido.

5 O RECEPTOR

5.1 Descrição da Eletrônica

O receptor desenvolvido, de maneira simplificada, tem como principais componentes: dois microcontroladores (um para filtro digital e um para reconstrução de pacotes), um sensor de luz ambiente (encapsulamento contendo outros componentes para diferentes configurações), um amplificar operacional e um resistor. A Figura 13 mostra fotos do mesmo.

Figura 13 – Protótipo de Receptor Desenvolvido.

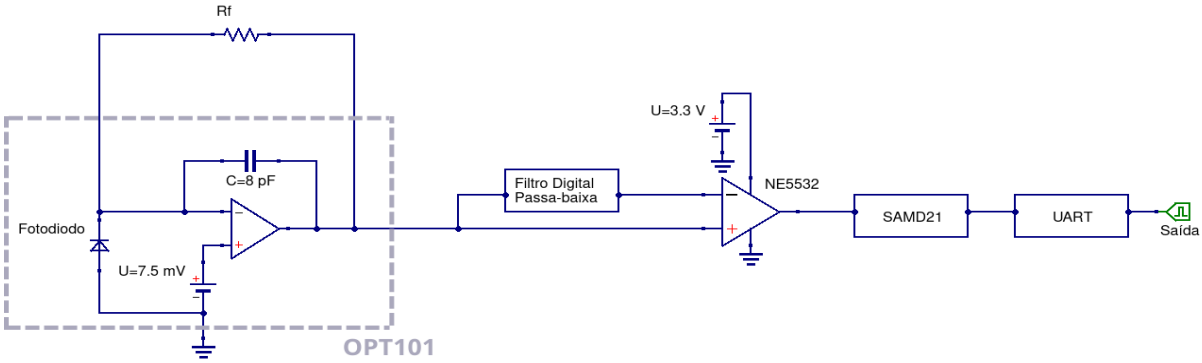


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 14 apresenta o esquemático do circuito eletrônico de recepção que compõe o *dongle* **SmaL PnP**. Inicialmente, pode-se observar um circuito de fotodiodo com amplificador de transimpedância representando o circuito interno do fotossensor OPT101, utilizado na interface entre o domínio óptico e elétrico no circuito de recepção VLC; nesse primeiro estágio do circuito, deve-se ter atenção ao resistor R_f, o qual trata da realimentação externa do amplificador, sendo assim possível ajustar o ganho que o mesmo terá, de maneira diretamente proporcional ao valor de R_f. No segundo estágio do circuito é dado pelo filtro digital desenvolvido, o qual tem como entrada o sinal de saída do OPT101 e gera uma saída com frequências inferiores à 120 Hz (frequência das lâmpadas de LED externas ao transmissor). No terceiro estágio, tem-se um circuito comparador que possui como entrada de referência (entrada inversora) a saída do filtro passa-baixa e realiza a comparação entre esse sinal e a saída do OPT101; tendo como resultado a reconstrução de sinal semelhante ao observado na saída da RPi do transmissor, contendo somente nível alto e baixo segundo a codificação Manchester. O quarto estágio do **SmaL PnP** é dado por um microcontrolador SAMD21, que faz a digitalização da saída do comparador e

trata a mesma construindo pacotes de dados segundo o protocolo próprio apresentado no capítulo 4, além de verificar o bit de paridade para validar se a informação recebida tem um grau de confiabilidade satisfatório segundo a métrica adotada. Por fim, o SAMD21 faz uso de um controlador UART para envio dos bits de maneira sequêncial para que um computador possa ler essa saída e aplicá-la sobre a aplicação ***SmaL Web Version*** para reconstrução da mensagem enviada.

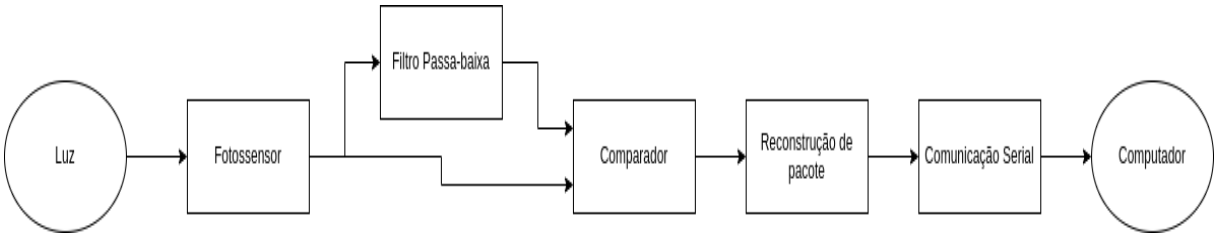
Figura 14 – Esquemático do Circuito de Recepção.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 15 ilustra o circuito de recepção por meio de um diagrama de blocos para ter-se uma visualização mais rápida dos processos envolvidos na recepção dos dados desde a captação de luz na interface do fotodiodo até o envio de bytes via serial para um computador.

Figura 15 – Diagrama de blocos do Circuito de Recepção.



Fonte: Produção do próprio autor.

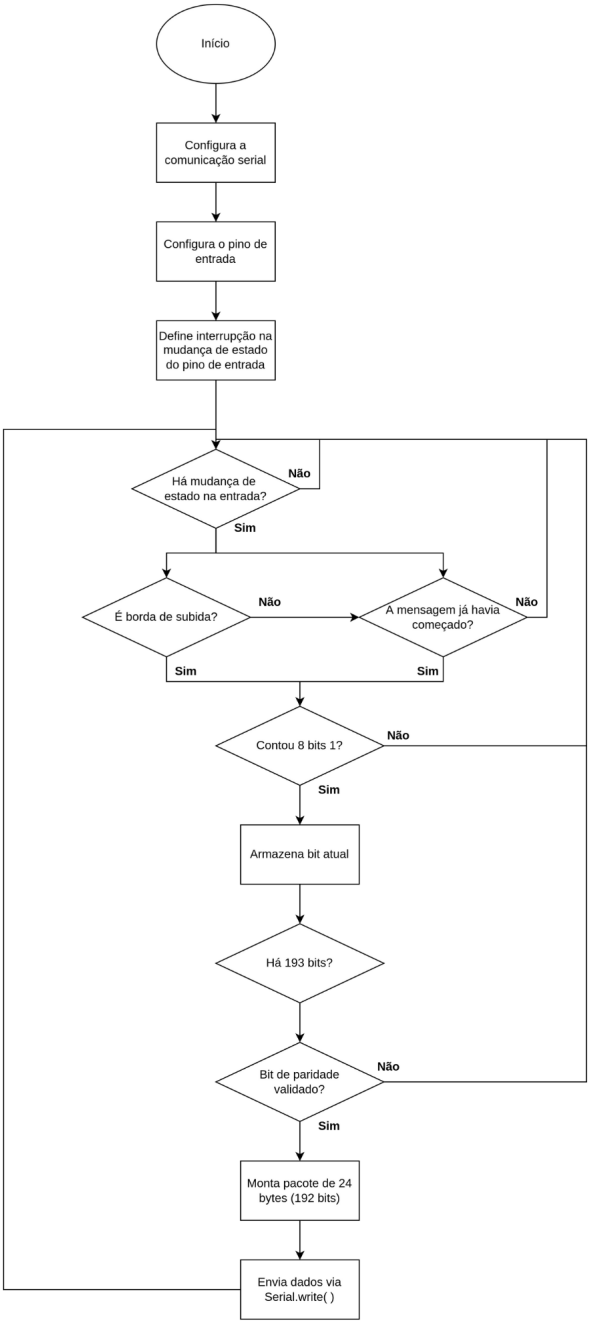
5.2 Arquitetura de Software

5.2.1 Sistema Embarcado

Fez-se a programação do microcontrolador SAMD21 de maneira a atuar como um decodificador de mensagens codificadas em Manchester, além de realizar a reconstrução dos

pacotes de dados em estruturas de 24 bytes para então efetuar o transmissão do mesmo via porta serial. Na Figura 16 ilustra-se seu funcionamento por meio de um fluxograma. Neste ponto é importante saber que para utilização de tal microcontrolador em sistemas operacionais da Microsoft se faz necessário a instalação de alguns *drivers*[1], os quais podem ser encontrados no Github da *Adafruit Industries*[2].

Figura 16 – Fluxograma do *software* embarcado em SAMD21.



Fonte: Produção do próprio autor.

[1] Disponível em: <https://github.com/adafruit/Adafruit_Windows_Drivers/releases/tag/2.5.0.0>.
[2] Disponível em: <https://github.com/adafruit>.

Em suma, o código embarcado no microcontrolador é iniciado a partir da configuração da comunicação serial, informando-se a taxa de transmissão do mesmo, bem como a configuração do modo do pino de entrada e, em seguida, defini-se a função que será executada por interrupção de mudança de estado neste pino. Quando acionada, a interrupção executa a verificação em torno do início ou continuidade de uma mensagem de acordo com o protocolo próprio do sistema e, caso a mensagem já tenha sido iniciada, armazena os bits da mesma. No momento em que se 193 bits, verifica-se a paridade dos dados armazenados, sendo o último bit responsável pela paridade do pacote. Caso o teste de paridade valide a integridade da informação, um pacote de 24 bytes será enviado via comunicação serial para ser recebido em um computador e interpretado no sistema *web*.

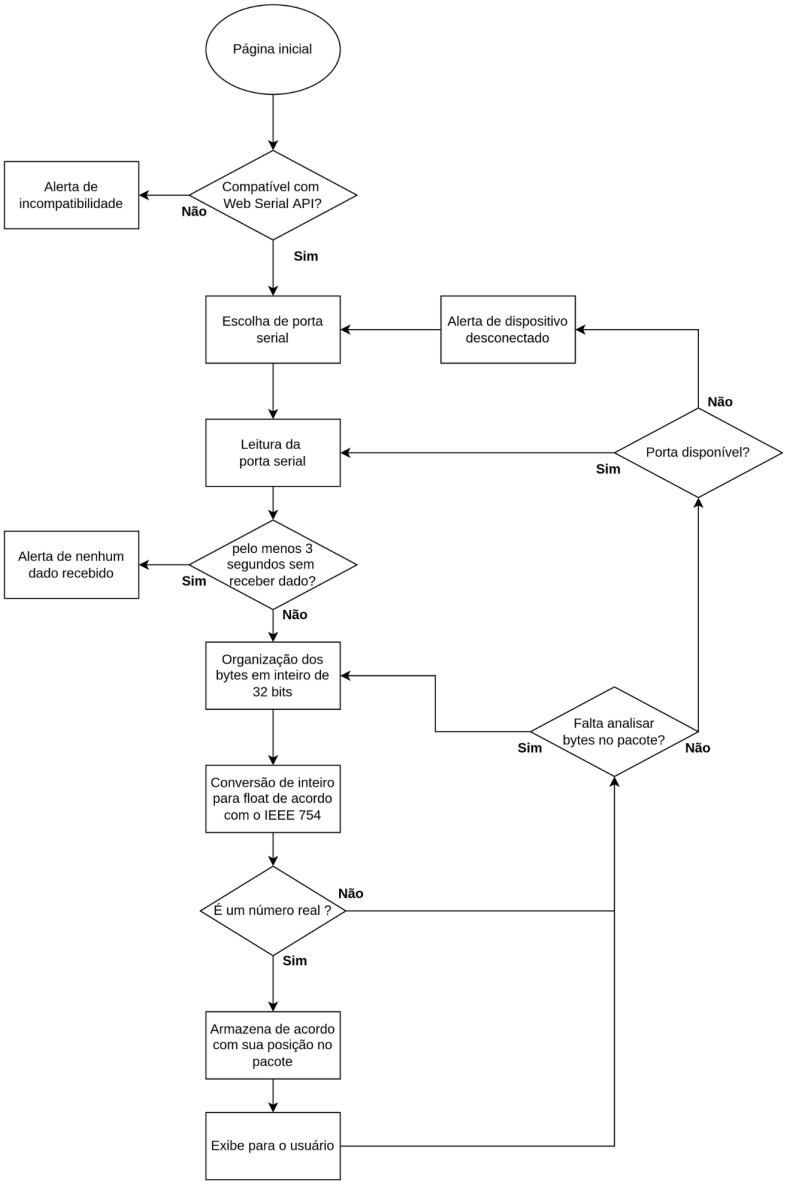
5.2.2 Sistema *Web*

Utilizou-se de técnicas e ferramentas de desenvolvimento *front-end* para a criação de uma aplicação *web* responsiva capaz de acessar as portas USB do computador na qual está sendo executada a recepção dos pacotes de dados fornecidos pelo sistema embarcado apresentado anteriormente. Para tal, utilizou-se uma *framework* de componentes utilitários para **Vue.js**[3] que é uma *framework* **Javascript**[4] baseada em arquitetura de componentes *single file*, chamada **Quasar**[5]. Esta última vem sendo bastante aplicada no desenvolvimento de *software* para computadores e celulares, devido as facilidades de compilação e portabilidade disponíveis para a mesma.

A Figura 17 apresenta um fluxograma representativo das funcionalidades desta aplicação, bem como algumas características da mesma. Para validação da aplicação em ambiente computacional, antes dos experimentos em laboratório, utilizou-se um Arduino UNO com intuito de simular o protótipo de dongle VLC. Este dispositivo de testes sempre envia pacotes de bytes contendo a mensagem "0.75" para fins de verificação da comunicação e avaliação das funções criadas na aplicação.

[3] Disponível em: <https://vuejs.org/>.
[4] Disponível em: <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/JavaScript>.
[5] Disponível em: <https://quasar.dev/>.

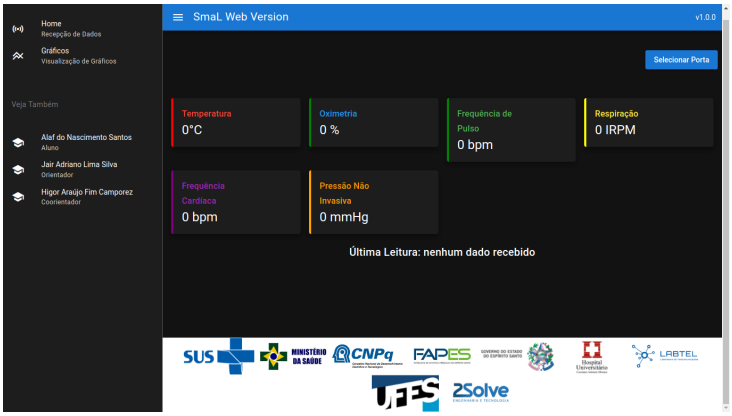
Figura 17 – Fluxograma da aplicação *web*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Começando-se pela página inicial da aplicação, tal como observada na Figura 18, nela pode-se observar um conjunto de *cards* que representam as variáveis a serem recebidas via porta serial; os quais são parâmetros pré-definidos para uma aplicação de VLC em hospitais, recebendo valores de parâmetros vitais fornecidos por um monitor multiparamétrico para o transmissor do capítulo 4. Ainda sobre a mesma figura, nela há um rodapé contendo os envolvidos no desenvolvimento das pesquisas em torno de VLC que deram suporte a produção deste trabalho.

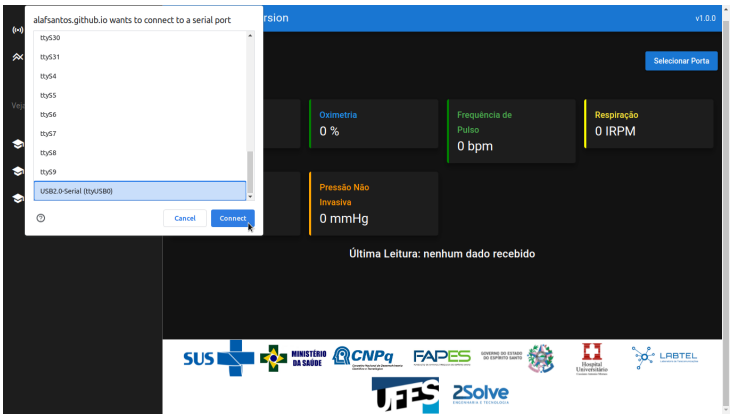
Figura 18 – Página inicial - *SmaL Web Version*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na tela inicial, existe um botão no canto superior direito para seleção de porta serial. A Figura 19 mostra sua ativação, bem como o *pop-up* que é exibido para que se escolha o **SmaL PnP**.

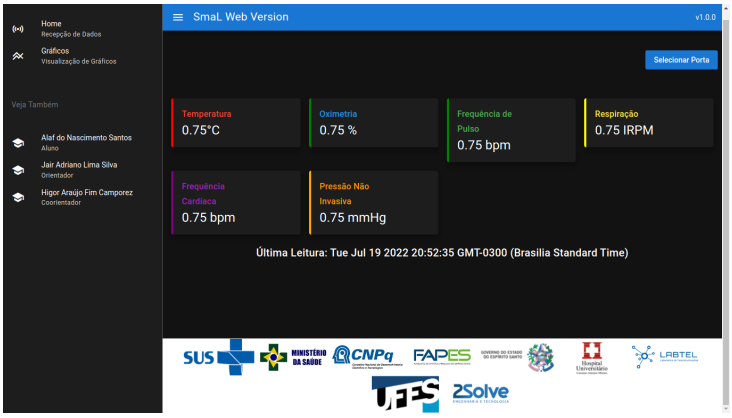
Figura 19 – Escolha de porta - *SmaL Web Version*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após definir-se a porta serial, se houver recepção de dados, o *status* da "Última Leitura" irá mudar para o último momento de mensagem recebido e as informações decodificadas serão exibidas na interface tal como observado na Figura 20.

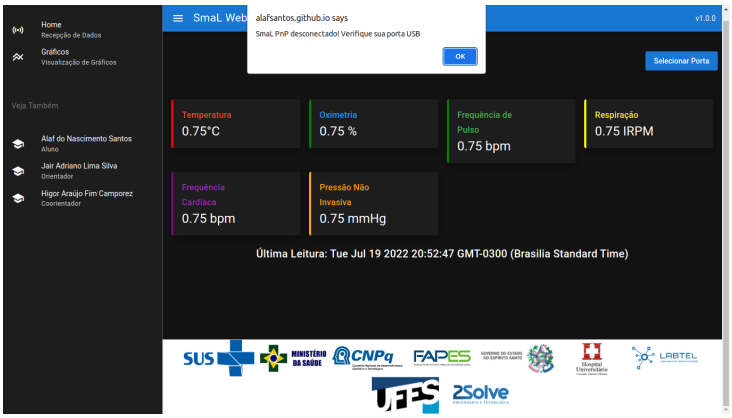
Figura 20 – Exibição de dados na interface - *SmaL Web Version.*



Fonte: Produção do próprio autor.

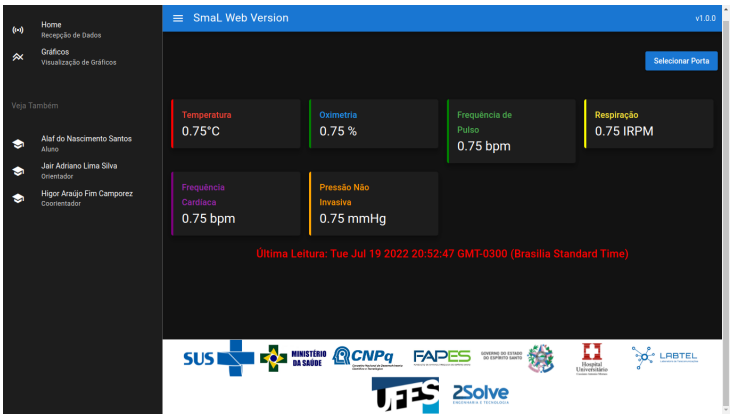
Caso o **SmaL PnP** seja desconectado do computador, uma mensagem será exibida informando que o dispositivo foi desconectado, tal como visto na Figura 21. Caso isso aconteça, ou o transmissor pare de enviar informações por no mínimo 3 segundos, a interface deverá se comportar como a Figura 22 mostra, ou seja, não serão recebidos dados novos e a mensagem de "Última Leitura" será mantida no tempo da última recepção de dado, porém sua cor mudará para vermelho, visando alertar o usuário.

Figura 21 – Mensagem de aviso de dispositivo desconectado - *SmaL Web Version.*



Fonte: Produção do próprio autor.

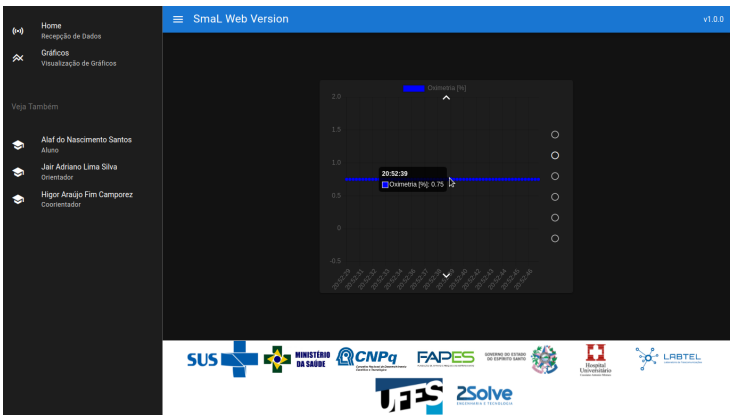
Figura 22 – Estilo de "Última Leitura" não atual - *SmaL Web Version*.



Fonte: Produção do próprio autor.

A aplicação ***SmaL Web Version*** também possibilita a visualização de gráficos de histórico de curto prazo para todas as variáveis disponíveis em sua tela inicial, por meio da página de gráficos presente em seu menu lateral. A Figura 23 exemplifica essa opção na aplicação.

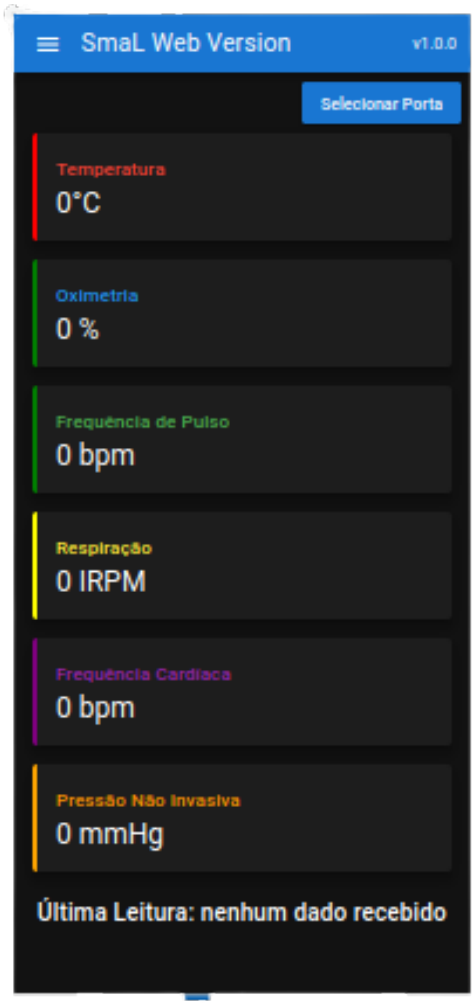
Figura 23 – Gráfico de oximetria - *SmaL Web Version*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os gráficos são exibidos em formato "carrossel vertical" e usam dados de armazenamento em *local storage*, assim todas as características e funções desenvolvidas são executadas completamente no navegador do usuário, em outras palavras, a aplicação está inteiramente no *client-side*. Por fim, no que tange a responsividade da aplicação, a Figura 24 ilustra a aplicação para uma tela de um aparelho iPhone 12 Pro.

Figura 24 – *App* em iPhone 12 Pro.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2.3 Comunicação Serial

O *software* embarcado no SAMD21 lida com a reconstrução dos pacotes de bits recebidos via luz e faz envio dos mesmos de maneira serial atuando como transmissor. Do outro lado, tem-se um computador executando a aplicação web desenvolvida para que se possa receber e interpretar os bytes recebidos via serial.

No que tange o sistema embarcado, a comunicação serial é feita de maneira a economizar banda por meio de envio unicamente dos bytes necessários para a recuperação dos valores desejados, em outras palavras, 24 bytes de dados, unicamente os necessários para recuperação de 6 *floats* segundo o padrão IEEE 754, são enviado por meio de métodos de escrita serial existentes na *framework* C++ do Arduino compatíveis com o microcontrolador utilizado.

Para leitura e interpretação dos dados enviados pelo sistema embarcado, a aplicação web deve ter acesso à esses bytes via interface serial do computador na qual está sendo executada. Essa comunicação no lado do receptor, para a dada configuração de comunicação serial, se dá por meio de *Web Serial API*[6] a qual é compatível com navegadores Chrome, Opera e Edge, tornando assim a recepção em diferentes plataformas possível desde que a máquina desejada possua pelo menos um desses *browsers* instalado.

[6] Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Web_Serial_API>

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Desenvolvimento do Filtro

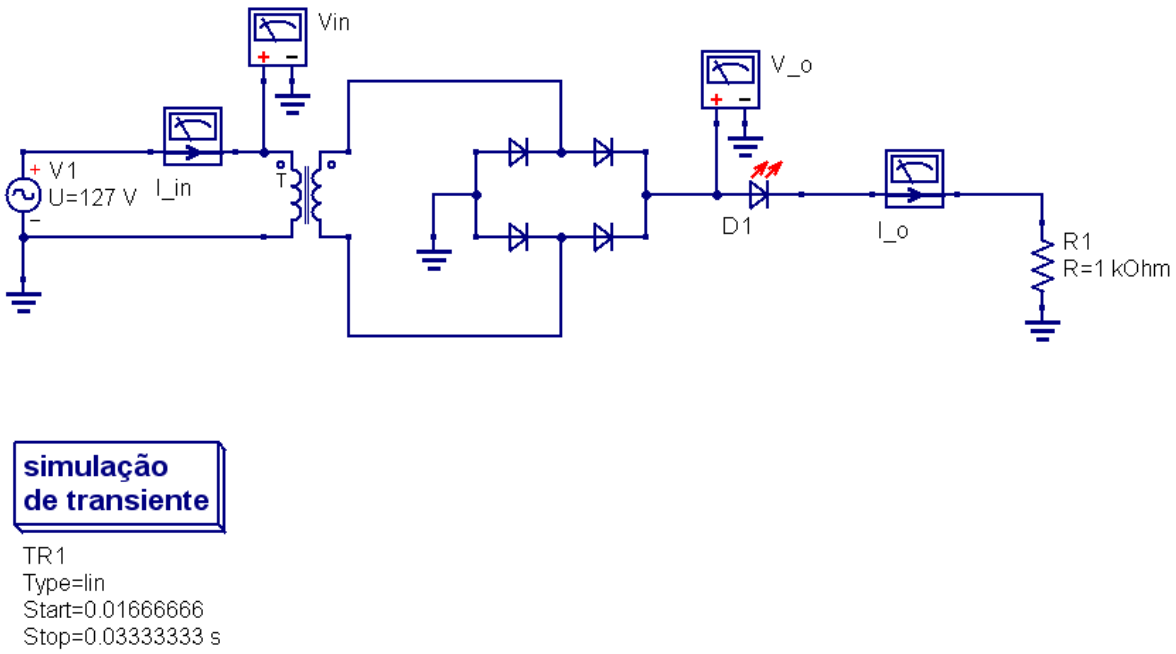
6.1.1 LEDs em Iluminação Convencional

Nos casos em que se possui lâmpadas de LED comuns operando em um ambiente de aplicação da tecnologia VLC, deve-se ter em mente que estas causarão interferência no desempenho do sistema de comunicação em questão. Para o presente trabalho, fez-se necessário o entendimento de como esses dispositivos poderiam impactar a transferência de informação.

Espera-se, em um primeiro momento, que a flutuação na luminosidade causada pela lâmpada de LED seja em torno da frequência da rede elétrica que a alimenta. Na prática deve-se considerar que, geralmente, estes dispositivos possuem pontes de diodos acopladas a si ou trabalham com alguma forma de retificação alternativa para um maior aproveitamento da potência consumida. Esses circuitos adicionais devem ser considerados no projeto, uma vez que interferem na forma de onda observada ao se analisar a variação da intensidade de luz no ambiente.

Buscando-se verificar como esses dispositivos podem se comportar em relação ao ambiente em que estão inseridos, simulou-se, utilizando-se o *software* **Qucs**, o circuito da Figura 25. Pode-se observar que se trata de uma abordagem simplificada de como uma lâmpada de LED convencional trabalha. No circuito utilizou-se uma tensão de alimentação da rede elétrica de 127 V e 60 Hz, passando por um transformador abaixador de tensão e em seguida uma ponte de diodos atuando como retificador de onda completa para então alimentar o LED.

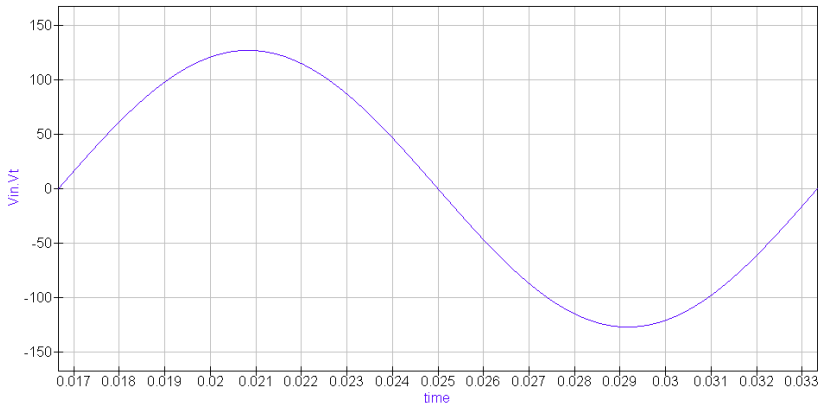
Figura 25 – Circuito de lâmpada de LED simplificado.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 26 mostra a tensão de entrada do circuito, a qual oscila em uma frequência de 60 Hz como definido.

Figura 26 – Tensão de entrada do circuito de lâmpada de LED simplificado.

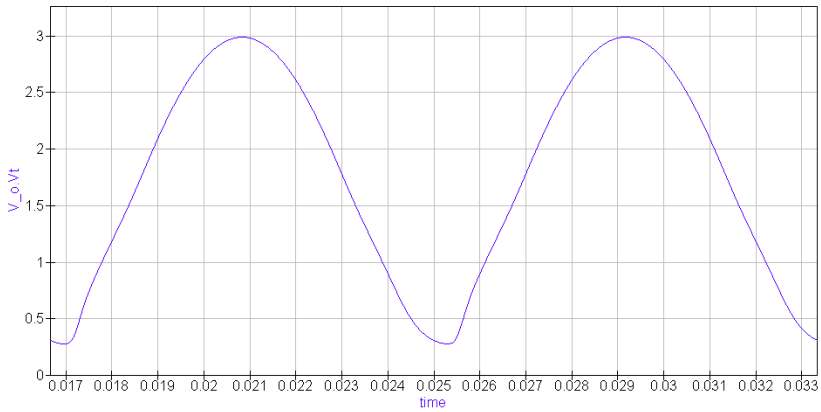


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 27 apresenta o sinal de tensão na saída do circuito, ou seja, sobre o LED. Pode-se verificar que há uma retificação de onda completa resultando em um período de sinal 2 vezes menor que o da tensão de entrada e, consequentemente, o dobro da frequência de

entrada é observado na saída.

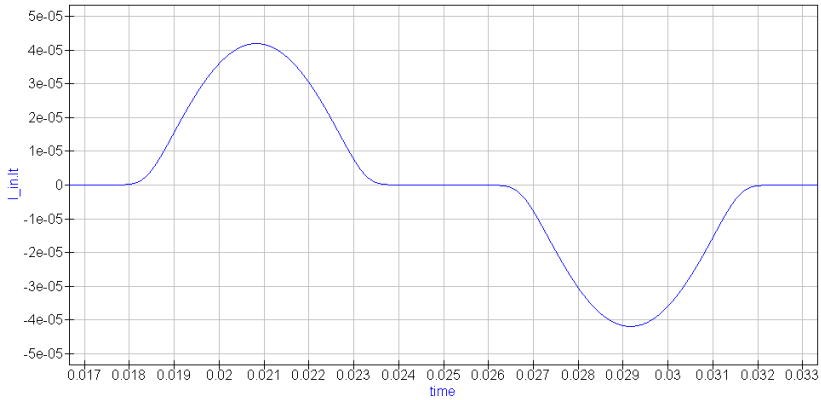
Figura 27 – Tensão de saída do circuito de lâmpada de LED simplificado.



Fonte: Produção do próprio autor.

As Figuras 28 e 29 mostram as correntes de entrada e saída, respectivamente, para a simulação realizada. As formas de onda observadas acompanham os sinais de tensões apresentados anteriormente, mantendo-se a conservação de energia no lado de alta e baixa do transformador utilizado (elevação de tensão, queda de corrente e vice-versa).

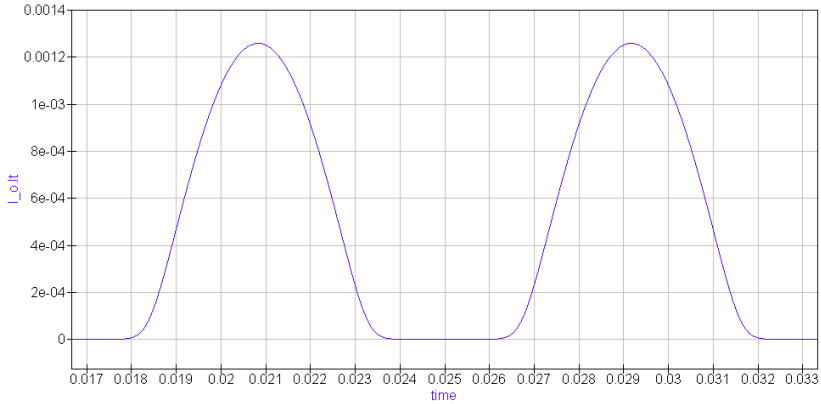
Figura 28 – Corrente de entrada do circuito de lâmpada de LED simplificado.



Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado anterior tem impacto direto na escolha do filtro passa-baixa responsável por filtrar as frequências indesejadas na recuperação dos pacotes de dados no lado do receptor. Para entender melhor o impacto das lâmpadas de LED sobre o circuito, utilizou-se o *software* MatLab para verificação do sinal no domínio da frequência. O código disponível no APÊNDICE A simula os sinais de entrada e saída do circuito da lâmpada de LED, além

Figura 29 – Corrente de saída do circuito de lâmpada de LED simplificado.

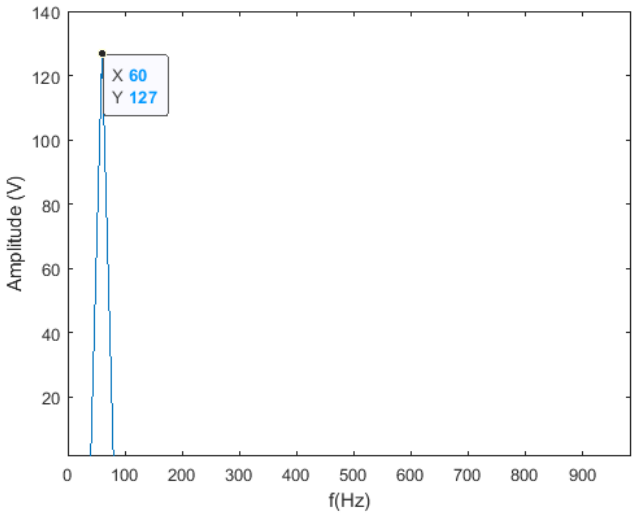


Fonte: Produção do próprio autor.

do sinal recuperado no receptor através do OPT101, para a detecção do ruído proveniente das lâmpadas externas ao sistema VLC.

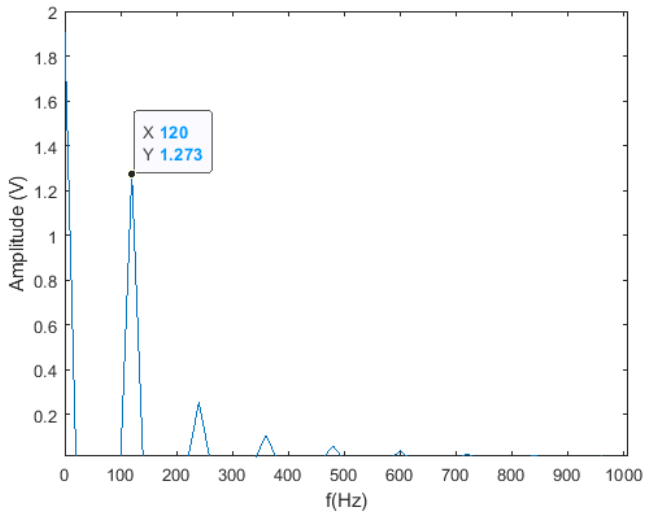
As Figuras 30 e 31 mostram, respectivamente, as transformadas de Fourier dos sinais de tensão de entrada do circuito e saída do circuito de lâmpada de LED discutido. Pode-se verificar que a entrada é uma função senoidal em 60 Hz, por causa da frequência da rede elétrica, enquanto a saída se comportará como o módulo deste seno, por causa da ponte de diodos utilizada na retificação do sinal.

Figura 30 – Transformada de Fourier da tensão de entrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

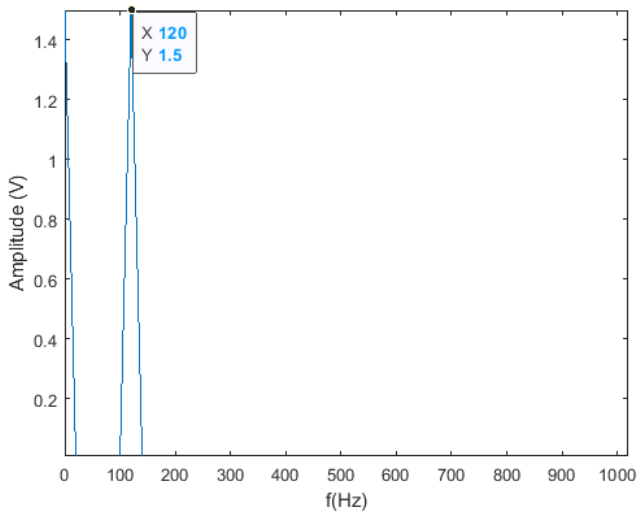
Figura 31 – Transformada de Fourier da tensão de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na aplicação proposta neste trabalho, do ponto de vista do receptor, o fotossensor terá como saída um sinal elétrico de 120 Hz devido à tensão sobre o LED transmissor e sua transformada de Fourier resultará na Figura 32. Pode-se observar que a maior frequência observada é em 120 Hz, sendo a parcela DC responsável pelo pico em 0 Hz, que também sofrerá ação do filtro passa-baixa utilizado. Do resultado obtido, verificou-se que a frequência de corte do filtro em 120 Hz é capaz de atender o sistema proposto.

Figura 32 – Transformada de Fourier da tensão de saída do OPT101.

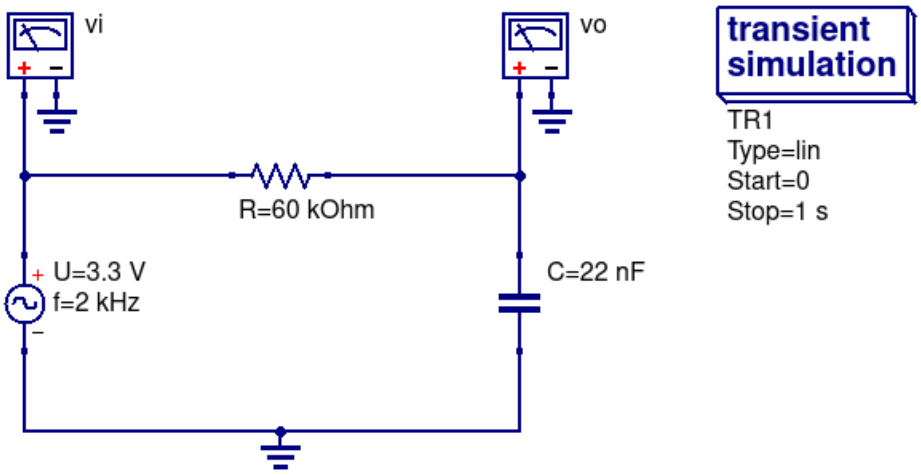


Fonte: Produção do próprio autor.

6.1.2 Filtro Analógico

Inicialmente, projetou-se um filtro passivo de primeira ordem utilizando-se da ferramenta de simulação Qucs[1]. Essa abordagem foi escolhida pela simplicidade e custo desse tipo de filtro, o circuito projetado é dado pela Figura 33 e o procedimento para sua definição é detalhado a seguir.

Figura 33 – Filtro passa-baixa passivo simulado.



Fonte: Produção do próprio autor.

Seja Z_c a impedância do capacitor utilizado para uma dada frequência, fazendo-se o divisor de tensão no circuito para encontrar-se o sinal de saída do mesmo, pode-se obter a equação 6.1.

$$v_o(t) = \frac{Z_C}{R + Z_C} \cdot v_i(t) \tag{6.1}$$

Da transformada de Laplace do circuito, pode-se obter a função de transferência do filtro passa-baixa, dada pela equação 6.2.

[1] Disponível em: <http://qucs.sourceforge.net/>

$$V_o(s) = \frac{Z_C(s)}{R + Z_C(s)} \cdot V_i(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \cdot V_i(s)$$

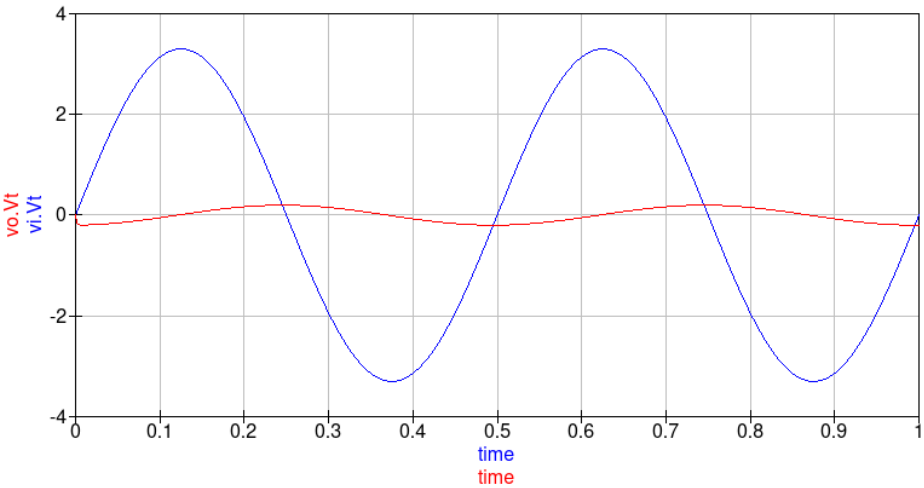
$$\implies H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{1 + sRC}$$

$$H(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} \tag{6.2}$$

De $H(s)$, pode-se obter a frequência de corte dada por $f_c = \dfrac{1}{2\pi RC}$ e fase introduzida pelo filtro sendo $\phi = -\arctan(2\pi f RC)$. A partir desses resultados, definiu-se valores comerciais de capacitores e resistores para o projeto de filtro com frequência de corte em torno de 120 Hz.

Escolhendo-se uma frequência $f = 2\ kHz$, uma capacitância de 22 nF e uma resistência $R = 60\ k\Omega$, encontra-se uma frequência de corte de 120,57 Hz e uma fase de $-86,55°$. O resultado da simulação para um sinal de entrada de 2 kHz é dado pela Figura 34, na qual a onda vermelha é a saída do circuito e a azul é a entrada. A comparação mostra que há uma atenuação significativa para as frequências superiores ao corte, como esperado.

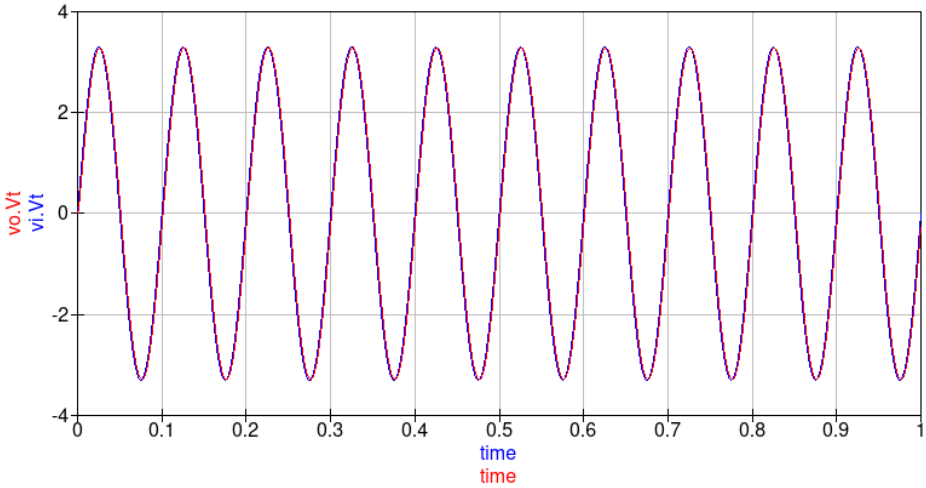
Figura 34 – Resultado da simulação para f = 2 kHz.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 35 mostra uma comparação entre o sinal de entrada e saída para uma frequência de 10 Hz (inferior a frequência de corte do filtro). Pode-se verificar que a atenuação e a fase entre os sinais deixa é desprezível para as baixas frequências, como esperado do projeto.

Figura 35 – Resultado da simulação para f = 10 Hz.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na prática, ao implementar-se o circuito para uso no receptor VLC, verificou-se que o desempenho do mesmo não é satisfatório para nossa aplicação. O principal motivo para isso se deu no fato de que para sequências alternadas de bits 1 e bits 0, em codificação Manchester, o período de sinal, no ponto de vista da onda gerada, será o dobro do esperado, fazendo com que a frequência caia pela metade e, nesse caso, uma vez que o filtro possui frequência de corte em 120 Hz e ordem 1, este irá impactar não só sobre o ruído, mas também no sinal que se deseja demodular, resultando em erros na saída do circuito comparador, uma vez que o ruído em 120 Hz é usado como referência para o mesmo.

6.1.3 Filtro Digital

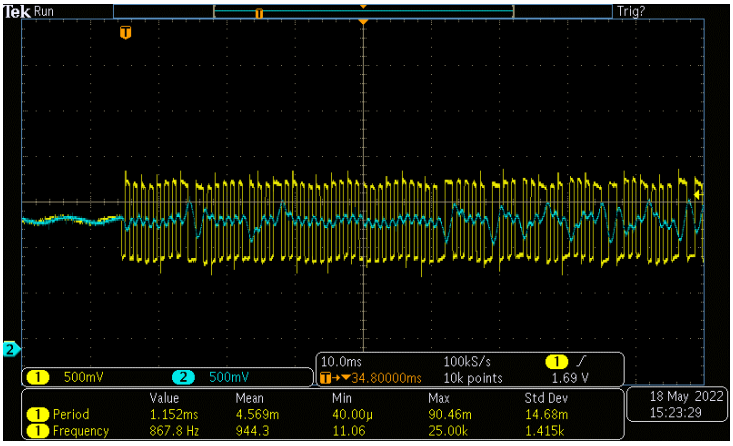
Para suprir a demanda por baixas taxas de erro, a solução encontrada se deu pelo uso de processamento digital do sinal de saída do OPT101. Para tal, utilizou-se um filtro digital de biquad de segunda ordem baseado em método recursivo em um microcontrolador STM32F405. O filtro foi desenvolvido em parceria com a Universidade de Ciências Aplicadas ***NHL Stenden***. A análise de sinais ao longo da eletrônica do receptor utilizando este filtro será feita em detalhes na seção 6.2.

6.2 Análise de Sinal ao Longo do Circuito

Para esta análise, a distância entre o transmissor e o receptor definida foi de 30 centímetros. O experimento foi realizado sobre uma mesa de trabalho e as lâmpadas externas ao *setup* estavam ligadas e gerando ruído em 120 Hz como apresentado no Capítulo 2.

Na Figura 36 a saída do filtro digital passa-baixa é mostrada no canal dois (em azul) e entrada do filtro, ou seja, a saída do fotossensor, é dada pelo canal um (em amarelo). O sinal filtrado, de baixas frequências, é utilizado como referência para o circuito comparador e, portanto, a saída do mesmo deve ser precisa para que erros sejam minimizados.

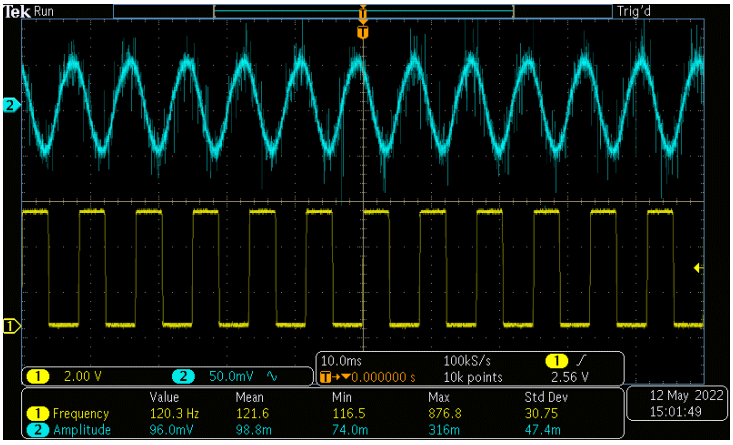
Figura 36 – Sinal do fotossensor e saída do filtro passa-baixa.



Fonte: Produção do próprio autor.

O filtro introduz um pequeno defasamento entre os sinais de entrada e saída e, para facilitar a visão desse defasamento no osciloscópio, utilizou-se o sinal senoidal de ruído gerado pelas lâmpadas de LED em 120 Hz. A Figura 37 mostra a medição do ruído recebido pelo fotossensor. O canal dois (em azul) é o ruído e o canal um (em amarelo) é a saída do comparador para esta situação. Pode-se notar que o defasamento entre os sinais de saída do OPT101 e do filtro digital gera uma onda quadrada de frequência 120 Hz na saída do comparador.

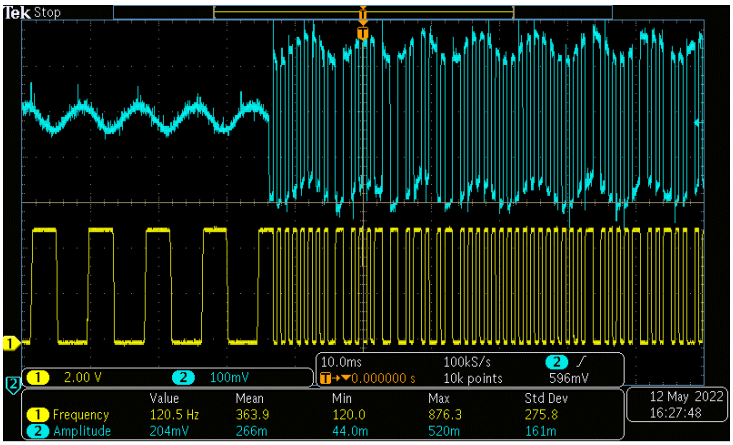
Figura 37 – Análise do efeito de ruído sobre o comparador.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 38 o transmissor está habilitado, para que não haja apenas ruído recebido através do fotossensor. O canal dois (em azul) é o sinal gerado pelo OPT101. Nota-se que o ruído em 120 Hz modula o sinal de interesse em 2 kHz, causando a oscilação do mesmo gerando uma envoltória em 120 Hz. Essa envoltória é removida ao utilizar-se o comparador, o qual possui somente dois nível de saída possíveis, alto e baixo, gerando assim um sinal semelhante ao gerado diretamente pela RPi no lado do transmissor.

Figura 38 – Saídas do fotossensor e do comparador.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda na Figura 38, evidenciado no lado esquerdo, pode-se verificar que o ruído em 120 Hz, junto à fase introduzida pelo filtro, gera uma onda quadrada na saída do comparador nos momentos em que não se tem uma mensagem sendo transmitida. Essa onda nos momentos em que o transmissor não está enviando dados não gera problema na recepção, pois um tratamento em *software* foi implementado, uma vez que tem-se um protocolo bem definido

para saber-se quando há uma mensagem em andamento, tal como descrito na Seção 5.2.1.

6.3 Experimentos Realizados no *Setup* VLC

Inicialmente buscou-se validar se o erro em conexão *back-to-back* seria nulo no sistema desenvolvido. Contudo, constatou-se que havia um erro de aproximadamente 2% em torno dos bits recebidos mesmo com uma conexão elétrica entre a *Raspberry Pi* do transmissor e o microcontrolador do receptor. O método de levantamento de erro se deu através do envio de pacotes de dados conhecidos e verificação dos mesmos após a recepção de 300000 bits. Para resolver este problema, analisou-se o sinal de saída da RPi, através de um osciloscópio MDO3012 da Tektronix, e pode-se verificar que existiam momentos em que a transmissão era interrompida mesmo que por poucos milissegundos. Com isso em mente, modificou-se a prioridade do programa de transmissão no sistema operacional da RPi para o maior nível possível, porém isso não foi suficiente, uma vez que uma série de serviços do sistema também possuem tal prioridade e o *hardware* tem uma limitação de 4 núcleos. A alternativa encontrada, e que resolveu o problema, foi no uso de DMA para controle do pino de saída do microcomputador. A partir daí, a conexão em *back-to-back* foi validada com erro nulo e pode-se partir para o uso de canal VLC.

A partir do momento em que se trabalhou com a comunicação óptica sem fio, como objetivo do projeto, o sistema desenvolvido mostrou-se eficaz para diferentes comprimentos do canal de comunicação. A Figura 39 apresenta o experimento realizado, no qual foi possível validar o sistema para distâncias entre 25 cm e 3 m, utilizando-se incidência normal sobre a interface do fotossensor e visada direta. O levantamento de erro para esta etapa será discutido na seção 6.4.

Figura 39 – *Setup* utilizado no experimento.

Fonte: Produção do próprio autor.

Em seguida, após os experimentos discutidos, dos quais obteve-se o erro na recepção de pacotes de dados conhecidos e a definição dos ganhos necessários na realimentação externa do OPT101, utilizou-se de um monitor multiparamétrico de sinais vitais conectado à RPi do transmissor VLC para fornecer dados dinâmicos para validação de uma aplicação prática do protótipo desenvolvido. A comunicação entre o monitor e a *Raspberry Pi* se deu por meio do protocolo HL7, como discutido anteriormente.

6.4 Análise de Erro x Distância

Os experimentos de levantamento de erro foram realizados com e sem luz externa, para verificar-se a atuação do filtro passa-baixas sobre as flutuações na luz em razão das lâmpadas de LED. Para cada ponto no qual se fez medição da taxa de erro, enviou-se um total de 300000 bits a partir do envio contínuo de pacotes de 193 bits conhecidos, cada um contendo 6 números decimais conforme o padrão IEEE 754 para pontos flutuantes de precisão simples e 1 bit de paridade de acordo com protocolo próprio. Utilizou-se visada direta entre o transmissor e o receptor com os equipamentos no chão do laboratório, além de incidência normal na interface do fotossensor OPT101. A região entre 250 cm e 280 cm mostraram maior estabilidade para incidência oblíqua sob a presença de ruído das luzes externas, porém para melhores resultados em todo espaço de trabalho, além da ausência de equipamento para medição de ângulo com precisão (por exemplo, um transferidor), optou-se pela incidência normal.

Um ponto importante para se destacar é que, considerando-se o protocolo desenvolvido, pode-se comprovar experimentalmente que o bit de paridade tem resultado satisfatório em todos os casos nos quais há um número impar de bits errados nos pacotes recebidos, caso contrário tem-se um erro na recepção. No mais, para os experimentos sem ruído das lâmpadas de LED, notou-se erro nulo no sistema para todas as distâncias exploradas, exceto nos pontos de saturação do OPT101 (ganho elevado ou canal VLC menor que 25 cm). Por fim, é importante deixar claro que o termo BER é evitado nesta seção pois as mensagens transmitidas eram estáticas e, portanto, não geradas aleatoriamente; utiliza-se o termo taxa de erro ou simplesmente erro.

Para levantamento da taxa de erro na recepção de dados do sistema desenvolvido, variou-se o ganho da realimentação do fotossensor OPT101, por meio da variação do R_f (resistor de *feedback*) externo do mesmo. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para cada ponto de medição para $R_f = 860\ k\Omega$. Para este primeiro experimento, procurou-se encontrar um ganho que garantisse um erro para uma distância de 300 cm em torno de 0% com atuação do ruído das luzes externas e, da tabela, pode-se verificar um erro máximo de $0,26\%$. Em seguida, diminui-se a distância entre o transmissor e o receptor até o ponto de saturação do fotossensor para o dado ganho, encontrando-se um desempenho insatisfatório para distâncias menores que 250 cm.

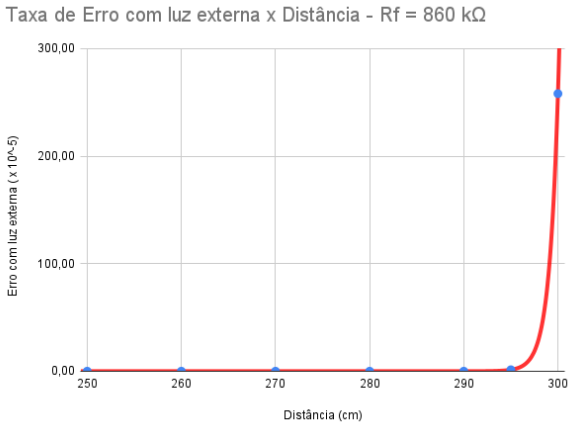
Tabela 1 – Levantamento de taxa de erro para $R_f = 860\ k\Omega$.

Distância (cm)	**Rf (kΩ)**	**Taxa de erro com luz externa (x10^{-5})**	**Taxa de erro sem luz externa (x10^{-5})**
300	860	258,09	0,00
295	860	1,33	0,00
290	860	0,00	0,00
280	860	0,00	0,00
270	860	0,00	0,00
260	860	0,00	0,00
250	860	0,00	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 40 ilustra o comportamento da taxa de erro em função da distância de acordo com os resultados obtidos na Tabela 1. Pode-se verificar um comportamento exponencial do erro nessa faixa de distâncias.

Figura 40 – Taxa de Erro x Distância para $R_f = 860\ k\Omega$.



Fonte: Produção do próprio autor.

No intuito de aumentar a faixa de distâncias para a qual o sistema pode trabalhar de maneira satisfatória, iniciou-se um novo experimento a partir da distância de 30 cm, onde foi definido $R_f = 157\ k\Omega$, e se verificou o comportamento do erro até a distância de 300 cm, obtendo-se os pontos da Tabela 2.

Tabela 2 – Levantamento de taxa de erro para $R_f = 157\ k\Omega$.

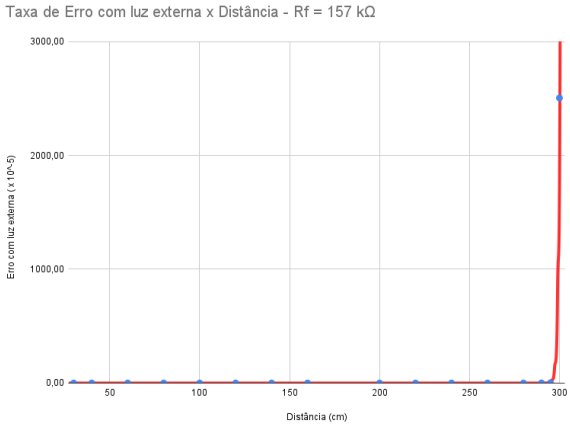
Distância (cm)	**Rf (kΩ)**	**Taxa de erro com luz externa (x10^{-5})**	**Taxa de erro sem luz externa (x10^{-5})**
300	157	2504,05	0,00
295	157	2,00	0,00
290	157	0,00	0,00
280	157	0,00	0,00
260	157	0,00	0,00
240	157	0,00	0,00
220	157	0,00	0,00
200	157	0,00	0,00
160	157	0,00	0,00
140	157	0,00	0,00
120	157	0,00	0,00
100	157	0,00	0,00
80	157	0,00	0,00
60	157	0,00	0,00
40	157	0,00	0,00
30	157	0,00	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 41 ilustra o comportamento da taxa de erro em função da distância de acordo com os resultados obtidos na Tabela 2. Novamente é possível verificar um comportamento exponencial do erro na dada faixa de distâncias.

Os experimentos foram realizados no chão do laboratório e para altura de bancada de

Figura 41 – Taxa de Erro x Distância para $R_f = 157\ k\Omega$.



Fonte: Produção do próprio autor.

trabalho o ganho ótimo seria outro, com resistência na realimentação a depender das condições de trabalho. Para resolver esta lacuna, o desenvolvimento de um controle automático de ganho se mostra como uma opção interessante. Para comprovar que o o controle de ganho é capaz de reduzir os erros a zero para uma determinada faixa de variação de distâncias (no experimento, até 200 cm), realizou-se o experimento de verificação do funcionamento do sistema para diferentes distância sobre uma mesa de trabalho. Os resultados obtidos são dados pela Tabela 3. A diferença entre o ganho necessário em 175 cm e 200 cm pode ser explicada pela sensibilidade do resistor variável utilizado, um trimpot linear rotativo de 1 MΩ, o qual tem grande variação de resistência para uma pequena diferença de ângulo no mesmo; além disso, a reflexão de onda em outros objetos em torno do receptor para cada ponto também causa um ruído de amplitude diferente, a qual não pode ser da mesma ordem que a amplitude do sinal desejado para que a recuperação da informação seja possível (erro mínimo).

Tabela 3 – Levantamento de taxa de erro sobre mesa de trabalho.

Distância (cm)	**Rf (kΩ)**	**Taxa de erro (x10^{-5})**
25	98,7	0,00
50	98,7	0,00
75	98,7	0,00
100	98,7	0,00
125	98,7	0,00
150	98,7	0,00
175	98,7	0,00
200	580	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho buscou uma breve apresentação e documentação do desenvolvimento de um sistema de comunicação VLC, além da prova de conceito, sobre a utilização da tecnologia em diferentes dispositivos da atualidade, apresentando um passo importante na democratização da ciência e acessibilidade das tecnologias emergentes para diferentes públicos.

Dada a crescente demanda por conectividade, a tecnologia de comunicação via luz visível surge como uma alternativa interessante para se superar o espectro de rádio cada vez mais escasso para nos sistemas de comunicação sem fio, especialmente em aplicações *indoor*. Com essa alternativa, luminárias podem ser adotadas para, além da iluminação do ambiente, realizarem comunicação de dados. Um exemplo interessante está nos sistemas com requisitos de mobilidade, onde deve-se ter atenção no desafio que há para se manter a conectividade. Com esse objetivo, uma alternativa se encontra na adotação de um gerenciamento do tipo Handover, utilizado em sistemas celulares sem fio, o qual possibilita conectividade em diferentes cenários internos, por exemplo atuação sobre os casos sobrepostos (iluminação uniforme) e também nos não sobrepostos (iluminação pontual).

O desenvolvimento eficiente desse tipo de sistema envolve trabalho de uma equipe multidisciplinar e uma série de pesquisas, simulações e experimentos para então a validação de um protótipo. Em síntese, no trabalho desenvolvido, obteve-se um protótipo de sistema multiplataforma para recepção de dados via tecnologia de comunicação por luz visível funcional e de baixo custo, com possíveis melhorias a serem feitas para uma evolução contínua do mesmo. Das contribuições do trabalho, é importante ressaltar o *hardware* **SmaL PnP** e o *software* ***SmaL Web Version***, sendo o primeiro responsável pelo tratamento de ruído e decodificação das informações a partir de técnicas de eletrônica e sistemas embarcados, enquanto o segundo faz o tratamento da informação recuperada e exibição da mesma. No *setup* atual, pode-se obter alto desempenho em sistemas sem movimentação do receptor, para enlaces com linha de visada direta de até 3 metros.

Foram desenvolvidas todas as partes descritas de modo a cumprir requisitos do projeto proposto, porém cabem melhorias no protótipo desenvolvido para trabalhos futuros. Primeiramente, dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a implementação do controle automático de ganho é o próximo passo fundamental para que o protótipo desenvolvido tenha maior robustez e grau de liberdade. Posteriormente, avançar-se em pesquisas sobre diferentes fotodiodos para tratamento ruídos diferentes dos causados por luminárias

externas e da rede elétrica local. Uma aplicação interessante do protótipo criado e que merece uma carga horária de trabalho de pesquisa e desenvolvimento está na aplicação de técnicas de Handover para suprir demandas de sistemas celulares. Por fim, pode-se diminuir significativamente os custos do sistema a partir da readequação da eletrônica desenvolvida em torno do filtro passa-baixas, uma forma de fazer esta melhoria se dá na elevação da frequência de operação do sistema e utilização de um filtro analógico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL., M. A. K. B. et. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. JurnalTeknologi, 2016. ISSN 2180 –3722. Disponível em: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/9285/5537>. Citado na página 15.

ALBUQUERQUE, M. P. de; ALBUQUERQUE, M. P. de. Processamento digital de sinais. 2002. Citado na página 22.

ANTONIOU, A. Digital filters: analysis, design, and signal processing applications. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018. Citado na página 32.

BEDOR, A. A. B. Projeto e Contrução de Protótipo de Sistema de Comunicação por Luz Visível (VLC). Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 26.

BREED, G. Bit error rate: Fundamental concepts and measurement issues. High Frequency Electronics, Summit Technical Media, v. 2, n. 1, p. 46–47, 2003. Citado na página 25.

CARVALHO, R. M. Comunicações analógicas e digitais. São Paulo: LTC, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 31.

CISCO, U. Cisco annual internet report (2018–2023) white paper. 2020. Acessado em, v. 10, n. 01, 2021. Citado na página 16.

CONCEIÇÃO, M. L. Comunicação por luz visível. 2015. Citado na página 28.

CRISP, J. Introduction to microprocessors and microcontrollers. [S.l.]: Elsevier, 2003. Citado na página 35.

DATTA, K.; DAS, P.; SAHA, M.; SAHA, S. Designing embedded visible light communication system adaptable to fluctuations in light intensity. In: . [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 29.

DATTA, K. N.; DAS, P.; SAHA, M.; SAHA, S. Designing embedded visible light communication system adaptable to fluctuations in light intensity. In: Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado na página 18.

DURDA, F. Serial and uart tutorial. FreeBSD Documentation, 1996. Citado na página 34.

ERGUL, O.; DINC, E.; AKAN, O. B. Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications. Physical Communication, Elsevier, v. 17, p. 72–85, 2015. Citado na página 16.

FRANCO, J. What is direct memory access (dma) and why should we know about it? Nov, v. 25, p. 1–23, 2016. Citado na página 36.

GOMES, A. S.; GOMES, C. R. A. Classificação dos tipos de pesquisa em informática na educação. Jaques, Patrícia Augustin; Pimentel, Mariano; Siqueira; Sean; Bittencourt, Ig.(Org.) Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Concepção da Pesquisa. Porto Alegre: SBC, 2019. Citado na página 19.

GONÇALVES, M. H.; ARAUJO, L. E. de; RODRIGUES, V. Lentes de gelatina. Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil, v. 42, 2019. Citado na página 30.

HEALTH, U. D. of; SERVICES, H. et al. Office of the assistant secretary for planning and evaluation. Standards Organizations for the NHII: Health Level 7 (HL7), 2003. Disponível em: <https://aspe.hhs.gov/standards-organizations-nhii>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

ISMAIL, S. N.; SALIH, M. H. A review of visible light communication (vlc) technology. In: AIP PUBLISHING LLC. AIP Conference Proceedings. [S.l.], 2020. v. 2213, n. 1, p. 020289. Citado na página 26.

LAZARO, R.; ZWAAG, V. D.; MINNE, K.; COSTA, W.; ACIOLI, G.; MARINHO, M.; KHOURI, M.; VIVAS, G. d. C.; SANTOS, F.; BASTOS-FILHO, T. et al. Integrating power line and visible light communication technologies for data transmission in hospital environments. In: SPRINGER. Brazilian Congress on Biomedical Engineering. [S.l.], 2022. p. 751–756. Citado na página 37.

LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. 5g internet of things: A survey. Journal of Industrial Information Integration, Elsevier, v. 10, p. 1–9, 2018. Citado na página 15.

LONGHI, W. V.; COLVERO, C. P. Módulo didático com tecnologia vlc. Revista Eletrônica Argentina-Brasil de Tecnologias da Informação e da Comunicação, v. 2, n. 1, 2018. Citado na página 30.

MAITY, G. K.; MAITY, S. P.; ROY, J. N. All-optical manchester code generator using toad-based d flip-flop. In: 2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS). [S.l.: s.n.], 2012. p. 479–481. Citado na página 24.

MARKSTEIN, P. The New IEEE-754 Standard for Floating Point Arithmetic. In: CUYT, A.; KRäMER, W.; LUTHER, W.; MARKSTEIN, P. (Ed.). Numerical Validation in Current Hardware Architectures. Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2008. (Dagstuhl Seminar Proceedings (DagSemProc), v. 8021), p. 1–3. ISSN 1862-4405. Disponível em: <https://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2008/1448>. Citado na página 33.

NUNES, R. A. A.; ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P.; SEIXAS, J. M. Introdução a processadores de sinais digitais-dsp. Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro, 2006. Citado na página 22.

PASQUINI, N. C. Revoluções industriais: uma abordagem conceitual. Revista Tecnológica da Fatec Americana, v. 8, n. 01, p. 29–44, 2020. Citado na página 14.

PIMENTEL, J. R.; CAMPANHA, J. R. Lentes espessas: duas distâncias focais? Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 10, n. 1, p. 59–70, 1993. Citado na página 30.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição. [S.l.]: Editora Feevale, 2013. Citado na página 19.

RAJAGOPAL, S.; ROBERTS, R. D.; LIM, S.-K. Ieee 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. IEEE Communications Magazine, v. 50, n. 3, p. 72–82, 2012. Citado na página 26.

RAPUANO, S.; DAPONTE, P.; BALESTRIERI, E.; VITO, L. D.; TILDEN, S. J.; MAX, S.; BLAIR, J. Adc parameters and characteristics. IEEE instrumentation & measurement magazine, IEEE, v. 8, n. 5, p. 44–54, 2005. Citado na página 23.

REGUERA, V. A. New rll code with improved error performance for visible light communication. arXiv preprint arXiv:1910.10079, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. As revoluções industriais até a indústria 4.0. Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 480–491, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

SANTOS, R. História das telecomunicações em portugal. Biblioteca Online de Ciências Da Comunicação, p. 1–11, 1999. Citado na página 14.

SCHMITZ, C. R. et al. Desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicaçao por ultrassom através de paredes metálicas. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 23.

SCOPACASA, V. A. Introdução à tecnologia de led. Revista LA_PRO, São Paulo, ed, v. 1, p. 5–10, 2008. Citado na página 27.

SHARMA, P. Evolution of mobile wireless communication networks-1g to 5g as well as future prospective of next generation communication network. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, v. 2, n. 8, p. 47–53, 2013. Citado na página 14.

SILVA, E. C. G. d. Costa e. O futuro da telefonia convencional e a ascensão da rede móvel no brasil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Citado na página 14.

SOUZA, J. J. de; STEVAN, S. L.; POMPERMAIER, M. A. C.; MATOS, J. de; FONSECA, Z. palhano da. Project of a communication system by visible light comunication (vlc) based on led lighting. Iberoamerican Journal of Applied Computing, v. 3, n. 3, 2013. Citado na página 18.

SU, K. L. Analog filters. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 31.

SUSHANTH, K. V. S. S.; CHOCKALINGAM, A. Performance of imaging receivers using convex lens in indoor mimo vlc systems. In: 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. Citado na página 30.

VEGNI, A. M.; LITTLE, T. D. C. Handover in vlc systems with cooperating mobile devices. In: 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). [S.l.: s.n.], 2012. p. 126–130. Citado na página 26.

YNOGUTI, C. Introdução aos filtros digitais. Instituto Nacional de Telecomunicações–INATEL, 2009. Citado na página 32.

ZHU, H.; ZHANG, M.; WANG, C.; GUO, X.; ZHANG, Y. Design of a visible light internet access system. In: 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. [S.l.: s.n.], 2015. p. 49–52. Citado na página 24.

ZWAAG, K. D.; LAZARO, R.; MARINHO, M.; ACIOLI, G.; SANTOS, A.; RIMOLO, L.; COSTA, W.; SANTOS, F.; BASTOS, T.; SEGATTO, M.; ROCHA, H. et al. Performance evaluation of an ook-based visible light communication system for transmission of patient monitoring data. In: SPRINGER. Brazilian Congress on Biomedical Engineering. [S.l.], 2022. p. 731–736. Citado na página 37.

ZWAAG, K. M. V. D.; MARINHO, M. P.; COSTA, W. D. S.; SANTOS, F. D. A. S. D.; BASTOS-FILHO, T. F.; ROCHA, H. R.; SEGATTO, M. E.; SILVA, J. A. A manchester-ook visible light communication system for patient monitoring in intensive care units. IEEE Access, IEEE, v. 9, p. 104217–104226, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.

ZWAAG, K. M. vd; NEVES, J. L.; ROCHA, H. R.; SEGATTO, M. E.; SILVA, J. A. Adaptation to the leds flicker requirement in visible light communication systems through ce-ofdm signals. Optics Communications, Elsevier, v. 441, p. 14–20, 2019. Citado na página 37.

ZWAAG, K. vd; NEVES, J.; ROCHA, H.; SEGATTO, M.; SILVA, J. Increasing vlc nonlinearity tolerance by ce-ofdm. In: OPTICA PUBLISHING GROUP. Latin America Optics and Photonics Conference. [S.l.], 2018. p. W3D–3. Citado na página 37.

Apêndices

APÊNDICE A – SIMULAÇÃO DE SINAIS NO MATLAB

```
Fs = 10000;
T = 1/Fs;
L = 500;
t = (0:L-1)*T;

f = 60;
s_in = 127*sin(2*pi*f*t);
s_out = abs(3*sin(2*pi*f*t));
s_opt = 1.5 + 1.5*sin(2*pi*2*f*t);

figure(1)
plot(t,s_in)
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('t(s)')
title('Tensão de Entrada')

figure(2)
plot(t,s_out)
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('t(s)')
title('Tensão de Saída')

figure(3)
plot(t,s_opt)
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('t(s)')
title('Tensão de Saída no OPT101')

Y = fft(s_in);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
figure(4)
plot(f,P1)
```

```
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('f(Hz)')

Y = fft(s_out);
P2 = abs(Y/L);
P4 = P2(1:L/2+1);
P4(2:end-1) = 2*P4(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
figure(5)
plot(f,P4)
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('f(Hz)')

Y = fft(s_opt);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;

figure(6)
plot(f,P1)
ylabel('Amplitude (V)')
xlabel('f(Hz)')
```