

Guilherme Rodrigues dos Santos

Módulo Receptor para Comunicação por meio de luz visível

Belo Horizonte

2021

Guilherme Rodrigues dos Santos

Módulo Receptor para Comunicação por meio de luz visível

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Andrea Chiuchiarelli

Belo Horizonte

2021

*Este trabalho é dedicado à meus familiares e amigos
que estiveram comigo sempre que precisei
e olha que precisei bastante*

Agradecimentos

Sou grato primeiramente a meus pais por sempre me apoiarem, acreditando plenamente em mim, mesmo quando eu duvidava. Por serem minha principal fonte de inspiração, sendo inconformados com o saber, buscando sempre se renovar e se reinventar.

Agradeço ao meu professor orientador Andrea Chiuchiarelli pela confiança depositada ao me convidar a fazer parte deste projeto. Por ter sido um orientador presente e motivado durante todo o processo.

À Júlia, minha namorada, pela compreensão e apoio durante meus últimos passos nessa trajetória.

Aos meus amigos de Belém por, mesmo longe fisicamente, continuarem presentes na minha vida.

Aos meus amigos da UFMG, em especial os de curso e os que fizeram parte da minha história na CPE Jr.. Sem as risadas, os surtos, os apoios, nada disso teria sido possível.

Ao meu amigo, colega de faculdade e parceiro de projeto, Bruce Morrow, por ter batalhado comigo dias, noites e madrugadas não só neste projeto, como em todo o curso.

Também agradeço a Universidade e aqueles professores que se esforçam para nos entregar um ensino de qualidade.

Lista de abreviaturas e siglas

VLC	<i>Visible Light Communication</i>
AGC	<i>Automatic Gain Controller</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
OOK	<i>On-off Keying</i>
M2M	<i>Machine-to-machine</i>
RF	Radiofrequência
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
PSRR	<i>Power Supply Rejection Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise-Ratio</i>
DC	<i>Direct Current</i>

Lista de símbolos

η	Eficiência quântica
N_c	Número de elétrons coletados
N_i	Número de fótons incidentes
R	Responsividade
e	Carga fundamental do elétron
λ	Comprimento de onda da luz recebida
h	Constante de Planck
c	Velocidade da luz no vácuo
I_P	Fotocorrente gerada
P_R	Potência de luz recebida
σ_T	Ruído térmico
k	Constante de Boltzman
T_e	Temperatura absoluta
B	Largura de banda do receptor
F_n	Figura de ruído
R_L	Resistência equivalente no fotodiodo
θ	Ângulo do LED aferido experimentalmente
D_X	Distância aferida entre LED e fotodiodo

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de blocos de um transceptor VLC digital. Destacados em azul estão os objetos de interesse deste trabalho. fonte: elaboração própria. .	20
Figura 2 – Diagrama de blocos da estrutura básica do receptor. Fonte: elaboração própria.	27
Figura 3 – Esquemático dos circuitos do <i>Front-end</i> . Fonte: elaboração própria. . .	30
Figura 4 – Esquemático do <i>Front-end</i> do receptor. Elaboração própria.	31
Figura 5 – Esquemático dos circuitos que compõe módulo de recuperação de dados do receptor. Fonte: elaboração própria.	32
Figura 6 – Simulação no tempo do <i>Front-end</i> do receptor. Fonte: elaboração própria.	33
Figura 7 – Simulação no tempo do <i>Front-end</i> do receptor com foco na subida e na descida do sinal. Fonte: elaboração própria.	33
Figura 8 – Simulação na frequência do <i>Front-end</i> do receptor. Fonte: elaboração própria.	34
Figura 9 – Varredura DC da corrente no fotodiodo para análise da saída do <i>Front-end</i> do receptor. Fonte: elaboração própria.	35
Figura 10 – Resposta no tempo do circuito de Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria.	35
Figura 11 – Análise em frequência no ponto de operação do circuito de Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria	36
Figura 12 – Resposta da saída do receptor através da varredura estática da entrada do módulo de recuperação de dados, Fonte: elaboração própria.	37
Figura 13 – Simulação no tempo de todo o receptor, mostrando a saída intermediária do <i>Front-end</i> . Fonte: elaboração própria.	38
Figura 14 – Resposta simulada para entrada de Bits pseudoaleatórios. Fonte: elaboração própria.	38
Figura 15 – <i>Set-up indoor</i> modelado. Fonte:(GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2019)	41
Figura 16 – Resultados gráficos 2D de SNR e BER obtidos do simulador óptico. Fonte: elaboração própria.	45
Figura 17 – Resultados com visualização 3D para o perfil BER no plano ortogonal à fonte luminosa, com distância de 15 cm. Fonte: elaboração própria. .	46
Figura 18 – Resultados com visualização 3D para o perfil SNR no plano ortogonal à fonte luminosa, com distância de 15 cm. Fonte: elaboração própria. .	46
Figura 19 – <i>Set-up</i> experimental na sala escura. Fonte: elaboração própria.	47
Figura 20 – Mecanismo desenvolvido para testes com variação da distância entre transmissor e receptor. Fonte: elaboração própria.	48

Figura 21 – Mecanismo desenvolvido para testes com variação angular do receptor. Fonte: elaboração própria.	48
Figura 22 – Amplitude da tensão de saída do receptor em função da frequência da onda quadrada no transmissor, $D_X = 15$ cm, $\theta = 0^\circ$. Fonte: elaboração própria.	50
Figura 23 – Amplitude da tensão de saída do receptor em função da distância. Fonte: elaboração própria.	51
Figura 24 – Amplitude do sinal ao se variar o ângulo em diferentes distâncias. Fonte: elaboração própria.	52
Figura 25 – Reposta no tempo da entrada no transmissor e a saída do receptor em diferentes distâncias. Fonte: elaboração própria.	53
Figura 26 – Comparação da reposta no tempo da entrada no transmissor e a saída do receptor para o <i>Front-end</i> e para o módulo Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria.	54
Figura 27 – Exemplo do Time Recovery	55
Figura 28 – Monitor serial na comunicação direta entre os Arduínos visto no re- ceptor. Fonte: elaboração própria.	56
Figura 29 – Saída do circuito receptor com envio de <i>frames</i> . Fonte: elaboração própria.	56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Associação dos circuitos aos seus respectivos nomes	28
Tabela 2 – Resultados obtidos através da simulação utilizando o software Multisim®	28
Tabela 3 – Valores de referência utilizados no simulador.	43
Tabela 4 – Parâmetros de Fit para os resultados da figura 24	51

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Visão geral	19
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivos	20
1.4	Estrutura da Monografia	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Cronograma	26
4	SIMULAÇÃO DO CIRCUITO RECEPTOR DIGITAL VLC	27
4.1	Considerações iniciais	27
4.2	Circuitos do front-end simulados	27
4.3	Circuito proposto	29
4.3.1	Decisões de projeto	29
4.3.2	Resultados de simulação	32
4.3.2.1	Módulo Front-end	32
4.3.2.2	Módulo Recuperação de dados	34
4.3.2.3	Circuito receptor completo	37
5	SIMULADOR DE CANAL	41
5.1	Modelo teórico	42
5.2	Metodologia de simulação	43
5.3	Resultados de simulação	44
6	TESTES LABORATORIAIS	47
6.1	Set-up experimental	47
6.2	Metodologia de teste	49
6.3	Resultados experimentais	49
6.3.1	Caracterização do Front-end	50
6.3.2	Circuito Receptor	52
6.3.3	Aquisição de dados via Arduíno	54
7	CONCLUSÃO	57
7.1	Propostas de trabalhos futuros	58

REFERÊNCIAS	59
--------------------	-----------

Resumo

É esperada uma crescente demanda por conectividade não só de pessoas quanto de equipamentos nas próximas décadas, guiado por conceitos como internet das coisas (IoT), sendo impactado inclusive pela atual situação de Pandemia, que alavancou a necessidade de conectividade através da adoção em larga escala de trabalho de casa.

Ao passo que as comunicações sem fio estão chegando ao seu limite físico devido a essa crescente demanda por fluxo de dados, está aumentando a busca por novas alternativas para suprir essa necessidade de maior conectividade, sendo a comunicação por luz visível (*Visible Light Communication*, VLC) uma das principais possibilidades. Sistemas de comunicação VLC que fazem uso de LEDs para transmitir dados oferecem a grande vantagem de reutilizar infraestrutura já instalada, uma vez que os mesmos LEDs de iluminação podem ser aproveitados para comunicação.

Este trabalho se coloca nessa linha de pesquisa, visando desenvolver e validar um módulo receptor VLC digital. O projeto é altamente multidisciplinar, compreendendo o desenvolvimento de um simulador de canal óptico VLC, seguindo modelos já estabelecidos na literatura, o projeto e a caracterização do *front-end* do receptor e a comparação entre os resultados obtidos por simulação e a análise experimental do circuito implementado.

O sistema foi implementado e testado como parte de um sistema de transmissão completo, em conjunto com o transmissor projetado por outro aluno. O transceptor como um todo atingiu uma taxa de aproximadamente 2 kbps à distância máxima de 25 cm. Os resultados do simulador atenderam o esperado tanto da literatura quanto do resultado experimental, considerando incertezas associadas às medições. Com esse trabalho foi possível comprovar a eficácia da comunicação por luz visível utilizando componentes baratos, com razoável taxa de transmissão.

Palavras-chave: comunicação óptica sem fio (OWC), comunicação por luz visível (VLC), circuitos moduladores para LEDs, simulador de canal óptico, receptor.

1 Introdução

1.1 Visão geral

A demonstração de Marconi da primeira transmissão de rádio da ilha de Wight a Togboat em 1895, marca o início das transmissões sem fio. Então a primeira rede baseada em radio foi desenvolvida em uma universidade no Havaí, a ALOHANET em 1971. No início dos anos 90 foi apresentado pela primeira vez o acesso sem fio à internet, mas com baixas taxas de dados, o que não deixou a solução viável, especialmente com a introdução da tecnologia *Ethernet* para internet cabeada. Contudo, esse cenário mudou a partir das LANs, baseadas no padrão IEEE 802.11, continuando sendo mais lentas em relação à rede cabeada, mas já em velocidades aceitáveis, ganhando gradualmente preferência em diversos ambientes devido à conveniência da liberdade dos cabos (SEYMOUR; SHAHEEN et al., 2011).

Com o avanço nas tecnologias sem fio não só a velocidade de transmissão de dados aumentou, como também seu alcance e pontos de acesso, sendo este último um dos principais pontos que têm possibilitado grandes transformações na indústria, na chamada Indústria 4.0 (VUKSANOVIĆ; VEŠIĆ; KORČOK, 2016). Essa transformação já tem mostrado uma tendência no perfil de conexão de dispositivos, onde em 2023, estima-se que a comunicação entre máquinas (*Machine-to-machine*-M2M) representará mais de um terço das conexões móveis (CISCO, 2020).

Hoje, a necessidade por mais conectividade continua aumentando, enquanto as tecnologias existentes, que utilizam predominantemente radiofrequências (RF), já estão chegando em seu limite físico. Nesse contexto, o uso da luz visível para comunicação sem fio, *Visible Light Communication*-VLC, representa uma alternativa para superar essas limitações.

O uso da luz visível para transmissão de dados permite resolver o problema de disponibilidade de banda, sendo o espectro de frequência da radiação eletromagnética visível muito amplo (430 THz - 790 THz). Outra importante característica da comunicação VLC é que, em aplicações *indoor*, o sinal luminoso fica confinado com alta eficiência, melhorando a segurança da comunicação, e garantindo que só os dispositivos de interesse tenham acesso. A luz pode ser utilizada tanto para iluminação quanto para a transmissão de dados, tendo menor gasto de potência não utilizado em relação ao RF. Isso tudo podendo transmitir com velocidades comparáveis às de sistemas RF (SEYMOUR; SHAHEEN et al., 2011).

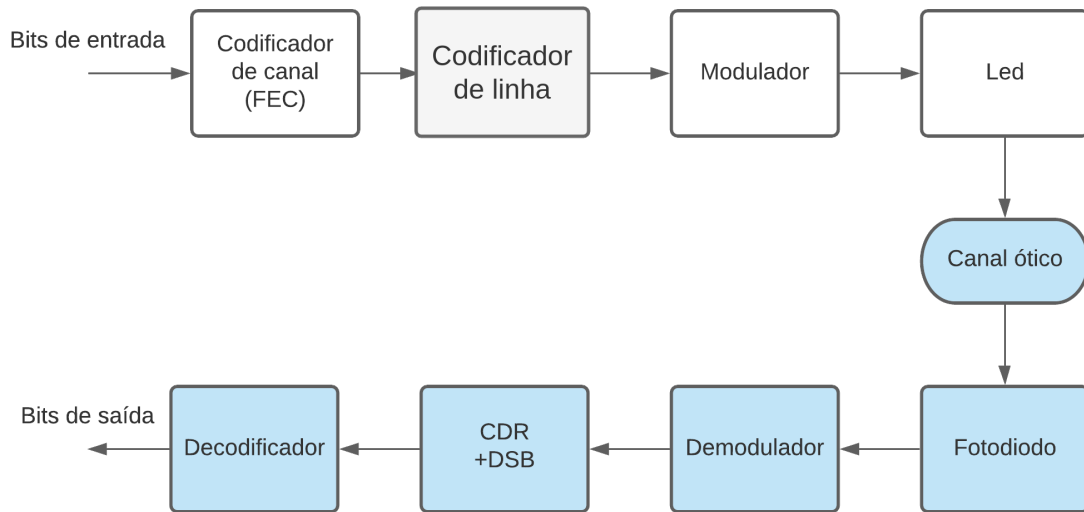


Figura 1 – Diagrama de blocos de um transceptor VLC digital. Destacados em azul estão os objetos de interesse deste trabalho.
fonte: elaboração própria.

1.2 Motivação

Tendo em vista o crescente aumento na demanda por comunicações sem fio e a aproximação de limites inerentes à tecnologia proveniente de RF, torna-se necessária uma solução eficiente para contornar esses limites. O uso da luz visível para comunicação não é novo e já tem apresentado bons resultados, fatores que alavancaram o interesse no tema na pesquisa e no mercado. Para isso, será feito um estudo do sistema VLC a partir das equações que governam a propagação da luz no espaço livre, a fim de auxiliar na fase de projeto e desenvolvimento do transceptor, além da comparação para validação experimental. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos de um transceptor VLC digital onde os blocos em azul são os objetos de interesse deste trabalho. A funcionalidade de cada um destes será detalhada nos capítulos adiante.

1.3 Objetivos

O presente trabalho consiste no projeto e desenvolvimento de um módulo receptor VLC digital, em conjunto com um simulador para a modelagem de um canal óptico *wireless*.

1.4 Estrutura da Monografia

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em 6 capítulos. Esse capítulo inicial apresentou uma visão geral do tema, contextualizando a respeito da comunicação

sem fio e da necessidade de novas alternativas; o segundo capítulo aborda os trabalhos e pesquisas desenvolvidas acerca do tema de VLC; o terceiro capítulo mostra a metodologia a ser utilizada nesta monografia; o quarto capítulo apresenta o desenvolvimento e simulação do módulo receptor; o quinto capítulo mostra os resultados do simulador óptico para o receptor; o sexto capítulo apresenta resultados experimentais do receptor e, por fim, o sétimo capítulo conclui a monografia, além de apresentar propostas de melhorias ou trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

O uso de radiofrequências em comunicação sem fio é indubitavelmente predominante, especialmente se tratando de uso domiciliar, como no caso do *Wi-Fi*. Essa tecnologia tem restrições inerentes ao seu limitado espectro de frequência, onde é necessário fazer uma relação de compromisso entre conectividade e alta capacidade, uma vez que essas grandezas são inversamente relacionadas. Isso vem sendo agravado com a tendência de uso cada vez maior de dados e pontos de acesso a dados, vide Indústria 4.0 (VUKSANOVIĆ; VEŠIĆ; KORČOK, 2016). Além disso, são enumeradas limitações em como vulnerabilidade de segurança por ser capaz de ultrapassar paredes; interferência com outros serviços de comunicação e de navegação; dificuldade de operação em operações que requerem baixa latência, devido ao espectro pequeno e é necessário um dispositivo separado para fazer a comunicação (KHAN, 2017).

A comunicação por luz visível, se mostra uma promissora alternativa. Mitiga o problema de segurança em aplicações *indoor*, pois só é possível receber a informação se estiver no mesmo ambiente; o espectro da luz visível ocupa de 430 THz a 790 THz, resolvendo a limitação de banda. Outro ponto interessante é que a tecnologia pode ser aproveitada tanto para iluminação quanto para o envio de dados, tornando-a mais eficiente por não ser um elemento que já está incorporado a qualquer ambiente.

A busca para um novo método de comunicação não é nova, nem a escolha de comunicação por luz visível. Em 2015 já se discutia sobre a tecnologia, mostrando as diferentes formas de se trabalhar com VLC, ressaltando aplicações na aviação para reduzir interferência, comunicação em alto mar, com maior eficiência devido à melhora na propagação do sinal por conta da luz (NDJONGUE; FERREIRA; NGATCHED, 2015). Na época o grande desafio era conseguir estabelecer um padrão, para permitir a entrada dessa tecnologia no mercado. Era especulado que seria um concorrente do *Wi-Fi*, mas que provavelmente não o extinguiria, devido a limitações que emergiram durante as pesquisas, como dificuldade de implementar comunicação duplex e, devido ao curto campo de visão das fontes luminosas, a comunicação funciona melhor sob condições de pouca mobilidade, além de sofrer bastante interferência da luz ambiente.

Em 2017 foi feita uma análise do impacto do padrão que engloba VLC, o IEEE 802.15.7, que veio tentando resolver cada uma dessas limitações para a chegada da tecnologia no mercado. Ainda assim, havia muitos desafios, o padrão não foi totalmente aceito, estava desatualizado em relação à pesquisa, um exemplo é que o padrão estipulava taxas de envio de dados de até 96 Mb/s, enquanto já haviam registros de taxas superiores a 1 Gb/s (Cailean; Dimian, 2017). Em 2015, foi demonstrado a comunicação a 8 Gb/s, com

taxa de erro de bit (*Bit Error Rate*-BER) inferior ao limite de $3.8 \cdot 10^{-3}$, utilizando código corretor de erro (FEC) com *overhead* de 7% (Wang et al., 2015). Em 2017 é apresentada a atualização do padrão, o IEEE 802.15.7r1, direcionando para aplicações em ambiente fechado, tratando-os de maneira bem menos idealizada em seus modelos (Uysal et al., 2017).

Do ponto de vista do receptor de VLC, foi proposto em 2017 um circuito receptor, com componentes de baixo custo discretos, capaz de dar a característica de mobilidade para o sistema, utilizando um amplificador de ganho automático (*Automatic Gain Controller* - AGC) (FUADA et al., 2017). Avanços foram feitos, mas até 2016, a melhor taxa de dados utilizando LED na modulação OOK (*On-off Keying*) era de 614 Mb/s a uma distância de 45 cm (FAHS; CHOWDHURY; HELLA, 2016). No referido artigo é proposto um circuito totalmente integrado onde foi possível alcançar taxas de 1.8 Gb/s, com BER de $5 \cdot 10^{-5}$ a uma distância de 46 cm. Em 2019 são propostos circuitos integráveis, com tecnologia 0.18 μm CMOS, onde a interferência da luz ambiente é retirada tanto no domínio óptico, através de uma estratégia de polarização da luz, como eletricamente, utilizando amplificador de transferência de carga (*Charge Transfer Amplifier* - CTA). O circuito proposto possui um consumo de 15 pJ/bit e opera em uma banda de 5 MHz (AHMED; BERMAK, 2019).

3 Metodologia

Este trabalho foi iniciado pelo estudo bibliográfico, derivando, então, em dois focos concomitantes, um para simulação de um canal óptico VLC e outro para criação e validação do circuito receptor. O trabalho de simulação foi validado experimentalmente com testes em laboratório.

O estudo da literatura teve o início com uma abordagem mais generalista, com a teoria de OWC (Optical Wireless Communication) e modulação digital, tendo foco em OOK e seus desafios. Então, foi direcionado para VLC e suas aplicações, adentrando mais especificamente nos circuitos receptores. Por fim, o foco foi para modelagem matemática do meio de comunicação em espaço livre, considerando as características ópticas, bem como os componentes utilizados.

A simulação do canal óptico foi realizada em conjunto com outro aluno, responsável pelo desenvolvimento de um módulo transmissor VLC. A linguagem de programação escolhida foi Python, devido à facilidade de implementar modelos matemáticos complexos de forma vetorizada, ser um software livre e da maior familiaridade dos membros do projeto com a linguagem para o trabalho colaborativo. Esse simulador provê cálculos de potência recebida, SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) e BER em diferentes configurações entre receptor e transmissor.

Para o projeto do circuito receptor foi utilizado o software Multisim®, versão 14.0, desenvolvido pela National Instruments, a fim de testar diferentes topologias de circuito. Os circuitos foram idealizados para funcionarem a uma distância de pelo menos 10 cm de um único LED vermelho de 5 mm, tensão nominal 1,79 V e corrente de 20 mA, sendo essa a potência de referência; a luz sendo convertida em sinal elétrico através do fotodiodo BPW34, ligado a um conversor A/D (analógico-digital) de 5V e 10 bits, tendo 1 LSB (Least Significant Bit) igual a 5 mV. Os seguintes parâmetros foram levantados na simulação a fim de comparação:

- Mínima tensão de alimentação para o circuito funcionar;
- Consumo médio de potência tendo como entrada uma onda quadrada, com valores respectivos a uma fotocorrente gerada no fotodiodo quando o LED está a uma distância de 15 cm e 0°. Valor de referência obtido através do simulador óptico;
- Tempo de subida;
- Tempo de descida;
- *Slew rate*;

- Largura de banda;
- Ganho de fonte de alimentação.

Com base nos parâmetros acima foi escolhida uma topologia. As que apresentavam menor consumo energético tiveram um maior peso, por permitirem uma comunicação em distâncias maiores. Outro ponto muito relevante levado em consideração foi a facilidade de implementação física.

A validação experimental teve como objetivo validar tanto a simulação do canal quanto os módulos transmissor, idealizado e desenvolvido pelo aluno anteriormente citado, e receptor com o circuito escolhido segundo os critérios acima. Os circuitos foram montados em *protoboard* e placas de prototipagem Arduino® foram utilizadas para geração de mensagem no transmissor e coleta de dados na saída do receptor.

A fim de padronizar e dar uma maior confiabilidade nos testes, foi construído um protótipo de uma estação de testes, com o intuito de comparar os resultados experimentais com a simulação do circuito e do canal. Os testes foram feitos com ondas padrões, sem valor de informação, como ondas quadradas, e também com pequenas mensagens em frames de 16 bytes.

Importante deixar claro que em decorrência da situação atual da pandemia da Covid-19 algumas dessas ações podem não ser concluídas.

3.1 Cronograma

Março 2020	Definição do projeto e levantamento do referencial teórico
Abril 2020	Teste e avaliações de circuitos analógicos para o Receptor
Maio 2020	Implementação da Análise de BER e SNR no simulador óptico
Junho 2020	Troca de Mosfet por BJT nas simulações de circuito
Julho 2020	Correção no simulador e finalização da caracterização simulada do receptor
Agosto 2020	Criação do protótipo da primeira estação de testes experimentais
Janeiro 2021	Tradução do simulador para Python
Fevereiro 2021	Análise de viabilidade de uso de Arduino para o projeto do transceptor
Março 2021	Montagem e teste de circuito com resultados satisfatórios
Junho 2021	Implementação algoritmos de recuperação de sinal
Julho 2021	Implementação de interpretação de dados no Arduino
Agosto 2021	Testes em laboratório com Arduino
Setembro 2021	Finalização e considerações finais

4 Simulação do Circuito Receptor Digital VLC

Este capítulo apresenta as condições nas quais o receptor está inserido e considerações relevantes para o projeto, bem como circuitos da literatura utilizados no estágio receptor de sistemas VLC. Em seguida são apresentados resultados de simulação para diferentes opções do *front-end*, então é descrito o circuito do receptor proposto e seus resultados simulados.

4.1 Considerações iniciais

A figura 2 apresenta o diagrama da estrutura básica de um receptor VLC. O primeiro bloco, o chamado "*front-end*", é composto pelo fotodetector que transforma o sinal luminoso em corrente elétrica, juntamente com uma pre-amplificação que tem uma relação muito forte entre sensibilidade e banda. O canal linear é composto por um amplificador que, dependendo da aplicação pode ser variável, como no caso de comunicações com mobilidade e um filtro passa-baixas para eliminar as altas frequências, sendo algumas vezes acrescido de um passa-altas também para tirar a componente contínua proveniente da luz ambiente. A recuperação de dados é o bloco onde é feito o sincronismo, através do *clock recovery*, a fim de obter o sinal amostrado no tempo certo e o circuito decisor, responsável por definir se o sinal naquele tempo é correspondente ao bit '1' ou ao bit '0'.

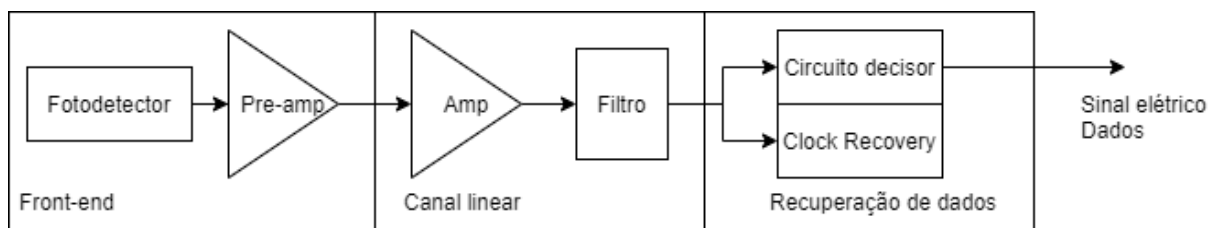


Figura 2 – Diagrama de blocos da estrutura básica do receptor. Fonte: elaboração própria.

4.2 Circuitos do front-end simulados

Na tabela 2 estão resumidos os principais resultados de simulação para os circuitos da tabela 1, realizados no software Multisim®V 14.0. São mostrados a mínima tensão de alimentação necessária para o funcionamento normal do circuito, a potência média consumida, os tempos de subida e descida, a largura de banda e o ganho de fonte de alimentação.

A largura de banda é um parâmetro essencial para a definição do circuito, uma vez que o sinal começa a ficar mais atenuado a medida que se aproxima do seu corte. A largura de banda define qual a taxa limite de recebimento de dados em que o circuito consegue funcionar corretamente. No caso de pulsos retangulares, que foram utilizados no projeto, verificou-se que o tempo de subida e descida são mais limitantes, tendo como efeito o de transformar o sinal em um dente de serra, essa distorção ocorrendo já em frequências menores do que aquelas ditadas pela largura de banda, sendo o circuito 1 o que apresentou melhor desempenho nesse sentido, enquanto o circuito 3 apresentou o pior. Isso mostra a melhora na utilização do fotodiodo com a polarização reversa, melhorando na linearidade. A polarização reversa aumenta a região de depleção e diminui a capacitância de junção, melhorando o tempo de resposta. Contudo, há um aumento na corrente de escuro, podendo ser crítico caso o interesse do trabalho fosse distâncias consideravelmente maiores.

Pode-se observar na Tabela 2 que a tensão mínima de alimentação associada ao ganho de alimentação da fonte é um parâmetro de grande relevância, sendo os circuitos considerados muito sensíveis à alimentação. Observou-se que os circuitos que utilizam amplificadores operacionais como amplificador de trans-impedância são os mais estáveis nesse sentido, como no caso dos circuitos 2 e 3. Este resultado já era esperado, devido ao alto PSRR (Power Supply Rejection Ratio) desses amplificadores.

Tabela 1 – Associação dos circuitos aos seus respectivos nomes

Nº do circuito	Nome do circuito receptor
1	TIA com realimentação do erro
2	Polarização reversa do fotodiodo
3	Fotodiodo sem polarização
4	Circuito transistorizado 1
5	Circuito transistorizado 2

Tabela 2 – Resultados obtidos através da simulação utilizando o software Multisim®

Circuito	1	2	3	4	5
Tensão mínima de alimentação(V)	2,88	1,75	2,44	1,58	4,00
Potência média consumida (W)	4,19	4,08	4,08	4,93 m	243,57 m
Tempo de subida (ns)	199	313	543	484	790
Tempo de descida (ns)	79	480	1384	185	178,25
Largura de banda nominal (MHz)	3,75	1,51	0,99	4,28	1,27
Ganho de fonte de alimentação(mV/V)	620,6	104 m	47 m	38,4	23,2

A figura 3 apresenta os esquemáticos utilizados na simulação. O circuito 1 da figura 3a foi idealizado tentando mitigar os efeitos da iluminação ambiente através da realimentação do erro, a desvantagem dele é que a SNR é reduzida devido à presença do transistor de compensação que adiciona ruído térmico diretamente no sinal (AHMED; BERMAK, 2019). O circuito 3, mostrado na figura 3c foi um *front-end* já proposto em outro trabalho (FUADA et al., 2017). O circuito 2, mostrado na figura 3b é uma variação do circuito 3, porém deixando o fotodiodo polarizado reversamente, com objetivo de melhorar a linearidade da resposta, deixando esse bloco mais confiável. Os circuitos 4 e 5, respectivamente nas imagens 3d e 3e são circuitos transistorizados, portanto mais facilmente integráveis, propostos na literatura (SENIOR; JAMRO, 2009).

4.3 Circuito proposto

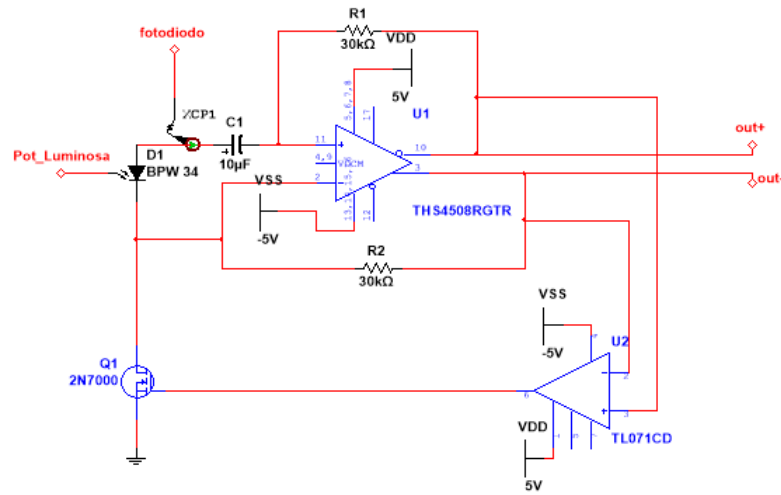
4.3.1 Decisões de projeto

Considerando as condições de idas reduzidas ao laboratório devido à pandemia de COVID-19 optou-se por desconsiderar opções com muitos transistores e sim a utilização de amplificadores operacionais do tipo TL071, por motivos de maior facilidade de implementação e identificação de problemas, além de já ter os componentes disponíveis, o que agilizou os testes e a implementação, deixando entre o circuito 2 e o circuito 3. O circuito escolhido foi o circuito 2, que mostrou na simulação uma melhora na resposta de fato, tendo como destaque a melhora no tempo de descida do circuito, como pode ser visto na tabela 2.

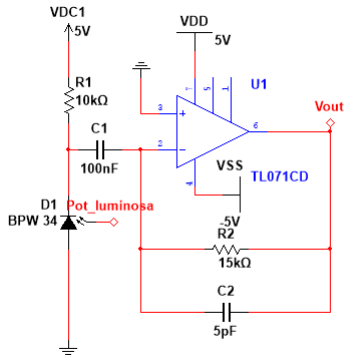
Inicialmente a intenção era projetar o receptor como no diagrama da figura 2, contudo, ao acrescentar elementos de ganho com amplificadores operacionais principalmente na prática, mas também em simulação, foram observados efeitos indesejáveis como perda de banda efetiva e algumas não linearidades. Dessa forma, o circuito 2 foi modificado para ser não apenas uma pre-amplificação, mas uma amplificação efetiva do sinal, trocando o resistor de realimentação por um resistor de 200 k Ω . Essa modificação não é feita normalmente pois a banda é radicalmente reduzida, mas no caso deste trabalho atende os objetivos de taxas de transmissão, tendo o benefício de uma maior sensibilidade com relação à potência luminosa recebida. Apesar de não haver um estágio de canal livre, o capacitor no circuito 2 já garante uma filtragem passa-baixas que atende os requisitos necessários para o sistema VLC.

Além disso, para simplificar o teste, com o número de fontes disponíveis, foi ligada uma fonte DC (*Direct Current*) de 2 V para polarizar reversamente o fotodiodo. O circuito do *front-end* está apresentado na figura 4.

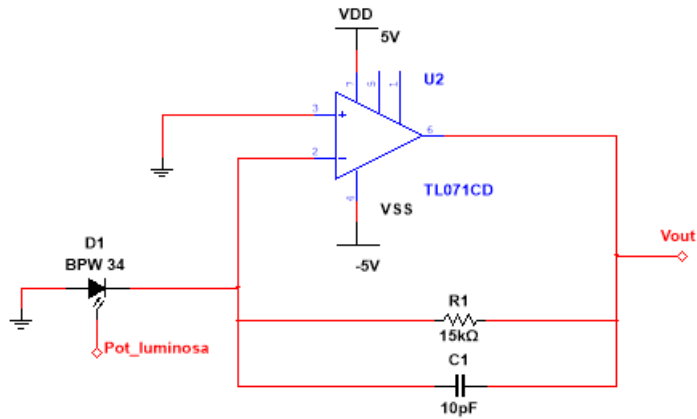
O módulo de recuperação de dados foi projetado visando o processamento do sinal



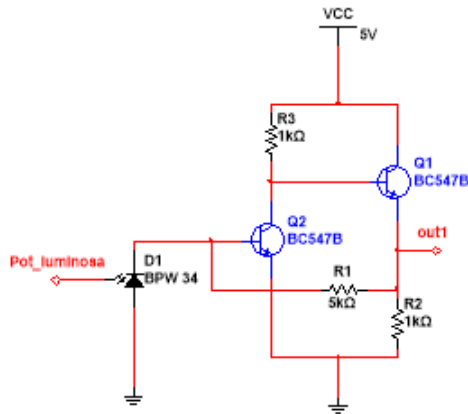
(a) Circuito 1: TIA com realimentação do erro



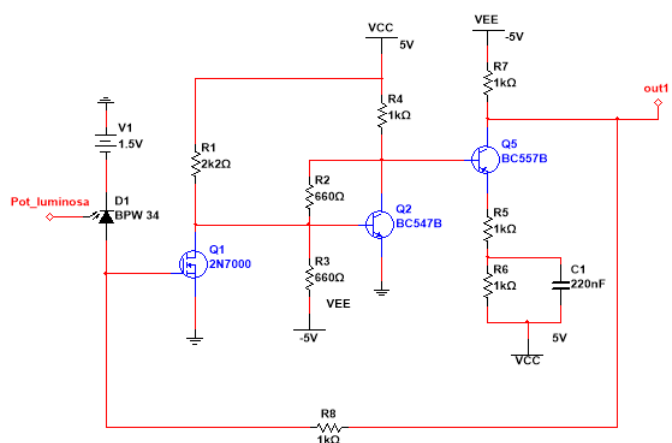
(b) Circuito 2: Polarização reversa do fotodiodo.



(c) Circuito 3: Sem polarização no fotodiodo.



(d) Circuito 4: Circuito transistorizado 1



(e) Circuito 5: Circuito transistorizado 2

Figura 3 – Esquemático dos circuitos do *Front-end*. Fonte: elaboração própria.

elétrico através da placa de prototipagem Arduino®, sendo necessário adequar o sinal à tensão aceita por ele na entrada digital, que é de 0 V a 5 V. O *front-end* possui comportamento inversor e como explicado anteriormente o uso de um amplificador inversor não se

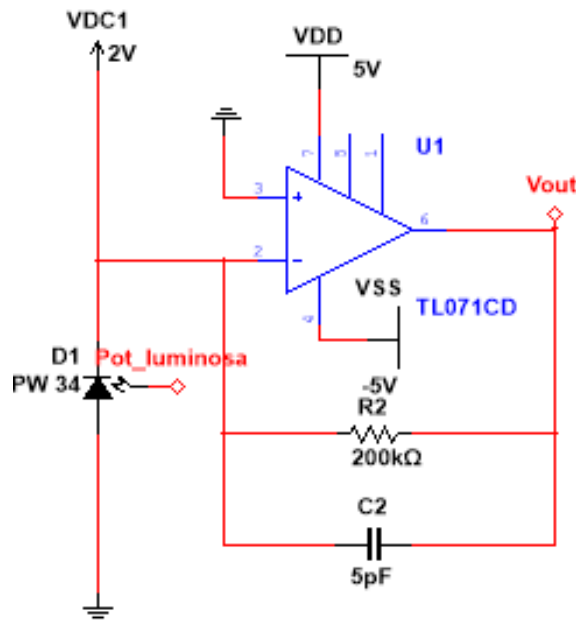


Figura 4 – Esquemático do *Front-end* do receptor. Elaboração própria.

mostrou uma alternativa viável, então foi decidido o uso de um circuito que somasse um sinal DC variável de modo a deixar o sinal sempre maior que 0. Dando, então, flexibilidade ao receptor para ser utilizado tanto em curtas distâncias como para distâncias um pouco maiores.

A fim de obter tal comportamento, no módulo de recuperação de dados, mostrado na figura 5, primeiramente foi utilizado um circuito grampeador ativo, esquematizado na figura 5a. O grampeador ativo soma um valor variável ao sinal, de modo que mantém a amplitude do sinal anterior, mas começando do valor de referência inserido na entrada inversora do amplificador operacional do circuito. Como a tensão de referência é 0 V, a saída do grampeador começa em 0 V.

Dessa forma, o sinal nunca é negativo na entrada do Arduino®, contudo não há limite para essa tensão, podendo superar os 5 V permitidos para operação segura, sem queima de equipamento. Além disso, o sinal de saída do grampeador está com os sinais lógicos contrários aos de entrada e é desejável uma saída em fase com a entrada. A fim de obter essa saída desejada foi implementado um circuito decisor, utilizando a topologia de circuito saturador, como mostrado na figura 5b.

No circuito decisor o transistor Q_1 entra em saturação se receber um sinal positivo do circuito grampeador. Isso faz com que a tensão V_{BE} fique por volta de 0,2 V, o que não é o suficiente para o Zehner D_3 conduza, produzindo 0,2 V na saída. Quando recebe 0 V, o transistor Q_1 entra em corte, fazendo com que o Zehner D_3 fique polarizado reversamente, levando ao valor nominal de 4,8 V na saída do decisor. Esse comportamento digital é muito desejável para facilitar na implementação do tratamento desse sinal do Arduino.

Com isso o funcionamento da leitura do sinal no Arduino seria a mesma, independentemente da distância, desde que ela se mantenha dentro do intervalo em que o resto do circuito responde.

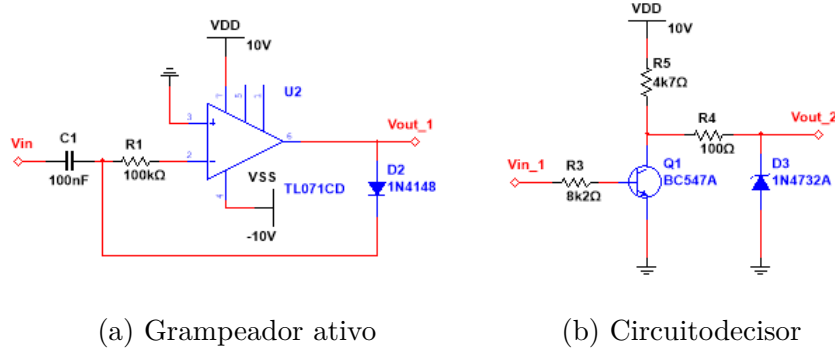


Figura 5 – Esquemático dos circuitos que compõe módulo de recuperação de dados do receptor. Fonte: elaboração própria.

4.3.2 Resultados de simulação

Nesta seção será apresentado o resumo dos resultados de simulação do circuito proposto, o qual foi apresentado na seção anterior. A partir de então sempre que um sinal de corrente for apresentado, ele foi convertido pela razão de 1 V/mA devido a melhor visualização resultante no simulador.

4.3.2.1 Módulo Front-end

O circuito da figura 4 correspondente ao *Front-end* do receptor foi analisado no tempo, em frequência e o seu comportamento estático. Nos próximos tópicos esses resultados serão apresentados.

Análise no tempo

O circuito foi simulado no tempo com uma onda quadrada, com frequência de 1 kHz, sendo equivalente a uma taxa de transmissão de 2 kbps, com distância de transmissão de 15 cm entre LED e fotodiodo - valor obtido pelo simulador óptico que será abordado no capítulo 5. O gráfico da figura 6 mostra em vermelho a corrente do fotodiodo com fator de escala de 100x e a tensão de saída do *Front-end* em verde.

O fotodiodo capta uma corrente com amplitude de 21,7 μ A, gerando uma amplitude de 4,34 V na saída do *Front-end*. O circuito é inversor e não cria nenhum tipo de distorção no sinal para a taxa recebida.

A figura 7 mostra que o sinal de fato é pouco distorcido, sendo os valores calculados de *slew rate* de subida igual a 0,836 V/ μ s e o *slew rate* de descida é 0,954 V/ μ s.

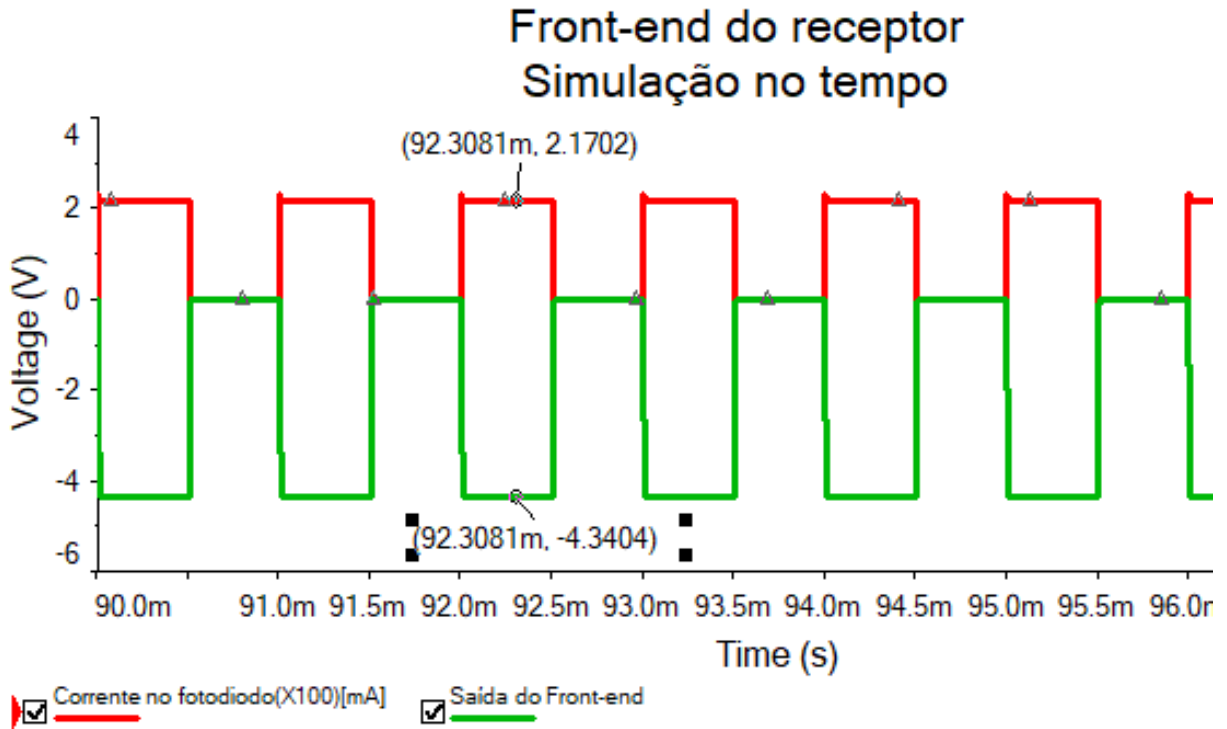


Figura 6 – Simulação no tempo do *Front-end* do receptor. Fonte: elaboração própria.

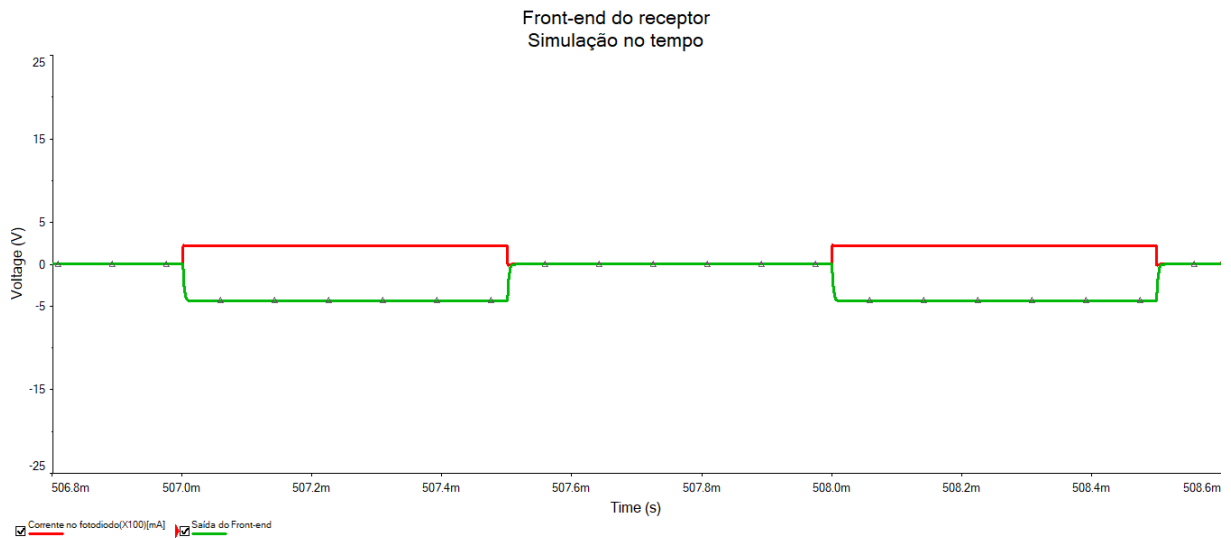


Figura 7 – Simulação no tempo do *Front-end* do receptor com foco na subida e na descida do sinal. Fonte: elaboração própria.

- Análise em frequência

A figura 8 é a resposta em frequência do circuito do *Front-end*, sendo obtido pela razão entre a tensão de saída do *Front-end* pela corrente do fotodiodo.

À partir dessa resposta se obtém a frequência de corte como 80 kHz, a inclinação na região de transição de -27,93 dB/dec, sendo aproximadamente uma resposta de primeira ordem, o ganho na faixa de passagem é de 200 kV/mA. Observa-se também uma resposta

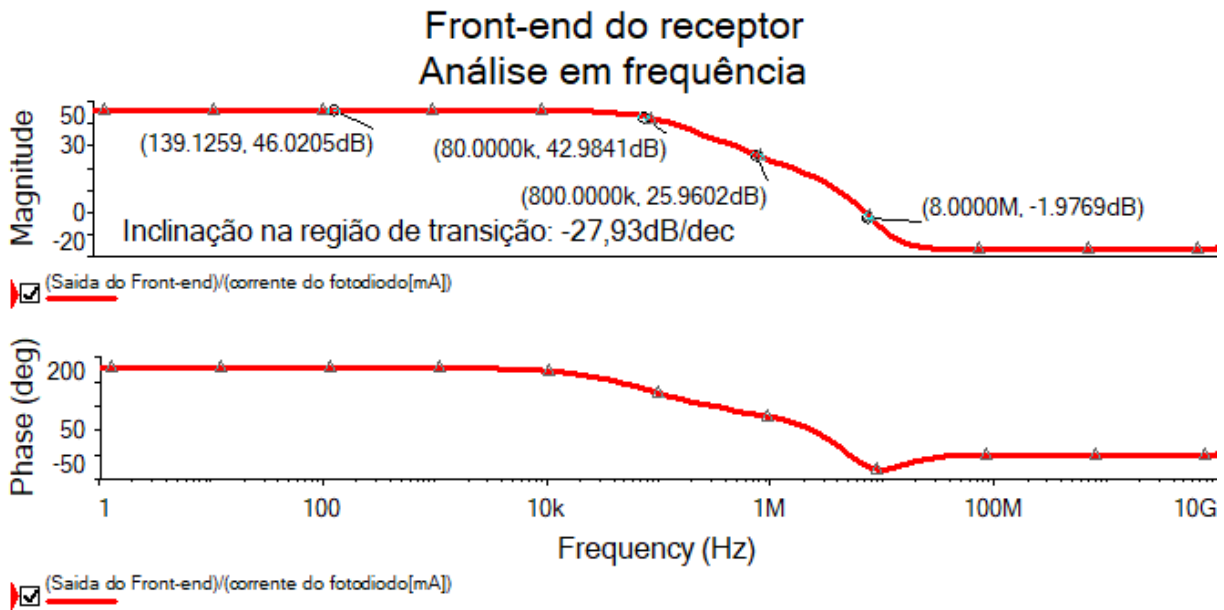


Figura 8 – Simulação na frequência do *Front-end* do receptor. Fonte: elaboração própria.

linear da fase na faixa de passagem. A responsividade do fotodiodo para a frequência do LED utilizada é de 0,3570 A/W - valor calculado pelo simulador óptico que será abordado no capítulo 5. Sendo assim, o ganho por potência luminosa recebida no fotodiodo é de 75 V/mW.

Como esperado, um maior ganho nesse estágio limita bastante a largura de banda do circuito, como o interesse deste trabalho são taxas de transmissão por volta de 2 kbps, a resposta em frequência é muito satisfatória.

Análise estática

Mediu-se a saída do circuito para valores de corrente DC passando pelo fotodiodo variando de $-10 \mu\text{A}$ a $+50 \mu\text{A}$. O resultado dessa simulação está na figura 9.

A resposta é linear mesmo para valores negativos até por volta de $40 \mu\text{A}$. Como a corrente no fotodiodo à distância de 15 cm está por volta de $20 \mu\text{A}$, o sistema possui um ganho linear de 200 kV/mA ao longo de toda a faixa de operação de interesse.

4.3.2.2 Módulo Recuperação de dados

O circuito de recuperação de dados, composto pelo circuito da figura 5a ligado ao circuito da figura 5b foi analisado no tempo, em frequência e o seu comportamento estático. Nos próximos tópicos esses resultados serão apresentados.

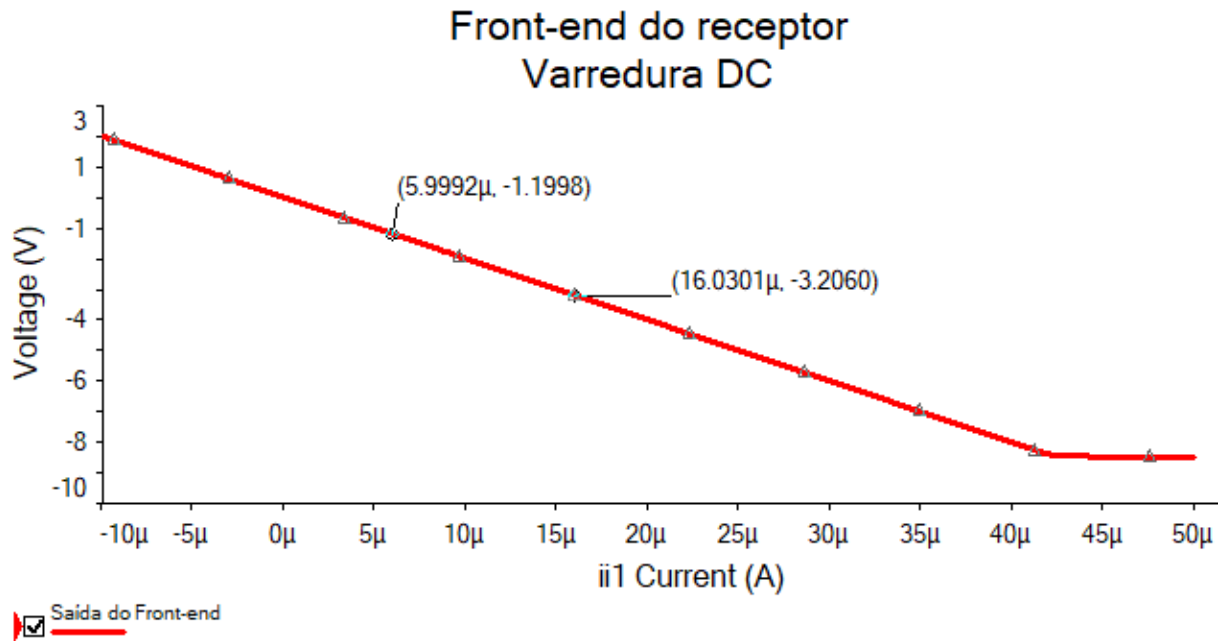


Figura 9 – Varredura DC da corrente no fotodiodo para análise da saída do *Front-end* do receptor. Fonte: elaboração própria.

Análise no tempo

O circuito de recuperação de dados foi simulado no tempo com um sinal de onda quadrada correspondente à saída do circuito do *Front-end* para uma distância de 15 cm, com frequência de 1 kHz, correspondente a uma taxa de 2 kbps. Isso foi feito a fim de analisar sua resposta independentemente de qualquer tipo de efeito de carga do estágio anterior que possa interferir na análise. A figura 10 mostra o resultado.

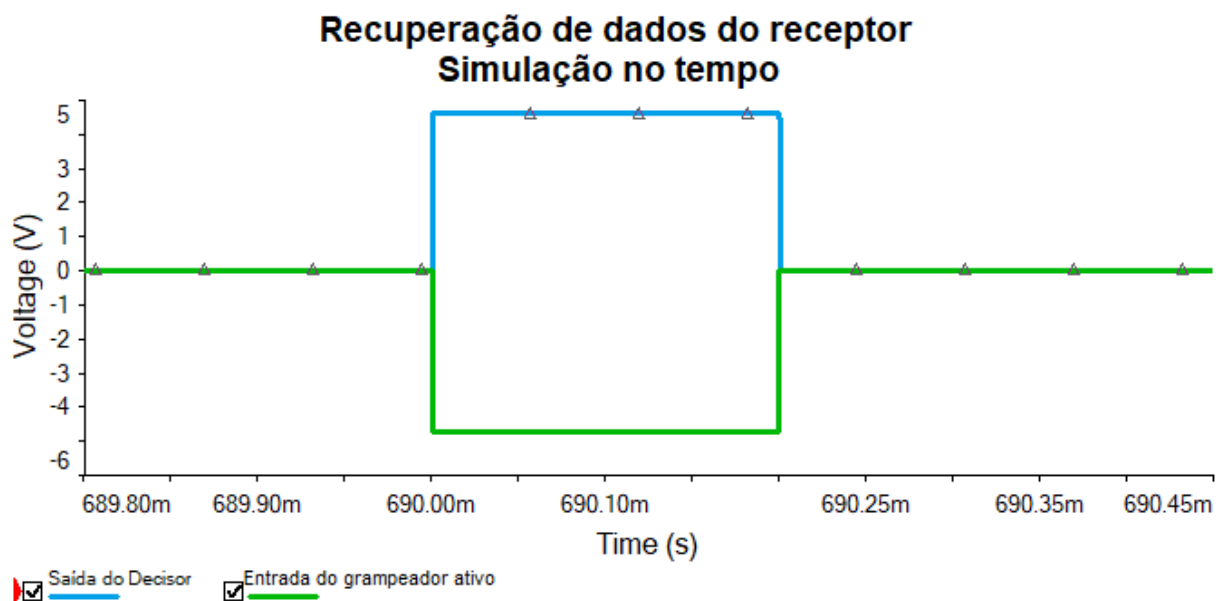


Figura 10 – Resposta no tempo do circuito de Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria.

À partir da simulação se obtém $51,9 \text{ V}/\mu\text{s}$ de *slew rate* de subida e $124,0 \text{ V}/\mu\text{s}$ de *slew rate* de descida. Observa-se um comportamento inversor e digital, como esperado, para o ponto de operação.

Análise em frequência

O funcionamento do circuito de recuperação de dados é não-linear digital, portanto a simulação em frequência deve ser feita para o ponto de operação específico, sendo assim aplicou-se um sinal senoidal com amplitude muito pequena em torno da mesma tensão de referência da análise no tempo a fim de se obter o perfil do comportamento em frequência do módulo. A saída do decisor, que é a saída do módulo de recuperação de dados está representado em azul e a entrada da recuperação de dados, que é a entrada do grameador ativo, está representada em verde.

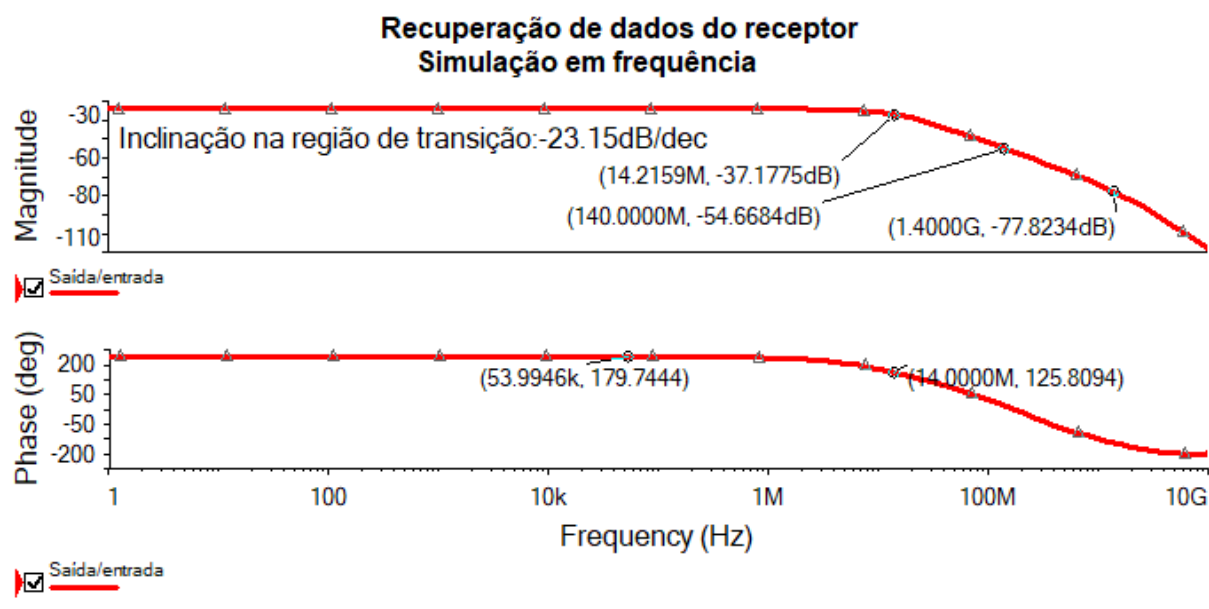


Figura 11 – Análise em frequência no ponto de operação do circuito de Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria

A figura 11 mostra o perfil da resposta em frequência para o ponto de operação. Devido ao comportamento não-linear, o ganho na faixa de passagem não tem muito significado quantitativo, mas a frequência de corte e a inclinação na região de transição são úteis para entender a resposta do circuito, sendo o corte em 14 MHz e a inclinação de $-23,15 \text{ dB/dec}$, o que corresponde a um sistema de primeira ordem.

Análise estática

Mediu-se a saída do circuito para valores de tensão DC na entrada do módulo variando de -10 V a $+2 \text{ V}$, o resultado da simulação está exibido na figura 12.

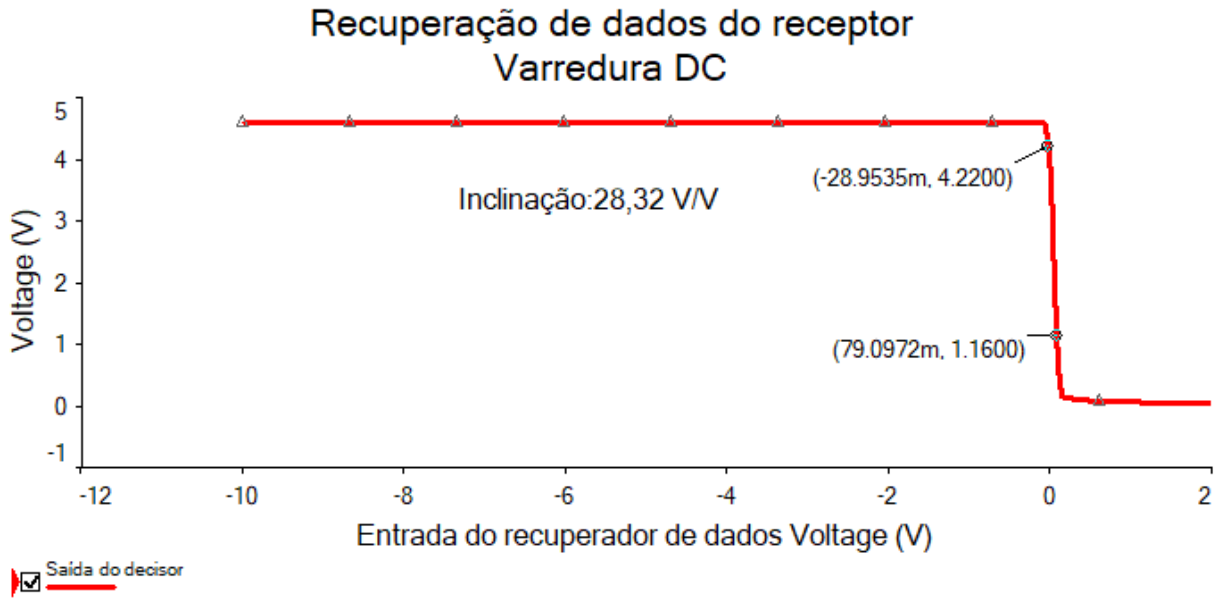


Figura 12 – Resposta da saída do receptor através da varredura estática da entrada do módulo de recuperação de dados, Fonte: elaboração própria.

O comportamento é de fato digital, tendo inclinação na faixa de transição de 28,32 V/V em torno de 0 V, como desejado. O sinal de saída é digital, fixado em 4,6 V para sinal de bit 1 e 20 mV para sinal de bit 0.

4.3.2.3 Circuito receptor completo

O circuito do receptor, formado pela união dos dois módulos anteriores, simulados nas seções 4.3.2.1 e 4.3.2.2, será analisado no tempo, na frequência e estaticamente.

Análise no tempo

Ao conectar os dois módulos é esperado que a saída total se mantenha igual ou muito parecida com a simulação feita para o módulo de recuperação de dados isolada. A figura 13 mostra esse resultado com a mesma entrada de referência na corrente do fotodiodo utilizada na seção 4.3.2.1. A entrada, corrente do fotodiodo, está representada em vermelho multiplicada por um fator de escala de 100, a saída do front-end está apresentada em verde e a saída do decisor, consequentemente do receptor, está representada em azul.

É possível observar que a resposta no ponto de operação é similar à observada na seção 4.3.2.2, não ocorrendo grandes variações. O circuito total é não inversor e responde digitalmente com sinal de 4,6 V para sinal lógico alto e com 26 mV para sinal lógico baixo.

Até este momento os testes no tempo foram feitos utilizando uma onda quadrada para emular o comportamento de transmissão de dados, entretanto, ela serve para aspectos construtivos apenas e não representa fielmente o comportamento em uma verdadeira

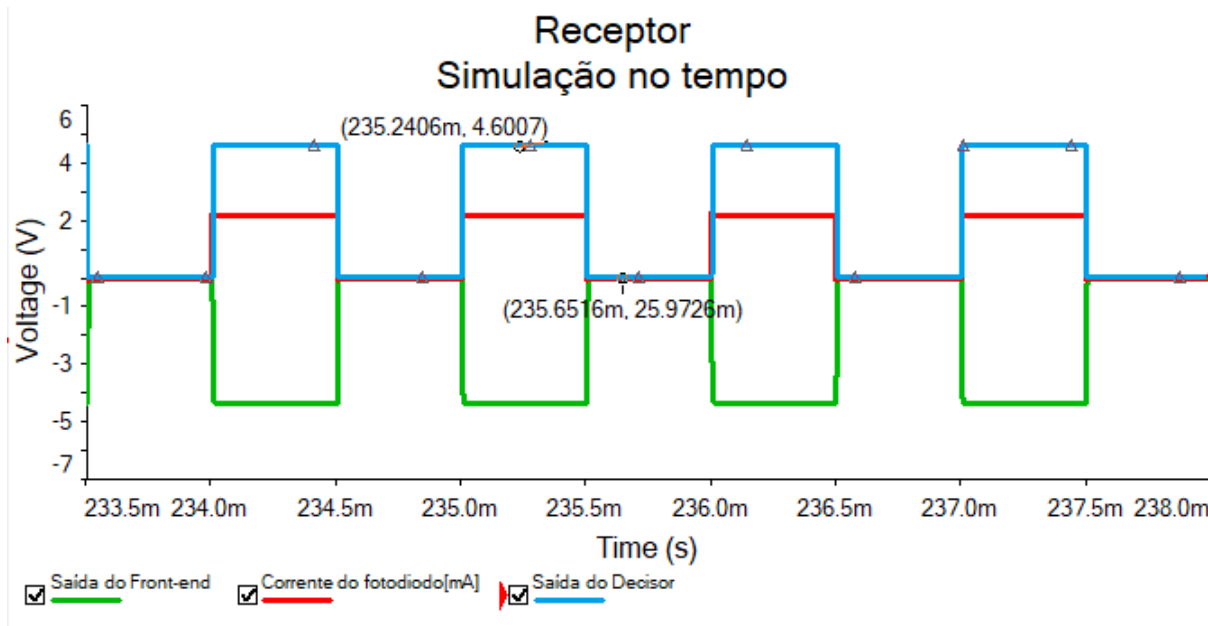


Figura 13 – Simulação no tempo de todo o receptor, mostrando a saída intermediária do Front-end. Fonte: elaboração própria.

transmissão. Isso porque a onda quadrada não transmite informação. Portanto, foi gerada uma sequência de bits pseudoaleatórios com nível lógico alto com o mesmo valores de referência da seção 4.3.2.1. O resultado dessa simulação é evidenciado na figura 14, onde a corrente no fotodiodo é exibida em verde, aumentada por um fator de 100 vezes para facilitar visualização; a tensão de saída total do receptor é mostrada em vermelho.

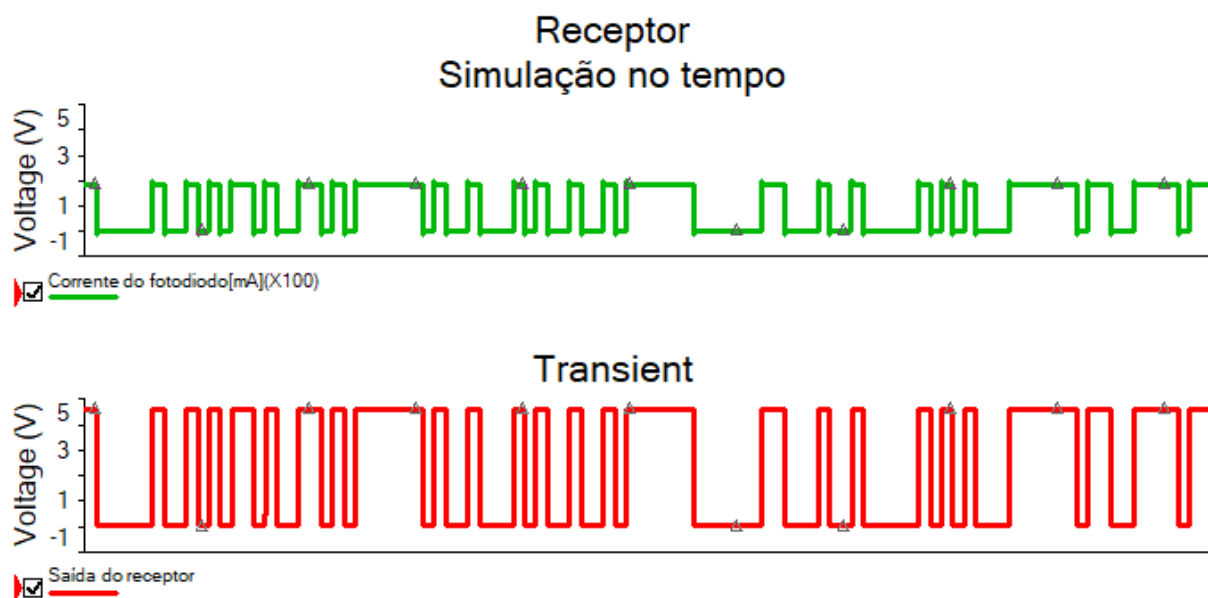


Figura 14 – Resposta simulada para entrada de Bits pseudoaleatórios. Fonte: elaboração própria.

Esse resultado representa com maior fidelidade o comportamento do receptor recebendo dados a uma taxa de 2 kbps. Nota-se que o sinal de saída está em fase com a

entrada, sem perda de informação, conseguindo dar um caráter mais digital para o sinal, removendo os *spikes* na fotocorrente gerada ao ocorrer transições de nível, além do uso de grande parte da excursão da porta de entrada do Arduino®.

A resistência de carga no fotodiodo foi medida e o valor encontrado foi de $1\text{ G}\Omega$, resultado que indica uma redução grande na largura de banda.

Análise em frequência

Devido ao comportamento não-linear do módulo de recuperação de dados a análise em frequência não pôde ser feita diretamente pelo simulador, contudo a partir dos resultados individuais, obtidos nas seções 4.3.2.2 e 4.3.2.1, pode-se concluir que é o *Front-end* que limita a largura de banda e o *slew rate* do istema. Sendo assim, a frequência de corte do sistema é de 80 kHz e o *slew rate* de subida igual a $0,836\text{ V}/\mu\text{s}$ e o *slew rate* de descida é $0,954\text{ V}/\mu\text{s}$.

Análise estática

A análise estática do sistema não é possível diretamente por conta de erros de convergência do simulador, porém, como o sinal do *front-end* é sempre negativo, o grampador sempre elevará o nível lógico baixo para 0 V e mantém a amplitude do sinal, assim a curva do receptor terá um perfil digital igual ao realizado na seção 4.3.2.2, mostrado na figura 12.

5 Simulador de canal

Esta seção aborda o desenvolvimento de um simulador óptico que considera uma única fonte luminosa que obedece à lei de Lambert e um fotodiodo como receptor, no espaço livre, sem reflexões ou obstáculos, na chamada transmissão de visada direta. A figura 15 ilustra o *set-up* simulado. O LED no caso deste trabalho considerado é de 65mW vermelho, sendo a fonte luminosa considerada; o fotodiodo utilizado foi o BPW34, a amplificação e o processamento do sinal já foram abordados no capítulo 4, o recebimento de dados pelo computador com o processamento de dados intermediado pelo Arduino® será abordado posteriormente no capítulo 6. O simulador foi desenvolvido em Python e permite a movimentação do fotodiodo em relação à fonte luminosa tanto em distância quanto em ângulo de incidência.

O simulador foi projetado segundo dois tipos de orientação. O primeiro consiste em receber valores específicos para obter a resposta de um determinado ponto de operação. O segundo recebe do simulador do transmissor resultados de potência luminosa a fim de gerar gráficos mostrando o funcionamento do sistema em função de múltiplos parâmetros, sendo o simulador do transmissor projetado pelo outro aluno supracitado que trabalhou no mesmo projeto.

Este capítulo abordará inicialmente o modelo teórico do simulador, como foi feita a implementação, os resultados obtidos, por fim uma comparação com a literatura.

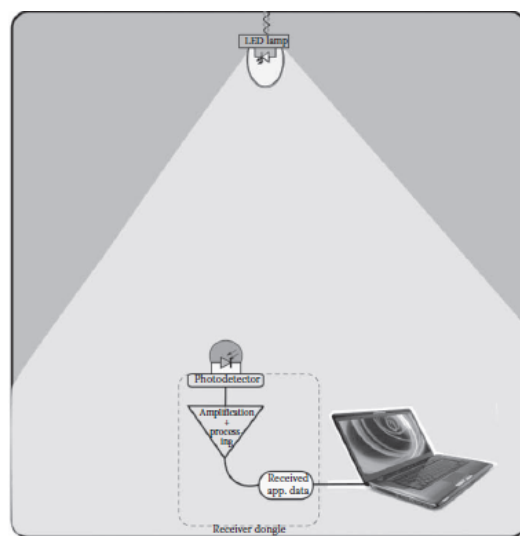


Figura 15 – *Set-up indoor* modelado. Fonte: (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2019)

5.1 Modelo teórico

Os cálculos do simulador do receptor foram baseados no modelo demonstrado e apresentado na literatura (SENIOR; JAMRO, 2009). A responsividade é o elemento que, comumente, é utilizado para se caracterizar um fotodiodo. Com base na eficiência quântica, definida pela equação 5.1, a responsividade do fotodiodo é calculada pela equação 5.2,

$$\eta = \frac{N_c}{N_i}, \quad (5.1)$$

$$R = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad (5.2)$$

onde η é a eficiência quântica; o número de elétrons coletados é N_c ; o número de fótons incidentes é N_i ; R é a responsividade do fotodiodo; e é a carga fundamental do elétron; λ é o comprimento de onda da luz recebida; h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz no vácuo

Ao incidir luz, o fotodiodo irá gerar uma corrente, a fotocorrente, estimada pela equação 5.3,

$$I_p = P_R \cdot R, \quad (5.3)$$

onde I_p é a fotocorrente, P_R é a potência de luz recebida, sendo esse o sinal elétrico que é tratado pelo circuito receptor no capítulo 4.

Para analisar a qualidade do sinal recebido no fotodiodo é necessário estimar a SNR e a BER do receptor. Para isso há dois ruídos que devem ser considerados, o ruído *shot* e o ruído térmico. O ruído térmico é associado à agitação dos elétrons de maneira aleatória, sendo modelado como ruído branco, com densidade espectral infinita, em materiais condutores que aumenta conforme a temperatura é aumentada, gerando fluxo de corrente mesmo que não exista tensão aplicada. O ruído *shot* ocorre devido à corrente no fotodiodo ser formada por um fluxo de elétrons gerados em instantes aleatórios, sendo modelado como um processo aleatório estacionário.

A variância (potência) de ruído térmico é dada pela equação 5.4. Por esse trabalho estar interessado em fotodiodos do tipo P-I-N, o ruído térmico é dominante em relação ao ruído *shot*, sendo assim a SNR pode ser estimada pela equação 5.5. A partir da SNR, calcula-se a função Q, estimada pela equação 5.6 de onde se estima a BER pela equação 5.7

$$\sigma_T^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T_e \cdot B \cdot F_n}{R_L}, \quad (5.4)$$

$$SNR = \frac{(I_p)^2}{\sigma_T^2}, \quad (5.5)$$

$$Q = \sqrt{SNR}, \quad (5.6)$$

$$BER = \left(\frac{e^{\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot Q}} \right), \quad (5.7)$$

onde k é a constante de Boltzmann; T_e é a temperatura absoluta do fotodiodo; B é a largura de banda do receptor; F_n é a figura de ruído do receptor e R_L é a resistência de carga no fotodiodo.

A tabela 3 resume os valores de referência utilizados. Na tabela 3a estão expressos valores típicos utilizados em literatura, enquanto a tabela 3b apresenta os valores obtidos da simulação do circuito na seção 4.

Tabela 3 – Valores de referência utilizados no simulador.

(a)		(b)	
η	0,75	R_L	1 $G\Omega$
T_e	293 K	B	80 kHz
F_n	4 dB		
λ	690 nm		

5.2 Metodologia de simulação

O simulador óptico recebe parâmetros que definem o ponto de operação do sistema, como distância e ângulo. O simulador, então, calcula como deve ser a resposta no fotodiodo e a converte para valores que podem ser diretamente utilizados no simulador de circuitos, gerando a mesma resposta, recurso utilizado no capítulo 4 para o projeto do circuito receptor.

A caracterização do receptor foi feita analisando a SNR e a BER em função da potência recebida, variando distância e ângulo. A SNR foi apresentada em dB e a BER foi exibida em escala logarítmica.

Para a observação dos efeitos de variação da distância foram arbitrados valores de 5 cm a 60 cm, com ângulo de 0°, esses valores eram parâmetros de entrada para o simulador do transmissor, que devolve a potência recebida naquele ponto, permitindo então a obtenção da SNR e da BER. Os valores de potência para 5 cm e 60 cm foram obtidos através da simulação do ponto de operação, sendo respectivamente 90 μW e 622 nW, valores utilizados para observar o efeito de variação da SNR e da BER com relação à potência recebida de modo análogo ao realizado para a distância.. A análise do ângulo

foi similar à distância, com a distância constante em 15 cm e o ângulo arbitrado de -15° a $+15^\circ$.

A fim de observar o efeito conjunto de distância e ângulo na BER e na SNR foi definido uma sala cúbica, tendo o LED no ponto central do teto, orientado na direção ortogonal ao plano do teto, como lâmpadas costumeiramente são posicionadas em casas, também ilustrado no modelo da figura 15. Foram calculados valores de BER e SNR para cada ponto de um plano XY paralelo ao chão dessa sala a uma distância de 15 cm em relação ao LED. Tendo o LED como referência espacial foi gerado o perfil de BER e SNR ao longo desse plano XY variando X e Y de -25 cm a +25 cm.

A fim de garantir correto funcionamento no desenvolvimento do software, esse foi desenvolvido orientado a testes, com testes unitários que sempre validam as respostas sabidamente certas com base em parâmetros de teste. O código pode ser obtido no Repositório Git ([MORROW BRUCE E SANTOS, 2021b](#)).

5.3 Resultados de simulação

A figura 16 reúne os resultados de simulação de BER e SNR em função de potência recebida, distância e ângulo segundo os parâmetros explanados nas seções 5.1 e 5.2. Os gráficos estão organizados de modo a ter todos os resultados de SNR à esquerda em azul e da BER à direita em vermelho, com gráficos avaliando o mesmo parâmetro, respectivamente potência recebida, distância e ângulo.

Os resultados de SNR e de BER apresentam comportamento inverso e com o mesmo perfil, o que era esperado devido à aproximação feita pela equação 5.7. Qualitativamente isso é muito coerente, uma vez que se um sinal com maior qualidade é recebido, respectivo a uma alta SNR, existe uma menor probabilidade de erro de bits, o que equivale a uma menor BER.

Primeiramente é possível notar que os resultados de SNR e BER em função da potência, respectivamente mostrados nas figuras 16a e 16b, e os em função da distância, figuras 16c e 16d, aparentam ter uma relação entre si fazendo com que a derivada segunda dos gráficos seja maior em módulo. O que de fato acontece, visto que a potência diminui com o quadrado da distância.

Um resultado que vale a pena ressaltar é que a SNR diminui rapidamente no início, mas depois de 10 cm essa redução é desacelerada. O que indica ser possível funcionamento do receptor a distâncias maiores que a projetada, de 15 cm.

As figuras 16e e 16f mostram uma diminuição da SNR e piora da BER mais aguda em relação aos outros parâmetros, indicando uma região de funcionamento angular do circuito reduzida.

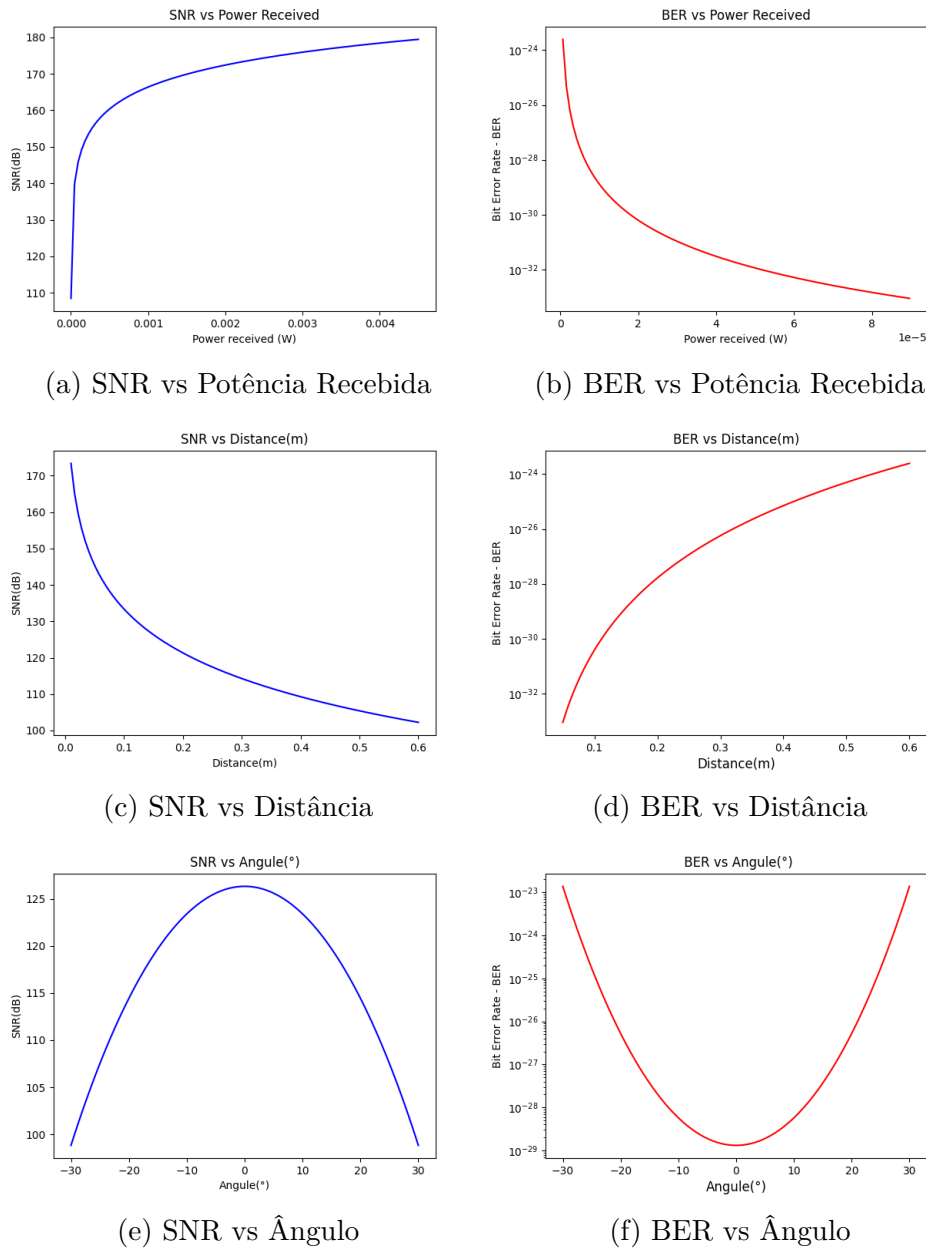
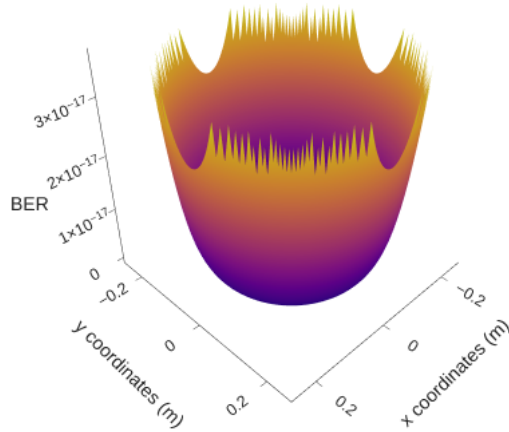


Figura 16 – Resultados gráficos 2D de SNR e BER obtidos do simulador óptico. Fonte: elaboração própria.

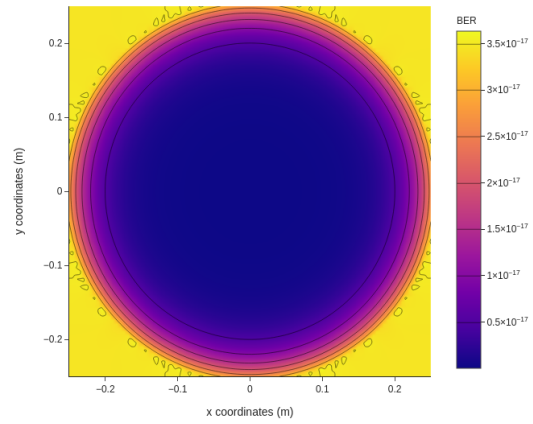
A figura 17 apresenta como a BER varia no plano paralelo ao teto definido pela altura de 15 cm. A figura 17a mostra a superfície gerada ao se colocar a BER no eixo Z, percorrendo o plano XY no espaço, essa superfície parece manter um centro com valores iguais e elevações abruptas no erro ao se aproximar das bordas, o que fica mais claro na figura 17b, mostrando esse comportamento através da curva de calor da superfície.

A figura 18 apresenta como a SNR varia no mesmo plano analisado para a BER, a figura 18a mostra a vista isométrica gerada ao se colocar a SNR no eixo Z, percorrendo o plano XY no espaço, essa superfície tem uma máxima SNR no centro, que é justamente onde o LED e o fotodiodo estão alinhados, caindo então linearmente, o que fica mais claro

na figura 18b, através da curva de calor da superfície.

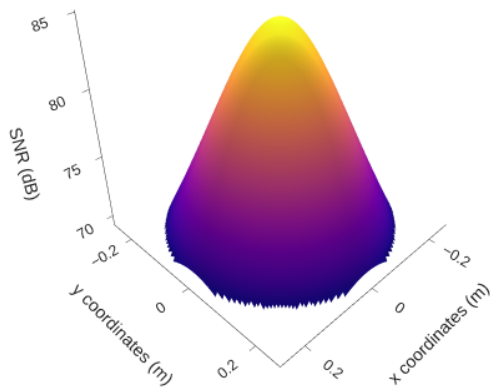


(a) Visão isométrica da BER no plano paralelo ao teto

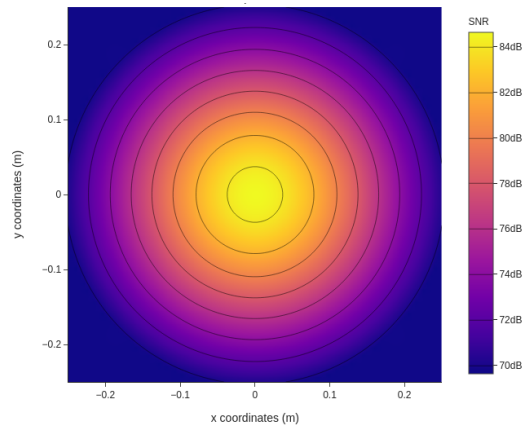


(b) BER planificada em curva de calor

Figura 17 – Resultados com visualização 3D para o perfil BER no plano ortogonal à fonte luminosa, com distância de 15 cm. Fonte: elaboração própria.



(a) Visão isométrica da SNR no plano paralelo ao teto



(b) SNR planificada em curva de calor

Figura 18 – Resultados com visualização 3D para o perfil SNR no plano ortogonal à fonte luminosa, com distância de 15 cm. Fonte: elaboração própria.

6 Testes laboratoriais

Este capítulo aborda todo o aspecto laboratorial do trabalho. Será apresentado primeiramente o *set-up* utilizado, em seguida a metodologia dos testes, então os resultados obtidos.

6.1 Set-up experimental

Os experimentos em laboratório foram todos realizados na sala escura do laboratório de Óptoeletrônica e Microtecnologias Aplicadas (OptMA), na UFMG. A Figura 19 mostra a montagem para os testes. Foram utilizadas três fontes DC para alimentação tanto do receptor quanto do transmissor; O circuito foi montado em *protoboard*; um gerador de sinais foi utilizado para criar a informação a ser enviada pelo transmissor; um Osciloscópio e um multímetro digital foram utilizados para medições de sinais elétricos no circuito.

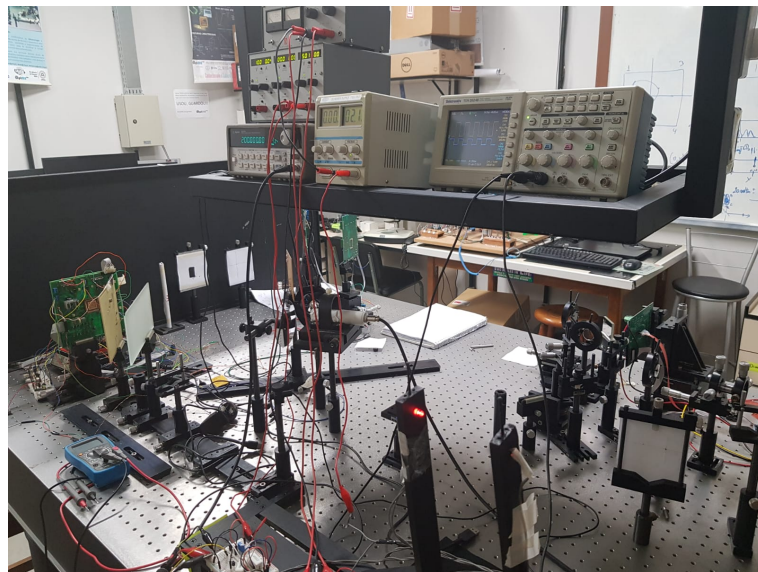


Figura 19 – *Set-up* experimental na sala escura. Fonte: elaboração própria.

Para medidas padronizadas e com certo grau de confiabilidade foi construído uma estação de testes em madeira Pinus e de Eucalipto. A estrutura foi pintada de preto fosco com tinta spray a fim de evitar reflexões. O LED e o Fotodiodo foram fixados na altura de 30cm, a fim de ficar distante da mesa a ponto de reflexões nela serem desprezíveis para as medidas, utilizando fios de par trançado para conectar o circuito a estruturas móveis a fim de permitir medidas com variação na distância e no ângulo.

Para a medição com variação de distâncias foi utilizada uma trena acoplada à estação, indicando a distância entre o LED e o fotodiodo, como pode ser visto na figura 20. A fim de realizar medições com variação de ângulo foi fixada por meio de parafusos estruturas iguais que permitem a movimentação angular, sendo adicionado um transferidor no LED para aferição do ângulo, como foi destacado na figura 21.



Figura 20 – Mecanismo desenvolvido para testes com variação da distância entre transmissor e receptor. Fonte: elaboração própria.

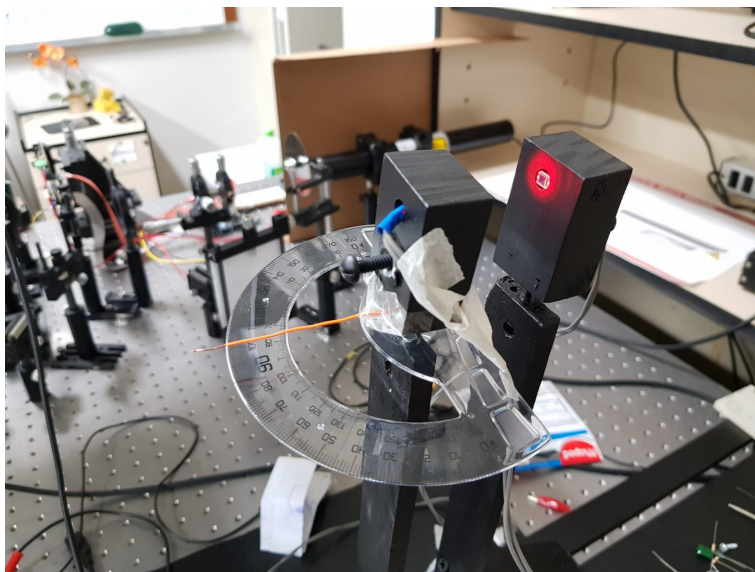


Figura 21 – Mecanismo desenvolvido para testes com variação angular do receptor. Fonte: elaboração própria.

6.2 Metodologia de teste

Para os testes foram utilizadas ondas quadradas de 0 V a 5 V, tendo como padrão a frequência de 1 kHz, alterada apenas na análise da resposta em frequência. Para variações na distância o transmissor foi fixado, movendo-se apenas o fotodiodo, podendo-se alcançar uma distância máxima de 36,6 cm entre LED e fotodiodo. Nas medições de ângulo foi definido 0° para o caso em que LED e fotodiodo estão alinhados, sendo que apenas o LED é girado, sendo a medida de ângulo aferida no transferidor acoplado nele.

Todas as medidas no osciloscópio foram realizadas observando a onda quadrada, na saída do gerador de sinais e a saída do circuito analisado. Essas medidas foram salvas em um arquivo .CSV com todos os pontos de leitura do osciloscópio. Os dados foram processados e os gráficos gerados posteriormente utilizando o software Python. Os códigos utilizados para processar os dados estão todos disponíveis no Repositório Git para os resultados experimentais (MORROW BRUCE E SANTOS, 2021a).

Deste ponto do texto em diante sempre que o símbolo θ aparecer, ele estará indicando o ângulo do LED aferido e D_X será a distância entre LED e fotodiodo.

Primeiramente o *Front-end* foi caracterizado, variando-se a frequência da onda quadrada de 500 Hz a 10kHz, $D_X = 15$ cm e $\theta = 0^\circ$. Então todos os testes na sequência foram realizados com a onda quadrada na frequência de 1 kHz. Foram, então, realizadas medidas variando D_X de 5 a 35 cm com passo de 5 cm. Posteriormente, foram feitas medidas ao variar θ de -15° a $+15^\circ$, com passo de 5° , repetindo essa medição para três diferentes valores de $D_X = (5, 15 \text{ e } 25)$ cm.

Em seguida o *front-end* do circuito receptor foi ligado ao módulo de recuperação de dados, onde foram feitas medidas com $\theta = 0$ para $D_X = (5, 15, 25, 30)$ cm.

Para a aquisição dos dados com o Arduíno®, primeiramente foi testado o código de comunicação ligando diretamente o transmissor e o receptor (*back-to-back*), então o modo de *Debug* foi acionado para observar o que o receptor estava captando em termos de amostras e de bytes pelo monitor serial. O Arduíno®transmissor foi então conectado ao *driver* do LED e o sinal elétrico na saída do circuito receptor foi medido em laboratório, com taxa de transmissão reduzida a fim de ser possível a captura do sinal elétrico do *frame* pelo osciloscópio.

Os resultados desses experimentos e suas análise serão discutidos na próxima seção.

6.3 Resultados experimentais

Esta seção irá apresentar, analisar e discutir os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais referentes ao módulo receptor VLC desenvolvido neste trabalho.

6.3.1 Caracterização do Front-end

A figura 22 exibe a caracterização em frequência do *Front-end*, com $D_X = 15$ cm e $\theta = 0^\circ$, mostrando a amplitude da tensão de saída do módulo.

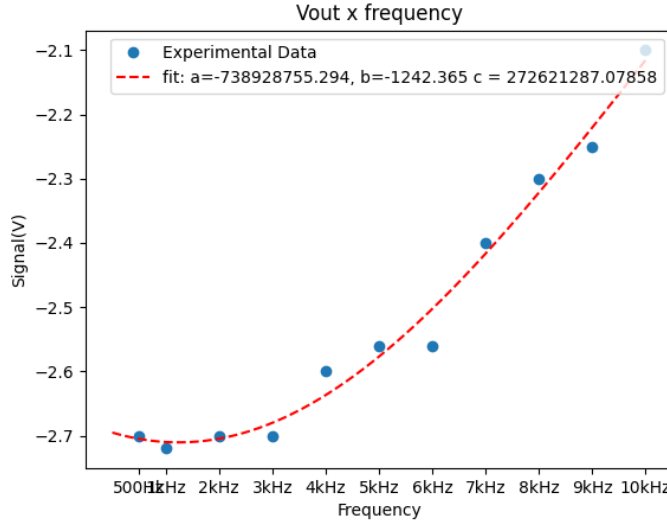


Figura 22 – Amplitude da tensão de saída do receptor em função da frequência da onda quadrada no transmissor, $D_X = 15$ cm, $\theta = 0^\circ$. Fonte: elaboração própria.

Foram feitos fit para a função 6.1,

$$\frac{a}{(f + b)^2 + c}, \quad (6.1)$$

onde os valores de fit não podem ser utilizados para estimar parâmetros, visto que foi utilizado um fit agnóstico a um modelo.

Para se estimar a largura de banda, tentou-se gerar a FFT discreta para a resposta saída do circuito, onde se analisaria a amplitude da fundamental, esse valor seria dividido pelo valor de amplitude conhecido da literatura para a transformada de Fourier para uma onda quadrada. Com isso, o fit deveria apontar o ponto extrapolado de onde a frequência de corte se encontraria. Seria esperado uma largura de banda inferior à simulada, devido a não idealidades no circuito, ao circuito ter sido montado em *protoboard*, que acrescentam capacitâncias parasitas e alta resistência de contato, e ao fio da *protoboard* até o fotodiodo ser consideravelmente grande, o que tem efeito de redução de banda mesmo que tenha sido utilizado um par trançado para tentar mitigar esse efeito.

Não foi conclusiva a análise realizada dessa forma, sendo necessário mais testes para conseguir validar a largura de banda do circuito. Contudo, para efeitos práticos deste trabalho foi possível comprovar o funcionamento ótimo com a frequência de entrada da onda quadrada em 1kHz.

A figura 23 expõe os resultados de teste com variação da distância com $\theta = 0^\circ$, mostrando a amplitude de saída do *front-end*.

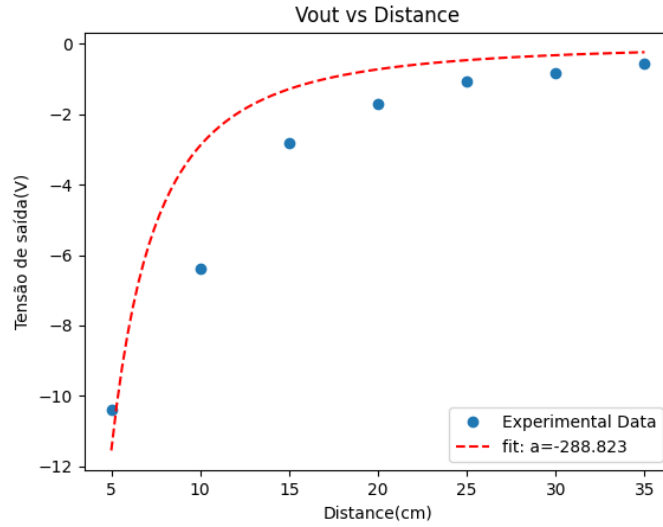


Figura 23 – Amplitude da tensão de saída do receptor em função da distância. Fonte: elaboração própria.

Como a relação entre potência luminosa recebida no fotodiodo e a distância tem um comportamento quadrático e o circuito do *Front-end* possui um comportamento linear, foi feita, então uma regressão segundo a equação 6.2

$$\frac{a}{d^2}, \quad (6.2)$$

onde $a = -288,8$. É possível perceber que os dados tendem a se comportar alinhado com a curva, mostrando de fato esse comportamento inverso quadrático.

A figura 24 registra a resposta com variação de ângulo com distâncias de (5, 15 e 25) cm.

O fit dos dados para cada distância da figura 24 foi feito para a função de uma gaussiana 6.3,

$$A \cdot e^{\frac{-(\theta-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (6.3)$$

sendo os parâmetros de fit obtidos listados na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de Fit para os resultados da figura 24

D_X	5 cm	15 cm	25 cm
a	-11617	-3145	-1002
μ	-0,178	0,148	-2,268
σ	-6,371	-6,085	-6,263

Como esperado, a variação de ângulo mostra o mesmo perfil de variação com amplitudes diferentes. Isso é mais evidenciado com os parâmetros de fit da tabela 4, onde a variou bastante, representando os maiores valores para distâncias menores, como esperado. Já μ e σ são bem próximos nos gráfico, principalmente para $D_X = 15$ cm e

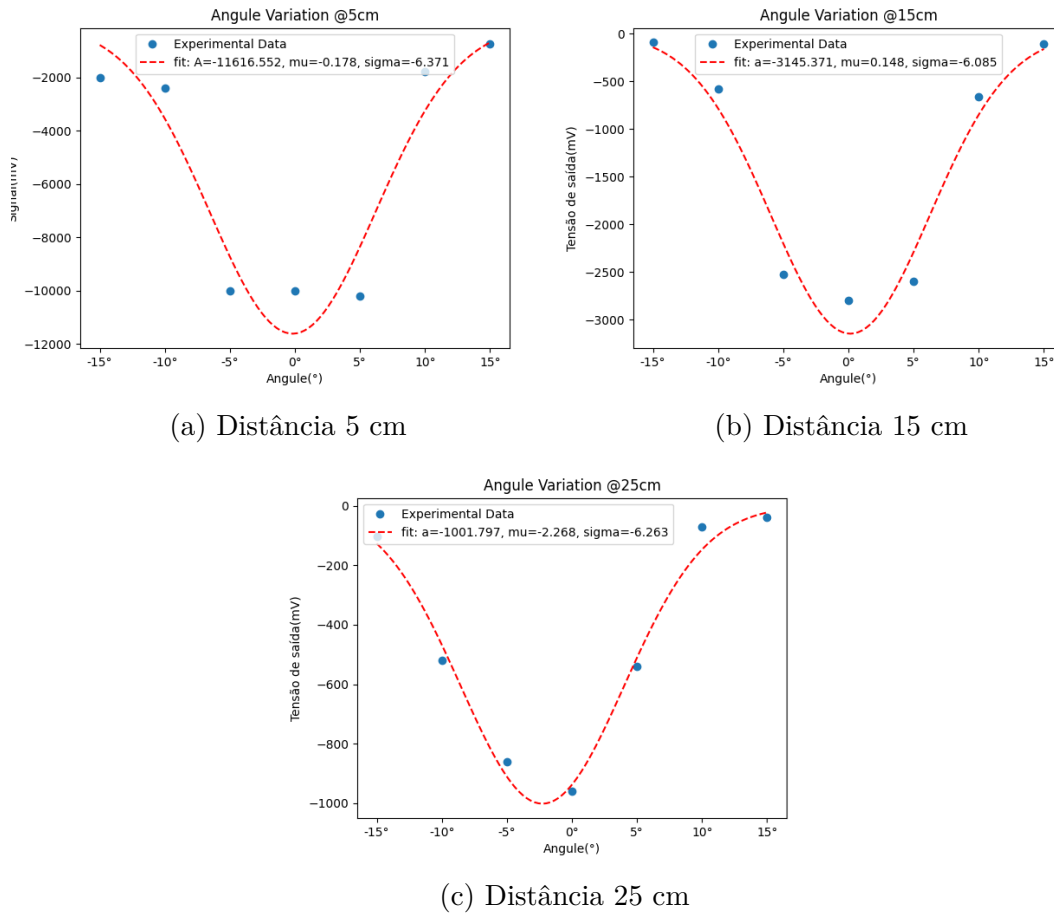


Figura 24 – Amplitude do sinal ao se variar o ângulo em diferentes distâncias. Fonte: elaboração própria.

$D_X = 25$ cm, respectivo às figuras 24a e 24b, tendo uma divergência para $D_X = 25$ cm que pode ser observada pela própria curva, onde há um deslocamento do ponto de maior potência recebida para ângulos negativos, respectivo a figura 24c. Isso pode ser explicado por aspectos práticos, onde pode ter se verificado um leve desalinhamento entre transmissor e receptor durante a medição.

6.3.2 Circuito Receptor

Devido à característica digital do módulo de recuperação de dados, não faz sentido caracterizá-lo da forma realizada para o *Front-end* na subseção 6.3.1. Além disso, é sabido da simulação do capítulo 4 que o *Front-end* é o elemento crítico em termos de largura de banda e é o elemento de ganho de fato. Assim os resultados apresentados nessa seção são focados no comportamento do receptor como sistema, funcionando no tempo.

A figura 25 ilustra o funcionamento no tempo do circuito receptor, sendo apresentada a entrada no transmissor em azul e a saída do receptor em laranja para $D_X = (5, 25 \text{ e } 30)$ cm.

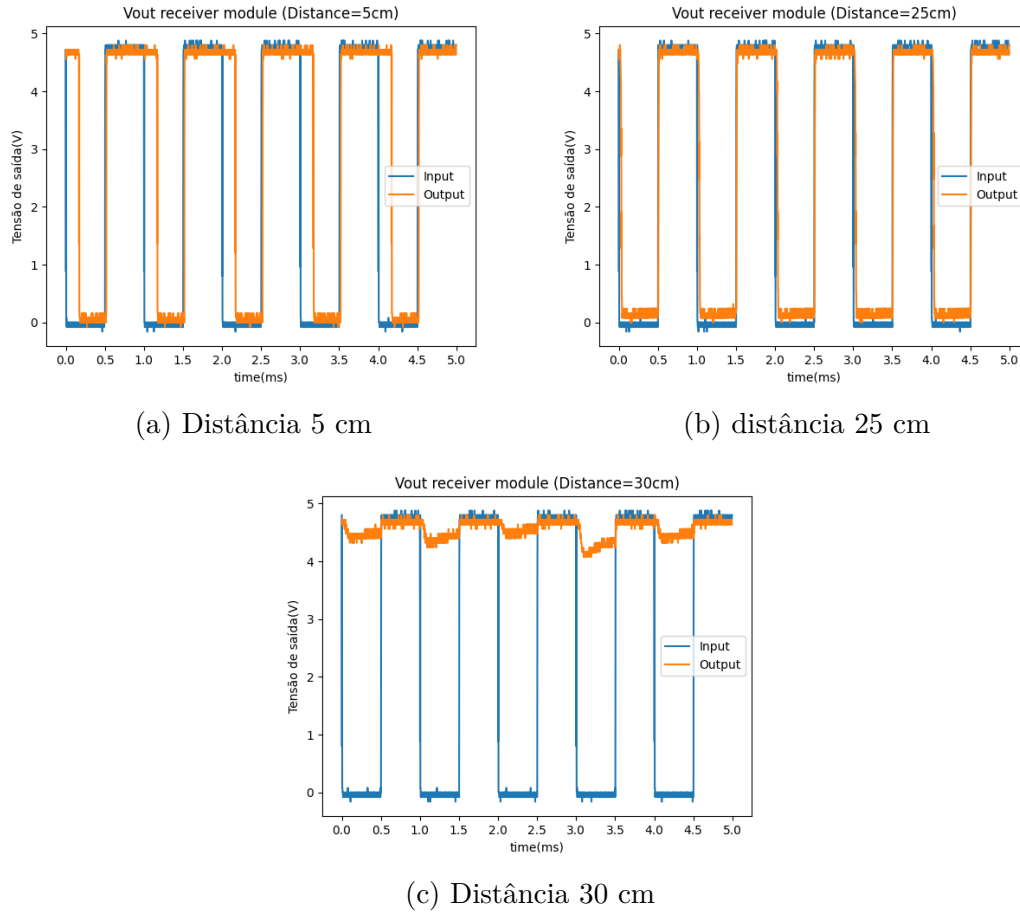


Figura 25 – Reposta no tempo da entrada no transmissor e a saída de receptor em diferentes distâncias. Fonte: elaboração própria.

É observável que para distâncias menores há um alargamento temporal do nível lógico alto e um achatamento do nível baixo, como visto na figura 25a para $D_X = 5$ cm. Isso ocorre pois a proximidade gera uma maior potência, consequentemente um maior efeito de saturação no decisor. Como a onda não é uma onda quadrada perfeita, possuindo tempos de subida e descida não nulos, juntamente com o limiar de decisão do saturador não ser na metade da excursão do sinal e sim próximo de 0, o tempo de bit 1 fica maior que o tempo de bit 0. Ainda assim, a informação é recuperável pelo Arduino sem maiores implicações. A figura 25b mostra que o receptor reproduz o sinal quase completamente, sendo este o maior valor de D_X com recepção confiável. Com $D_X = 30$ cm, como na figura 25c, o receptor não é mais confiável, o sinal não é recuperado pelo transmissor.

A figura 26 compara a tensão de saída do *Front-end* e do módulo de recuperação de dados, com $D_X = 15$ cm.

O sinal no tempo da figura 26a mostra que o *Front-end* é inversor, com amplitude de 0 V a aproximadamente -3 V, com o sinal levemente arredondado. O sinal do receptor completo, exibido na figura 10, é não inversor, com amplitude de 0 V a 4.7 V, mostrando um comportamento igual ao esperado pela simulação, realizada no capítulo 4. O sinal a

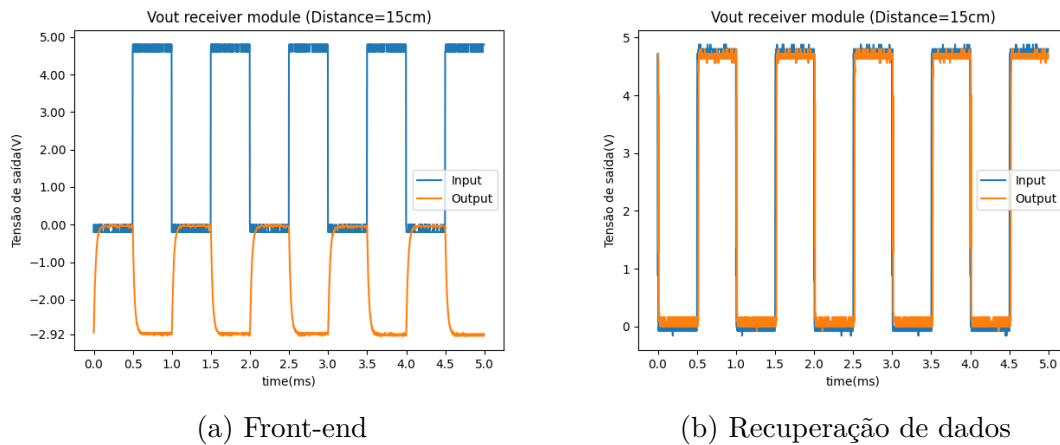


Figura 26 – Comparação da resposta no tempo da entrada no transmissor e a saída de receptor para o *Front-end* e para o módulo Recuperação de dados. Fonte: elaboração própria.

15 cm é recuperado completamente, sem ter valores negativos, utilizando quase toda a excursão de sinal da entrada do Arduino®.

6.3.3 Aquisição de dados via Arduino

O *frame* da mensagem foi definido pelo receptor com 16 bytes, sendo 1 byte de início de *frame*, 1 byte de sincronismo, até 12 bytes de dados, 1 byte de paridade e 1 byte de fim do *frame*. Quando nada está sendo enviado, o transmissor envia uma sequência alternada de 1 e 0 que deveria ser lido pelo transmissor como uma sequência de A's.

Foi desenvolvido para esse *frame* um código em Arduino com o objetivo de receber a resposta do circuito do receptor por um pino analógico de entrada, então decidir os bits, extrair a mensagem e enviar para o computador via comunicação serial.

O código foi desenvolvido baseado no tratamento de interrupções, a fim de que enquanto cálculos estão sendo feitas a leitura na entrada não fique travada, além de permitir controle da taxa de recebimento de bits.

São realizadas 15 amostras por bit, depois feita a média dessas amostras, é tentado montar um *frame*, caso não seja possível, um byte é excluído e é testado novamente. Quando identifica o *frame*, o dado é extraído e enviado ao PC pela comunicação serial.

Contudo, não foi possível obter sucesso no desenvolvimento do código. O principal motivo identificado foi a falta de sincronismo juntamente com a exclusão de um byte inteiro, ao invés de bit a bit quando o *frame* não for formado.

Foi desenvolvido também um código para a recuperação de sincronismo, mas ele não está adaptado para o Arduino, exigindo adaptação (AL-HAMIRI, 2017). A figura 27 mostra o resultado exemplo para 100 amostras por símbolo como o sincronismo é

recuperado pelo algoritmo de Gardner. Tanto o código em Arduino quanto o código em python para recuperação dos sinais podem ser encontradas no repositório git para o sistema de aquisição e envio de mensagens ([VLCSysSystem/RECEIVER3...](#), 2021). A figura 28 exibe as capturas de tela para a comunicação direta entre o Arduino transmissor e o receptor.

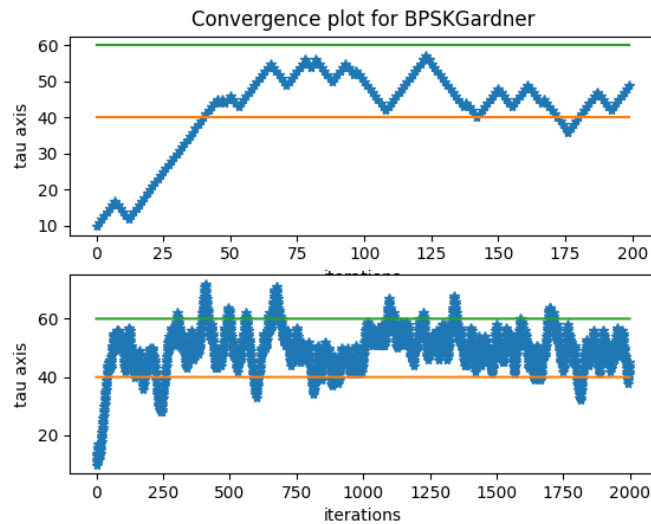


Figura 27 – Exemplo do Time Recovery

A figura 28a mostra a comunicação serial do computador com o Arduino receptor e transmissor ligados diretamente em modo Debug. Quando não está sendo enviado nada, o receptor entende na maioria das vezes o símbolo A repetido várias vezes, contudo não há tanta confiança, pois os bytes 5 que aparecem no *print* deveriam ser A também. A figura 28b mostra o exemplo das amostras obtidas. O que se observou é que as amostras são obtidas corretamente, mas por perda de sincronismo não são lidos os bytes de forma correta e o frame não é reconstruído.

Testou-se então enviar a mensagem para o receptor e captar com o osciloscópio o sinal elétrico no circuito receptor, resultados apresentados na figura 29.

A figura 29a mostra o correto recebimento do sinal no circuito receptor quando não está sendo enviado *frames* de informação pelo transmissor, sem perda ou atraso aparente. A figura 29b mostra o recebimento do *frame* no circuito do receptor. Para capturar o envio do *frame* foi necessário utilizar uma frequência muito pequena fazendo com que o resultado obtido seja sub-amostrado, não sendo possível reconstruir o sinal completamente, contudo é possível observar que o circuito acompanha a maioria das transições. Fica evidente que o tempo de bit 0 é bem menor que o de bit 1, como esperado pelo teste do circuito com baixas frequências. Isso se deve ao comportamento já mencionado gerado pelo circuito grampeador.

7 Conclusão

Esse trabalho teve como objetivo apontar VLC como alternativa para as limitações já encontradas na tecnologia de RF. A partir disso foi projetado um receptor que transforma o sinal luminoso em elétrico, utilizando um circuito digital que utiliza a excursão de sinal quase toda do Arduino®. Desenvolvendo, então um simulador óptico que realimentou com informações sobre a potência ótica recebida o projeto do circuito, além de fornecer dados sobre a confiabilidade do sistema com variações da posição do LED em relação ao fotodiodo.

O circuito projetado foi montado em laboratório e caracterizado. Foi desenvolvido código para interpretação do sinal elétrico de saída desse circuito por Arduino, sendo testado primeiramente enviando sinal diretamente de um para o outro. Posteriormente, foi feito o teste utilizando os circuitos transmissor e receptor.

A simulação do comportamento da luz em relação à distância e ao ângulo permitiram o projeto de circuitos de maneira bem consistente, sendo esses resultados comprovados em laboratório, principalmente analisando no domínio do tempo. O simulador ainda permitiu uma análise da confiabilidade da comunicação, estimando valores de SNR e BER.

Além disso, foi possível estabelecer comunicação a uma taxa de 2 kbps e distância de 25 cm. Foi possível a aquisição de amostras corretas pelo Arduino®, sendo necessária a implementação de sincronismo e ajuste na construção do *frame* para analisar bit-a-bit ao invés de descartar bytes inteiros.

A metodologia utilizada para o projeto, utilizando o simulador óptico como ferramenta para enriquecer a simulação de circuito e dar maior confiabilidade aos seus resultados se mostrou muito eficaz. Sendo a bateria de testes suficiente para comprovar o funcionamento para o ponto projetado, já sendo possível identificar limitações práticas e pontos de melhoria. A metodologia para teste da comunicação com o Arduino® foi eficiente para identificar o problema que impossibilitou sua funcionalidade prática e validou a comunicação estabelecida pelo circuito.

O trabalho focou no receptor VLC, mas o projeto englobando o todo o transceptor VLC funcionou como uma prova de conceitos, sendo o primeiro passo em direção a um transceptor funcional, a uma verdadeira alternativa às limitações do RF, abrindo caminho para muitas melhorias.

7.1 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões de melhoria existem muitas possibilidades utilizando o próprio *set-up* e circuitos montados, acrescentando códigos de recuperação de sincronismo no código do Arduino®, além de ao não encontrar o *frame* passar a excluir o dado de um bit apenas e não de um *byte* completo. Outra possibilidade é enviar as amostras para o computador e processar as amostras por um script em python®, a fim de conseguir maior poder de processamento, mas esse método é menos indicado por conta da limitação forte imposta pela velocidade de envio serial confiável de 115200 *Baud rate*.

Independentemente da aquisição efetiva dos dados, pode ser criado mais um receptor e um transmissor que se comuniquem inicialmente com a mesma frequência e transmitindo a mesma mensagem, para comprovar o aumento da SNR com uma matriz de transmissores e receptores, avaliando eventuais limitações de sistema devidas à fase relativa entre as réplicas da mensagem enviada. O simulador óptico orientado a objetos pode facilmente ser reutilizado, abrindo caminho para estudos posteriores, tais como transmissão utilizando LEDs de cores diferentes, e receptores seletivos em comprimento de onda.

Do ponto de vista do circuito do receptor, poderiam ser implementadas melhorias que permitissem um funcionamento em maiores taxas de recebimento de dados, a utilização de um circuito que dividisse o ganho com o *Front-end* seria a alternativa para isso. Além disso, acrescentar um circuito de AGC pode ser uma alternativa muito interessante para aumentar a robustez do receptor em maiores distâncias.

Referências

AHMED, M.; BERMAK, A. A CMOS current mirroring integration based visible light receiver for intelligent transport systems. In: *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 556–569. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.

AL-HAMIRI, M. *Symbol synchronization Techniques in digital communications*. [S.l.]: Rochester Institute of Technology, 2017. Citado na página 54.

Cailean, A.; Dimian, M. Impact of iee 802.15.7 standard on visible light communications usage in automotive applications. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 4, p. 169–175, 2017. Citado na página 23.

CISCO. *Cisco Annual Internet Report (2018–2023)*. San José, California, 2020. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>>. Citado na página 19.

FAHS, B.; CHOWDHURY, A.; HELLA, M. M. A 1.8 Gb/s fully integrated optical receiver for OOK visible light communication in 0.35 μ CMOS. In: *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 934–937. Citado na página 24.

FUADA, S. et al. A First Approach to Design Mobility Function and Noise Filter in VLC System Utilizing Low-cost Analog Circuits. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, v. 5, p. 14, jul. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.

GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. [S.l.]: CRC press, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 41.

KHAN, L. U. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, v. 3, n. 2, p. 78 – 88, 2017. ISSN 2352-8648. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816300335>>. Citado na página 23.

MORROW BRUCE E SANTOS, G. *Experimental_results*. 2021. Original-date: 2021-08-05T04:54:31Z. Disponível em: <https://github.com/guilhas-cpu/Experimental_results>. Citado na página 49.

MORROW BRUCE E SANTOS, G. *VLCSim*. 2021. Original-date: 2021-04-16T03:06:31Z. Disponível em: <<https://github.com/bruce-morrow/VLCSim>>. Citado na página 44.

NDJIONGUE, A. R.; FERREIRA, H.; NGATCHED, T. Visible Light Communications (VLC) Technology. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, p. 1–15, jun. 2015. Citado na página 23.

SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 42.

- SEYMOUR, T.; SHAHEEN, A. et al. History of wireless communication. *Review of Business Information Systems (RBIS)*, v. 15, n. 2, p. 37–42, 2011. Citado na página 19.
- Uysal, M. et al. Ieee 802.15.7r1 reference channel models for visible light communications. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 1, p. 212–217, 2017. Citado na página 24.
- VLCSystem/RECEIVER3.INO at main · author = Morrow, Bruce e Santos,Guilherme, bruce-morrow/VLCSystem. 2021. Disponível em: <<https://github.com/bruce-morrow/VLCSystem>>. Citado na página 55.
- VUKSANOVIĆ, D.; VEŠIĆ, J.; KORČOK, D. Industry 4.0: the future concepts and new visions of factory of the future development. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 293–298. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- Wang, Y. et al. 8-gb/s rgby led-based wdm vlc system employing high-order cap modulation and hybrid post equalizer. *IEEE Photonics Journal*, v. 7, n. 6, p. 1–7, 2015. Citado na página 24.