

RESEARCH PAPER

Avaliação de Eficiência em Canais de Comunicação VLC

Evaluation of Efficiency in VLC Communication Channels

Mariana Yukari Yano [Universidade Federal do ABC | mariana.yano@aluno.ufabc.edu.br]

Helder May Nunes da Silva Oliveira [Universidade de São Paulo | helderoliveira@ime.usp.br]

Rodrigo Augusto Cardoso da Silva [Universidade Federal do ABC | cardoso.rodrigo@ufabc.edu.br]

✉ Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil.

Resumo. Este artigo investiga sistemas de Comunicação por Luz Visível (VLC), uma alternativa às redes tradicionais que utiliza diodos emissores de luz para transmitir dados com alta segurança, baixo custo e imunidade a interferências eletromagnéticas. Analisamos o desempenho das modulações On-Off Keying (OOK) e Variable Pulse Position Modulation (VPPM), bem como o impacto da distância do transmissor em métricas como potência recebida, relação sinal-ruído e capacidade do canal. Os resultados indicam que a VPPM supera a OOK em eficiência espectral (5 bps/Hz contra 0,2 bps/Hz), sobretudo em distâncias menores que 3 m e cargas úteis elevadas, devido ao uso mais eficiente da largura de banda sob as restrições impostas por sistemas VLC baseados em modulação de intensidade/detecção direta (IM/DD). Identificamos uma altura ideal (2,0 m - 2,5 m), equilibrando cobertura e qualidade do sinal; acima desse intervalo, ocorre degradação acentuada na comunicação. Conclui-se que a VPPM é mais adequada para aplicações de alta taxa de dados, enquanto a OOK é viável em cenários simples. A altura de instalação é um parâmetro crítico para otimização do sistema.

Abstract. This paper investigates Visible Light Communication (VLC) systems, an alternative to traditional networks that employs light emitting diodes to transmit data with high security, low cost, and immunity to electromagnetic interference. We analyze the performance of On-Off Keying (OOK) and Variable Pulse Position Modulation (VPPM), as well as the impact of transmitter distance on metrics such as received power, signal-to-noise ratio (SNR), and channel capacity. The results show that VPPM outperforms OOK in spectral efficiency (5 bps/Hz versus 0.2 bps/Hz), particularly at distances shorter than 3 m and for high payloads, due to the more efficient use of the available bandwidth under the constraints imposed by intensity modulation/direct detection (IM/DD) based VLC systems. An optimal transmitter height was identified (2.0 m - 2.5 m), balancing coverage and signal quality; above this range, we observe significant degradation in the communication. We conclude that VPPM is more suitable for high-data rate applications, while OOK remains viable for low-complexity scenarios, and that installation height is a critical parameter for system optimization.

Palavras-chave: Comunicação Óptica sem Fio, Comunicação por Luz Visível

Keywords: Wireless Optical Communication, Visible Light Communication

Received: 20 December 2025 • **Accepted:** 20 February 2026 • **Published:** 27 February 2026

1 Introdução

Diferente de tecnologias sem fio tradicionais como Wifi, Bluetooth, ZigBee e LoRaWAN, cuja transmissão de dados é baseada em sinais de radiofrequência [Alves and da Silva Filho, 2020; Moraes *et al.*, 2021], a comunicação por luz visível (VLC) emprega luz como meio de comunicação [Matheus *et al.*, 2019]. A Comunicação Óptica sem Fio (OWC, do inglês *Optical Wireless Communication*) refere-se à transmissão de dados por meio de feixes de luz, oferecendo maior largura de banda, imunidade a interferências eletromagnéticas e segurança aprimorada em comparação com redes sem fio tradicionais [Ucar *et al.*, 2016]. Como utiliza luz de natureza direcional, a OWC limita a propagação à linha de visão direta, o que reduz as chances de interceptação e torna a tecnologia especialmente adequada para ambientes internos com requisitos rigorosos de confiabilidade [Pathak *et al.*, 2015].

Dentro desse contexto, a Comunicação por Luz Visível (VLC, do inglês *Visible Light Communication*) destaca-se como uma tecnologia promissora da OWC, utilizando o espectro visível da luz (400–700 nm) para transmitir dados de forma segura, eficiente e com alta largura de banda [IEEE, 2019]. Inicialmente restrita a aplicações de curto alcance, a

VLC vem ganhando espaço em cenários de ambientes *indoor*, onde há melhor controle da luz, permitindo a integração entre iluminação e comunicação de dados [Matheus *et al.*, 2019].

Para que sistemas VLC possam competir com tecnologias tradicionais de rede, é essencial compreender como parâmetros físicos e escolhas de modulação afetam o desempenho global. Características como o tipo de modulação, potência de transmissão, distância, ângulos de incidência e recepção e o funcionamento do fotodetector influenciam diretamente métricas como potência recebida, relação sinal-ruído (SNR), capacidade do canal, eficiência espectral e taxa efetiva de transmissão [Vieira *et al.*, 2020]. Nesse contexto, esquemas de modulação como *On-Off Keying* (OOK) e *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM) são amplamente utilizados devido à simplicidade de implementação e compatibilidade com diodos emissores de luz (LEDs) comerciais [Pathak *et al.*, 2015], mas diferem significativamente em desempenho e eficiência espectral.

Este trabalho apresenta uma avaliação abrangente do desempenho de sistemas VLC, integrando a comparação entre OOK e VPPM e a análise da sensibilidade do sistema a parâmetros físicos do ambiente, com foco especial na altura do transmissor em um cenário *indoor*. Foram conduzidas si-

mulações realistas variando modulação, carga útil, distância, geometria do ambiente e características do receptor, buscando compreender como cada fator afeta a potência recebida, SNR, capacidade do canal, tempo de transmissão e proporção de receptores ativos.

Embora existam estudos que abordam otimizações em sistemas VLC com foco em eficiência espectral ou consumo energético [Obeed *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020], poucos trabalhos [Bhutani *et al.*, 2025; Mahanani *et al.*, 2025; Ghassemlooy *et al.*, 2017] integram comparações entre diferentes modulações. No entanto, esses trabalhos não apresentam uma análise aprofundada da sensibilidade das métricas de desempenho a fatores físicos do ambiente, como a altura do transmissor. A presente pesquisa busca preencher essa lacuna, fornecendo comparações entre OOK e VPPM, bem como um mapeamento detalhado de como alterações na configuração espacial do sistema influenciam o desempenho agregado dos receptores.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi comparar as modulações OOK e VPPM em sistemas de VLC e analisar o impacto da altura do transmissor em métricas de desempenho, incluindo potência recebida, SNR, capacidade do canal e tempo de transmissão, considerando um cenário *indoor* com múltiplos receptores. Para alcançar esse objetivo, as principais questões de pesquisa investigadas são: (i) como a escolha do esquema de modulação (OOK ou VPPM) afeta o desempenho de sistemas VLC *indoor*? e (ii) de que forma a altura do transmissor influencia o desempenho de sistemas VLC *indoor*?

Os resultados mostram que a eficiência do canal diminui com o aumento da carga útil e da distância, especialmente acima de 3 m. A modulação VPPM apresentou desempenho superior à OOK, sobretudo em curtas distâncias, devido à maior eficiência espectral (5 bps/Hz contra 0,2 bps/Hz) e maior robustez na detecção. Além disso, verificou-se que a altura do transmissor tem impacto decisivo sobre o sistema, com queda significativa na potência recebida, no SNR e na taxa de transmissão acima de aproximadamente 2,5 m. Dessa forma, as principais contribuições deste artigo são (i) resultados quantitativos que evidenciam o melhor desempenho da VPPM em termos de eficiência espectral; e (ii) identificação de uma faixa ótima de instalação do transmissor. Os resultados aqui apresentados podem servir de subsídio para o projeto de sistemas VLC mais robustos e adaptáveis, contribuindo para a consolidação da comunicação óptica sem fio como uma alternativa viável às redes convencionais em ambientes internos.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2, são destacadas pesquisas e abordagens já exploradas na literatura que servem de base ou referência para este estudo. A Seção 3 expõe a base teórica necessária para a compreensão do problema, incluindo conceitos, modelos e equações relevantes. A Seção 4 apresenta as principais métricas empregadas na avaliação de um sistema VLC. A Seção 5 descreve o procedimento adotado para a modelagem e simulação do sistema, com detalhamento dos parâmetros e condições de análise. A Seção 6 apresenta os resultados obtidos e sua respectiva discussão, avaliando o desempenho e interpretando os impactos das variáveis estudadas. Por fim, a Seção 7 sintetiza as principais conclusões do trabalho e indica

possíveis direções para pesquisas futuras.

2 Trabalhos Relacionados

Diversos estudos exploraram a otimização de parâmetros para melhorar a eficiência do canal [Junior, 2014; Vieira *et al.*, 2020; Villa Sierra, 2021; Sankarasubramaniam *et al.*, 2003], sendo o tamanho do pacote na rede um desses parâmetros, como no trabalho de [Sankarasubramaniam *et al.*, 2003], em que os autores analisaram a otimização do tamanho do pacote visando a eficiência energética.

No contexto da comunicação óptica sem fio, os autores de [Vieira *et al.*, 2020] propuseram uma abordagem de otimização para maximizar a eficiência do canal OWC com modulação OOK. No entanto, a análise se limitou a apenas esse esquema de modulação. Além disso, pesquisas recentes exploraram a otimização de parâmetros físicos para melhorar a eficiência da comunicação óptica. Estudos como o de [Villa Sierra, 2021] investigaram a influência da potência transmitida e do ângulo de incidência da luz no desempenho do canal, ressaltando a importância da adaptação dinâmica desses parâmetros.

Estudos recentes têm explorado aspectos críticos do desempenho de sistemas VLC em diferentes cenários. O autor de [Pathak *et al.*, 2015] analisou a comunicação em ambientes internos com LEDs comerciais, destacando os efeitos de bloqueios humanos na degradação do sinal. Já [Wu, 2024] avaliou a segurança de sistemas VLC subaquáticos sob condições de estimativas imprecisas de canal, mostrando como falhas de modelagem afetam a confiabilidade. Esses trabalhos reforçam a relevância de fatores como bloqueios, posicionamento e incertezas de canal no desempenho e aplicabilidade prática da comunicação óptica sem fio.

Este estudo contribui para essa lacuna ao realizar uma análise comparativa entre OOK e VPPM, avaliando a eficiência espectral e a robustez ao ruído sob diferentes condições de transmissão. A abordagem adotada considera restrições práticas e utiliza otimização numérica para explorar o impacto de variáveis como potência, ângulo de incidência e distância na eficiência do canal.

Os trabalhos apresentados na Tabela 1 evidenciam que a literatura aborda aspectos isolados do desempenho em redes sem fio e comunicação óptica, como otimização do tamanho de pacote, efeitos de bloqueios, ou limitações de alinhamento. No entanto, observa-se que poucos estudos avaliam simultaneamente diferentes esquemas de modulação em VLC ou consideram a influência conjunta de parâmetros físicos do ambiente sobre métricas fundamentais do canal. Diferentemente dessas abordagens, o presente artigo contribui para essa lacuna ao realizar uma análise comparativa entre OOK e VPPM, avaliando a eficiência espectral e a robustez ao ruído sob diferentes condições de transmissão. A abordagem adotada considera restrições práticas e utiliza otimização numérica para explorar o impacto de variáveis como potência, ângulo de incidência e distância na eficiência do canal. Além disso, a análise do impacto da altura do transmissor é integrada ao estudo, oferecendo uma avaliação mais abrangente e alinhada a cenários práticos de sistemas VLC em ambientes internos.

Tabela 1. Resumo dos trabalhos relacionados

Trabalho	Objetivo e parâmetros considerados	Limitações
[Sankarasubramaniam et al., 2003] [Junior, 2014]	Otimização do tamanho do pacote visando energia Relação entre tamanho do pacote e eficiência do canal	Não trata comunicação óptica Não analisa modulação
[Vieira et al., 2020] [Pathak et al., 2015] [Wu, 2024]	Otimização da eficiência do canal OWC com OOK Desempenho OWC indoor; bloqueios; ângulo Segurança em VLC subaquático	Focado apenas em OOK Não compara modulações Cenário específico; sem modulações comuns
Este trabalho	Comparação entre OOK e VPPM; impacto da distância	Integra modulações e análise física

3 Fundamentos de Comunicação Óptica Sem Fio em Luz Visível

A Comunicação por Luz Visível (VLC — *Visible Light Communication*) é uma subárea da Comunicação Óptica Sem Fio (OWC — *Optical Wireless Communication*) que utiliza a faixa visível do espectro eletromagnético (aproximadamente entre 400 e 700 nm, conforme a Figura 1) para transmissão de dados [Arnon, 2015]. Nessa abordagem, LEDs convencionais atuam simultaneamente como dispositivos de iluminação e transmissores de informação, modulando sua intensidade luminosa a velocidades muito superiores àquelas percebidas pelo olho humano [Matheus et al., 2019].

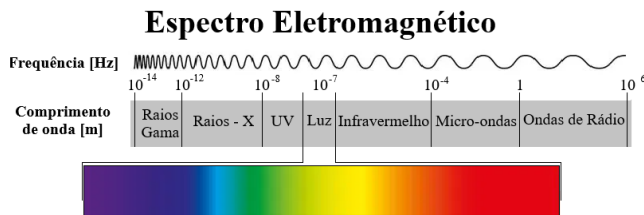


Figura 1. Espectro Eletromagnético

Entre as principais vantagens da VLC, destacam-se a larga largura de banda disponível, imunidade à interferência eletromagnética, ausência de interferência com sistemas de rádio, maior segurança física — já que a luz não atravessa paredes — e fácil reutilização espacial [Arnon, 2015; Ucar et al., 2016]. Essas características tornam a tecnologia particularmente adequada para hospitais, aeronaves, fábricas, ambientes industriais e escritórios, além de permitir integração direta com a infraestrutura de iluminação já existente.

Antes de discutir os esquemas de modulação utilizados neste trabalho, é importante entender por que a modulação é necessária em VLC. Em sistemas ópticos de luz visível, a informação digital (bits) deve ser convertida em variações controladas da intensidade luminosa emitida pelos LEDs. Como a modulação é baseada em intensidade e a detecção é direta (IM/DD — *Intensity Modulation/Direct Detection*), o sinal deve ser real, positivo e compatível com as restrições físicas do emissor [Kharbouché et al., 2025]. Diferentes técnicas de modulação são, portanto, essenciais para ajustar taxa de dados, robustez ao ruído, eficiência espectral, brilho percebido e conformidade com o padrão IEEE 802.15.7, que define requisitos de enlace, formatos de quadros e codificação [IEEE, 2011, 2019].

Entre os esquemas padronizados, destacam-se o *On-*

Off Keying (OOK) e o *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM). A OOK é uma modulação binária simples: representa o bit “1” com a presença de luz e o bit “0” com sua ausência. Essa simplicidade leva a baixo custo computacional e baixo consumo energético, embora a técnica seja sensível a ruído e reduza sua eficiência em cenários com baixa relação sinal-ruído (SNR) [Shams et al., 2023].

A VPPM combina variação da posição temporal do pulso com controle da largura do pulso, permitindo que a informação seja transmitida tanto pela posição quanto pela forma do pulso dentro de uma janela de tempo. Isso aumenta a eficiência espectral, melhora a robustez ao ruído e permite dimerização sem perda de dados, característica relevante para sistemas de iluminação inteligentes [Kim et al., 2013].

Dessa forma, os estudos indicam que, enquanto a OOK apresenta vantagem em termos de simplicidade de implementação e baixo custo computacional, por codificar a informação exclusivamente na presença ou ausência do pulso, a VPPM explora de maneira mais eficiente o tempo e a potência do sinal. Isso se traduz em maiores taxas de transmissão, melhor estabilidade do canal e maior flexibilidade operacional, especialmente em enlaces de curta e média distância, onde os efeitos de dispersão temporal são limitados e a sincronização temporal pode ser explorada de forma mais eficaz.

A Figura 2 ilustra as diferenças entre as modulações OOK e VPPM, apresentando um exemplo de como a sequência de bits 10110100 é codificada em cada esquema. Na modulação OOK, a informação é transmitida pela presença ou ausência de luz dentro do intervalo do símbolo. Já na modulação VPPM, a informação é representada pela posição temporal do pulso dentro de uma janela de tempo.

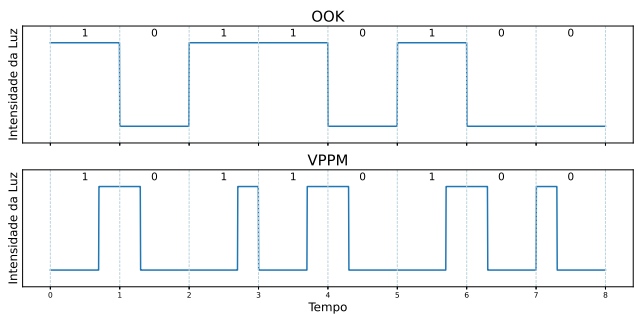


Figura 2. Modulações OOK e VPPM

4 Avaliação de Desempenho de Sistemas VLC

O desempenho de um sistema VLC pode ser avaliado por meio de diferentes métricas que expressam a qualidade e a eficiência da comunicação. Assim, esta seção apresenta os principais parâmetros usados nesse tipo de avaliação, juntamente com as equações empregadas para calculá-los.

Neste estudo, a avaliação foi feita em um cenário 3D com emissores e receptores assimétricos, no qual variações na área do fotodetector, ângulo de recepção (FOV) e responsividade afetaram diretamente as medidas. A lista a seguir elenca os parâmetros considerados e explicita como foram calculados:

- **Carga Útil (c):** representa a fração de dados efetivamente transmitidos que correspondem à informação útil, desconsiderando cabeçalhos, bits de controle e redundâncias dos protocolos de rede. É expressa pela Equação (1) [Vieira et al., 2020]. Nos cenários simulados, c variou entre 10% e 90%, refletindo diferentes condições de eficiência no uso do canal.

$$c = \frac{\text{dados úteis}}{\text{dados totais}} \quad (1)$$

- **Potência Recebida (P_r):** potência que chega aos receptor VLC, em Watts [W] influenciada pela potência de transmissão (também em Watts, W) distância entre emissor e receptor, área do fotodetector e ângulos de incidência e recepção. A propagação óptica em VLC segue o modelo de radiação Lambertiano [Zhong et al., 2024], sendo o padrão de emissão definido pela ordem lambertiana $m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos(\theta))}$ onde θ é o ângulo semi-intensivo do LED [Vieira et al., 2020]. Valores moderados de m (entre 2 e 3) refletem emissores com feixes de abertura típicos de 50°–70°.

$$P_r = \frac{(m+1)P_t}{2\pi(d^2 + h^2)} \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\theta) \cdot A_r \quad (2)$$

A potência recebida é dada pela Equação (2), onde P_t é a potência óptica do LED transmissor (em Watts, W); d é a distância horizontal entre LED e receptor (em metros, m); h é a altura do LED em relação ao receptor no chão (m); $\phi = \arctan\left(\frac{d}{h}\right)$ é o ângulo entre o LED e o receptor (em graus, °); θ é o ângulo de emissão ou inclinação do LED (°); A_r é a área do fotodetector (em metros quadrados, m²); o termo $\cos^m(\phi)$ modela a direção da luz emitida segundo o padrão de Lambert; e $\cos(\theta)$ representa o desalinhamento angular entre emissor e receptor, influenciando diretamente o acoplamento óptico.

- **Relação Sinal-Ruído (SNR):** quantifica a razão entre potência útil e potência de ruído no receptor. É calculada segundo [IEEE, 2019] com a Equação (3), onde R é a responsividade do receptor, $B = 10$ MHz a largura de banda e $N_0 = 10^{-12}$ W/Hz a densidade espectral de ruído.

$$\text{SNR} = \frac{(R \cdot P_r)^2}{N_0 \cdot B} \quad (3)$$

- **Capacidade de Canal (C):** calculada a partir da equação de Shannon-Hartley em [Sankarasubramaniam et al., 2003], mostrada na Equação (4).

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (4)$$

Considera-se a taxa máxima de transmissão de dados com erro desprezível. No cenário simulado, todos os enlaces apresentaram capacidade acima de 70 Mbps.

- **Eficiência Espectral (η_{esp}):** mede a quantidade de bits transmitidos por segundo (bps) [Vieira et al., 2020]. Para $B = 10$ MHz, as capacidades obtidas resultaram em eficiências espectrais superiores a 7 bps/Hz.
- **Eficiência do Canal (η_{canal}):** considera o aproveitamento real do canal, levando em conta a potência recebida, a carga útil transmitida e penalizações associadas à distância e ao overhead dos pacotes. Uma forma de expressar é a proposta em [Vieira et al., 2020], apresentada na Equação (5), onde c representa a carga útil e d a distância entre transmissor e receptor.

$$\eta_{canal} = \frac{P_r}{1+c} \cdot e^{-0.5 \cdot d} \quad (5)$$

- **Tempo de Transmissão (T):** tempo necessário para enviar uma determinada quantidade de dados (Equação (6)), obtido por [Ghassemloooy et al., 2017].

$$T = \frac{\text{dados}}{C} \quad (6)$$

5 Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia empregada nos experimentos do presente artigo. A Subseção 5.1 explica a configuração dos experimentos executados, enquanto a Subseção 5.2 lista as ferramentas empregadas nos experimentos computacionais.

5.1 Descrição dos Experimentos

Este artigo apresenta inicialmente experimentos a fim de comparar as modulações OOK e VPPM. Posteriormente, apresenta-se experimentos que discutem o impacto da distância em transmissões VLC.

Para a comparação entre modulações, simularam-se transmissões com modulações OOK e VPPM em diferentes condições de carga útil e distância entre transmissor e receptor. Para cada modulação, variou-se os parâmetros de entrada e foram obtidas as métricas de eficiência espectral, capacidade do canal e eficiência do canal.

A carga útil c variou entre 10% e 90%. A potência recebida P_r em cada enlace e a SNR correspondente foram obtidas pelas equações apresentadas na Seção 4. A partir desses valores, determinou-se a capacidade de canal C , a eficiência espectral η_{esp} como razão entre capacidade e largura de banda, e a eficiência do canal η_{canal} . Finalmente, o tempo de transmissão T de um pacote de dados de tamanho fixo foi calculado.

A distância entre os dispositivos foi ajustada entre 1 m e 6 m, e as simulações foram conduzidas em condições ideais de visada direta (LoS, do inglês *line of sight*), sem obstáculos ou interferência óptica externa. A Tabela 2 sintetiza os valores dos parâmetros descritos até aqui.

A variação da altura do transmissor também foi escolhida como objeto de estudo por ser um fator físico de fácil ajuste em aplicações reais e que exerce influência direta sobre o enlace óptico. Alterações na altura modificam simultaneamente a distância efetiva entre transmissor e receptores, o ângulo de incidência da luz e a distribuição de intensidade

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas equações de desempenho.

Parâmetro	Notação	Valor / Unidade
Potência transmitida	P_t	0.5 W
Distância horizontal	d	0–5 m
Altura do LED	h	1–3 m
Ângulo LED–receptor	ϕ	0–70°
Ângulo de emissão do LED	θ	50°–70°
Área do fotodetector	A_r	1 cm ² (10 ^{−4} m ²)
Ordem lambertiana	m	2–3
Responsividade	R	0.4 A/W
Largura de banda	B	10 MHz
Densidade de ruído	N_0	10 ^{−12} W/Hz
Carga útil	c	0.1–0.9
Capacidade de canal	C	> 70 Mbps

luminosa no ambiente. Esses elementos afetam a potência recebida, a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, métricas como capacidade do canal e tempo de transmissão. Assim, compreender como a altura impacta o desempenho do sistema é fundamental para identificar configurações que maximizem a eficiência do enlace e minimizem perdas, servindo como base para otimizações futuras em projetos de redes VLC.

O cenário modelado foi um ambiente *indoor* com múltiplos receptores distribuídos no plano horizontal, e o transmissor foi posicionado em alturas variando de 2,5 m a 20 m. Para cada valor de altura, foram avaliadas a potência recebida média, SNR resultante, capacidade do canal, tempo de transmissão e a proporção de receptores ativos. Esta última foi definida como a razão entre o número de receptores com P_r acima de um limiar mínimo e o total de receptores.

A Figura 3 ilustra um exemplo de configuração de ambiente utilizada para avaliação de desempenho em um enlace VLC do tipo *broadcast*. Nela, observa-se a disposição espacial de um transmissor único (marcado por um triângulo vermelho), posicionado a uma determinada altura, responsável por irradiar sinal luminoso em direção a quatro receptores ativos (marcados por círculos verdes), distribuídos em diferentes posições no plano horizontal. As linhas tracejadas indicam os caminhos de propagação entre o transmissor e cada receptor, permitindo visualizar a geometria do enlace e a variação das distâncias envolvidas. Essa representação tridimensional auxilia na compreensão da relação entre a posição dos dispositivos e o impacto nos parâmetros de desempenho, como a potência recebida, a taxa de transmissão e a confiabilidade do sistema.

A Tabela 3 sintetiza os valores dos parâmetros utilizados nos experimentos com variação da altura.

Tabela 3. Parâmetros utilizados nos experimentos com variação de altura.

Parâmetro	Valor / Unidade
Altura do transmissor	2,5–20 m
Mínimo de potência para receptor ativo	10 ^{−9} W
Tamanho do pacote	1000 bytes
Largura de banda B	1,67 kbps
Potência transmitida P_t	20 mW

5.2 Ferramentas

As simulações foram implementadas em *Python* utilizando as bibliotecas *numpy*, *scipy* e *matplotlib* para operações numéricas, cálculo de métricas e geração de gráficos. Os modelos de propagação óptica, potência recebida, ruído e SNR seguiram as especificações do padrão IEEE 802.15.7.

Para cada conjunto de parâmetros, a simulação foi executada repetidamente sob as mesmas condições iniciais, permitindo estimar a variabilidade estatística dos resultados. Cada repetição recomputou integralmente as grandezas físicas (potência recebida, SNR, capacidade, eficiências e tempo de transmissão), evitando a influência de efeitos de cache, estados internos ou artefatos numéricos. Em todos os casos, as repetições apresentaram desvios absolutos inferiores a 10^{−6}.

Com os valores obtidos nas repetições, calcularam-se médias e intervalos de confiança. O intervalo de confiança de 95% exibido nos gráficos da seção seguinte foi determinado a partir da distribuição amostral da média, utilizando a Equação (7), onde μ é a média das repetições, s é o desvio-padrão e n é o número de execuções independentes. Esse procedimento permite quantificar a incerteza associada às estimativas numéricas e avaliar a estabilidade das métricas simuladas [Jain, 1991]. Assim, os intervalos de confiança apresentados refletem, de forma estatisticamente rigorosa, a confiabilidade dos resultados obtidos.

$$\mu \pm 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

6 Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos realizados para o presente artigo e está dividida em duas partes. A Subseção 6.1 apresenta os resultados da comparação entre as modulações OOK e VPPM, enquanto a Subseção 6.2 apresenta resultados para a avaliação da distância entre transmissor e receptores VLC.

6.1 Modulações

As simulações foram realizadas com o objetivo de comparar o desempenho das modulações OOK e VPPM em diferentes condições de operação. Os cenários foram configurados para avaliar o impacto da carga útil e da distância de enlace no comportamento do sistema VLC.

As cargas úteis variaram entre 10 e 100 bits, em incrementos de 10 bits, permitindo analisar como a quantidade de dados transmitidos influencia métricas como eficiência espectral e eficiência do canal. As distâncias entre transmissor e receptor foram definidas entre 1 m e 4 m, com passo de 1 m. Em conformidade com o modelo óptico de espaço livre, o aumento da distância reduziu significativamente a potência recebida e a SNR, afetando diretamente a capacidade do enlace.

As Figuras 4 e 5 apresentam a eficiência do canal em função da carga útil para diferentes distâncias. Observa-se redução monotônica da eficiência à medida que a carga útil aumenta, resultado da maior proporção de bits de sobrecarga e da elevação da probabilidade de erro. A degradação é mais pronunciada para distâncias superiores a 1 m, nas quais a atenuação óptica passa a dominar o desempenho do enlace.

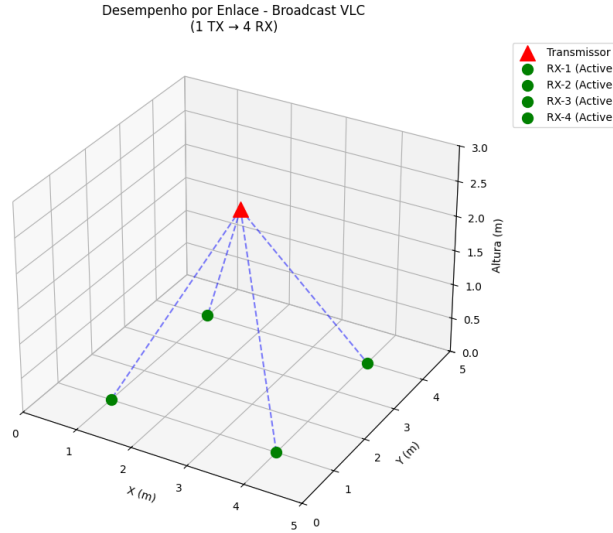


Figura 3. Exemplo de Configuração de Ambiente

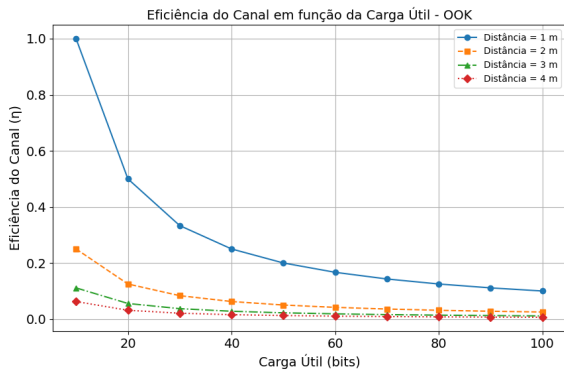


Figura 4. Eficiência do canal para modulação OOK.

Ambas as modulações exibem tendências similares; contudo, a VPPM apresenta desempenho levemente superior, especialmente em distâncias reduzidas. Tal comportamento decorre do mecanismo de codificação por posição do pulso, que melhora a robustez à detecção e reduz erros em comparação com o esquema binário simples da OOK.

A eficiência espectral obtida foi de aproximadamente 0,2 bps/Hz para OOK e 5 bps/Hz para VPPM. Essa diferença decorre do fato de que a OOK transmite apenas um bit por ciclo de modulação, enquanto a VPPM utiliza a posição temporal do pulso para transmitir mais informação por unidade de largura de banda. Essa diferença acentuada não é intrínseca ao esquema de modulação OOK em si, mas resulta das restrições práticas impostas por sistemas VLC baseados em IM/DD. Nesse tipo de sistema, a informação é transportada exclusivamente pela intensidade luminosa, o que impõe sinais reais, não negativos e limitados em amplitude, além de vincular diretamente a transmissão de dados às funções primárias de iluminação [Kharbouche *et al.*, 2025].

A largura de banda dos LEDs comerciais, associada à sua resposta passa-baixa, restringe a taxa máxima de variação do sinal óptico, limitando a taxa de símbolos viável para modulações que dependem de transições bruscas, como a OOK [Al-Kinani *et al.*, 2018; Haas *et al.*, 2020]. Adicionalmente, requisitos de mitigação de *flicker* e de manutenção do nível médio de iluminação impõem restrições ao *duty cycle* (fra-

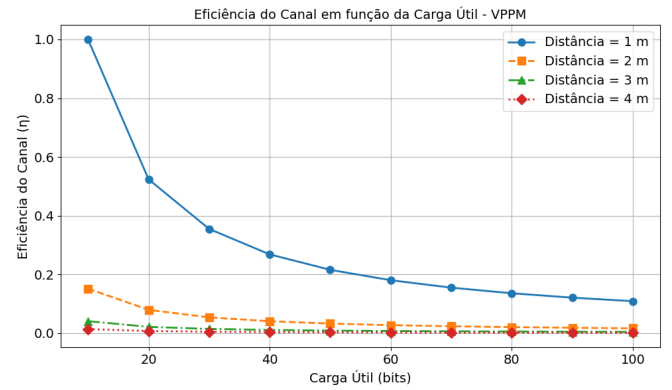


Figura 5. Eficiência do canal para modulação VPPM.

ção do tempo em que o sinal permanece ativo dentro de um período) e à taxa mínima de símbolos da OOK, forçando a operação em regimes conservadores que resultam em subutilização da largura de banda disponível [Shams *et al.*, 2023; Kharbouche *et al.*, 2025]. Como consequência, embora simples, a OOK apresenta eficiência espectral reduzida quando aplicada a sistemas VLC reais.

A VPPM opera de forma compatível com essas restrições. Ao combinar a modulação por posição temporal do pulso com o controle explícito da largura do pulso, a VPPM permite ajustar o *duty cycle* para atender simultaneamente aos requisitos de iluminação e de comunicação, sem necessidade de reduzir drasticamente a taxa de símbolos [Kim *et al.*, 2013; Kharbouche *et al.*, 2025]. Além disso, a codificação da informação no domínio temporal torna o esquema menos sensível às limitações de largura de banda do LED, possibilitando um uso mais eficiente do espectro óptico disponível em cenários práticos de VLC [Matheus *et al.*, 2019].

A análise da eficiência do canal demonstra comportamento inversamente proporcional tanto à carga útil quanto à distância. Distâncias maiores reduzem a potência recebida e aumentam a taxa de erro, enquanto cargas úteis elevadas amplificam a sobrecarga e o número de retransmissões necessárias, reduzindo a taxa efetiva de transmissão.

Embora a VPPM apresente maior eficiência espectral e melhor desempenho em taxas de transmissão elevadas, a

OOK permanece vantajosa em termos de consumo energético e complexidade computacional. A OOK requer apenas a comutação binária do LED, resultando em menor tempo de acionamento, menor dissipação e circuitos de detecção mais simples. Em contraste, a VPPM demanda controle preciso da posição temporal dos pulsos e algoritmos de sincronização mais sofisticados, aumentando tanto o processamento quanto o consumo energético associado.

6.2 Distância entre transmissor e receptor

Como visto na subseção anterior, a distância entre o transmissor e o receptor é um fator crítico no desempenho de sistemas VLC, afetando diretamente a propagação do sinal, a potência recebida e, consequentemente, todas as métricas derivadas de qualidade de comunicação. Por isso, investigamos melhor o impacto dessa distância, considerando um ambiente com vários receptores no chão e um transmissor no teto, típica posição de lâmpada de ambiente interno. Diferentes distâncias foram modeladas com diferentes valores para a altura desse ambiente. As simulações mostraram um comportamento bastante consistente com os modelos teóricos, mas também revelaram características práticas importantes para o dimensionamento da rede.

As Figuras 6–9 apresentam as métricas analisadas, todas com um intervalo de confiança de 95%. A análise da potência recebida média (Figura 6) evidencia que existe uma altura na qual o sinal atinge seu valor máximo, em torno de 2 m, antes de iniciar um decaimento acentuado. Esse ponto pode ser interpretado como o equilíbrio entre a área de iluminação útil e a intensidade do feixe que incide sobre os receptores. A partir de 3 m, a potência se reduz quase exponencialmente, o que compromete diretamente o desempenho global da rede.

O mesmo efeito se reflete na curva do SNR (Figura 7), que apresenta uma queda contínua com o aumento da altura. Observa-se que, para transmissões até cerca de 5 m, o sistema ainda mantém margens aceitáveis de SNR, embora já em declínio. Entretanto, para alturas superiores a 10 m, o SNR atinge valores muito baixos, tornando o canal praticamente inutilizável para transmissão confiável. Esse comportamento está em consonância com a queda da potência, já que a relação sinal-ruído é altamente dependente da intensidade do feixe recebido.

A capacidade do canal (Figura 8) confirma essa tendên-

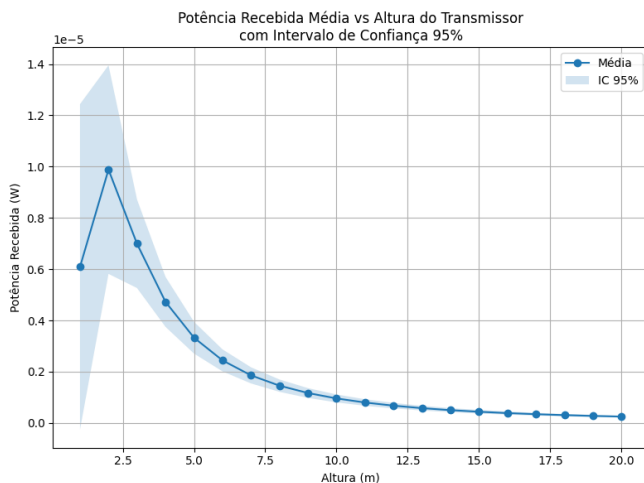


Figura 6. Potência Média

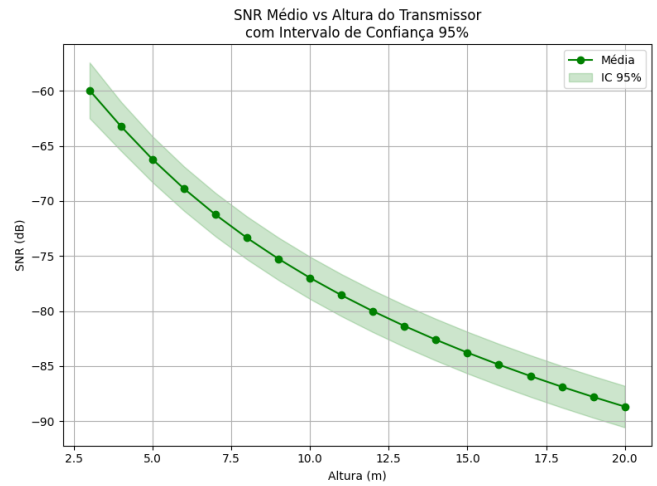


Figura 7. SNR

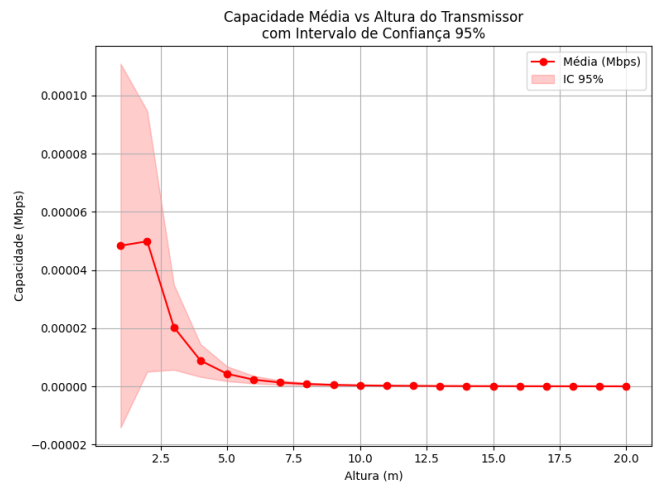


Figura 8. Capacidade Média

cia. Nota-se que os valores mais altos de capacidade ocorrem entre 2,0 m e 2,5 m, intervalo em que há potência suficiente para sustentar uma boa taxa de dados sem comprometer a cobertura. A partir de 3 m, a capacidade decresce rapidamente e tende a valores próximos de zero, revelando que, apesar de haver cobertura física, a rede não consegue sustentar transmissão de dados com eficiência.

O impacto mais evidente dessa degradação aparece no tempo médio de transmissão dos pacotes (Figura 9). Até cerca de 2,5 m, o tempo cresce de forma relativamente controlada, mas a partir desse ponto passa a aumentar de forma acelerada, atingindo valores da ordem de centenas de milhões de segundos em 20 m, completamente inviáveis para qualquer aplicação prática. Esse crescimento está diretamente associado à redução da taxa de dados suportada, uma vez que a queda do SNR aumenta a probabilidade de erro e gera necessidade de retransmissões.

Além das médias apresentadas, todos os gráficos exibem também o intervalo de confiança de 95%, o que fornece uma medida da variabilidade dos resultados e da confiabilidade das estimativas. Observa-se que, para valores de altura próximos a 2 m, os intervalos são maiores, indicando maior dispersão nos dados devido à sensibilidade do sistema nessa região, onde pequenas variações podem gerar diferenças significativas na potência recebida e, consequentemente, no SNR e na

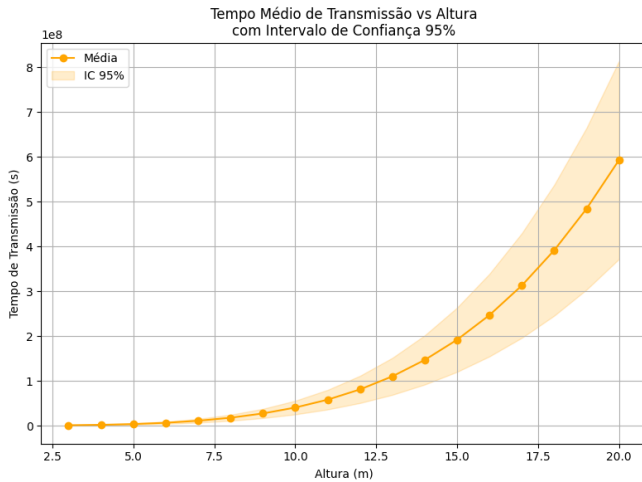


Figura 9. Tempo Médio de Transmissão

capacidade. Já em alturas maiores, os intervalos tendem a se estreitar, refletindo a consistência do comportamento de degradação do canal, ainda que haja um desempenho cada vez mais baixo. Isso demonstra que, embora o sistema apresente incertezas locais, especialmente na altura ótima, a tendência geral de queda com o aumento da altura é robusta e estatisticamente confiável.

Em suma, os resultados apontam para a existência de uma distância ótima, que, em um ambiente fechado com receptores espalhados pelo chão, seria obtido por um transmissor VLC em uma altura próxima de 2,0 m a 2,5 m. Essa distância produz equilíbrio entre intensidade do sinal, cobertura espacial e taxa de transmissão. Alturas muito baixas podem limitar o alcance da rede, enquanto alturas muito elevadas degradam severamente o desempenho devido à queda da potência e do SNR. Assim, a escolha da altura do transmissor deve considerar não apenas a área iluminada, mas também a preservação da qualidade do canal e a minimização do tempo de transmissão.

Na prática, essa faixa de altura é compatível com ambientes como escritórios e centros de dados, onde luminárias e transmissores costumam estar posicionados próximos ao teto, a cerca de 2,5 m do chão, garantindo boa cobertura e qualidade do enlace. Em hospitais, por outro lado, a presença de equipamentos suspensos, divisórias e movimentação frequente pode dificultar a manutenção dessa altura ideal, exigindo ajustes de posicionamento. Já em aeronaves, o espaço reduzido e a altura dos compartimentos de cabine (tipicamente inferiores a 2 m) inviabilizam o uso direto dessa configuração, demandando soluções específicas de adaptação do sistema VLC.

7 Conclusões

Este trabalho apresentou uma análise do desempenho de sistemas de Comunicação por Luz Visível, comparando as modulações *On-Off Keying* e *Variable Pulse Position Modulation* e investigando o impacto da distância entre transmissor e receptores no comportamento do enlace.

Os resultados demonstraram que a VPPM oferece vantagens significativas em termos de eficiência espectral, alcançando aproximadamente 5 bps/Hz, enquanto a OOK apresentou valores da ordem de 0,2 bps/Hz. Esse ganho decorre do mecanismo de codificação baseado na posição temporal

do pulso, que permite maior densidade de informação por unidade de largura de banda. Ainda assim, a OOK mostrou-se adequada a aplicações de baixa complexidade, nas quais simplicidade de hardware, menor processamento e redução do consumo energético são requisitos prioritários.

A análise geométrica do sistema evidenciou que a distância entre transmissor e receptores influencia diretamente a potência recebida, a relação sinal-ruído (SNR), a capacidade do canal e o tempo de transmissão. Observou-se a existência de uma faixa ótima de instalação do transmissor, entre 2,0 m e 2,5 m, na qual se obtém o melhor compromisso entre intensidade do sinal, cobertura espacial e desempenho global. Valores fora desse intervalo, tanto inferiores quanto superiores, resultaram em degradação das métricas, seja pela limitação da área iluminada ou pela rápida redução da potência recebida.

A avaliação dos intervalos de confiança de 95% confirmou a robustez dos resultados obtidos, indicando que, apesar de maior variabilidade próxima à faixa ótima, a tendência de degradação do desempenho com o aumento da altura é estatisticamente consistente.

Conclui-se que a escolha adequada da modulação e da configuração geométrica do sistema são fatores críticos no projeto de redes VLC *indoor*. A VPPM é mais indicada para aplicações que demandam altas taxas de transmissão, enquanto a OOK permanece uma alternativa viável em cenários que priorizam simplicidade e baixo consumo energético.

As principais limitações deste trabalho estão no uso de simulações sob condições ideais de LoS, o que não considera efeitos como bloqueios ou interferências. Além disso, considera-se um cenário *indoor* estático, limitando a generalização dos resultados para ambientes mais dinâmicos. Dessa forma, os resultados tendem a indicar tendências de desempenho, não necessariamente refletindo os valores absolutos aplicáveis a todos os sistemas VLC. Em vista dessas limitações, propõe-se como trabalhos futuros: (i) a avaliação do impacto de obstáculos e reflexão difusa; (ii) a extensão do modelo para múltiplos transmissores e receptores em cenários dinâmicos; e (iii) a implementação de protótipos experimentais para validação prática dos resultados obtidos por simulação.

Declarações complementares

Financiamento

Esta pesquisa é parte do INCT de Redes de Comunicação e Internet das Coisas Inteligentes (ICoNIoT), financiado por CNPq (proc. 405940/2022-0), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.954253/2024-00.

Contribuições dos autores

MY Y contribuiu para a concepção do estudo, desenvolvimento da metodologia, análise dos dados, investigação e foi a principal responsável pela redação do manuscrito. HMNSO e RACS contribuíram com a orientação ao longo da pesquisa, escrita e revisão do manuscrito. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Conflitos de interesse

Os autores declaram que não têm nenhum conflito de interesses.

Referências

- Al-Kinani, A., Wang, C.-X., Zhou, L., and Zhang, W. (2018). Optical wireless communication channel measurements and models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3):1939–1962. DOI: 10.1109/COMST.2018.2838096.
- Alves, C. and da Silva Filho, J. (2020). Um estudo sobre o modelo ZigBee de rede sem fio IEEE 802.15.4. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação*, 18(2). Disponível em: <https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/reic/article/view/1719>.
- Arnon, S. (2015). *Visible Light Communication*. Cambridge University Press.
- Bhutani, M., Singh, B., Gupta, A., Sudha, K., Sharma, S., Banerjee, S., Talwar, M., and Chaurasiya, V. K. (2025). Visible light communication technologies: a review of IEEE 802.15. 7 and its role in next-generation networks. *International Journal of Communication Systems*, 38(11):e70149. DOI: 10.1002/dac.70149.
- Ghassemlooy, Z., Alves, L., Zvanovec, S., and Khalighi, M. (2017). *Visible Light Communications: Theory and Applications*. CRC Press.
- Haas, H., Elmirghani, J., and White, I. (2020). Optical wireless communication. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2169):20200051. DOI: 10.1098/rsta.2020.0051.
- IEEE (2011). IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light. *IEEE Std 802.15.7-2011*, pages 1–309. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195.
- IEEE (2019). IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range optical wireless communications. *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pages 1–407. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198.
- Jain, R. (1991). *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley New York.
- Junior, W. A. S. (2014). Redes aéreas IEEE 802.15.4: tamanho ótimo do pacote e coleta de dados. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Kharbouche, A., El-Haryqy, N., Ouamna, H., Madini, Z., and Zouine, Y. (2025). Visible light communication technologies: A tutorial and survey from fundamentals to cutting-edge innovations. *Optical Switching and Networking*, page 100824. DOI: 10.1016/j.osn.2025.100824.
- Kim, H.-C., Yoo, J.-H., Jung, S.-Y., and Jeon, J.-P. (2013). Design of multi-spectral coded VPPM for optical wireless LED communications. In *2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 375–379. DOI: 10.1109/ICUFN.2013.6614845.
- Mahanani, E. L., Marsuki, A. I., Mufti, S., and Abimanyu, A. (2025). Comparative performance analysis of 8-PPM and OOK modulation techniques for diver-to-diver UVLC systems. In *2025 IEEE International Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT)*, pages 138–144. IEEE. DOI: 10.1109/SOFTT67007.2025.11213017.
- Matheus, L. E. M., Vieira, A. B., Vieira, L. F., Vieira, M. A., and Gnawali, O. (2019). Visible light communication: Concepts, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4):3204–3237. DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348.
- Moraes, J., Oliveira, H., Rosário, D., and Cerqueira, E. (2021). Viabilização de alocação de recursos em LoRaWAN. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação*, 19(2). Disponível em: <https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/reic/article/view/2086>.
- Obeed, M., Salhab, A. M., Alouini, M.-S., and Zummo, S. A. (2019). On optimizing VLC networks for downlink multi-user transmission: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3):2947–2976. DOI: 10.1109/COMST.2019.2906225.
- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., and Mohapatra, P. (2015). Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2047–2077. DOI: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- Sankarasubramaniam, Y., Akyildiz, I., and McLaughlin, S. (2003). Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003.*, pages 1–8. DOI: 10.1109/SNPA.2003.1203351.
- Shams, N., Kakhki, A. P., Nabavi, M., and Nabki, F. (2023). An OOK and binary FSK reconfigurable dual-band noncoherent IR-UWB receiver supporting ternary signaling. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 31(5):644–657. DOI: 10.1109/TVLSI.2023.3248486.
- Ucar, S., Coleri Ergen, S., Ozkasap, O., Tsonev, D., and Burchardt, H. (2016). Secvlc: Secure visible light communication for military vehicular networks. In *Proceedings of the 14th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MobiWac '16*, page 123–129, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery. DOI: 10.1145/2989250.2989259.
- Vieira, A. G., Vieira, L. F. M., and Vieira, M. A. M. (2020). Tamanho Ótimo do pacote em comunicação por luz visível sem fio. In *Anais XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2020)*, SBRC, page 15–28. Sociedade Brasileira de Computação. DOI: 10.5753/sbrc.2020.12270.
- Villa Sierra, J. F. (2021). *Control del ángulo del fasor de voltaje en sistemas de potencia*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Wu, W.-C. (2024). Detection and performance analysis for MIMO visible light communication system using joint optical spatial and pulse amplitude width modulation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2024(1):8. DOI: 10.1186/s13638-024-02335-x.
- Zhong, X., Chen, C., Wen, W., Liu, M., Fu, H., and Haas, H. (2024). Optimization of surface configuration in IRS-aided MIMO-VLC: A BER minimization approach. *IEEE Photonics Journal*, 16(3):1–12. DOI: 10.1109/JPHOT.2024.3395894.