

# Comunicação Óptica Sem Fio Subaquática: Caracterização de Desempenho da Luz Vermelha

Gabriel M. Reis<sup>1</sup>, Douglas D. M. Silva<sup>1</sup>, Alex B. Vieira<sup>2</sup>,  
Marcos A. M. Vieira<sup>3</sup>, Luiz F. M. Vieira<sup>3</sup>, José Augusto M. Nacif<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Florestal/MG

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora/MG

<sup>3</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG

{gabriel.m.reis, douglas.marcelino, jnacif}@ufv.br

**Resumo**—A comunicação subaquática sem fio (UWC) é de grande interesse para aplicações militares, industriais e para a comunidade científica, pois desempenha um papel importante, como por exemplo, na vigilância tática e no monitoramento da poluição da água. A UWC pode ser realizada usando ondas acústicas, de radiofrequência (RF) e ópticas. Em contraste com as ondas acústicas e de RF, a comunicação óptica sem fio subaquática (UWOC) pode suportar taxas de dados mais altas com baixos níveis de latência. Entretanto, as propriedades do canal de água representam desafios significativos para a UWOC, o que exige soluções de rede eficientes. Nesse sentido, este artigo investiga o desempenho de um sistema UWOC com um transmissor no espectro de luz vermelha em um ambiente aquático raso e claro. Foram realizadas avaliações sobre o impacto no desempenho da transmissão causado por diodos de laser (LDs) nesse comprimento de onda. Os resultados apresentados mostram o impacto na comunicação causado pelo meio, pela distância entre os nós e pelo tipo de transmissor usado. Além disso, eles demonstram a viabilidade do uso da luz vermelha na comunicação, que atingiu uma taxa de dados máxima de 5,08 kbps com 5 cm de distância entre os nós.

## I. INTRODUÇÃO

Dois terços da superfície terrestre são cobertos por água, graças a isso, nos últimos milhares de anos, os humanos sempre exploraram o oceano e, mais recentemente, com a crescente mudança climática global e o esgotamento de recursos, tem havido um aumento no interesse na pesquisa de sistemas de exploração oceânica, como monitoramento ambiental, coleta de dados científicos subaquáticos, arqueologia marítima, exploração de campos petrolíferos offshore, segurança portuária e vigilância tática [38], monitoração de lagos [37]. O aumento no interesse em sistemas subaquáticos [32], [33], por sua vez, incrementa a necessidade por sistemas de comunicação subaquática. Sistemas de comunicação com fio (particularmente fibra óptica) podem ser usados para fornecer comunicação em tempo real em aplicações submarinas, mas seu alto custo, falta de flexibilidade e desvantagens operacionais tornam-se restritivos para a maioria dos casos práticos [36].

Os estudos mais recentes incentivam a exploração do ambiente oceânico por meio da implantação de tecnologias UWC, ou seja, a transmissão de dados em um ambiente aquático

não guiado através do uso de carregadores de sinal sem fio, como ondas de radiofrequência (RF), ondas acústicas e ondas ópticas [3]–[5], [39]. Os sistemas de ondas acústicas, mais frequentemente vistos para UWC, tiveram grande sucesso devido à sua capacidade de se comunicar por muitos quilômetros [2]. Contudo, o desempenho desse tipo de comunicação é limitado pela baixa largura de banda, altas perdas de transmissão, propagação de multicaminhos variável no tempo, alta latência e propagação Doppler. Além disso, sinais acústicos gerados por sistemas de comunicação e dispositivos de navegação e alcance sonoro de alta potência (SONAR) têm impacto negativo sobre os mamíferos subaquáticos e peixes [9].

Por outro lado, as ondas de RF foram inicialmente usadas como faixas de baixa frequência para transmitir sinais na comunicação terrestre, a fim de atingir uma comunicação confiável e para alcançar altas velocidades. No entanto, em um ambiente subaquático, as ondas de RF se propagam de maneira diferente em comparação com o ambiente terrestre e dependem totalmente do meio aquático em que se encontram [4]. As ondas de RF em meio subaquático sofrem com desvanecimento de sinal e atenuam facilmente em distâncias muito curtas debaixo d'água, o que torna um desafio transmitir sinais através de ondas de RF em um meio de água altamente turvo [10].

Considerando a largura de banda limitada de RF e de métodos acústicos em ambientes subaquáticos, há uma crescente necessidade de transmissão de dados em alta velocidade neste meio. Por isso, a comunicação óptica sem fio subaquática (UWOC) tornou-se uma alternativa atraente e viável para baixo e médio alcance, por apresentar ampla largura de banda, alta confiabilidade, baixa latência, ter baixo impacto e baixo custo [6]. No entanto, os grandes desafios da UWOC são o maior nível de atenuação, as variações significativas em suas propriedades ópticas, mais fontes de interrupção do *link* e uma grande quantidade de matéria dissolvida e particulada [4].

Vale ressaltar que a propagação subaquática de ondas ópticas exibe características distintas para diferentes comprimentos de onda, sendo notável que a água oferece maior transparência no espectro de luz azul-verde (450 nm–532 nm) quando comparado a outros comprimentos de onda do espec-

tro eletromagnético [9]. Portanto, UWOC em termos de luz visível é principalmente realizada no espectro azul-verde de comprimento de onda [10]. No entanto, em ambientes ricos em matéria orgânica colorida dissolvida (*color dissolved organic material* - CDOM), a utilização de transmissores em outras partes do espectro de luz visível pode apresentar resultados superiores [4]. Esse “subtipo” de UWOC que usa o espectro de luz visível recebe o nome de comunicação por luz visível sem fio subaquática (*underwater visible light communication* - UVLC).

Neste trabalho, será apresentado um sistema UVLC em água doce rasa e límpida baseado em OpenVLC [11] utilizando um diodo laser (*laser diode* - LD) e um foto-diodo (*photodiode* - PD). Sendo analisada a comunicação entre ambos, utilizando a cor vermelha, com o objetivo de compreender melhor o comportamento dessa frequência de onda e sua viabilidade para o uso em sistemas UVLC. A proposta foi avaliada em diversas condições, estudando os efeitos na comunicação causados pelo comprimento de onda da cor vermelha considerando o espectro eletromagnético e a distância entre os nós.

As principais contribuições desse trabalho são: (i) discussão de novos resultados sobre o impacto causado pela emissão espectral de luz vermelha na comunicação subaquática, (ii) comparação entre o desempenho da comunicação em ambiente subaquático e em ambiente terrestre para o comprimento de luz vermelha, (iii) medição do impacto gerado por variação da distância entre nós da rede subaquática para o comprimento de luz vermelha e (iv) a avaliação experimental da emissão/resposta espectral da cor vermelha em sistemas UVLC.

O restante deste artigo está organizado em 5 seções. Na Seção II, descreve-se os trabalhos relacionados. Uma visão geral sobre comunicação óptica sem fio subaquática é apresentada na Seção III. A metodologia utilizada e o cenário configurado para os experimentos são discutidos na Seção IV. Os resultados obtidos são discutidos na Seção V. Na Seção VI, por fim, o artigo é concluído.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Com o aumento no interesse por pesquisas sobre UWOC, vários artigos foram publicados sobre o assunto. O impacto no desempenho do sistema, assim como desenvolvimentos recentes na caracterização de canais UWOC, esquemas de modulação, técnicas de codificação e várias fontes de ruído específicas de UWOC são discutidos em [4]. O desempenho da UWOC foi avaliado em [26] e vários desafios associados ao desenvolvimento desse tipo de comunicação foram introduzidos. A modelagem matemática e avaliação de desempenho do canal UWOC foi apresentada em [27]. Além disso, a pesquisa realizada por [18] lista exaustivamente os fatores críticos de propagação de sinais ópticos em um meio subaquático onde os autores modelaram os canais UWOC.

A utilização de UWOC como tecnologia de comunicação óptica em espaço livre e UVLC foi comparada e amplamente discutida em [28]. O trabalho mais recente baseado no esquema MIMO-OFDM utilizando UVLC é proposto em [30],

no qual os autores apresentam o desempenho da taxa de erro de bits do sistema considerando condições de baixa turbulência no canal. Um sistema de UWOC baseado em LDs é apresentado em [35], no qual os autores medem a taxa de erros de bits e a velocidade de transmissão de dados para um LD azul. Elamassie et al. [36] investiga os limites de desempenho dos sistemas UVLC. Neste trabalho os autores desenvolvem uma expressão de perda de caminho de forma fechada em função dos parâmetros do transmissor e do tipo de água e utilizam essa nova expressão para determinar a distância máxima alcançável de comunicação para sistemas UVLC em mar, oceano claro, águas costeiras e águas portuárias.

A resposta espectral de diodos emissores de luz (*light-emitting diodes* - LEDs) usando frequências do espectro eletromagnético distintas e atuando como fotodiodos em sistemas OWC foi estudada em [31], [34]. Os autores investigaram nestes trabalhos, dentro de um contexto OWC, a influência da polarização reversa nas propriedades de fotorrecepção de LEDs usados como fotodiodos. Matheus et al. [25] expandiram a pesquisa de [34] usando uma variedade maior de combinações de cores de LEDs, analisando seus impactos na comunicação e mostrando as configurações apropriadas para uma comunicação VLC eficaz.

Sob o mesmo ponto de vista, o presente artigo expande os conceitos acima, aumentando o número de bandas do espectro eletromagnético viáveis para UWOC ao utilizar o comprimento de onda de luz vermelha na comunicação e, também, por apresentar uma comparação do desempenho da rede subaquática com a rede em ambiente terrestre. Escolhemos a cor, as distâncias e os transmissores estudados para fornecer mais informação acerca do uso da luz vermelha em redes UWOC considerando as propriedades ópticas do meio subaquático. Nesse cenário, as distâncias possíveis de comunicação são menores e as cores mais comuns são o azul e o verde.

## III. COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL SEM FIO SUBAQUÁTICA

A implementação de redes UWC é algo desafiador, porém altamente relevante para a exploração de setores inacessíveis do oceano, já que UWC cria uma oportunidade para coleta e análise de dados hidrográficos como, por exemplo, dados de poluição da água, monitoramento ambiental subaquático, mudanças nas correntes, alertas antecipados sobre inundações e tsunamis e observação dos fenômenos de derretimento da camada de gelo devido ao aquecimento global [14]. A Tabela I apresenta uma comparação entre as características de sistemas de comunicação UWC acústicos, ópticos e baseados em RF.

A UWOC apresenta vantagens quando comparada às redes sem fio subaquáticas operando com ondas acústicas e RF, podendo atingir taxas de transferência de dados mais altas em distâncias de até algumas dezenas de metros, conseguindo chegar até vários Gbps em águas claras com pouca ou nenhuma dispersão [9]. Além disso, os sistemas UWOC fornecem um desempenho com baixa latência em razão da alta velocidade de propagação da luz no meio aquático [16], são mais eficientes

Tabela I  
COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO  
SUBAQUÁTICAS. ADAPTADO DE [9] PARA SE ADEQUAR AO CONTEXTO  
DESTE ARTIGO

Parâmetro	RF	Acústica	Óptica
Alcance	< 100 m	< 20 km	100 - 200 m
Fatores de atenuação	Frequência e condutividade	Condutividade	Distância e propriedades ópticas inerentes
Velocidade	$2,25 \cdot 10^8$ m/s	1500 m/s	$2,25 \cdot 10^8$ m/s
Potência do transmissor	$\approx 100$ W	$\approx 10$ W	$\approx 1$ W

em termos de energia e apresentam um custo mais baixo do que seus equivalentes acústicos e de RF [17]. Além disso, a segurança da comunicação na UWOC é maior do que em métodos acústicos e de RF, já que maioria dos sistemas UWOC são implementados na configuração linha de visão ponto a ponto, ao invés do cenário de transmissão difusa utilizado em ondas acústicas e de RF, dificultando as tentativas de *eavesdropping* [18].

A propagação de ondas ópticas em ambientes subaquáticos exibe características diferentes para comprimentos de onda distintos. A água oferece transparência no espectro de luz azul-verde quando comparado a outros comprimentos de onda do espectro óptico [9]. Portanto, a comunicação óptica sem fio subaquática é majoritariamente realizada em termos de luz visível (UVLC), mais especificamente no espectro do comprimento de onda azul-verde (450-532) nm [19].

Em ambientes subaquáticos, existe a presença de tecidos vegetais mortos e matéria orgânica em decomposição que é classificada como matéria orgânica colorida dissolvida. Esse material pode aumentar a turbidez da água e, assim, diminuir a distância de propagação da luz. Além disso, há os CDOMs que produzem ácidos húmicos e fúlvicos que apresentam, assim como a clorofila de fitoplânctons, alto pico de absorção em torno da região azul-verde do espectro eletromagnético e, conseqüentemente, a aplicação de emissores de luz na banda amarelo-vermelho se destaca para ambientes ricos nesse tipo de matéria [4].

Do ponto de vista técnico o projeto de um *link* UVLC pode ser classificado em quatro categorias [18]:

- i) **Linha de visão ponto a ponto:** neste cenário, os receptores utilizados devem estar alinhados e diretamente

ligados uns aos outros na direção da linha de propagação do sinal. É o cenário mais utilizado em UWOC;

- ii) **Linha de visão difusa:** utiliza fontes de luz difusa, como LEDs de alta potência, com grande ângulo de abertura para realizar a transmissão UWOC de um nó para vários nós;
- iii) **Linha de visão baseada em retrorefletor:** baseia-se no fenômeno de retroespalhamento, que consiste em uma fonte de luz com um refletor óptico. Conseqüentemente, a fonte de propagação do feixe óptico emite continuamente um feixe de luz durante a propagação do sinal de luz modulado que é refletido por um refletor local e, então, recebido pelo destino;
- iv) **Sem linha de visão:** nesta configuração, o transmissor emite o feixe de luz em direção a superfície do mar com um ângulo de incidência maior que o ângulo crítico para que o feixe de luz sofra uma reflexão interna total. O receptor deve ficar voltado para a superfície do mar em uma direção aproximadamente paralela à luz refletida para garantir a recepção adequada do sinal.

Levando em conta essas opções de projeto, a utilização de UVLC encontra algumas dificuldades em ambientes reais. Primeiramente, um desalinhamento dos transmissores/receptores ópticos pode causar desconexões de curto prazo que geralmente são resultado de movimentos aleatórios da superfície da água, variações dependentes da profundidade, correntes e turbulência aquática [20], [21]. Além disso, mesmo se o comprimento de onda do feixe de luz for azul ou verde, a propagação do feixe óptico debaixo d'água é impactada pelas propriedades ópticas inerentes e aparentes [15]. Essas propriedades são bastante distintas para cada tipo de corpo d'água (variando de águas rasas a oceanos profundos) pois variam de acordo com a profundidade e requerem uma compreensão completa do ambiente bio-físico-químico subaquático [4]. Essas propriedades fazem com que o feixe de luz sofra absorção, dispersão, turbulência e, portanto, desvanecimento de multipercursos devido às interações das moléculas de água e partículas com os fótons [1], [3], [4], [10], [18].

Apesar de todas adversidades, o UVLC tornou-se uma tecnologia promissora na nova era da comunicação sem fio subaquática, que chamou a atenção como uma alternativa para propagação de sinal em alta velocidade em pequenas distâncias no hostil meio subaquático, tendo diversas aplicações que podem se beneficiar da sua utilização [1], [3], [4], [9], [10], [14], [22]. Dada a velocidade de transferência de dados, ambiente e plataforma necessários, é possível identificar qual tecnologia UVLC se adequa melhor à aplicação. Logo, redes baseadas em UVLC podem ser utilizadas para variadas áreas como monitoramento ambiental, navegação, plataformas petrolíferas, segurança e aplicações militares [10].

#### IV. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E CENÁRIO

A implementação do sistema UVLC investigado neste artigo se deu com base na plataforma OpenVLC 1.0. A OpenVLC é uma plataforma aberta definida por software criada para pesquisas relacionadas a comunicação por luz visível. Ela consiste

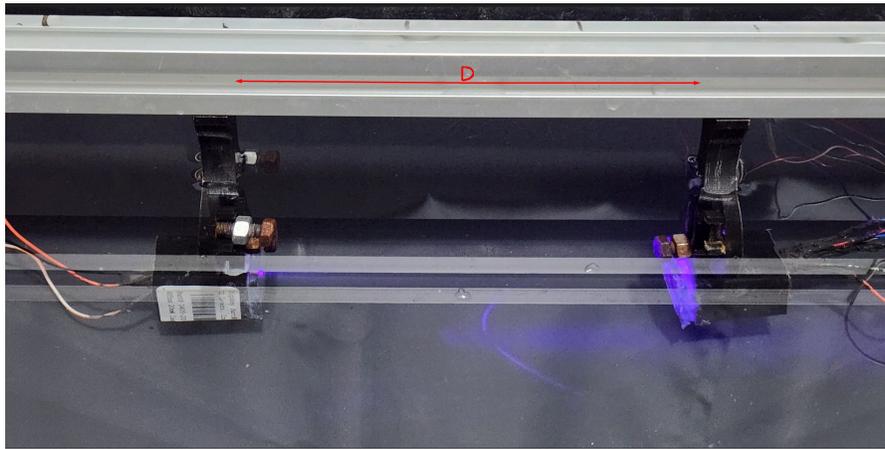


Figura 1. Ambiente experimental.

em uma placa de expansão, montada sobre o BeagleBone Black, contendo os elementos ópticos, como LEDs, LDs e PDs, necessários para realizar a comunicação. Além disso, a OpenVLC também possui um driver próprio, responsável pela comunicação com camadas superiores e implementação da camada de enlace/física. Na camada física estão implementados *On-off keying* para modulação, Manchester para codificação e para a correção de erros, é utilizado *Reed Solomom*. Na camada de enlace são utilizados CSMA/CA, CSMA/CD e CSMA/CD-HA para controle de acesso ao meio [23].

As avaliações foram realizadas através da topologia com linha de visão ponto a ponto, a mais comum em redes UVLC. Para isso, fixaram-se o LD e o PD em um suporte deslizante conectado a um perfil de alumínio. Assim, conseguiu-se alinhar os transmissores e receptores de maneira eficiente mesmo subaquaticamente. A Figura 1 mostra o ambiente experimental, já com os componentes submersos em água encanada com profundidade de 8 cm. O perfil de alumínio associado ao suporte deslizante permitiu a variação da distância  $d$  entre os nós de comunicação sem risco de alteração no alinhamento, garantindo que o único fator de impacto na qualidade do link causado por essa alteração fosse, de fato, o gerado pela distância. Os testes foram conduzidos sob luz ambiente aberto com baixa intensidade de ventos.

Com o objetivo de garantir que os componentes utilizados na comunicação (LD e PD) não apresentassem funcionamento comprometido embaixo d'água foi necessário envolvê-los, de forma a não permitir contato entre as partes elétricas expostas e a água. Para proteger o LD e o PD, utilizou-se uma caixa impressa em 3D com abertura na parte de baixo e de cima. Após o posicionamento dos componentes, o interior da caixa foi preenchido com silicone. Em seguida, a caixa teve sua parte superior lacrada com uma peça de vidro, como mostra a Figura ??.

Os parâmetros de sistema como frequência e tamanho dos pacotes enviados podem ser facilmente modificados pois o *software* da OpenVLC é implementado como um driver Linux. Para garantir a paridade de configuração na rede

para todos os cenários experimentados, os parâmetros foram fixados conforme o apresentado na Tabela II e estão de acordo com a avaliação e recomendações de outros estudos sobre o OpenVLC 1.0 [24]. Para medir o desempenho das redes, foram consideradas as seguintes métricas: vazão de dados e taxa de recepção de pacotes (PRR). Esses dados foram obtidos por meio da execução da ferramenta Iperf transmitindo pacotes UDP durante 60 segundos com especificações ótimas adotadas e firmadas para todos os experimentos em sua configuração, sendo elas: pacote com tamanho de 0,8 kB e vazão de dados de 16 kbps, que são parâmetros estado-da-arte para o Iperf quando usado para avaliações em OpenVLC [24].

Tabela II  
PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Parâmetro	Valor
Transmissor	LD
Receptor	PD
Frequência	50 kHz
Tamanho do payload	0,8 kB
Modulação	<i>On-Off Keying</i> (OOK) com codificação Manchester
Protocolo de acesso ao meio	CSMA/CA

Em nossa análise foi estudada a comunicação com um LD atuando na qualidade de transmissor e um PD agindo como receptor. Para analisar a viabilidade do uso de transmissores vermelhos os experimentos tiveram o objetivo de aferir o impacto causado pela resposta espectral na comunicação subaquática. Os experimentos consideraram um sistema otimizado para comunicações subaquáticas sem turbulência, haja visto que a utilização de um LD no lugar de um LED resolve grande parte do problema de dispersão do feixe de luz [18]. Foram utilizados um foto-diodo OPT101 e um LD vermelho com comprimento de onda de 650 nm. O LD vermelho apresenta melhores resultados de vazão e PRR em ambientes terrestres [25] e também apresenta bons resultados para ambientes com alta concentração de CDOM. A distância

$d$  foi variada, assumindo os valores 5 cm, 10 cm, 20 cm e 40 cm.

O experimento foi repetido 5 vezes em cada cenário. Cada execução do Iperf gerou o envio de 126 pacotes e, ao final das 5 execuções, foram enviados 630 pacotes. Os resultados apresentados são médias e intervalo de confiança para todas as amostras relativas a um dado cenário, contando com um nível de confiança de 90%. Por fim, no último estágio da análise são comparados os resultados obtidos na segunda fase dos experimentos para o LD vermelho com a avaliação realizada por [25]. Utilizou-se na comparação os valores de PRR e vazão de dados na comunicação LED-a-LED: vermelho-vermelho pois os parâmetros de configuração da OpenVLC e para o Iperf são os mesmos nos dois estudos e, embora o PD seja um melhor receptor que o LED, optamos pela configuração com melhor desempenho para transmissor vermelho mostrada no artigo referência.

## V. RESULTADOS E AVALIAÇÕES

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados experimentais obtidos para média e intervalo de confiança dos valores de PRR e vazão de dados no contexto da segunda etapa de avaliação, com o LD vermelho atuando como transmissor. Nossos resultados mostram que a taxa de recepção de pacotes tem comportamento semelhante à vazão de dados. A maior vazão de dados média alcançada nesse cenário foi de 5,08 kbps na distância de 5 cm, a qual decaiu em 31,16% até a distância de 20 cm, onde se estabiliza em 3,49 kbps e permanece igual até 40 cm. A PRR, como citado anteriormente, acompanha a tendência da vazão de dados e também atinge seu pico, de 84,86%, na distância de 5 cm e estabiliza em 46,28% entre 20 cm e 40 cm.

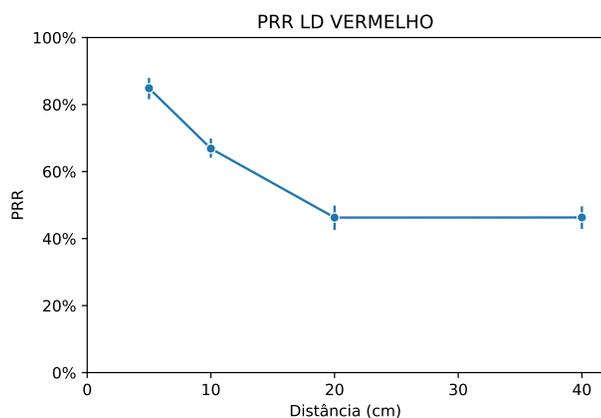


Figura 2. Taxa de recepção de pacotes para o LD vermelho em várias distâncias.

A comparação dos resultados do LD vermelho com os obtidos por [25] no *link* LED vermelho a LED vermelho demonstra o impacto da água no desempenho da comunicação. Em [25] a PRR tem variações torno de 3%, permanecendo próxima a 85% para todas as distâncias, algo atingido no ambiente subaquático apenas para a distância de 5 cm. Para a vazão,

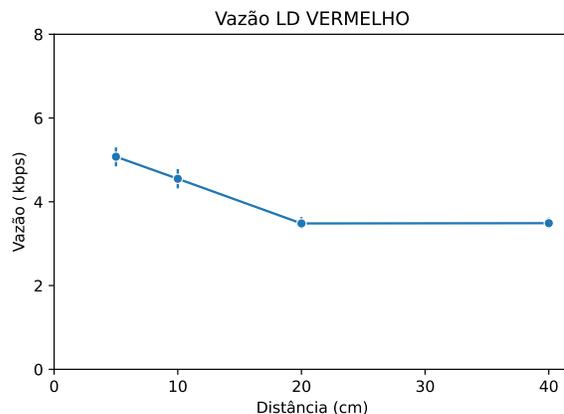


Figura 3. Vazão de dados para o LD vermelho em várias distâncias.

mesmo o pior valor no ambiente terrestre, próximo a 9 kbps em 80 cm, é superior ao melhor valor subaquático. Levando em consideração o fato de no presente estudo utilizarmos um foto-diodo como receptor, essa piora nos resultados se torna ainda mais significativa.

## VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi explorado o desempenho da comunicação de um LD no comprimentos de onda de luz vermelha atuando como transmissor em conjunto com um PD, aplicado como receptor, para múltiplas distâncias. Por fim, comparou-se o resultado obtido com a utilização do laser vermelho com a avaliação realizada por [25]. O desempenho em ambiente subaquático mesmo que inferior ao ambiente terrestre, ainda se mostra muito promissor em se tratando da luz vermelha.

Os resultados obtidos demonstram as limitações do uso de fontes de luz difusas para redes UVLC em águas rasas e límpidas e como essas limitações são solucionadas com a utilização de LDs com baixo ângulo de divergência de feixe. Ademais, é factível confirmar que valer-se de emissores de luz operando no espectro de luz vermelha é uma alternativa viável para UVLC em curtas distâncias. Além disso, as limitações de sistemas UVLC frente a sistemas VLC terrestres são exemplificadas.

Como trabalhos futuros, propõe-se uma avaliação semelhante à realizada neste trabalho, porém para águas com diferentes profundidades e turbidezes. Também pretende-se explorar o impacto causado por emissores de luz em comprimentos de ondas distintos aos considerados nesse estudo.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer CAPES, CNPq e Fapemig (Projeto #APQ-02062-21) pelo financiamento a este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Gussen, Camila MG and Diniz, Paulo SR and Campos, Marcello LR and Martins, Wallace A and Costa, Felipe M and Gois, Jonathan N, "A survey of underwater wireless communication technologies," J. Commun. Inf. Sys, vol. 31, pp.242–255, 2016.

- [2] Chitre, Mandar and Shahabudeen, Shiraz and Stojanovic, Milica, "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges," *Marine technology society journal*, vol. 42., pp.68–73, 2008.
- [3] Zhu, Shijie and Chen, Xinwei and Liu, Xiaoyan and Zhang, Guoqi and Tian, Pengfei, "Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 73, pp.2100274, 2020.
- [4] Kaushal, Hemani and Kaddoum, Georges, "Underwater optical wireless communication," *IEEE access*, vol. 4, pp.1518–1547, 2016.
- [5] Sun, Xiaobin and Kang, Chun Hong and Kong, Meiwei and Alkhazragi, Omar and Guo, Yujian and Ouhssain, Mustapha and Weng, Yang and Jones, Burton H and Ng, Tien Khee and Ooi, Boon S, "A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, pp.421–431, 2020.
- [6] Chowdhury, Mostafa Zaman and Hossan, Md Tanvir and Islam, Amirul and Jang, Yeong Min, "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications," *IEEE Access*, vol.6, pp.9819–9840, 2018.
- [7] Johnson, Laura J and Jasman, Faezah and Green, Roger J and Leeson, Mark S, "Recent advances in underwater optical wireless communications," *Underwater Technology*, vol.32, pp.167–175, 2014.
- [8] Elamassie, Mohammed and Miramirkhani, Farshad and Uysal, Murat, "Performance characterization of underwater visible light communication," *IEEE Transactions on Communications*, vol.67, pp.543–552, 2018.
- [9] Saeed, Nasir and Celik, Abdulkadir and Al-Naffouri, Tareq Y and Alouini, Mohamed-Slim, "Underwater optical wireless communications, networking, and localization: A survey", *Ad Hoc Networks*, vol.94, pp.101935, 2019.
- [10] Ali, Mohammad Furqan and Jayakody, Dushantha Nalin K and Li, Yonghui, "Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems", *IEEE Access*, vol.10, pp.22169–22225, 2022.
- [11] Wang, Qing and Giustiniano, Domenico and Puccinelli, Daniele, "Open-VLC: Software-defined visible light embedded networks", *Proceedings of the 1st ACM MobiCom workshop on Visible light communication systems* University Science, pp.15–20, 2014.
- [12] Pathak, Parth H and Feng, Xiaotao and Hu, Pengfei and Mohapatra, Prasant, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges", *IEEE communications surveys & tutorials*, vol.17, pp.2047–2077, 2015.
- [13] IEEE, "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)*, pp.1–407, April 2019.
- [14] Ali, Mohammad Furqan and Jayakody, Dushantha Nalin K and Chursin, Yury Alexandrovich and Affes, Soféine and Dmitry, Sonkin, "Recent advances and future directions on underwater wireless communications", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.27, pp.1379–1412, 2020.
- [15] Mobley, Curtis D, "The optical properties of water", *Handbook of optics*, vol.1, pp.43–3, 1995.
- [16] Haltrin, Vladimir I, "One-parameter two-term Henyey-Greenstein phase function for light scattering in seawater", *Applied Optics*, vol.41, pp.1022–1028, 2002.
- [17] Che, Xianhui and Wells, Ian and Dickers, Gordon and Kear, Paul and Gong, Xiaochun, "Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, vol.48, pp.143–151, 2010.
- [18] Zeng, Zhaoquan and Fu, Shu and Zhang, Huihui and Dong, Yuhan and Cheng, Julian, "A survey of underwater optical wireless communications", *IEEE communications surveys & tutorials*, vol.19, pp.204–238, 2016.
- [19] Al-Kinani, Ahmed and Wang, Cheng-Xiang and Zhou, Li and Zhang, Wensheng, "Optical wireless communication channel measurements and models", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.20, pp.1939–1962, 2018.
- [20] Zhang, Huihui and Dong, Yuhan, "Link misalignment for underwater wireless optical communications", *2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, pp.215–218, 2015.
- [21] Yi, Xiang and Li, Zan and Liu, Zengji, "Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence", *Applied Optics*, vol.54, pp.1273–1278, 2015.
- [22] Dickey, T and Lewis, M and Chang, G, "Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations", *Reviews of geophysics*, vol.44, 2006.
- [23] Matheus, LM and Vieira, Alex Borges and Vieira, LF and Vieira, M and Freire, J and Gnawali, Omprakash, "Comunicação por luz visível: conceito, aplicações e desafios", 2017.
- [24] Heydariaan, Milad and Yin, Shengrong and Gnawali, Omprakash and Puccinelli, Daniele and Giustiniano, Domenico and others, "Embedded visible light communication: Link measurements and interpretation", *MadCom: New Wireless Communication Paradigms for the Internet of Things*, in conjunction with the 13th International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN 2016), 2016.
- [25] Matheus, Luiz and Pires, Letícia and Vieira, Alex and Vieira, Luiz FM and Vieira, Marcos AM and Nacif, José A, "The internet of light: Impact of colors in LED-to-LED visible light communication systems," *Internet Technology Letters*, vol.2, pp.e78, 2019.
- [26] Arnon, Shlomi, "Underwater optical wireless communication network", *Optical Engineering*, vol.49, pp.015001, 2010.
- [27] Jaruwatanadilok, Sermsak, "Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory", *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol.26, pp.1620–1627, 2008.
- [28] Ghassemlooy, Zabih and Arnon, Shlomi and Uysal, Murat and Xu, Zhengyuan and Cheng, Julian, "Emerging optical wireless communications—advances and challenges", CA: University Science, vol.33, pp.1738–1749, 2015.
- [29] Chaudhary, Anand Kumar and Shukla, Sandeep and Singh, Shivendra, "Analysis of underwater wireless communication using visible light LEDs", *2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, pp.1–4, 2020.
- [30] Jiang, Hongyan and Qiu, Hongbing and He, Ning and Popoola, Wasiu and Ahmad, Zahir and Rajbhandari, Sujun, "Performance of spatial diversity DCO-OFDM in a weak turbulence underwater visible light communication channel", *Journal of Lightwave Technology*, vol.38, pp.2271–2277, 2020.
- [31] Shin, Dong-Yong and Kim, Jae Young and Eom, In-Yong, "Spectral responses of light-emitting diodes as a photodiode and their applications in optical measurements", *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol.37, pp.2041–2046, 2016.
- [32] Viana, S.S., Vieira, L.F.M., Vieira, M.A.M., Nacif, J.A.M, Vieira, A.B. Survey on the design of underwater sensor nodes. *Des Autom Embed Syst* 20, 171–190 (2016).
- [33] D. Pinto et al., "HydroNode: A low cost, energy efficient, multi purpose node for underwater sensor networks," *37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2012.
- [34] Kowalczyk, Marcin and Siuzdak, Jerzy, "Influence of reverse bias on the LEDs properties used as photo-detectors in VLC systems", *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015*, vol.9662, pp.966205, 2015.
- [35] Shen, Chao and Guo, Yujian and Oubei, Hassan M and Ng, Tien Khee and Liu, Guangyu and Park, Ki-Hong and Ho, Kang-Ting and Alouini, Mohamed-Slim and Ooi, Boon S, "20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate", *Optics express*, vol.24, pp.25502–25509, 2016.
- [36] Elamassie, Mohammed and Miramirkhani, Farshad and Uysal, Murat, "Performance characterization of underwater visible light communication", *IEEE Transactions on Communications*, vol.67, pp.543–552, 2018.
- [37] Vieira, Luiz Filipe M and Vieira, Marcos Augusto M and Nacif, José Augusto M and Vieira, Alex Borges, "Autonomous wireless lake monitoring", *Computing in Science & Engineering*, vol.20, pp.66–75, 2018.
- [38] Coutinho, Rodolfo W. L. and Boukerche, Azzedine and Vieira, Luiz F. M. and Loureiro, Antonio A. F., "Underwater Wireless Sensor Networks: A New Challenge for Topology Control-Based Systems", *ACM Comput. Surv.*, vol.51, January 2019.
- [39] Coutinho, Rodolfo W. L. and Boukerche, Azzedine and Vieira, Luiz F. M. and Loureiro, Antonio A. F., "On the design of green protocols for underwater sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, vol.54, pp.67–73, 2016.
- [40] Coutinho, Rodolfo W.L. and Boukerche, Azzedine and Vieira, Luiz F.M. and Loureiro, Antonio A.F., "Modeling and Analysis of Opportunistic Routing in Low Duty-Cycle Underwater Sensor Networks", *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp.125–132, 2015.