

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

Gabriel M. Reis¹, Luiz F. M. Vieira², Alex B. Vieira³ e José A. M. Nacif¹

¹Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – Universidade Federal de Viçosa (UFV)

²Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

³Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

{gabriel.m.reis, jnacif}@ufv.br, lfvieira@dcc.ufmg.com, alex.borges@ufjf.br

Abstract. *Underwater wireless information transfer is of great interest to the military, industry, and the scientific community, as it plays an important role, for example, in tactical surveillance, aquatic pollution monitoring, and offshore oilfield control and maintenance. Underwater wireless communications can be carried out through acoustic, radio frequency (RF), and optical waves. Underwater optical wireless communications (UOWCs) can support higher data rates with low latency than their bandwidth-limited acoustic and RF counterparts. However, aquatic channel conditions (e.g., absorption, scattering, turbulence, etc.) pose significant challenges for UOWCs and significantly reduce the attainable communication ranges, which demands efficient networking solutions. In this sense, this article investigates the performance of underwater visible light communication (UVLC), a subgroup of UOWC, using a transmitter in the red light spectrum in shallow and clear water. We evaluated the impact on transmission performance caused by light emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs) at this wavelength. The results show the impact on communication caused by the environment, the distance between nodes, and the type of transmitter used.*

Resumo. *A transferência de informações sem fio em ambientes subaquáticos é de grande interesse para aplicações militares e industriais e, também, para a comunidade científica, pois desempenha um papel importante, por exemplo, na vigilância tática, monitoramento de poluição aquática e controle e manutenção de campos petrolíferos offshore. A comunicação sem fio subaquática pode ser realizada por meio de ondas acústicas, de radiofrequência (RF) e ópticas. Em contrapartida com as ondas acústicas e de RF, que possuem largura de banda limitada, a comunicação óptica sem fio subaquática (UOWC) pode suportar taxas de transferência de dados mais altas com baixos níveis de latência. No entanto, as propriedades do canal aquático (por exemplo, absorção, dispersão, turbulência, etc.) representam grandes desafios para a UOWC e reduzem significativamente os alcances possíveis de comunicação, o que gera demanda por soluções eficientes para as redes. Nesse sentido, investiga-se neste artigo o desempenho de comunicação por luz visível sem fio subaquática (UVLC), um subgrupo de UOWC, com um transmissor no espectro de luz vermelho em meio aquático raso e límpido. Foram conduzidas avaliações sobre a repercussão no desempenho da transmissão causado por diodos emissores de luz (LEDs) e*

lasers diodo (LDs) nesse comprimento de onda. Os resultados apresentados evidenciam o impacto na comunicação provocado pelo meio, distância entre nós e tipo de transmissor utilizado.

1. Introdução

Dois terços da superfície terrestre são cobertos por água. Nos últimos milhares de anos, os humanos nunca deixaram de explorar 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 [Gussen et al. 2016]. O aumento no interesse em sistemas subaquáticos, 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 [Elamassie et al. 2018]. Isso desencadeia a amplificação da demanda por comunicação sem fio subaquática (*underwater wireless communication - UWC*).

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 [Zhu et al. 2020, Kaushal and Kaddoum 2016, Sun et al. 2020]. Os sistemas de ondas acústicas, mais frequentemente vistos para UWC, tiveram grande sucesso devido à sua capacidade de se comunicar por muitos quilômetros [Chitre et al. 2008]. Contudo, o desempenho desse tipo de comunicação é limitada pela baixa largura de banda, altas perdas de transmissão, propagação de multicaminhos variável no tempo, alta latência e propagação Doppler. Todos esses fatores levam à variação temporal e espacial do canal acústico, o que limita a largura de banda disponível no sistema [Kaushal and Kaddoum 2016]. 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 [Saeed et al. 2019].

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 [Kaushal and Kaddoum 2016]. 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 [Ali et al. 2022].

Considerando a largura de banda limitada de RF e de métodos acústicos em ambientes subaquáticos e a crescente necessidade de transmissão de dados em alta velocidade, a comunicação óptica sem fio subaquática (*underwater optical wireless communication - UOWC*) tornou-se uma alternativa atraente e viável para comunicações de baixo e médio alcance, por apresentar ampla largura de banda, alta confiabilidade, baixa latência,

ter baixo impacto e baixo custo [Chowdhury et al. 2018]. Devido a isso, a utilização de ondas ópticas para UWC vem sendo amplamente estudadas. Essas pesquisas abrangem temas como a modelagem do canal, tratativa de problemas em diferentes camadas do modelo OSI, aumento do alcance de transmissão e da taxa de transferência de dados [Elamassie et al. 2018, Saeed et al. 2019]. No entanto, o maior desafio para UOWC se origina das características fundamentais da água de oceanos, mares e rios. A luz na água desses locais não apenas sofre maior atenuação do canal em comparação com o ar, mas também as propriedades ópticas do próprio meio variam significativamente e existem mais fontes de interrupção do *link*. Os oceanos são ricos em matéria dissolvida e particulada, criando várias circunstâncias com as quais um sistema de comunicação subaquática deve lidar [Kaushal and Kaddoum 2016].

A propagação subaquática de ondas ópticas exibe características distintas para diferentes comprimentos de onda. É 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 espectro eletromagnético [Saeed et al. 2019]. Portanto, UWOC em termos de luz visível é principalmente realizada no espectro azul-verde de comprimento de onda [Ali et al. 2022]. 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 [Kaushal and Kaddoum 2016]. O “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, é apresentado um sistema UVLC em água doce rasa e límpida baseado em OpenVLC [Wang et al. 2014] utilizando diodos laser (*laser diodes* - LDs) e diodos emissores de luz (*light-emitting diodes* - LEDs) em diferentes faixas do espectro de luz visível, além de um foto-diodo (*photodiode* - PD). Foram analisadas as comunicações LED-a-LED e LD-PD. Para a comunicação LED-a-LED utilizaram-se combinações de diferentes cores, por exemplo azul com azul e vermelho com azul. Na comunicação LD-PD, considerou-se um LD vermelho e outro azul. A proposta foi avaliada sob uma ampla gama de condições, estudando os efeitos na comunicação causados pelo comprimento de onda das cores considerando o espectro eletromagnético e a distância física entre os nós.

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

O restante deste artigo está organizado em 4 seções. Uma visão geral sobre comunicação óptica sem fio subaquática é apresentada na Seção 2. A metodologia utilizada e o cenário configurado para os experimentos são discutidos na Seção 3. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 4. Na Seção 5, por fim, o artigo é concluído.

2. 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 oceanográficos 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 [Ali et al. 2020]. Hoje em dia, as tecnologias mais utilizadas para transmissão de sinais para UWC são baseadas em ondas ópticas, acústicas ou de RF. A Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre as implementações de UWC para cada um desses tipos de onda.

Tabela 1. Comparação das Tecnologias de Comunicação Sem Fio Subaquáticas [Saeed et al. 2019] - Adaptado

Parâmetro	RF	Acústica	Óptica
Alcance	< 10 m	< 20 Km	< 200 m
Fatores de atenuação	Frequência e condutividade	Condutividade	Distância e propriedades ópticas inerentes
Velocidade	$2,25 \times 10^8$ m/s	1500 m/s	$2,25 \times 10^8$ m/s
Potência do transmissor	≈ 100 W	≈ 10 W	≈ 1 W
Custo	Alto	Alto	Baixo
Taxa de transferência de dados	< 0.1 Gbps	< 10 Kbps	< 10Gbps
Latência	Moderada	Alta	Baixa

A UOWC apresenta claras vantagens quando comparado à redes sem fio subaquáticas operando com ondas acústicas e RF. Em confronto com os sistemas acústicos e de RF, a UOWC pode 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 [Saeed et al. 2019]. Além disso, os sistemas UOWC fornecem um desempenho com baixa latência em razão da alta velocidade de propagação da luz no meio aquático [Haltrin 2002]. A UOWC é mais eficiente em termos de energia e também é mais financeiramente econômica do que seus equivalentes acústicos e de RF [Che et al. 2010]. A segurança da comunicação na UOWC é maior do que em métodos acústicos e de RF, já que maioria dos sistemas UOWC 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* [Zeng et al. 2016].

O espectro eletromagnético é formado por várias faixas de frequência, como mostrado na Figura 1. O termo *Optical Wireless Communication* refere-se à transmissão óptica na qual o espectro de luz visível (*visible light - VL*) guiada, infravermelho (*infrared - IR*) ou ultravioleta (UV) são usados como meio de propagação [IEEE 2019]. Os sistemas OWC que operam exclusivamente na banda VL são normalmente categorizados como comunicação por luz visível (*visible light communication - VLC*).

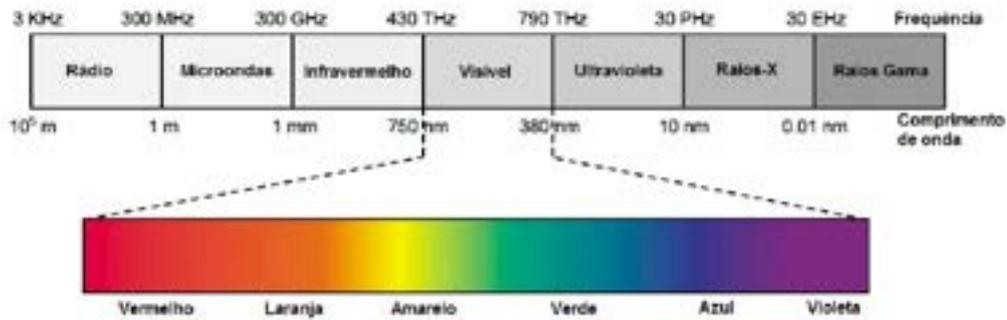


Figura 1. Espectro eletromagnético [Pathak et al. 2015]

A propagação de ondas ópticas em ambiente subaquáticos exibe características diferentes para comprimentos de onda distintos, conforme mostrado na Figura 2. É notável que a água oferece transparência no espectro de luz azul-verde quando comparado a outros comprimentos de onda do espectro óptico [Saeed et al. 2019]. 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 [Al-Kinani et al. 2018].

Em ambiente subaquáticos, existe a presença de tecidos vegetais mortos e matéria orgânica em decomposição. Esse tipo de matéria é classificada como matéria orgânica colorida dissolvida e pode aumentar a turbidez da água e, assim, diminuir a distância de propagação da luz. Além disso, CDOMs 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 [Kaushal and Kaddoum 2016].

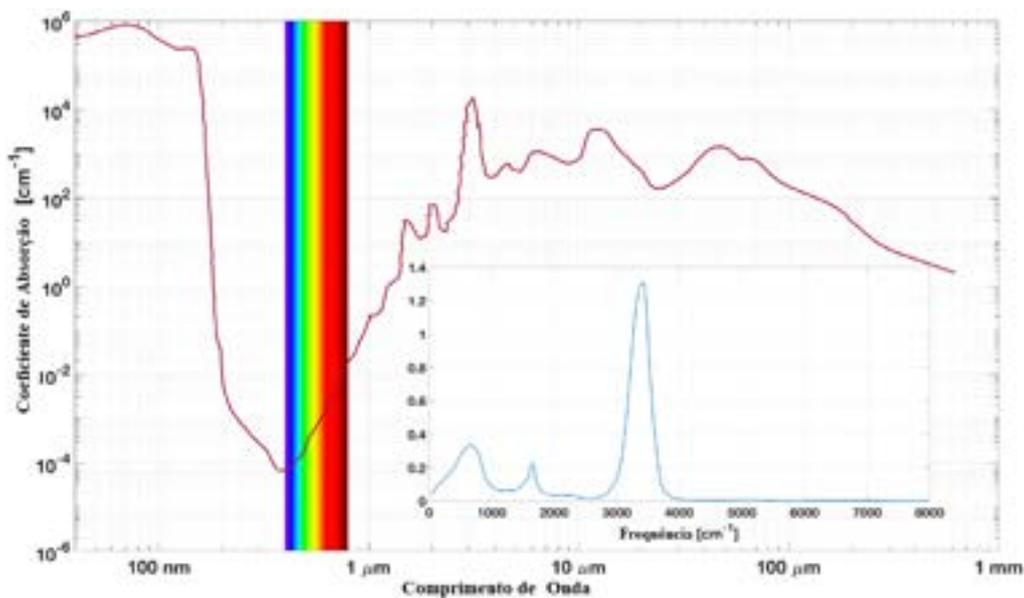


Figura 2. Atenuação das ondas ópticas na água [Saeed et al. 2019]

O *design* de um *link* UVLC pode ser classificado em quatro categorias [Zeng et al. 2016]: i) linha de visão ponto a ponto, ii) linha de visão difusa, iii) linha de visão baseada em retrorefletor e iv) sem linha de visão.

- Linha de visão ponto a ponto: neste cenário, os transceptores utilizados devem estar alinhados e diretamente ligados uns aos outros na direção da linha de propagação do sinal. É o cenário mais utilizado em UOWC;
- Linha de visão difusa: utiliza fontes de luz difusa, como LEDs de alta potência, com grande ângulo de abertura para realizar a transmissão UOWC de um nó para vários nós;
- Linha de visão baseada em retrorefletor: baseia-se no fenômeno de retroespalhamento, que consiste em uma fonte de luz com um refletor óptico. Consequentemente, 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;
- 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.

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 [Zhang and Dong 2015, Yi et al. 2015]. Além disso, mesmo se o comprimento de onda do feixe de luz for escolhido para ser azul ou verde, a propagação do feixe óptico debaixo d'água é impactada pelas propriedades ópticas inerentes e propriedades ópticas aparentes [Mobley 1995], que são bastante distintas para cada tipo de corpo d'água (variando de águas rasas a oceanos profundos), variam de acordo com a profundidade e requerem uma compreensão completa do ambiente bio-físico-químico subaquático [Kaushal and Kaddoum 2016]. Essas propriedades fazem com que o feixe de luz sofra absorção, dispersão, turbulência e, portanto, desvanecimento de multipercurso devido às interações das moléculas de água e partículas com os fótons [Gussen et al. 2016, Zeng et al. 2016, Kaushal and Kaddoum 2016, Zhu et al. 2020, Ali et al. 2022].

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. Diversas aplicações pode se beneficiar com o uso de UVLC [Ali et al. 2022, Ali et al. 2020, Gussen et al. 2016, Saeed et al. 2019, Saeed et al. 2019, Dickey et al. 2006, Kaushal and Kaddoum 2016, Zhu et al. 2020]. 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 [Ali et al. 2022].

3. 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 em uma placa de expansão, montada sobre o Beagle Bone 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 e Manchester para codificação. Para a correção de erros, é utilizado Reed Solomom. Na camada de enlace são utilizados CSMA/CD e CSMA/CD-HA para controle de acesso ao meio [Matheus et al. 2017].

Com o objetivo de garantir que os componentes utilizados na comunicação (LEDs, LDs e PD) não apresentassem funcionamento comprometido embaixo d'água foi necessário envolvê-los, de forma a não permitir contato entre as parte elétricas expostas e a água. A fim de proteger os LEDs, seus terminais foram envolvidos com uma camada de fita veda rosca e, posteriormente, inseridos em tubos termo retráteis. A Figura 3 mostra um LED isolado. Já para proteger os LDs e o PD, empregou-se uma caixa impressa em 3D com abertura na parte de baixo e de cima. Essa caixa foi preenchida com silicone, ou poliuretano, e os componentes introduzidos no centro da mesma, em seguida, a parte superior dela é fechada com um pedaço de vidro, como mostra a Figura 4.



Figura 3. Led Isolado



Figura 4. Laser isolado

As avaliações foram realizadas através da topologia com linha de visão ponto a ponto, a mais comum em redes UVLC. Para isso, fixaram-se os LEDs, LDs 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 5 mostra o ambiente experimental, já com os componentes submergidos. Empregou-se água encanada. A profundidade utilizada em todas as medições foi 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 em ambiente aberto com baixa intensidade de ventos.

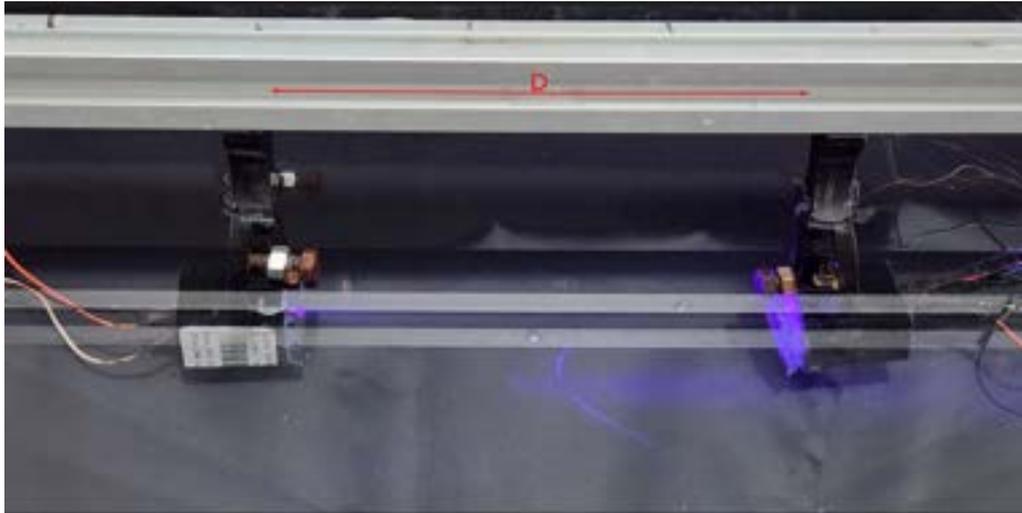


Figura 5. Ambiente experimental

O *software* da OpenVLC ser implementado como um driver Linux permite a fácil modificação de parâmetros de sistema, como frequência e tamanho dos pacotes enviados. Com o intuito de garantir a paridade de configuração na rede para todos os cenários experimentados, os parâmetros foram fixados conforme o apresentado na Tabela 2 e estão de acordo com a avaliação e recomendações de outros estudos sobre o OpenVLC 1.0 [Heydariaan et al. 2016]. Para medir a performance 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. Especificações ótimas foram adotadas e firmadas para todos os experimentos na configuração do Iperf 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 [Heydariaan et al. 2016].

Tabela 2. Parâmetros de Avaliação

Parâmetro	Valor
Transmissor	Múltiplos LEDs e LDs
Receptor	Múltiplos LEDs e 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

Na primeira etapa da análise, observa-se a comunicação LED a LED, na qual um LED age como transmissor, enquanto outro age como receptor. Com o propósito de realizar uma avaliação abrangente e completa das propriedades do LED como transceptor subaquático, consideram-se vários LEDs, desde frequências mais baixas (vermelho) até frequências mais altas (azul e uv-a). Foram avaliadas a vazão de dados e PRR para todas as combinações de LED (vermelho-vermelho, azul-vermelho, vermelho-azul, etc) adotando distância d de 10 cm. Para os casos em que não houve sucesso de comunicação à

10 cm, foi estudada a possibilidade de comunicação considerando distâncias menores.

Em um segundo momento, foi estudada a comunicação com um LD atuando na qualidade de transmissor e um PD agindo como receptor. Tendo o objetivo de analisar a viabilidade do uso de transmissores vermelhos, desejou-se aferir o impacto causado pela resposta espectral na comunicação subaquática, porém com um sistema otimizado para comunicações em baixo d'água sem turbulência, haja visto que a utilização de um LD no lugar de um LED, nessas condições, soluciona grande parte do problema de dispersão do feixe de luz [Zeng et al. 2016], permitindo o alcance de maiores distâncias. Dois LDs foram utilizados nesse estágio: um vermelho com comprimento de onda de 650 nm e um azul com comprimento de onda de 405 nm. Essa escolha se deu devido a transparência que a água oferece no espectro de luz azul-verde [Saeed et al. 2019], portanto é esperada melhor performance para transmissores nessa faixa e desejava-se estabelecer uma linha de base para a qualidade da comunicação. Já o LD vermelho, além de apresentar os melhores resultados de vazão e PRR em ambientes terrestres [Matheus et al. 2019], também é vantajoso para ambientes com alta concentração de CDOM. Para o foto-diodo, utilizou-se o OPT101. As mesmas métricas medidas na etapa 1 (vazão de dados e PRR) foram observadas aqui, contudo, a distância d foi variada, assumindo os valores 5 cm, 10 cm, 20 cm e 40 cm.

Para as duas etapas, os experimentos foram repetidos 5 vezes em cada cenário, com a finalidade de amenizar os possíveis erros. Cada execução do Iperf gerou o envio de 126 pacotes, ao final das 5 execuções, portanto, 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, o último estágio da análise compara os resultados obtidos na segunda fase dos experimentos para os LD vermelho com a avaliação realizada por [Matheus et al. 2019]. Dentre o que é apresentado em [Matheus et al. 2019], utilizou-se na comparação os valores de PRR e vazão de dados na comunicação LED-a-LED: vermelho-vermelho. Esse cotejo é possível, 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 performance para transmissor vermelho mostrada no artigo referência.

4. Resultados das Avaliações

Não foi possível mensurar a vazão de dados e a taxa de recepção de pacotes em todos os cenários experimentados. Na fase inicial dos experimentos, a comunicação LED-a-LED não foi bem sucedida para nenhuma combinação de cor à 10 cm e, mesmo ao reduzir a distância para 5 cm ou 2 cm, a transferência de dados de uma OpenVLC para outra não ocorreu. Na segunda etapa, a comunicação com o LD azul na função de transmissor funcionou de forma aleatória: dada a distância d , mesmo sem qualquer variação no ambiente, era bem sucedida de forma intermitente e sem um intervalo de tempo fixo. A Tabela 3 apresenta as possibilidades de comunicação.

A interferência de multipercurso ocorre no canal óptico subaquático quando um sinal óptico atinge o detector após encontrar objetos que causam dispersão ou reflexões geradas por outros corpos subaquáticos [Kaushal and Kaddoum 2016]. Em ambientes de águas rasas, o desvanecimento de multipercurso é mais significativo, por conta das

Tabela 3. Possibilidade de comunicação nas combinações de transmissores e receptores (células com ✓ representam combinações nas quais a comunicação foi possível, células com X representam onde a comunicação não foi possível e células com - representam cenários onde não houve tentativa de comunicação).

Receptor Trasmissor	LED Vermelho	LED Azul	LED UV-A	PD
LED Vermelho	X	X	X	-
LED Azul	X	X	X	-
LED UV-A	X	X	X	-
LD Vermelho	-	-	-	✓
LD Azul	-	-	-	X

reflexões causadas pela superfície d'água e pelo solo do corpo d'água. Na primeira etapa de avaliações, levando em consideração a distância de 8 cm entre a superfície da água e os LEDs, a distância de 2 cm entre o fundo do recipiente e os LEDs e, por fim, os LEDs pertencerem a categoria de fontes de luz de feixe largo, que são mais suscetíveis a interferência de multipercorso [Saeed et al. 2019], a falha na comunicação pode ser explicada.

A comunicação aleatória encontrada nos cenários do LD azul se deu por uma combinação de dois fatores:

- O LD azul fornecia 20 mW de potência, 4x o fornecido pelo LD vermelho. O OPT101 é um foto-diodo facilmente saturado, sendo a luz ambiente suficiente para saturá-lo por vezes, logo, a alta potência do laser azul saturou o PD.
- O LD azul possui ângulo de divergência de feixe paralelo de 9° e perpendicular de 20° o que o torna levemente difuso, desse modo, sofre do mesmo problema de interferência de multipercorso que os LEDs, embora com menor intensidade.

As Figuras 6 e 7 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.

A comparação dos resultados do LD vermelho com os obtidos por [Matheus et al. 2019] no *link* LED vermelho a LED vermelho demonstra o impacto da

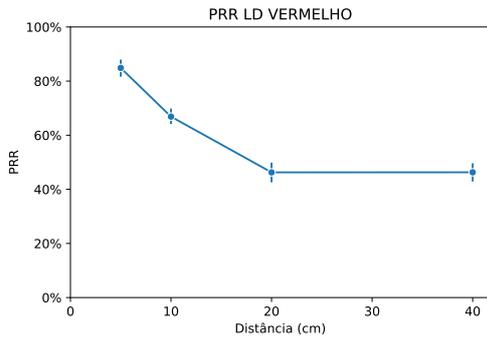


Figura 6. Taxa de recepção de pacotes para o LD vermelho em várias distâncias.

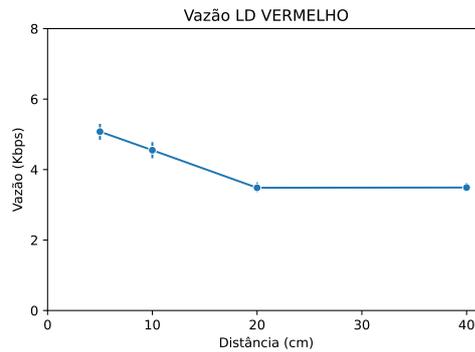


Figura 7. Vazão de dados para o LD vermelho em várias distâncias.

água na performance da comunicação. Em [Matheus et al. 2019] a PRR tem baixíssima variação (linha relativa a legenda *Red* da Figura 8), permanecendo próxima a 85% para todas as distâncias, algo atingido no ambiente subaquático apenas para a distância de 5 cm. Para a vazão (linha relativa a legenda *Red* da Figura 9), 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.

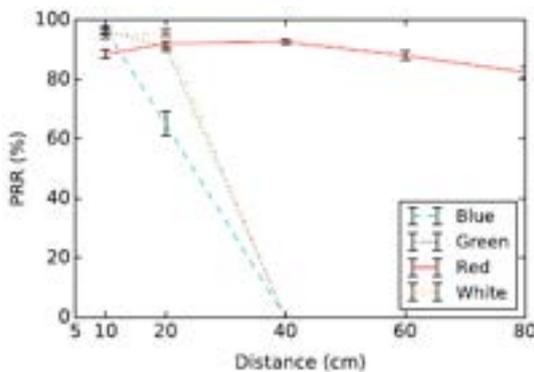


Figura 8. Taxa de recepção de pacotes para LEDs de diferentes cores como receptores.[Matheus et al. 2019]

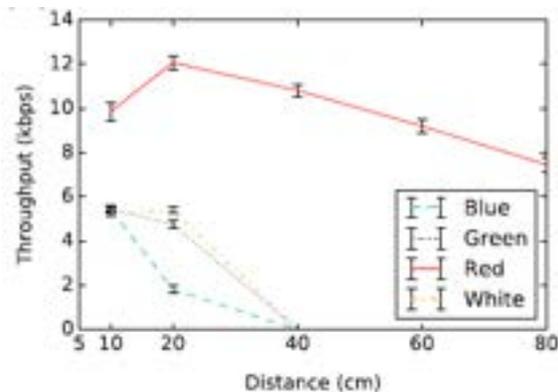


Figura 9. Vazão de dados para LEDs de diferentes cores como transmissores.[Matheus et al. 2019]

5. Conclusão

Neste trabalho, foi explorada a performance 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. O emprego e impacto causado por LEDs de diferentes cores no desempenho de sistemas de Comunicação por Luz Visível Subaquática em águas rasas e límpidas também foram avaliados. Para isso, diferentes combinações de LEDs atuando como transmissor e receptor foram analisadas à uma distância fixa. Por fim, comparou-se o resultado obtido com a utilização do laser vermelho com a avaliação realizada por [Matheus et al. 2019].

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.

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.
- Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., Chursin, Y. A., Affes, S., and Dmitry, S. (2020). Recent advances and future directions on underwater wireless communications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(5):1379–1412.
- Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., and Li, Y. (2022). Recent trends in underwater visible light communication (uvlc) systems. *IEEE Access*, 10:22169–22225.
- Che, X., Wells, I., Dickers, G., Kear, P., and Gong, X. (2010). Re-evaluation of rf electromagnetic communication in underwater sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 48(12):143–151.
- Chitre, M., Shahabudeen, S., and Stojanovic, M. (2008). Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. *Marine technology society journal*, 42(1):103.
- Chowdhury, M. Z., Hossain, M. T., Islam, A., and Jang, Y. M. (2018). A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications. *IEEE Access*, 6:9819–9840.
- Dickey, T., Lewis, M., and Chang, G. (2006). Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations. *Reviews of geophysics*, 44(1).
- Elamassie, M., Miramirkhani, F., and Uysal, M. (2018). Performance characterization of underwater visible light communication. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1):543–552.
- Gussen, C. M., Diniz, P. S., Campos, M. L., Martins, W. A., Costa, F. M., and Gois, J. N. (2016). A survey of underwater wireless communication technologies. *J. Commun. Inf. Sys.*, 31(1):242–255.
- Haltrin, V. I. (2002). One-parameter two-term heney-greenstein phase function for light scattering in seawater. *Applied Optics*, 41(6):1022–1028.
- Heydariaan, M., Yin, S., Gnawali, O., Puccinelli, D., Giustiniano, D., et al. (2016). Embedded visible light communication: Link measurements and interpretation. In *Mad-*

- Com: New Wireless Communication Paradigms for the Internet of Things, in conjunction with the 13th International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN 2016).*
- 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.
- Kaushal, H. and Kaddoum, G. (2016). Underwater optical wireless communication. *IEEE access*, 4:1518–1547.
- Matheus, L., Pires, L., Vieira, A., Vieira, L. F., Vieira, M. A., and Nacif, J. A. (2019). The internet of light: Impact of colors in led-to-led visible light communication systems. *Internet Technology Letters*, 2(1):e78.
- Matheus, L., Vieira, A. B., Vieira, L., Vieira, M., Freire, J., and Gnawali, O. (2017). Comunicação por luz visível: conceito, aplicações e desafios.
- Mobley, C. D. (1995). The optical properties of water. *Handbook of optics*, 1:43–3.
- 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.
- Saeed, N., Celik, A., Al-Naffouri, T. Y., and Alouini, M.-S. (2019). Underwater optical wireless communications, networking, and localization: A survey. *Ad Hoc Networks*, 94:101935.
- Sun, X., Kang, C. H., Kong, M., Alkhazragi, O., Guo, Y., Ouhssain, M., Weng, Y., Jones, B. H., Ng, T. K., and Ooi, B. S. (2020). A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication. *Journal of Lightwave Technology*, 38(2):421–431.
- Wang, Q., Giustiniano, D., and Puccinelli, D. (2014). Openvlc: Software-defined visible light embedded networks. In *Proceedings of the 1st ACM MobiCom workshop on Visible light communication systems*, pages 15–20.
- Yi, X., Li, Z., and Liu, Z. (2015). Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence. *Applied Optics*, 54(6):1273–1278.
- Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., and Cheng, J. (2016). A survey of underwater optical wireless communications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 19(1):204–238.
- Zhang, H. and Dong, Y. (2015). Link misalignment for underwater wireless optical communications. In *2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, pages 215–218. IEEE.
- Zhu, S., Chen, X., Liu, X., Zhang, G., and Tian, P. (2020). Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication. *Progress in Quantum Electronics*, 73:100274.