

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Frederico de Oliveira Sales

**MCAST-VLC: Um Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de
Comunicação por Luz Visível**

Juiz de Fora

2024

Frederico de Oliveira Sales

**MCAST-VLC: Um Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de
Comunicação por Luz Visível**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Edelberto Franco Silva

Coorientador: Prof. Dr. Alex Borges Vieira

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O. Sales, Frederico.

MCAST-VLC: Um Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de Comunicação por Luz Visível / Frederico de Oliveira Sales. – 2024.

59 f. : il.

Orientador: Edelberto Franco Silva

Coorientador: Alex Borges Vieira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2024.

1. Visible Light Communications. 2. Multicast. 3. IGMP. 4. Internet of Things. I. Franco Silva, Edelberto, orient. II. Borges Vieira, Alex, coorient. III. MCAST-VLC: Um Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de Comunicação por Luz Visível.

Frederico de Oliveira Sales

MCAST-VLC: Um Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de Comunicação por Luz Visível

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de concentração: Ciência da Computação.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edelberto Franco Silva - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Alex Borges Vieira - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Mario Antonio Ribeiro Dantas

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcos Augusto Menezes Vieira

Universidade Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 19/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **mario antonio ribeiro dantas, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alex Borges Vieira, Professor(a)**, em 05/03/2024, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edelberto Franco Silva, Professor(a)**, em 10/03/2024, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Augusto Menezes Vieira, Usuário Externo**, em 10/03/2024, às 20:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-UJf (www2.ujf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1709214** e o código CRC **4032C415**.

Dedico esse trabalho ao meu querido pai Enéas Vieira Galvão e Francisca R. Sales.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Edelberto Franco, Prof. Dr. Alex Borges.

“A person who never made a mistake, never tried something new.”
(Albert Einstein).

RESUMO

As redes sem fio têm crescido desde os anos 2000, e é necessário pensar em outras maneiras de enriquecer as possibilidades de escoamento do tráfego de rede e a sua cobertura. Os sistemas de comunicação sem fio atuais se concentram, principalmente, em soluções Wi-Fi, sendo as redes ópticas, como as de luz visível (VLC), excelentes candidatas para contornar a demanda do uso de radio frequência. Por esse motivo, propomos a evolução da comunicação óptica sem fio (OWC) de único salto para um modelo com múltiplos saltos e suporte à comunicação *multicast* em ambientes VLC através da proposta do protocolo MCAST-VLC. O MCAST-VLC é um protocolo de roteamento dinâmico multi-camadas para ambientes VLC, considerando algumas características específicas dessa área. Tal proposta compreende a necessidade de gerenciamento de grupo, isolamento de tráfego e protocolo de descoberta de rota em múltiplos saltos. O protocolo foi avaliado em um ambiente VLC real, e também estendido por um modelo matemático proposto a fim de investigar sua escalabilidade. Os resultados mostram que o MCAST-VLC pode lidar com 27,5% mais fluxo de rede do que um simples sistema de VLC *unicast*, a uma sobrecarga de pacotes de controle insignificante.

Palavras-chave: Comunicação por Luz Visível, Multicast, IGMP, Internet das Coisas.

ABSTRACT

Wireless networks have been growing since the 2000s, and it is necessary to think of other ways to improve network traffic offloading possibilities and coverage. Current wireless communication systems primarily rely on Wi-Fi solutions, while optical networks such as visible light networks (VLC) are promising alternatives that can address the demand for radio frequency usage. For this reason, we propose the evolution of single-hop optical wireless communication (OWC) to a multi-hop and multicast communication model in VLC environments. MCAST-VLC is a multi-layer dynamic routing protocol for VLC environments, considering some specific characteristics of this area. This proposal includes group management, traffic isolation, and multi-hop route discovery. The protocol was evaluated in a real VLC environment and extended by a mathematical model to investigate its scalability. The results indicate that MCAST-VLC can handle nearly three times as many network flows as a simple unicast VLC approach, with negligible control packet overhead.

Keywords: Visible Light Communications, Multicast, IGMP, Internet of Things.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas de fogueiras utilizadas para informar a queda de Troia para Misena. Aproximadamente 600 km. Sequência = [Troia, KazDagi, Limmos, Athos, Euboea, Kiptas, Misena]	17
Figura 2 – Código Morse utilizado para comunicação por luz visível entre as embarcações	18
Figura 3 – Patente do photofone de Alexander G. Bell	19
Figura 4 – Representados por um pulso que modula a amplitude F. Sendo assim, -K representa o bit 0, e +K representa o bit 1. Portanto: $q(t) \cdot 2\cos(2\pi \cdot F \cdot t) \Leftrightarrow Q(f + F) + Q(f - F)$	21
Figura 5 – Sinal BPSK.	21
Figura 6 – Codificação Manchester.	22
Figura 7 – Comunicações ópticas sem fio no espectro visível entre 430THz e 790THz após faixa de infravermelho.	26
Figura 8 – BBB OpenVLC 1.3.	27
Figura 9 – Arquitetura OpenVLC.	27
Figura 10 – Cenário de testes reais.	32
Figura 11 – Ocupação de banda no ambiente de testes.	33
Figura 12 – Cenário típico para o protocolo MCAST-VLC. Cinco nós em cenário de múltiplos saltos, com comunicação bidirecional entre os nós.	36
Figura 13 – Exemplo de gestão de grupo e encaminhamento de pacotes numa malha MCAST-VLC.	36
Figura 14 – Algoritmo para gerenciamento de entrada em grupo <i>multicast no protocolo MCAST-VLC</i>	37
Figura 15 – Diagrama solicitação de saída de grupo.	37
Figura 16 – Cabeçalho (<i>header</i> de um pacote MCAST-VLC.	38
Figura 17 – Troca de mensagens em uma malha MCAST-VLC.	39
Figura 18 – Teste de sanidade realizado entre os simuladores NS-2 e numérico.	47
Figura 19 – Cenário real de caracterização dos testes VLC.	48
Figura 20 – Como podemos observar na figura (b) a partir do teste estatístico não paramétrico KS, $statistic = 0.9939$, e $p - value < 0.05$, podemos rejeitar a hipótese nula. Dessa forma, tem-se evidências para afirmar que essa amostra não tem origem em uma distribuição normal.	49
Figura 21 – Acumulada do ambiente observado.	49
Figura 22 – Ambiente simulado MCAST-VLC - Área de possível ocorrência em azul mais claro e as áreas mais escuras correspondem a maior probabilidade de ocorrência da ocupação de banda.	50
Figura 23 – Ambiente observado <i>unicast</i> , distribuição FDA	50

Figura 24 – Ocupação de banda em <i>unicast</i> com o modelo proposto de caracterização.	51
Figura 25 – Ambiente simulado - pareamento.	51
Figura 26 – Overhead, goodput e pacotes enviados.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimento de onda eletromagnético VLC, frequência e energia do fóton.	25
Tabela 2 – Mensagens de gerenciamento de grupo (GMSG): Tipos de mensagens, valores e funções.	38
Tabela 3 – Parâmetros para simulação dos protocolos MAODV e ODMRP no simulador NS-2.	45
Tabela 4 – Parâmetros para simulação dos protocolos MCAST-VLC no simulador desenvolvido pelo autor.	46
Tabela 5 – Tabela de sobrecarga para 25 grupos contendo 20 membros cada. . . .	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações.</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica.</i>
AODV	<i>Ad-hoc On Demand Distance Vector.</i>
BBB	<i>Beaglebone Black.</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying.</i>
CFR	<i>Channel frequency response.</i>
FDA	<i>Função distribuição acumulada.</i>
IANA	<i>Internet Assigned Numbers Authority.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IGMP	<i>Internet Group Management Protocol.</i>
IoT	<i>Internet of Things.</i>
K-S	<i>Teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov.</i>
KS	<i>Teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov.</i>
LAN	<i>Local area network.</i>
LED	<i>Light emitter diode.</i>
LiFi	<i>Light fidelity.</i>
LOS	<i>Line of sight.</i>
MANET	<i>Self-organizing, Infrastructure-less network.</i>
MAODV	<i>Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector.</i>
MCAST-VLC	<i>Protocolo Multicast Dinâmico para Redes de Comunicação por Luz Visível.</i>
MCU	<i>Main Computer Unit.</i>
NLOS	<i>Non-line of sight.</i>
ODMRP	<i>On-Demand Multicast Routing Protocol.</i>
OOK	<i>On-Off Keying - Chave liga e desliga.</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection.</i>
OWC	<i>Comunicação Óptica Sem Fio.</i>
P2P	<i>Ponto a ponto.</i>
PPGCC	<i>Programa de pós graduação em ciências da computação.</i>
PROCEL	<i>Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.</i>
PRU	<i>Programmable Real Time Units.</i>
SWITCH	<i>Dispositivo de rede que é usado para conectar um ou mais dispositivos em uma rede local (LAN - Local Area Network).</i>
VLC	<i>Visual Light Communication.</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA	15
1.2	OBJETIVO	15
1.3	CONTRIBUIÇÕES	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	16
2	TRABALHOS RELACIONADOS	17
2.1	HISTÓRICO	17
2.1.1	Antes de Cristo	17
2.1.2	Século das Luzes	18
2.1.3	Thomas Edson e o Filamento	18
2.1.4	O Retorno da Luz	20
2.2	REDES SEM FIO E A COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL	20
2.2.1	Processo de Codificação	20
2.2.2	Unicast e Multicast	22
2.2.3	<i>IGMP</i>	23
2.2.4	Comunicação por Luz Visível	24
2.2.5	Diodo Emissor de Luz	25
2.2.6	OpenVLC	26
2.3	DYRP-VLC	28
2.4	<i>UNICAST</i>	29
2.5	<i>MULTICAST</i>	30
2.6	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO	30
2.7	CENÁRIO DE AMBIENTE REAL DYRP VS. MCAST-VLC	32
2.8	Considerações	34
3	MCAST-VLC	35
3.1	MCAST-VLC	35
3.2	REDE VLC DOMÉSTICA	35
3.3	TOPOLOGIA	35
3.4	MUDANÇA DE ESTADOS	37
3.5	CABEÇALHO - <i>HEADER</i>	38
3.6	MENSAGENS PARA GERENCIAMENTO DE GRUPOS.	38
3.7	Considerações	39
4	MODELAGEM NUMÉRICA	40
4.1	FLUXO	40
4.2	ENVIO DE PACOTES	40
4.3	ERROS	41
4.4	DEMANDA POR BANDA	41

4.5	OFERTA DE BANDA	41
4.6	CONDIÇÃO DE CONTORNO	41
4.7	RESTRICÇÕES	42
4.7.1	Matriz de Estados	42
4.7.2	<i>Warmup</i>	42
4.7.3	<i>Overhead</i>	42
4.8	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA	43
4.9	Considerações	44
5	RESULTADOS	45
5.1	CENÁRIO UM - AMBIENTE REAL DE CARACTERIZAÇÃO VLC .	46
5.2	CENÁRIO DOIS - AMBIENTE OBSERVADO MCAST-VLC vs. MODELO MCAST-VLC	47
5.3	CENÁRIO TRÊS - AMBIENTE OBSERVADO <i>UNICAST</i> vs. MODELO UNICAST	48
5.4	<i>OVERHEAD</i>	50
5.5	Sobrecarga	52
5.6	DISCUSSÕES	52
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do uso de dispositivos sem fio é notável. Conforme relatório apresentado em 2022 pela *Research and Markets*, o mercado global para conectividade por meio de dispositivos sem fio apresenta salto estimado de gastos entre 65.2 bilhões de dólares em 2021 para até 130.6 bilhões de dólares em 2026 (25). Conforme publicado em Wi-Fi Alliance (42), são destacadas as tecnologias Wi-Fi, Wi-Fi 6 e Wi-Fi 6E, indicando o crescimento de dispositivos IoT (*Internet of Things*) Wi-Fi, onde totalizaram 37% em 2022 e prevendo que excedam 40% do total até 2027. Tendo em vista essa tendência de expansão, somada à competição pelo meio de transmissão por rádio frequência, destaca-se a Comunicação por Luz Visível (*Visible Light Communication - VLC*) como alternativa promissora para escoar dados das redes de quinta geração (5G) e como complemento à redes locais sem fio (14).

Tendo em vista a demanda crescente, faz-se necessário considerar formas de redução e otimização da utilização dos recursos da rede, tais como compressão de dados (22) e melhorias no roteamento dos pacotes (28). É possível encontrar na literatura soluções *multicast* para ambientes VLC, entretanto, os trabalhos em questão não utilizam as práticas recomendadas pela *Internet Assigned Numbers Authority* (IANA), tais como endereçamento IP na classe de IPs recomendado, sob a faixa 224.0.0.0-239.255.255.255 (12).

Além disso, algumas soluções apresentam custos elevados em termos de sobrecarga de dados e implementação, além de limitações para o condicionamento das soluções propostas. Em geral, os trabalhos não mencionam a utilização de um protocolo para gerenciamento de grupos, como observado no trabalho de Adoptante et al. (1) que se baseia no envio de dados apenas para dispositivos a uma salto do servidor *multicast*.

Considerando tais lacunas, propomos um protocolo *multicast* baseado no IGMP V2 (*Internet Group Management Protocol*) (15) para ambientes VLC. Tal protocolo é considerado *multicast IP* multi-camadas, com capacidade para o gerenciamento de grupos em ambientes de múltiplos saltos. O protocolo ainda oferece uma camada simples de segurança, intrínseco às características do meio de transmissão do VLC e devido ao gerenciamento de grupos, realizando assim o isolamento dos fluxos de dados.

O protocolo Multicast Dinâmico para Redes de Comunicação por Luz Visível (MCAST-VLC), opera na faixa entre 430 e 790 THz no espectro visível, uma faixa de rádio frequência considerada ainda pouco explorada (3).

Para validação da proposta foi configurado um ambiente experimental com características semelhantes a um ambiente doméstico ou de um pequeno escritório. Considerando a limitação do número de dispositivos reais utilizados nos experimentos, foi proposta a modelagem de ambientes VLC com n nós. O modelo proposto permite a extrapolação do número de nós, grupos e também a inserção de dinâmica na rede (entrada e saída de

nós folha e líderes de grupos *multicast*). O modelo permitiu verificar a escalabilidade do protocolo MCAST-VLC.

Para fins de comparação, foram realizados experimentos com transmissões por dois métodos: *unicast* e *multicast*. O modo *unicast* exige que cada transmissão seja feita ponto a ponto, salto a salto, ou seja, existe um novo fluxo a ser enviado a cada nó folha cliente (*i.e.*, se há λ clientes, λ fluxos únicos devem ser criados pelo servidor *multicast*). Já para o modo *multicast*, o fluxo é replicado/repassado pelo líder de cada grupo, permitindo que o servidor na rede gere apenas fluxos para cada nó líder, onde G é o número de grupos e $G < \lambda$. Como uma breve apresentação dos resultados, observamos em um primeiro cenário um crescimento considerável da ocupação da largura de banda disponível pelo método *unicast*. Além da demanda superior a oferta, identificamos também a recusa em atender às requisições dos nós que, em contraste, são atendidos quando utilizado o MCAST-VLC. Além disso, foi possível verificar baixa sobrecarga de dados para o gerenciamento de grupos.

1.1 PROBLEMA

Com a recente implantação das redes de quinta geração (5G) e a crescente demanda e conseqüente poluição do espectro sem fio doméstico, surge a necessidade de ampliar o número de alternativas de tecnologias de acesso para escoamento de dados. Deste modo, é interessante investigar as redes VLC. Além de se apresentar como uma alternativa e complemento no escoamento de dados, tem o potencial de aproveitamento de recursos existentes. Por exemplo, utilizando a iluminação LED (Diodo Emissor de Luz) existente para transmitir dados, sem a necessidade de instalar dispositivos adicionais.

Porém, é importante considerar o aumento dos dados trafegados nas redes de comunicação e a necessidade de estratégias de roteamento e encaminhamento de dados. Apesar de haver relato na literatura de taxa de envio de dados por VLC em torno de *Gigabits* (32), experimentos recentes mostram valores bem mais conservadores, na faixa de 80kbps (43). Desta forma, se faz importante que propostas relacionadas à melhor utilização de recursos de rede sejam investigadas no ambiente VLC.

1.2 OBJETIVO

Com o objetivo principal de reduzir o consumo de recursos da rede e otimizar o envio de dados em redes de comunicação por luz visível, este trabalho apresenta um protocolo *multicast* que observa os requisitos das redes VLC e limitações relacionadas a taxa de dados (*data rate*). O protocolo deve ser capaz de gerenciar grupos de nós *multicast*, promover a melhor utilização dos recursos da rede e permitir que a cobertura da rede seja estendida através da utilização de protocolos de roteamento múltiplos saltos.

Como objetivos secundários, tem-se, além da documentação da proposta por meio

de sua arquitetura, sua validação em ambiente real e de simulação que contempla as características da comunicação por luz visível, capaz de gerenciar os nós da rede, encontrar rotas de encaminhamento de pacotes em ambientes de múltiplos saltos, manter o isolamento dos grupos e seus fluxos de dados.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

- Proposta de gerenciamento de grupos *multicast* para VLC com baixa sobrecarga;
- Manutenção da árvore *multicast* de maneira diferenciada, quando comparada ao IGMP;
- Modelagem do meio de transmissão VLC;
- Validação do modelo e do protocolo em um ambiente real VLC.
- Verificação da escalabilidade do protocolo considerando a modelagem.
- Repositório: <https://gitlab.com/fredericosales/mcast>

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante desse trabalho está organizado da seguinte maneira: Capítulo 2 são apresentadas a fundamentação teórica, trabalhos relacionados, cronologia e caracterização da comunicação por luz visível; no Capítulo 3 tem-se a proposta e definição do protocolo *multicast* para redes de comunicação visível, MCAST-VLC; no Capítulo 4 tem-se a caracterização do modelo numérico para avaliação da escalabilidade; Capítulo 5 tem-se os resultados e avaliações dos cenários; assim como as conclusões no Capítulo 6.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos apresentados neste capítulo realçam em algoritmos de roteamento e de *multicast*. Há um breve correlação de propostas no ambiente de redes Wi-Fi para assim descrever aqueles relacionados à VLC.

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais da redes de comunicação por luz visível e tecnologias relacionadas. Também serão apresentados embasamentos históricos de forma a criar um cronologia com relação à tecnologia em questão.

2.1 HISTÓRICO

2.1.1 Antes de Cristo

Historicamente, não há registros que confirmem quando, de fato, ocorreu a primeira comunicação por luz visível. Entretanto, o dramaturgo grego Aeschylus na peça Agamemnon, no período entre 524-426 a.c., descreveu como um tipo de comunicação por luz visível (*i.e.*, fogueiras) poderia ser utilizada para transmitir uma mensagem entre cidades com distâncias consideráveis.

Tais cidades relatadas eram separadas por, aproximadamente, seiscentos quilômetros. Sendo assim, as fogueiras foram posicionadas em locais de fácil visualização e iniciadas em ordem sequencial (*i.e.*, Troia, KazDagi, Limnos, Athos, Euboea, Kiptas, Misena) de forma a comunicar as boas novas sobre a conquista de Troia à Misena (21).

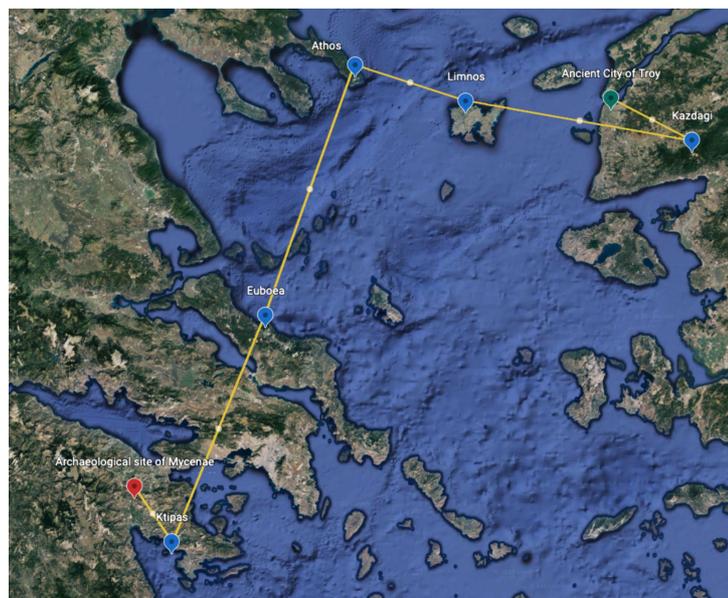


Figura 1 – Sistemas de fogueiras utilizadas para informar a queda de Troia para Misena. Aproximadamente 600 km. Sequência = [Troia, KazDagi, Limnos, Athos, Euboea, Kiptas, Misena]

2.1.2 Século das Luzes

No Século XVIII as grandes navegações oceânicas já estavam estabelecidas, e iniciava-se um período das navegações comerciais, fato que demandou meios mais eficazes de comunicação entre as embarcações devido ao método de navegação que utilizavam, a cabotagem (33). Contudo, o risco de colisões se torna constantemente eminente. Dessa forma o uso de faróis de sinalização náutica se tornou método com certa eficácia.

Sendo assim, médias e grandes embarcações utilizavam do recente criado código Morse para informar condições climáticas dentre outras notificações de pratica comum entre as embarcações (33).

a	● -	k	- ● -	u	● ● -	0	- - - -
b	- ● ● ●	l	● - ● ●	v	● ● ● -	1	● - - - -
c	- ● - ●	m	- -	w	● - -	2	● ● - - -
d	- ● ●	n	- ●	x	- ● ● -	3	● ● ● - -
e	●	o	- - -	y	- ● - -	4	● ● ● ● -
f	● ● - ●	p	● - - ●	z	- - ● ●	5	● ● ● ● ●
g	- - ●	q	- - ● -	.	● - ● - ● -	6	- ● ● ● ●
h	● ● ● ●	r	● - ●	,	- - ● ● - -	7	- - ● ● ●
i	● ●	s	● ● ●	?	● ● - - ● ●	8	- - - ● ●
j	● - - -	t	-	!	- ● - ● - -	9	- - - - ●

Figura 2 – Código Morse utilizado para comunicação por luz visível entre as embarcações

Fonte: Baseado em (33).

Com avanço da tecnologia, faróis marítimos foram aprimorados. De ferramental para sinalizar as regiões costeiras, agora esses equipamentos contam com novas tecnologias como a lente de Fresnel para torná-los mais eficientes e visíveis por maiores distâncias (33). Esses dispositivos são ainda uteis para garantir a passagem segura das embarcações em áreas de risco.

2.1.3 Thomas Edson e o Filamento

A primeira proposta para comunicação por luz visível de forma promissora, e devidamente documentada, ocorreu com a transmissão de voz em 1880 - séc. XIX. Granham Bell transmitiu uma mensagem sem fio por meio do espectro visível a uma distância aproximada de duzentos metros. Entretanto, devido ao tamanho, complexidade do aparato e sua baixa sensibilidade sua proposta foi abandonada (5).

Observa-se que a partir de *Bell* houve um hiato nas pesquisas em comunicações por luz visível (27). Sendo assim, o telégrafo e o telefone cresceram como meio de comunicação.

(No Model.)

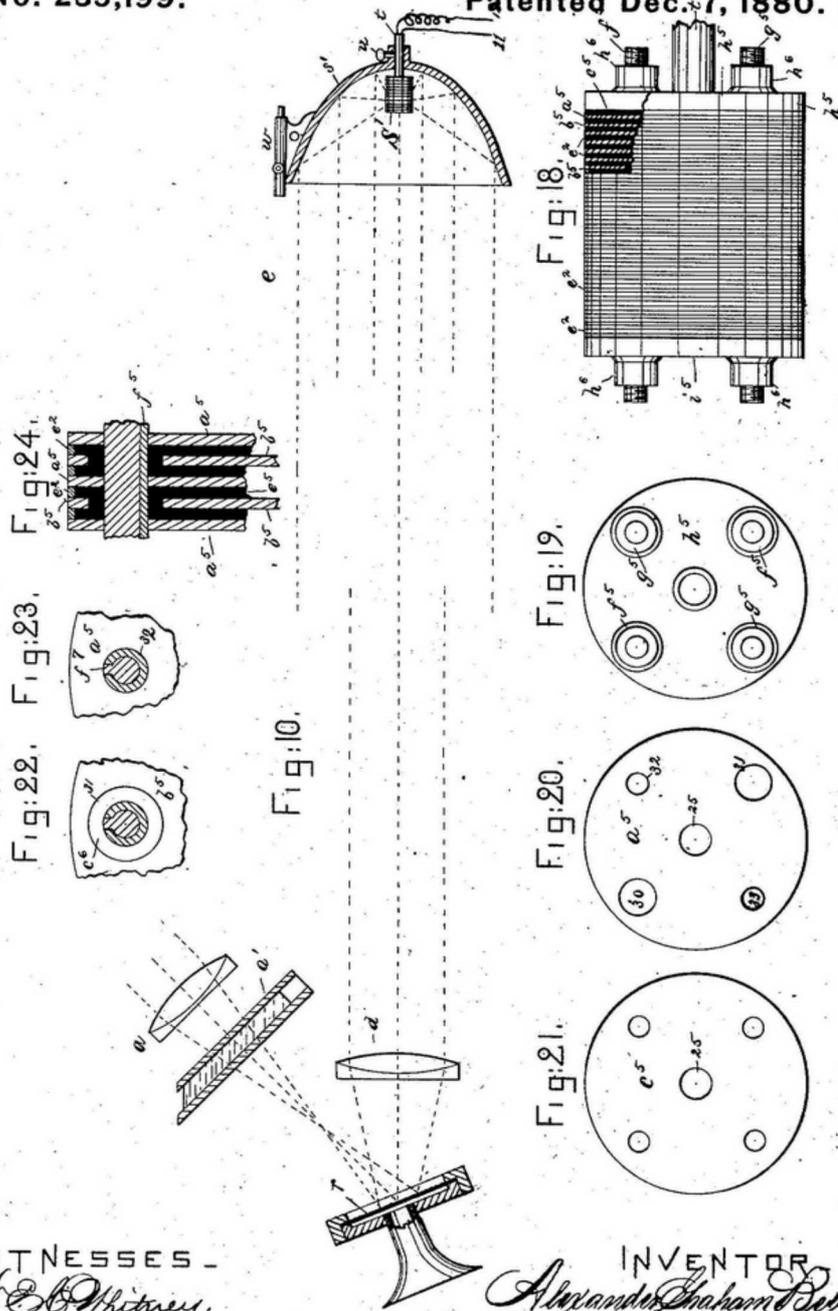
A. G. BELL.

8 Sheets—Sheet 3.

Apparatus for Signaling and Communicating, called
Photophone.

No. 235,199.

Patented Dec. 7, 1880.



WITNESSES -
W. B. Whitney.
V. D. Dearborn.

INVENTOR
Alexander Graham Bell.
 by *Crosby & Grey*

Figura 3 – Patente do photofone de Alexander G. Bell

2.1.4 O Retorno da Luz

Após a diminuição das pesquisas no campo da comunicação por luz no espectro visível, elas foram retomadas de maneira mais contundente em 2003. Dessa forma, o laboratório Nakagawa na universidade Keio no Japão (27), reinicia os estudos em redes ópticas de comunicação sem fio (*Optical Wireless Communications* - OWC). Seguindo essa interação, os pesquisadores de Keio, utilizaram LEDs para transmitir dados entre aplicações *P2P* (ponto-a-ponto) em ambientes controlados.

Em 2011, foi publicada pela força tarefa IEEE 812.15.7 as primeiras recomendações para comunicação por luz visível (35). Tal RFC fornece uma solução para a comunicação de luz visível que permite a transmissão de dados através de luz visível em frequências de 400 a 800 THz. A especificação inclui detalhes sobre o modo de operação, a largura de banda, o espectro de frequência, a potência de transmissão e outros aspectos técnicos da comunicação de luz visível.

A implementação de dispositivos compatíveis com IEEE 802.15.7 permitem a comunicação sem fio em ambientes internos com alta velocidade, baixo consumo de energia e alta confiabilidade. Além disso, a comunicação de luz visível não interfere com outras tecnologias de comunicação sem fio, tornando-a uma opção atrativa para aplicações onde a interferência é um problema.

Para evitar dano a saúde, a comunicação por luz visível deve evitar de toda forma flutuações perceptíveis do espectro visível para atender o padrão IEEE 802.15.7. Para tal, a recomendação IEEE, conforme (35), estabelece que a oscilação da luz deve ser maior que 200 Hz.

2.2 REDES SEM FIO E A COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

2.2.1 Processo de Codificação

Adotado pela plataforma de testes dessa pesquisa, a codificação Manchester trata-se de uma forma de modulação BPSK (*binary phase shift keying*), e se caracteriza sua simplicidade que permite a construção de sistemas de comunicação de baixo custo. Os estados lógicos são definidos por transições de estados, não capaz transmitir dados com longas sequências de zeros ou uns. As transições são determinadas a partir do ponto médio da corrente constante com auxílio de um comparador lógico para separar em camadas determinado o fluxo de dados. Assim, pode-se dizer que a BPSK é uma técnica de modulação digital que usa mudanças de fase para codificar informações binárias.

Em BPSK, a fase do sinal é alterada entre 0 e 180 graus para representar os valores binários 0 e 1, respectivamente. Isso significa que o sinal modulado é uma onda senoidal que mudou de fase para indicar o bit transmitido (34). A vantagem de BPSK é a sua simplicidade, o que o torna fácil de implementar e processar. Além disso, apresentando

uma taxa de erro baixa, o que significa ser confiável para a transmissão de dados. No entanto, podemos comentar que a principal desvantagem de BPSK é que ele só permite a transmissão de um bit de informação por ciclo de onda, o que significa que a taxa de dados é relativamente baixa em comparação com outras técnicas de modulação digital. De toda forma, BPSK é amplamente utilizado em diversas aplicações de comunicação sem fio, incluindo a transmissão de dados em satélites, sistemas de rádio amador e tecnologias de comunicação de longa distância (34).

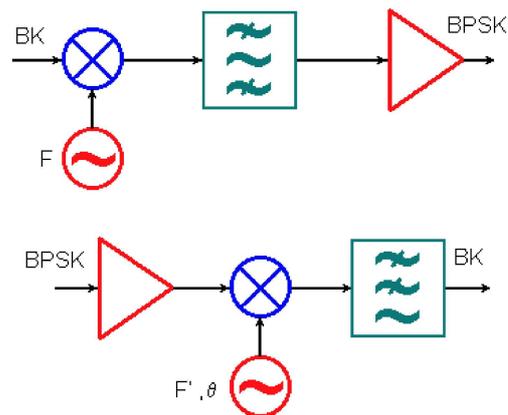


Figura 4 – Representados por um pulso que modula a amplitude F . Sendo assim, $-K$ representa o bit 0, e $+K$ representa o bit 1. Portanto: $q(t) \cdot 2\cos(2\pi \cdot F \cdot t) \Leftrightarrow Q(f + F) + Q(f - F)$.

Fonte: <https://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/apostila/sumario.html>

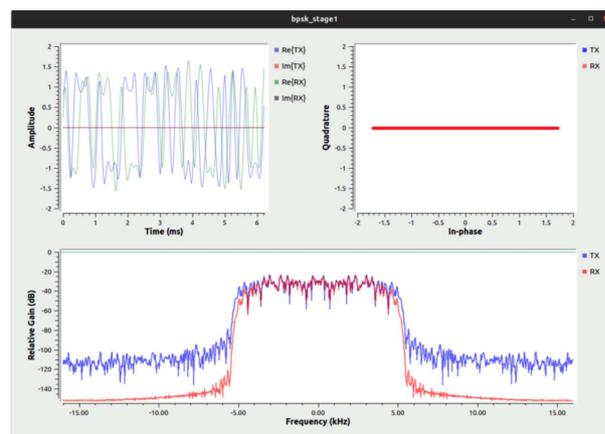


Figura 5 – Sinal BPSK.

Fonte: Próprio autor - aplicação GNURadio.

A codificação Manchester é um método de codificação de linha em que cada bit é representada por uma transição de nível de tensão. O Manchester é utilizado principalmente

em comunicações digitais para garantir a sincronização entre transmissor e receptor, e por detectar erros de transmissão. Nessa codificação cada bit é representado por dois pulsos um no e outro no meio do período de bit. Se o bit de dados for um 1 lógico, o primeiro pulso é de baixa tensão e o posterior é de alta tensão (17).

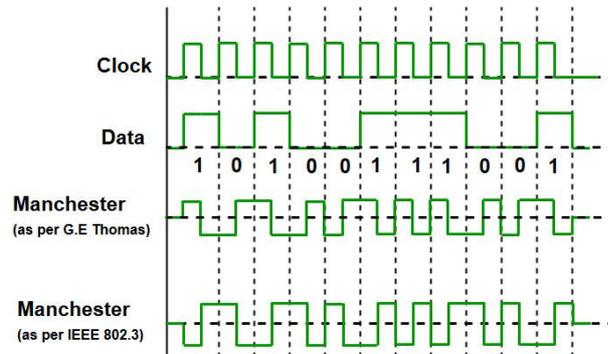


Figura 6 – Codificação Manchester.

Fonte: IEEE 802.3 (4)

Dessa forma, a principal característica da codificação Manchester é a garantia de sincronização entre o transmissor e receptor, onde cada transição de nível de tensão representa uma mudança de estado de bit. Além disso, a codificação permite a detecção de erros, uma vez que cada bit é representado por dois pulsos, ou seja, na falta de um dos pulsos, é possível detectar um erro de transmissão (17).

É possível encontrar a utilização da codificação Manchester em diversos sistemas de comunicação, *e.g.*, Ethernet e USB. Porém, é considerada de maior dificuldade de implementação comparado a outras técnicas, *e.g.*, *NRZ (Non-Return to Zero)*, *NRZI (Non-Return to Zero Inverted)* (31).

2.2.2 Unicast e Multicast

Em uma rede de computadores, a transmissão na modalidade sem fio é uma das formas mais utilizadas para enviar pacotes para diversos dispositivos simultaneamente devido a adoção de dispositivos móveis. Sendo assim, a transmissão sem fio torna o meio suscetível a vários tipos de ataques, perdas de pacotes, áreas de sombra, terminal oculto, interferências (39).

Considerando o roteamento em múltiplos saltos, onde os nós intermediários são utilizados para estender a cobertura de uma rede e permitir que uma mensagem alcance um nó distante, existem possibilidades de adaptações de protocolos de roteamento *Wi-Fi* no ambiente VLC em múltiplos saltos. Porém, é necessário destacar que características particulares a cada meio de transmissão e tecnologia associada podem determinar o desempenho de protocolos de roteamento e gerenciamento aplicados. Considerando

algoritmos de roteamento e também o modo *multicast*, algumas semelhanças entre nossa proposta e protocolos existentes podem existir, como: MAODV (*Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector*), ODMRP (*On-Demand Multicast Routing Protocol*), e AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*). Entretanto, como já destacado, são paradigmas diferentes e com desafios singulares a cada caso de aplicação, apesar operarem por radio frequências.

Redes sem fio locais apresentam características muito peculiares quando não operam em equipamentos mais robustos e específicos para ambientes onde existe a necessidade de tratar dados e transmitir para grupos. Grande parte de equipamentos Wi-Fi de prateleira (*off-the-shelf equipment*), convertem a transmissão do modo *multicast* para *unicast* para não sobrecarregar a rede. Com a exceção da linha Cisco MERAKI¹ que utiliza o *IGMP Snooping* para evitar tais entraves.

Dessa forma, quando um nó da rede solicita participação em um grupo, ele envia uma mensagem *IGMP* para o roteador. O roteador, por sua vez, envia uma mensagem *IGMP Query* para todos os nós na rede, perguntando quem está interessado em participar do grupo. Os nós que desejam participar respondem com uma mensagem *IGMP Report*, informando ao roteador que desejam receber o fluxo de dados (16).

O *IGMP Snooping* permite que o *equipamento* aprenda quais portas do equipamento têm nós que desejam participar de um grupo *multicast*, e então encaminha o tráfego apenas para essas portas, evitando inundar toda a rede com tráfego desnecessário. Isso reduz o congestionamento da rede e melhora seu desempenho (8).

Esse recurso é particularmente útil em redes maiores, onde há muitos nós e grupos *multicast*. Podendo também ajudar a garantir a segurança da rede, evitando que nós não autorizados recebam fluxo destinados a determinados grupos.

Mais detalhes sobre *unicast* e *multicast* serão apresentados no momento da caracterização do ambiente VLC, Capítulo 3.

2.2.3 IGMP

O protocolo IGMP é um protocolo da camada três do modelo *OSI*, utilizado para gerenciar grupos multicast em uma rede IP. Ele permite que os nós informem aos roteadores que desejam ingressar em um grupo *multicast* específico (39), para que possam receber fluxo destinado.

O modelo *OSI* (*Open Systems Interconnection*) é um modelo de referência para protocolos de comunicação de rede. Foi desenvolvido pela *ISO* (*International Organization for Standardization*) para fornecer um *framework* conceitual para a comunicação entre diferentes sistemas de computadores em redes(39).

¹ <https://t.ly/yN6q->

Quando um nó deseja ingressar em um grupo multicast, ele envia uma mensagem *IGMP* para o endereço *multicast* específico desse grupo, informando ao orquestrador de fluxo que deseja ingressar nesse grupo. O orquestrador, por sua vez, pode usar essas mensagens para gerenciar o tráfego *multicast* e encaminhá-lo apenas para os nós que pertençam a determinado grupo.

Esse protocolo é usado principalmente em redes com tráfego *multicast*, como redes de *streaming* de vídeo e áudio, para garantir que o tráfego seja enviado apenas aos nós que desejam recebê-lo. Ele permite que essas redes sejam mais eficientes em termos de largura de banda e oferece suporte a serviços multicast avançados, como roteamento multicast e árvores de distribuição multicast (7).

2.2.4 Comunicação por Luz Visível

Como definição, a comunicação por luz visível é uma tecnologia de transmissão de dados que utiliza a luz visível para transmitir informações em alta velocidade. Basicamente, a tecnologia usa LEDs para enviar sinais de luz pulsante que são recebidos por um receptor óptico e convertidos em sinais digitais.

Assim como acontece com o Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) para o IEEE 802.11, há o Li-Fi (*Light Fidelity*) com origem no padrão IEEE 802.15.7. A principal vantagem do *Li-Fi* em relação às tecnologias de comunicação sem fio convencionais (como o *Wi-Fi*) é a sua possibilidade de transmitir dados em altas velocidades, pois a luz visível tem uma frequência muito maior do que as ondas de rádio usadas por outras tecnologias. Além disso, o *Li-Fi* é considerado mais seguro do que o *Wi-Fi*, pois a luz não atravessa paredes, reduzindo o risco de interferência externa e espionagem.

No entanto, o *Li-Fi* também tem diversas limitações. A principal delas é que a tecnologia requer uma linha de visão direta entre o emissor e o receptor. Isso significa que os dispositivos precisam estar no mesmo ambiente e não podem ser separados por interferências ou bloqueios visíveis. Além disso, a tecnologia ainda em considerada em desenvolvimento, não estando amplamente disponível no mercado.

Como citado anteriormente, este trabalho se baseia em conceitos relacionados a dois métodos de envios de dados fundamentais para o entendimento deste trabalho: *unicast* e *multicast*. O paradigma *unicast* refere-se à transmissão fim-a-fim, ponto a ponto, onde há a necessidade de existir um remetente e um receptor com endereços IP diferentes. Nesse cenário cada cliente *unicast* conectado ao servidor consome o equivalente a uma largura de banda (18).

Em contraste ao método anterior, o *multicast* é uma comunicação orientada a grupo, onde a transmissão de dados é encaminhada por nós encaminhadores até grupos folha (20). Onde, indiferente do número de membros de cada grupo, não há consumo extra da largura de banda.

O método *multicast* pode apresentar os seguintes métodos de transmissão: um para muitos ($1 | n$); muitos para muitos ($n | n$); muitos para um ($n | 1$). *Multicast* não é uma comunicação ponto a multiponto na camada física (20). Uma das características essenciais do *multicast* é o gerenciamento de grupos realizado em conjunto com o protocolo *IGMP*.

Alguns pontos merecem atenção quando da utilização de *multicast*. Por exemplo, o gerenciamento de grupos mal feito pode, por natureza, se tornar suscetível para o *loop upstream* (16), e conseqüentemente perder controle dos grupos e deixar todo um segmento da rede indisponível (8).

2.2.5 Diodo Emissor de Luz

Com crescente demanda por sistemas mais eficientes energeticamente, com longo tempo de vida, e com boa resposta à eletroluminescência (*i.e.*, emissão de luz em resposta a uma corrente elétrica que o atravessa.), surge o diodo emissor de luz. Outro motivador é a redução do consumo energético total ao se utilizar LEDs. Como visto em (45), os estudos demonstraram uma redução de até 38% do consumo energético, sem sacrificar o conforto visual do sujeito no ambiente.

Para utilização do LED nas comunicações ópticas sem fio, foca-se no espectro visível entre 430THz e 790THz, logo após a frequência do infravermelho. Para nossos experimentos focamos ainda mais, na luz no espectro vermelho como vetor para transmissão de dados. Isso ocorre devido ao sucesso de outros pesquisadores no campo de pesquisa (23). A Tabela 1 apresenta algumas das características relacionadas.

Tabela 1 – Comprimento de onda eletromagnético VLC, frequência e energia do fóton.

Cor	Comprimento de onda	Frequência	Energia do fóton
Violeta	380-450 nm	668-450 THz	2.75-3.26 eV
Azul	450-495 nm	606-668 THz	2.50-2.75 eV
Verde	495-570 nm	526-606 THz	2.17-2.50 eV
Amarelo	570-590 nm	508-526 THz	2.10-2.17 eV
Laranja	590-620 nm	484-508 THz	2.00-2.10 eV
Vermelho	620-750 nm	400-484 THz	1.65-2.00 eV

Fonte: (27)

Na Figura 7 é possível ver o espectro eletromagnético, e o nível de energia. Esta imagem descreve a faixa de radiação eletromagnética, comprimento de onda e localização do espectro visível.

Observando que escolhemos este espectro por dois motivos: primeiro, ele possui menos interferência de cores; segundo, outros pesquisadores (26, 23), utilizam o diodo emissor de luz vermelha por apresentar melhores resultados e serem menos suscetíveis a

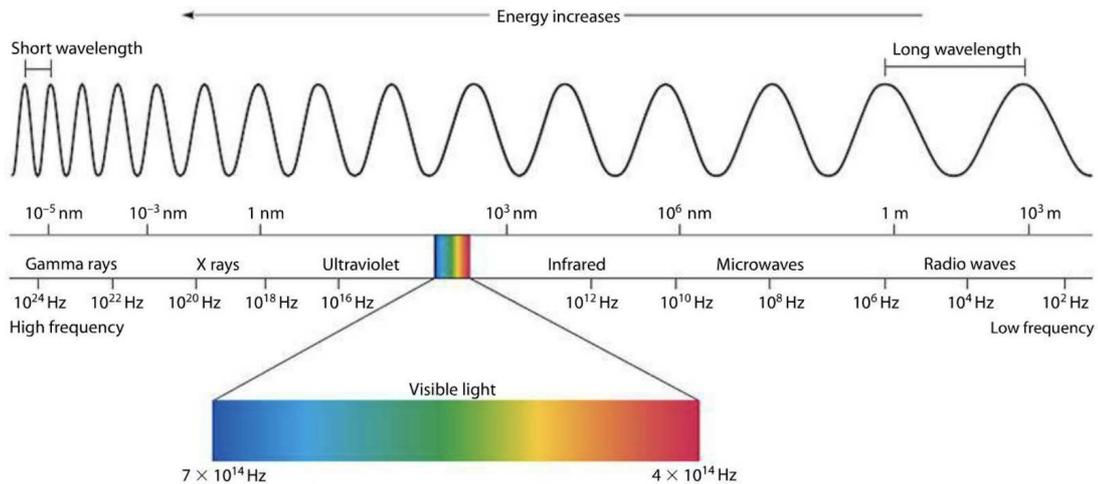


Figura 7 – Comunicações ópticas sem fio no espectro visível entre 430THz e 790THz após faixa de infravermelho.

Fonte: (28)

interferências. Para identificar o níveis de energia que correspondem aos fótons emitidos por determinado LED colorido, a conhecida relação Planck-Einstein pode ser utilizada (13). Como visto em 2.1.

$$\epsilon = hV = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Onde, ϵ = Energia; h = constante de Planck ($J \cdot s$); c = velocidade da luz no vácuo; λ = comprimento da onda (m); V = Radiação eletromagnética.

2.2.6 OpenVLC

O OpenVLC² é um projeto de código aberto que tem como objetivo desenvolver uma plataforma de VLC aberta e de baixo custo, sendo um projeto liderado por pesquisadores da Universidade Técnica de Munique, na Alemanha, e financiado pelo Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa.

Tecnicamente, o OpenVLC oferece uma plataforma de *software* e *hardware* aberta para a comunicação de luz visível, incluindo um *software* que implementa toda uma pilha de protocolos, um *hardware* de referência, ferramentas de desenvolvimento e documentação. A intenção na escolha desta plataforma para a pesquisa se baseia na facilidade de implementar soluções baseadas em VLC sem precisar adquirir equipamentos caros e fechados.

Para o ambiente funcionar, o OpenVLC precisa de apenas alguns componentes: 1 Placa Beaglebone Black (BBB) - conforme a Figura 8 -, “Capa” OpenVLC1.3: o *front-end* do VLC. A mesma capa é usada para transmissão e recepção; e o *driver OpenVLC1.3*:

² <http://www.openvlc.org/instructions.html>

código de *software* para camada MAC e PHY (implementado como *driver* Unix) e *firmware* (para controlar as unidades programáveis de tempo real (PRU) do BBB).



Figura 8 – BBB OpenVLC 1.3.

Fonte: <http://www.openvlc.org/instructions.html>

A solução de *software* é implementada como um *driver* Linux que pode se comunicar diretamente com a capa e a pilha de rede Linux. No OpenVLC, a interface VLC é configurada como uma nova interface de comunicação que pode aproveitar a vasta gama de ferramentas Linux.

Como sabemos, os módulos do cerne Linux são componentes de *software* que podem ser carregadas e descarregadas dinamicamente durante a execução do sistema operacional Linux. Eles fornecem recursos adicionais ao núcleo do Linux e podem ser usados para adicionar suporte a novos dispositivos, protocolos de rede ou outras funcionalidades. A Figura 9 destaca os componentes do *OpenVLC driver*, onde o VLC MAC (*Media Access Control*) se refere ao nível de acesso ao meio na pilha de protocolos de VLC, definindo regras para acessar o meio (neste caso, a luz visível) para transmitir dados.

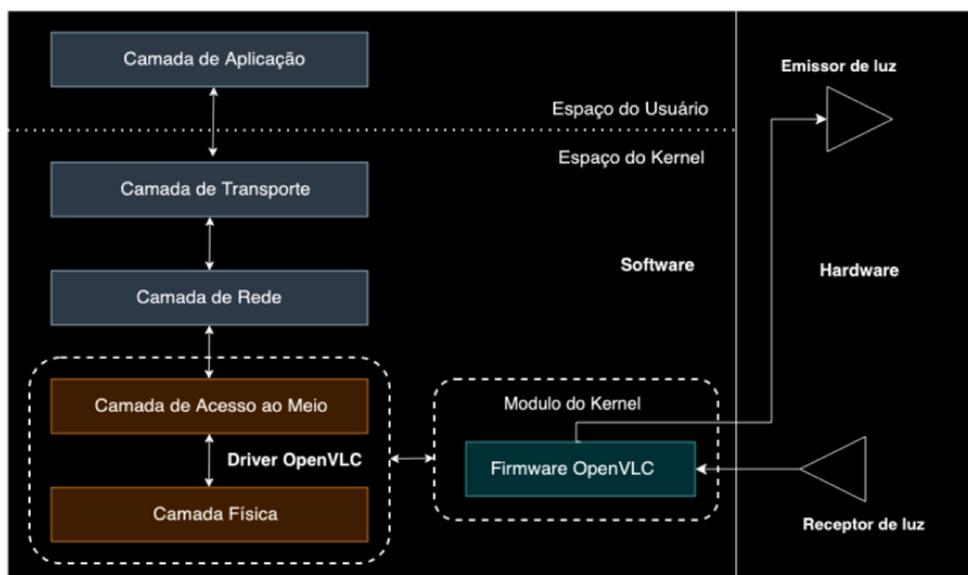


Figura 9 – Arquitetura OpenVLC.

O VLC MAC inclui funções como a gestão de colisões, a alocação de canais e a sincronização de tempo. Já o VLC PHY (*Physical Layer*) se refere ao nível físico da pilha de protocolos de VLC, sendo responsável por modular e demodular os sinais elétricos em sinais ópticos (e vice-versa), a fim de transmitir dados pela luz visível. Ele também é responsável por funções como codificação de sinal, controle de potência e gerenciamento de interferência.

Sendo assim, a plataforma apresentada possui uma versão simplificada do protocolo IP. Fato esse que facilitou a implementação de um protocolo simples, porém muito eficiente para ambientes de múltiplos saltos. A nossa proposta aproveitou parte da implementação do DYRP-VLC sobre o algoritmo Bellman-Ford que é responsável por baixa sobrecarga, e capacidade de encontrar novas rotas em caso de falhas (28).

2.3 DYRP-VLC

O DYRP-VLC (*Dynamic Routing Protocol for Visible Light Communication*) Matheus et al. (28), é um protocolo de roteamento dinâmico que tem como objetivo aumentar o desempenho de sistemas VLC em ambientes dinâmicos. Focado no roteamento de pacotes, o DYRP-VLC reage a obstáculos, construindo rotas alternativas na rede. A proposta do MCAST-VLC utiliza o DYRP-VLC como algoritmo de roteamento, incrementando-o com as funções referentes ao processo de *multicast*.

Primeiramente, é interessante considerar as propostas clássicas em estruturas das redes auto organizáveis cujo modo de transmissão é o *multicast* e de múltiplos saltos. Os principais protocolos relacionados são o *Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector* (MAODV) (37) e o *On-Demand Multicast Routing Protocol* (ODMRP) (44). Ambos propostos como protocolos para o ambiente *Wi-Fi* em modo *ad hoc*. O MAODV é um protocolo de roteamento *multicast ad hoc* que utiliza uma abordagem sob demanda para estabelecer caminhos *multicast* dinâmicos. Baseado no protocolo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*), foi adaptado para suportar transmissões *multicast* em ambientes sem fio. Sua intenção é que, com a características de ser reativo na descoberta de rotas, minimize a sobrecarga de controle. Já o ODMRP se assemelha ao MAODV em relação à característica da descoberta de rotas de forma reativa (sob demanda), porém não utiliza uma árvore *multicast* fixa, em vez disso, mantém uma estrutura de malha capaz de suportar a mobilidade de membros dos grupos. Ambas soluções são interessantes do ponto de vista de *multicast* em redes *Wi-Fi*, e serviram de motivação para a proposta do protocolo MCAST-VLC.

Em Rodolakis et al. (36) tem-se um dos primeiros trabalhos relacionados a *multicast* em redes *ad hoc* de múltiplos saltos. Os autores propõem uma extensão do protocolo de roteamento *unicast* de múltiplos saltos, o OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*), para suportar roteamento *multicast* em redes móveis *ad hoc* baseadas em *Multicast Overlay*

Spanning Trees (MOST). O protocolo MOST contempla árvores geradoras mínimas e caminhos mais curtos entre os nós *multicast*. O protocolo opera em conjunto com um protocolo de estado de enlace (proativo), como o OLSR. Diferentemente do protocolo MCAST-VLC, além do suporte à troca do protocolo de roteamento, o adotado nesta pesquisa se baseia no modo reativo de descoberta de rotas, o que, comparado a um protocolo proativo, tende a consumir menos recursos computacionais.

Já sob o foco das redes VLC e o *multicast* temos algumas propostas. Dentre as mais relevantes pode-se listar as de Adoptante et al. (1) e Lee et al. (24). No estudo conduzido por Adoptante et al., uma rede VLC é avaliada em relação à troca de datagramas provenientes de um sistema de áudio. Os autores realizam diversas transmissões, todas ponto a ponto, utilizando um único protocolo de transmissão de dados de um salto (24). Como destaque, pode-se considerar que os autores não desenvolveram um protocolo *multicast* por completo, uma vez que modulam os fluxos, inserindo códigos especiais em cada um deles. Cada dispositivo é previamente configurado com o código adequado para decodificar o seu fluxo modulado. Em suma, os autores não desenvolveram um protocolo *multicast* com gerenciamento de grupo, roteamento e isolamento de tráfego. Considerando essas características, o MCAST-VLC implementa gerenciamento de grupo, com menos roteamento de troca de mensagens e não inundando os nós.

Por fim, é possível listar propostas também limitadas à árvores virtuais fixas de roteamento *multicast*, como em Garai et al. (19). Aplicado no ambiente de redes veicular, esse trabalho avalia o envio de mensagens através do VLC em uma árvore *multicast*. Porém, os autores não definem características de gerenciamento de grupo e outros, inerentes a um protocolo *multicast* e do ambiente VLC.

2.4 UNICAST

Unicast é um tipo de comunicação de rede em que um único pacote de dados é enviado de um dispositivo emissor para um dispositivo receptor específico em uma rede. Isso é diferente dos modelos de comunicação *multicast* e *broadcast*, em que um pacote é enviado para múltiplos dispositivos receptores simultaneamente.

No modelo de comunicação *unicast*, o emissor envia um pacote diretamente para o endereço IP do dispositivo receptor, que pode estar em uma rede local ou remota. O dispositivo receptor recebe o pacote e pode responder ao emissor, estabelecendo assim uma comunicação bidirecional (39).

A comunicação *unicast* é amplamente usada em várias aplicações de rede, como navegação na web, envio de *e-mails*, transferência de arquivos e outras comunicações de um para um. Ela é eficaz para comunicação ponto a ponto em redes locais e remotas e é usada em uma ampla variedade de dispositivos, incluindo computadores, *smartphones*, *tablets*, roteadores, *switches* (39) e outros dispositivos de rede.

Entretanto, a comunicação unicast pode ser menos eficiente em termos de largura de banda em comparação com modelos de comunicação *multicast* e *broadcast*, pois cada pacote é enviado individualmente para um único dispositivo receptor. Isso pode levar a um maior tráfego na rede e pode ser menos escalável em situações em que muitos dispositivos precisam receber o mesmo pacote de dados simultaneamente (39).

2.5 MULTICAST

Multicast snooping é uma técnica usada em equipamentos de rede para controlar o tráfego *multicast* e garantir que esses pacotes sejam encaminhados apenas para as portas que têm dispositivos inscritos nos grupos correspondentes.

Os equipamentos de rede que suportam *multicast snooping* ouvem o tráfego *multicast* na rede para separar quais dispositivos estão inscritos em quais grupos. Com base nessas informações, o equipamento orquestrador de rede cria uma tabela de encaminhamento *multicast* que lista os grupos ativos e as portas do orquestrador que têm dispositivos inscritos nesses grupos. Quando um pacote chega ao orquestrador, ele usa a tabela de encaminhamento para encaminhar pacotes apenas para as portas do que têm dispositivos inscritos no grupo correspondente.

Essa técnica ajuda a minimizar o tráfego desnecessário na rede, reduzindo assim o congestionamento e a carga da rede. Além disso, ela permite que os dispositivos na rede recebam o tráfego necessário sem a necessidade de processar ou descartar pacotes *multicast* não solicitados.

Em um ambiente de *multicast* sem fio, em geral, tem-se a separação de grupos por espectro de frequência, ou identificadores únicos nos pacotes que trafegam na rede.

2.6 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

As métricas *multicast* são usadas em redes de computadores para avaliar o desempenho e a eficiência da transmissão de dados *multicast*. Essas métricas são diferentes das métricas *unicast*, pois são usadas para medir as características de transmissão de dados em grupos *multicast* em vez de conexões ponto a ponto.

Algumas das métricas *multicast* mais comuns incluem:

- Taxa de transmissão: mede a taxa na qual os pacotes de dados são transmitidos em um grupo *multicast*, geralmente medida em bits por segundo (bps).
- Eficiência da largura de banda: mede a eficiência da utilização da largura de banda para transmitir dados em um grupo *multicast*. Isso inclui o número de pacotes *multicast* transmitidos por unidade de largura de banda disponível.

- Atraso: mede o tempo que leva para os pacotes de dados chegarem aos dispositivos receptores no grupo *multicast*, geralmente medido em milissegundos (ms).
- Perda de pacotes: mede a porcentagem de pacotes de dados que são perdidos durante a transmissão em um grupo *multicast*. Isso pode ser causado por vários fatores, incluindo a falta de recursos de rede, falhas de dispositivo ou congestionamento de rede.
- Escalabilidade: mede a capacidade de uma rede de suportar grandes grupos *multicast* sem afetar o desempenho da rede ou diminuir a qualidade da transmissão.

Para avaliação do ambiente real foi implementado o protocolo no OpenVLC 1.0 (41), uma plataforma VLC na plataforma embarcada *Beaglebone black*, em conjunto com o módulo *OpenVLC V1.2*. Foi também utilizado o módulo *On-Off Keying (OOK)* (30) como mecanismo de modulação em conjunto com o *Manchester Run-Length Limited (RLL)* (40). O OpenVLC utiliza para correção de bits com erro o algoritmo *Reed-Solomon* na camada *MAC*. Assim, dois tipos de quadros são formados: quadros de dados e de reconhecimento (*ACK - Acknowledgment*). Este modelo é análogo a das redes sem fio do padrão IEEE 802.11. A camada de acesso ao meio utiliza o sentido de portadora para evitar colisões. Neste caso específico, existem dois tipos diferentes de detecção: detecção básica e detecção rápida. Ambos são funções da camada física. Esse módulo adota o mecanismo de detecção primária (CSMA/CA), ou seja, quando um quadro está pronto para ser transmitido, se o canal estiver livre, ele envia os dados. Caso contrário, o módulo inicia um contador de *back-off* com um valor aleatório entre 0 e o tamanho da janela de contenção. A detecção deve ser realizada de forma rápida durante a transmissão para detectar um canal ocupado e interromper a comunicação (CSMA/CD).

Para transmitir dados no método *unicast* adotamos o protocolo DYRP-VLC (29). Esse protocolo possui duas características que o destaca dos demais protocolos para redes de comunicação por luz visível: descoberta de rotas em cenários de múltiplos saltos e manutenção de rota. A descoberta de rotas se inicia no momento em que um nó na malha solicita a transmissão para o nó destino, que não está atualmente em sua tabela de roteamento. O protocolo inunda a rede até construir uma rota para cada nó final. Ele também mantém os estados da rota e associados a um tempo de expiração, controlando o status atual do nó, ou seja, ativo, ocioso, expirado ou hibernando. Esses parâmetros são atualizados periodicamente com base no desempenho da rede.

Para ambos os cenários experimentais utilizamos múltiplos saltos e nós encaminhadores para manter a neutralidade dos testes. Seguimos as recomendações para iluminação de ambientes de trabalho IES³ (*Illuminating Engineering Society*). Os experimentos foram realizados em condições com iluminação de 1050Lux aferidos pelo aparelho *Tomshin*

³ <https://www.ies.org/>

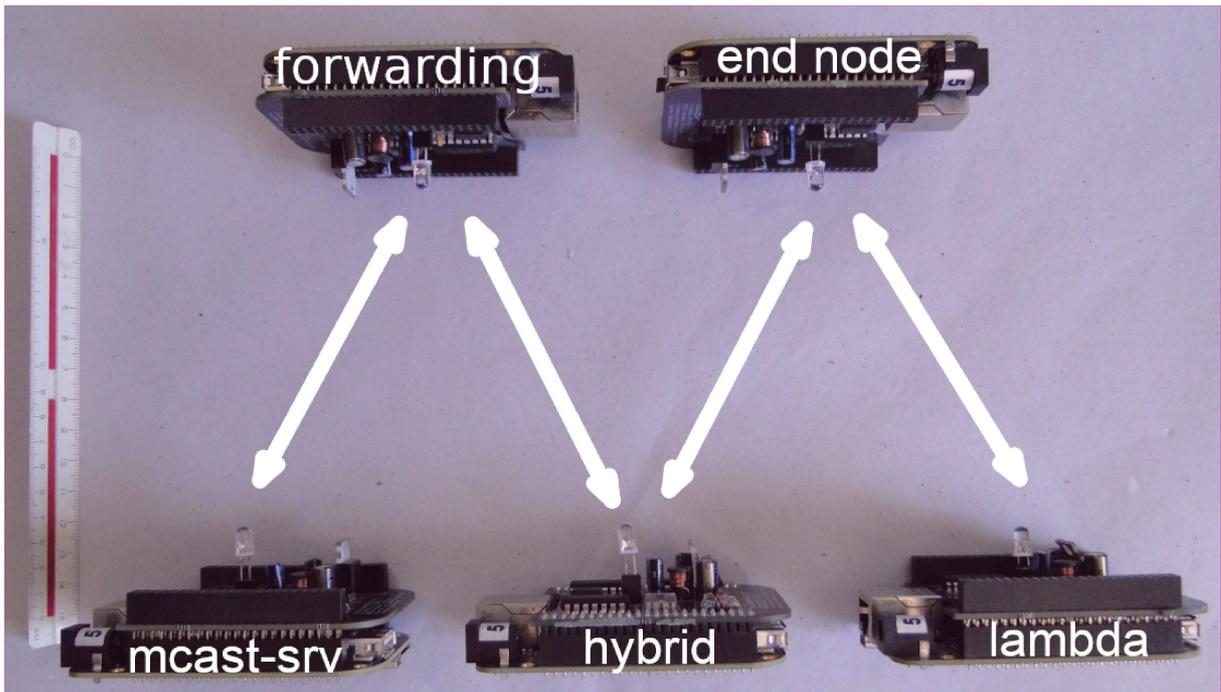


Figura 10 – Cenário de testes reais.

Mini LCD Luxímetro Medidor de luz 0-199999 Lux não aferido por órgão regulador. Os módulos embarcados estavam equipados com LEDs super brilho na cor vermelha entre as frequências: 400THz e 480THz, diâmetro de cinco milímetros, e consumo aproximado 30mA a 3,3 VDC, lente translúcida, e intensidade de luz média 16.125 Lux, taxa de dissipação média de 100mW a 25 graus Celsius, conforme *datasheet* do fabricante.

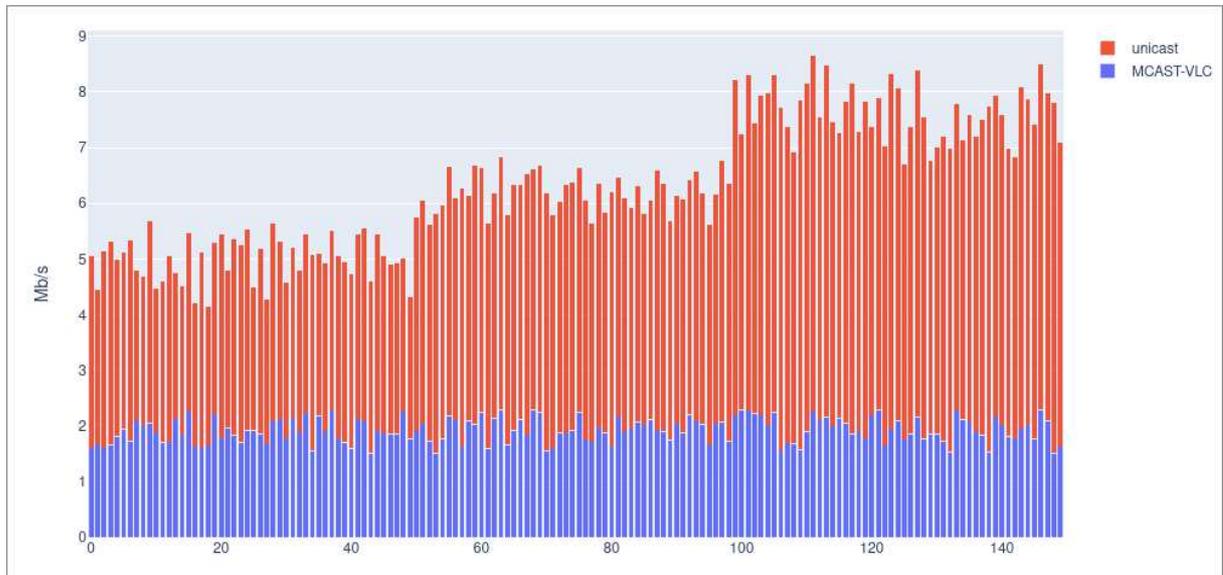
A Figura 10 descreve o cenário VLC experimental avaliado. Foram considerados cenários práticos e aplicações onde o ambiente VLC possui boa aderência. Foi observado com base em cenários onde o uso de VLC ocorre para a comunicação interna, onde lâmpadas LED comerciais estabelecem comunicação em múltiplos saltos (38), a comunicação LED-para-LED é de baixo alcance (10) e a comunicação entre *smartphones* e brinquedos usando VLC é aderente (9).

2.7 CENÁRIO DE AMBIENTE REAL DYRP VS. MCAST-VLC

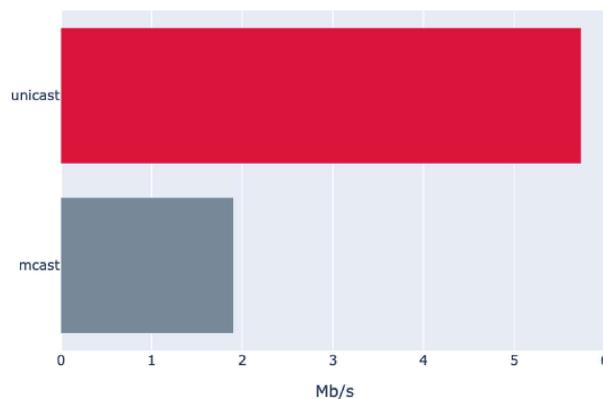
No primeiro caso, utilizou-se o método *unicast* (somente DYRP-VLC) para enviar um fluxo de dados para possíveis clientes na malha VLC. Dessa forma, pode-se afirmar que não há gestão de grupos, somente clientes que solicitam fluxo direto para o servidor. A intenção é observar a ocupação da banda e o número de nós atendidos pelo servidor de fluxo.

Observa-se na Figura 11 os resultados deste primeiro cenário, DYRP-VLC (*unicast*) versus MCAST-VLC. Como dito, a utilização somente do DYRP-VLC é considerada como *unicast* neste momento, uma vez que não há gerência de grupo ou funções relacionadas ao

multicast como o MCAST-VLC.



(a) Ocupação de banda, *unicast* versus MCAST-VLC



(b) Ocupação de banda, *unicast* versus MCAST-VLC

Figura 11 – Ocupação de banda no ambiente de testes.

O *MCAST-SRV* (servidor que gera tráfego para os grupos e nós folha da rede), transmitiu o fluxo dados a uma taxa de 2Mb/s. Foi definido para os testes a unidade máxima de transmissão (MTU - *Maximum Transmission Unit*) em 1.100 *Bytes*. Avaliou-se as métricas padrão sugeridas pelo grupo de trabalho IETF MANET para avaliação de protocolo de roteamento/multicast (11). Foi considerado o número de *bytes* de controle transmitidos pelo *MCAST-VLC* para fins de análise de sobrecarga e confirmação de recepção de pacotes. A taxa de dados entregues permitiu investigar qual o comportamento dos pacotes de controle na entrega de dados.

Avaliou-se também a taxa de entrega por unidade de tempo. Os resultados foram

analisados com a média de cinco observações por cenário, e adotou-se o nível de confiança de 95% para os intervalos observados.

Nesse experimento observou-se que no *unicast*, a cada nó adicionado, há um salto no consumo de banda. Já para o MCAST-VLC há independência em relação ao número de nós nos grupos. Seu consumo de banda não se altera independentemente do número de nós em um grupo. Tal premissa é verdadeira desde que não haja mudança de líder de grupos *multicast*.

A partir dos experimentos realizados, valores coletados e métricas analisadas no período de caracterização do cenário VLC e do comportamento dos protocolos, iniciou-se a modelagem numérica. O Capítulo 4 define cada característica do ambiente VLC, assim como do comportamento a ser adotado pelo modelo proposto.

2.8 Considerações

O ambiente disponível para testes OpenVLC na versão 1.2, é uma plataforma formidável para testes mais simples, entretanto, para ambientes mais complexos com topologias mais avançadas como em ambientes de múltiplos saltos e ambientes com maior nível de ruído (interferências por outras fontes de luz ou por difração pela presença de nevoa), a plataforma pode apresentar grande quantidade de inconsistências.

Dados os motivos anteriores foi necessário implementar o protocolo UDP para contornar tais inconsistências durante a conexão entre nós. Outro fator observado é que o firmware OpenVLC na versão 1.2, apresentou baixa taxa de recuperação de conexão, principalmente quando provinda de outros espectros de luz.

A recuperação da conexão é fator esperado do protocolo TCP/IP. Esse fenômeno ocorre pelo fato do firmware ser apenas uma camada de conversão, em que o TCP/IP é convertido para comunicação serial. O TX ou *transmissor* é o *LED* e o RX *receiver* é o LDR (light diode receiver).

A literatura apresenta um número escasso de trabalhos relacionados aos temas VLC, ou mesmo em OWC, com propostas de algoritmos *multicast* em redes de múltiplos saltos. Essa afirmação é corroborada por Cen et al., que mostra o número escasso de propostas no tema, mas também destaca sua relevância e interesse de pesquisa (6).

Destacamos que o MCAST-VLC se apresenta como uma abordagem única, uma vez que é baseado em um protocolo dinâmico, o que significa que a rede pode se adaptar a mudanças em tempo real. Em comparação, alguns dos trabalhos citados podem ser baseados em soluções mais estáticas, onde as rotas são definidas previamente e não podem ser alteradas dinamicamente. Além disso, se apresenta como a única proposta de *multicast* com gerenciamento de grupos e baixa sobrecarga para VLC na literatura.

3 MCAST-VLC

Nesta seção, apresentamos a proposta para um protocolo *multicast* em múltiplas camadas para redes VLC com múltiplos saltos. O *Multicast VLC* (MCAST-VLC) proporciona o isolamento de fluxo possibilitando somente o consumo de dados do fluxo por membros devidamente identificados e autorizados pelo servidor.

3.1 MCAST-VLC

O procolo proposto suporta múltiplos saltos, encaminhamento de fluxos destinados a grupos de forma sigilosa e transparente, gera numero reduzido de troca de mensagens de controle por utilizar o algoritmo Bellman-Ford. Dessa forma, cada nó tem conhecimento dos vizinhos a um salto de distância, portanto, não há inundação de mensagens de controle de roteamento para manter a topologia da malha.

É importante destacar que o algoritmo de roteamento é fator de baixa relevância para nossa proposta, e qualquer outro algoritmo pode ser utilizado. O desempenho do protocolo de roteamento, apesar de relevante do ponto de vista da gerência. Entretanto, esse fator não gera maiores impactos para a sobrecarga da proposta quanto ao gerenciamento de grupos e encaminhamento de fluxo na malha.

3.2 REDE VLC DOMÉSTICA

O protocolo MCAST-VLC está apoiado em protocolo de roteamento para redes VLC. Como sabemos, o atributo de múltiplos saltos resolve uma boa parte dos desafios das redes VLC. Porém, a capacidade de encontrar novas rotas e escapar de áreas de sombra de iluminação e/ou nós inativos dão alto grau de liberdade para a distribuição e disposição de dispositivos sem a preocupação de visada direta para o ponto central de envio de fluxo para a malha. Todo nó *MCAST-VLC* tem função primária de reconhecer seu vizinho a um salto e isolar nós inativos. Uma imagem de um cenário típico de uma rede VLC doméstica pode ser vista na Figura 12.

3.3 TOPOLOGIA

A Figura 13 descreve um cenário típico em que o protocolo *MCAST-VLC* se insere. Observe o gerenciamento do grupo N como um cenário de múltiplos saltos. Considerando uma rede VLC M como um conjunto de nós VLC, por definição temos que $N \subset M$. Onde, λ é um subconjunto de nós ordinários, responsáveis por encaminhar pacotes de forma transparente. Desta forma, M ou N são compostos por $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$.

Observe que o subconjunto de nós δ é formado por nós de borda de N , com as mesmas funções básicas VLC dos nós λ , mas com o papel apenas de encaminhadores de



Figura 12 – Cenário típico para o protocolo MCAST-VLC. Cinco nós em cenário de múltiplos saltos, com comunicação bidirecional entre os nós.

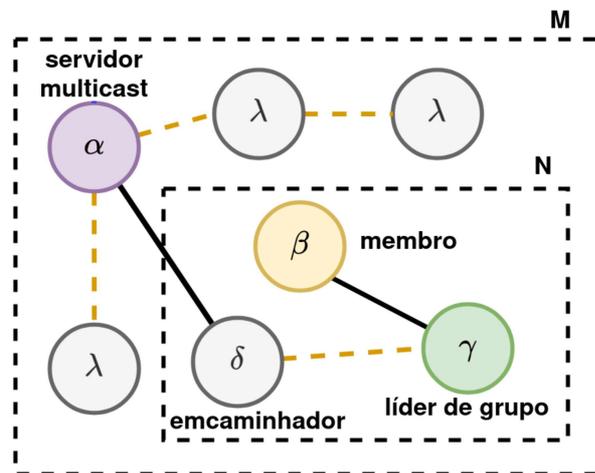


Figura 13 – Exemplo de gestão de grupo e encaminhamento de pacotes numa malha MCAST-VLC.

pacotes, onde $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k\}$. Por fim, o subconjunto N é composto além de nós δ como $N = \{\gamma, \beta\}$, onde o nó γ assume o papel de líder de grupo (responsável por manter comunicação lógica direta com o servidor α).

Sendo assim, o nó γ mantém o estado interno ao seu grupo *multicast*. O nó γ é também denominado nó híbrido, pois pode consumir dados, assim como encaminhar fluxo a nós internos ao grupo de sua liderança. Já o nó β é um nó membro, um nó folha na malha, pertencente a uma árvore *multicast*.

Dessa forma o cenário da Figura 13 o protocolo contém apenas um único servidor (α , ou simplesmente, MCAST-SRV). Entretanto, todas as modalidades do modo de comunicação *multicast* são suportadas. Ou seja, um servidor pode enviar mensagens para um grupo; mensagens de muitos servidores para um grupo; e mensagens de muitos servidores para muitos grupos. É importante destacar que, quando um grupo *MCAST-VLC*

consiste em apenas um único nó, este nó se torna o líder de grupo γ .

3.4 MUDANÇA DE ESTADOS

A Figura 14 demonstra no protocolo a mudança do estado de um nó encaminhador para nó integrante de um grupo *multicast*. O *joinMsg* é o primeiro passo para solicitar a entrada em um grupo. Recebida a solicitação de entrada, o servidor verifica se há grupo disponível, caso contrário, esse é criado com um único nó líder.

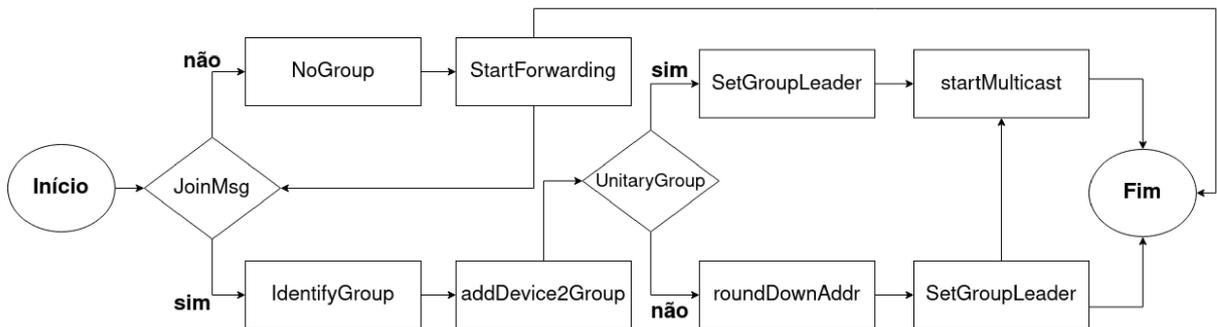


Figura 14 – Algoritmo para gerenciamento de entrada em grupo *multicast* no protocolo *MCAST-VLC*.

A próxima etapa é o gerenciamento de grupo. O manejo dos grupos é reativo. O líder de grupo monitora k tentativas consecutivas de comunicação com membros intercaladas por um período de tempo. Caso não haja resposta esse integrante do grupo é descartado como vizinho viável e outra nova etapa de verificação de por vizinhos a um salto é iniciada esse processo se repete por três vezes até que exista nova interação com líder.

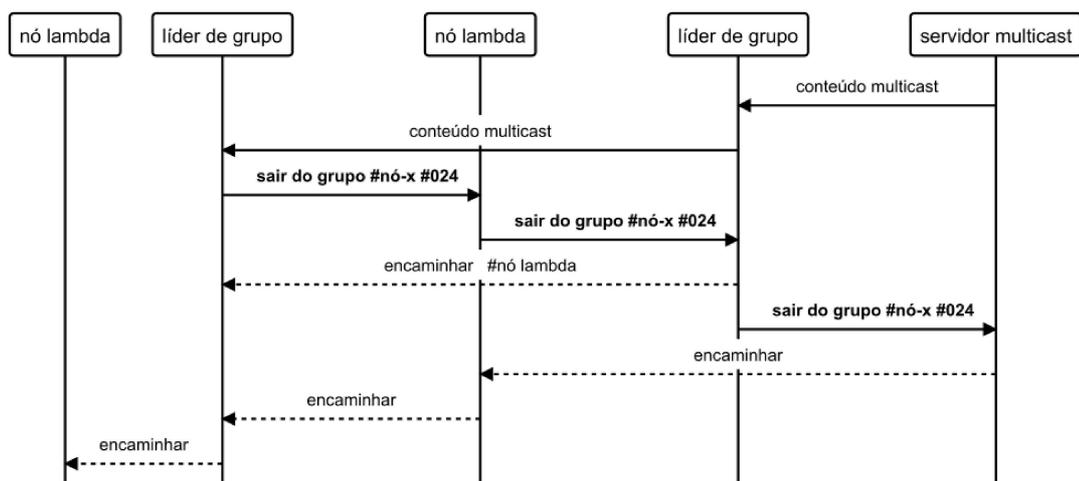


Figura 15 – Diagrama solicitação de saída de grupo.

3.5 CABEÇALHO - *HEADER*

Baseado no cabeçalho do protocolo *Internet Group Management Protocol Version 2* (IGMP V2) o cabeçalho do protocolo *MCAST-VLC* apresenta a seguinte configuração:

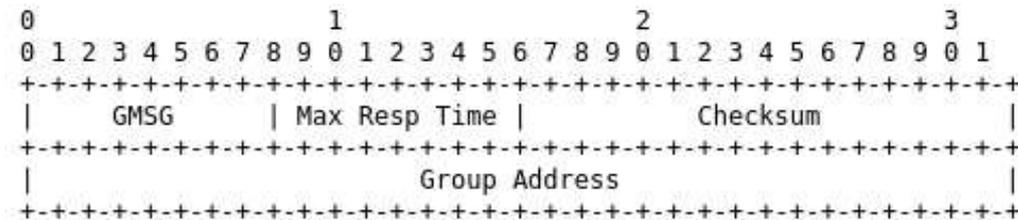


Figura 16 – Cabeçalho (*header* de um pacote MCAST-VLC).

A Figura 16 detalha o cabeçalho MCAST-VLC, *GMSG* (*Group Management Message*) a mensagem para gerenciamento de grupos é capaz de enviar códigos para cada tipo de mensagem: *joinGroup* 0x11; *leaveGroup* 0x13; ou *ACK* 0x10. O campo *Max Resp. Time* determina o tempo máximo (incremento de 10Hz) para envio da mensagem de resposta. O campo *checksum* corresponde aos bits de paridade para verificação de erros. Por fim o campo *Group Address* é responsável por identificar o grupo e líder.

Tabela 2 – Mensagens de gerenciamento de grupo (GMSG): Tipos de mensagens, valores e funções.

Mensagem	Função	Valor
GMRQ	Solicita (REQ) entrada em um grupo	0x11
GMRQ	Solicita (REQ) saída de um grupo	0x13
GMRP	ACK (REP) simples	0x10
GMRP	Resposta (REP) sobre um grupo e seu lider	0x1A
GRMP	ACK (REP) de confirmação de saída de um grupo	0x1B
GERR	Erro (ERR)	0xAA

3.6 MENSAGENS PARA GERENCIAMENTO DE GRUPOS.

A Tabela 2 apresenta códigos das mensagens para gerenciamento de grupo. A mensagem 0x11 verifica a vizinhança pelo líder do grupo com o conteúdo solicitado; a mensagem 0x13 corresponde ao saída de um nó do grupo após receber uma mensagem 0x1B, e entrar no modo de encaminhamento; a mensagem 0x10 é uma simples confirmação de ACK; o relatório contendo 0x1A o líder do grupo e ultimo octeto do referido grupo *multicast* 224.0.0.XXX; a mensagem 0x1B confirma a saída e envia informar o nó para entrar no modo de encaminhamento.

Uma observação importante a fazer é que não há tentativa de recuperação em casos interrupção da comunicação. Quando reestabelecida a comunicação a entrada no fluxo se

da conforme a linha de tempo da transmissão. Pacotes fora de ordem ou mal formados são descartados, portanto existe a possibilidade de perda de dados durante a transmissões *multicast*.

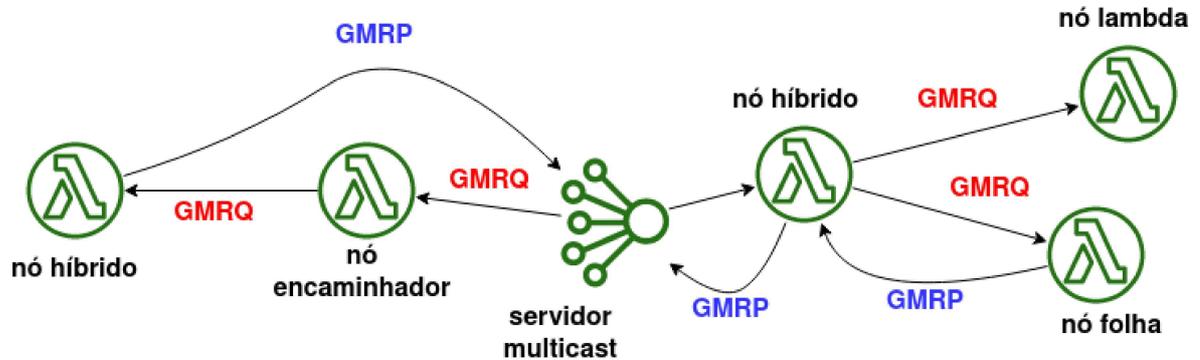


Figura 17 – Troca de mensagens em uma malha MCAST-VLC.

3.7 Considerações

Devemos considerar que essa proposta de protocolo multicast para redes de comunicação por luz visível, não é compatível com outros ambientes. Porque o gerenciamento da árvore multicast é feita de forma otimizada para redes VLC. A árvore não inclui nós que são responsáveis somente pelo repasse de pacotes e esses nós podem ocorrer de forma em que a árvore se torne descontínua, ver figura 13. Ela pode apresentar nós que não são membros entre nós membros de grupos *multicast*.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo é apresentada a modelagem numérica e o modelo para extrapolação dos resultados por meio de simulação do ambiente VLC com múltiplos saltos. Primeiramente, definiu-se a caracterização do fluxo de dados no meio VLC, na sequência a caracterização dos erros imputados ao modelo, e, por fim, a probabilidade estatística relacionada ao sucesso, fracasso ou atraso na transmissão são demonstrados.

4.1 FLUXO

Suponha que há um fluxo viável p que percorre um rede VLC. É possível utilizar qualquer algoritmo para determinar o fluxo máximo de uma rede tomando como condição de contorno o seu limite inferior maior ou igual a zero. Neste tipo de algoritmo, pode-se realizar apenas uma modificação: reduzir a capacidade de um arco $a'(i, j)$, como $r_{i,j} = (u_{i,j} - x_{i,j})$. Observa-se que desta forma é definida a capacidade residual do fluxo. Portanto, a primeira expressão demonstra o incremento máximo do nó de origem i até o nó de destino j .

Utilizando a capacidade residual do arco $a'(i, j)$, o segundo termo representa a capacidade remanescente do arco $a'(j, i)$. Note que qualquer fluxo, considerando-se os limites inferior e superior e observando-se as restrições descritas acima, impossibilita a existência de fluxo negativo no sistema analisado (2).

Assim, é possível demonstrar uma proposta para resolver o problema do fluxo máximo obedecendo as restrições do cenário em análise. Portanto, pode-se definir o fluxo viável como x em um malha G com valor real v . Assim, é possível determinar a origem e destino $[S, \bar{S}]$ como corte $s - t$. Observemos que foi definida a capacidade do corte $[S, \bar{S}]$, que por sua vez pode ser representada por:

$$u[S, \bar{S}] = \sum_{(i,j) \in (S, \bar{S})} u_{i,j} - \sum_{(i,j) \in (S, S)} l_{i,j} \quad (4.1)$$

A capacidade de corte representa a quantidade máxima de fluxo de rede que passa pelo conjunto de nós S . Por conveniência tratou-se como grupo *multicast*.

$$v = \sum_{(i,j) \in (S, \bar{S})} x_{i,j} - \sum_{(i,j) \in (S, S)} x_{i,j} \quad (4.2)$$

4.2 ENVIO DE PACOTES

Por fim, imaginemos um determinado número de pacotes p se movendo em um meio x contra uma força proporcional R . Esse percurso ocorre em uma janela de tempo t . Portanto, é possível afirmar que:

$$p = \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} = -R \frac{\delta x}{\delta t} \quad (4.3)$$

Uma vez que a força resistente R é um somatório de erros e características exclusivas do espectro visível α . Temos, portanto:

$$R = \sum_{i=0}^n (E_n \cdot \alpha_n) \quad (4.4)$$

4.3 ERROS

Os erros E , são os erros mais comuns das redes de comunicação em geral, como: taxa de atraso, taxa de perda, taxa de pacotes recebidos fora de ordem e demais. Os erros α são os erros característicos das redes VLC, como: sombra, interferências providas de outras fontes de iluminação, perda de visada, alta ou baixa sensibilidade do sensor receptor do espectro e demais fenômenos ópticos.

4.4 DEMANDA POR BANDA

Dessa forma, com a separação da E.D.O. (Equação Diferencial Ordinária) obtém-se duas equações: a de demanda e a de oferta, tratadas mais a frente neste texto. A banda demandada b é obtida pela *sigmoide* crescente em função de erros R , pacotes p e tempo. E , como esperado para a demanda de banda, tende a crescer.

$$b = b_0 \cdot e^{-\frac{R}{p} \cdot t} \quad (4.5)$$

4.5 OFERTA DE BANDA

A oferta de banda, obtida também pela separação, está fixada ao limite físico da rede, e também apresenta sua forma *sigmoide*. Entretanto, tende a decrescer em função do tempo. Deste modo, a variável x é a banda limite do sistema.

$$x = x_0 + \frac{b_0 \cdot p}{R} \cdot [1 - e^{-\frac{R}{p} \cdot t}] \quad (4.6)$$

4.6 CONDIÇÃO DE CONTORNO

Como condição de contorno, e sujeito às restrições apresentadas mais a frente, temos: *payload* total de 824Mb, taxa de transferência de 2 Mb/s e o somatório de erros inicial de 0,001.

4.7 RESTRIÇÕES

Todo sistema está sujeito a determinadas restrições. De forma natural, as restrições são a matriz de estados Markoviana, que representa a probabilidade de mudança de estados. Observemos que os valores das linhas devem sempre atender à condição: $[a_{ij} + \dots + a_{i+kj+n}] = 1$.

4.7.1 Matriz de Estados

Dessa forma, a primeira linha é adotada como a maior probabilidade de sucesso, a segunda, a falha na transmissão, a terceira linha o atraso na entrega de pacotes e assim sucessivamente.

$$P_t = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

4.7.2 Warmup

Neste ponto, consideramos o fluxo de dados constante em função do tempo. Dessa forma serão desconsiderados todo e qualquer fenômeno referente ao *warmup* do sistema em todos os cenários de testes. O *warmup* é o tempo, ou consumo geral, demandado para a configuração inicial até que a rede esteja pronta para iniciar a troca de tráfego e demais ações.

4.7.3 Overhead

Para determinar o *overhead* são considerados três cenários. Onde no melhor cenário o grupo *multicast* inicial é igual ao grupo final, ou seja, não há alteração na malha. Para cada cenário há a contabilidade de possíveis ocorrências, por exemplo: no melhor caso ou, primeiro cenário, não há mudanças na malha, portanto não existe sobrecarga; no segundo cenário, quando há perda de membros, o líder envia um cabeçalho contendo os membros que não fazem mais parte do grupo; no terceiro e último caso considerado, o grupo perde seu líder, há uma eleição, e o nó com o menor quarto octeto de seu endereço IP é eleito como novo líder, e essa mensagem é enviada para o servidor como o novo estado do grupo.

$$G = G' \quad (4.8)$$

No segundo cenário ou caso médio, o grupo *multicast* perde membros.

$$G' = G - M \quad (4.9)$$

Dessa forma, no terceiro cenário, ou pior caso o grupo perde o líder, é efetuada uma nova eleição, os nós membros são informados do resultado e um cabeçalho é enviado para o servidor *multicast* para informar do sobre a nova configuração do grupo.

$$G' = G - L \cdot E \quad (4.10)$$

4.8 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

Com as restrições e erros conhecidos, então buscou-se por uma distribuição com tais características para realizar os cálculos das probabilidade de sucesso e falha transmissão. Essa distribuição deve se comportar como uma aproximação inicial e pareada com as observações iniciais do experimento VLC em ambiente real.

O espaço amostral em questão é finito, e não há de forma direta correlação entre as possibilidades de ocorrência dos fenômenos observados. Foi utilizada então a distribuição binomial para calcular o sucesso ou fracasso do pacote em percorrer o meio x . Portanto, adotou-se p como a probabilidade de sucesso, $(1 - p)$ a probabilidade de insucesso, n total de ensaios e k o número de sucessos da amostra, conforme Equação 4.11.

$$P(X = k) \rightarrow v = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{(n-k)} \quad (4.11)$$

Observou-se também que o sistema apresenta outras características que não podem ser representados por sistemas binários. Para tais condições: atrasos por interferências entre frequências do espectro visível, sombras momentâneas, inatividade do nó por período acima janela de tempo de resposta do protocolo dentre outras, foi implementada uma cadeia de Markov, onde os fenômenos não binários representam as espaços de estados da distribuição de probabilidades Pr .

$$P_{i,j} = Pr = (X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (4.12)$$

Como probabilidade estacionária utilizou-se as médias das observações iniciais da avaliação em ambiente real representada pelo vetor de estados: s para sucesso; f para fracasso; a para atraso de pacotes.

$$u = (s, f, a) \quad (4.13)$$

Como condição de existência da matriz de estados Markoviana, temos que, por definição o vetor \bar{u} , obedece a seguinte condição:

$$\tau^T P = \tau^T \quad (4.14)$$

Dessa maneira τ^T é o autovetor da matriz de transição associado ao seu autovalor. Essa condição implica que ao longo do experimento observado o estado instantâneo independe de estados anteriores. Garantindo dessa forma a não interferência de resultados anteriores.

4.9 Considerações

O modelo apresenta modelo abrangente quanto ao peso destinado à erros. Observe, considerados apenas três características: sucesso no envio de pacotes; falha no envio de pacotes, nesse atributo vale observar que foram considerados erros comuns às redes de computadores com a adição dos erros mais comuns encontrados nas redes VLC. (falta de visada, interferências, etc); atraso no recebimento de pacotes, falha que não é crítica, porém quando observada em streaming de vídeos pode apresentar artefatos na estrutura da imagem.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos para avaliação com relação às métricas de: ocupação de banda, e *overhead* gerado pela gestão de grupos e suas características. Para todos os experimentos foram considerados os limites observados no ambiente DYRP-VLC (29) de $\cong 6\text{Mb/s}$ e múltiplos saltos. Como descrito anteriormente, todo e qualquer fenômeno relacionado ao *warmup* dos cenários avaliados foi desconsiderado.

Nos testes simulados foram utilizadas as linguagens *C*, *C++*, *python*, simulador *NS-2* em um macbook pro M1, com *CPU ARM64* com dez núcleos, *GPU* com trinta e dois núcleos e 16GB de memória *RAM*. As simulações em *NS-2* foram apenas utilizadas como testes de sanidade e correlação com o simulador em *python* criado pelo autor. A escolha dos protocolos MAODV e ODMRP servem apenas como balizadores da taxa de sobrecarga para criação da árvore *multicast* na avaliação do MCAST-VLC e resultados seguintes.

Tabela 3 – Parâmetros para simulação dos protocolos MAODV e ODMRP no simulador NS-2.

Parâmetros da simulação	
simulador de rede	NS-2
protocolo de roteamento	ODMRP, MAODV
Tempo de simulação	700 segundos
área simulada	4m x 5m (20m^2)
número de nós	400, 1000, 2000
número de grupos	20, 50, 100
membros por grupo	20
tráfego origem-destino	determinístico
tipo de dados	CBR
taxa de geração de pacotes	5 pacotes
intervalo de CBR	0.25s
protocolo MAC	IEEE 802.11p wave
taxa MAC	1Mb/s
RTS / CTS	-
distância transmitida	4m ~ 5m
visada	4m ~ 5m
modelo de propagação de rádio	two-ray ground
hello DYMO interval	1s

As Tabelas 3 e 4, mostram os valores utilizados nas simulações. Na Tabela 4 seguem os parâmetros utilizados para a simulação (*python* 3.10) de escalabilidade do modelo MCAST-VLC apresentado.

A Figura 20 corrobora para avaliação do comportamento do protocolo MCAST-VLC em comparação aos protocolos MAODV e ODMRP. O comportamento dos protocolos em

Tabela 4 – Parâmetros para simulação dos protocolos MCAST-VLC no simulador desenvolvido pelo autor.

Parâmetros da simulação	
simulador de rede	python 3.10
protocolo de roteamento	MCAST-VLC
Tempo de simulação	700 segundos
área simulada	4m x 5m ($20m^2$)
número de nós	400, 1000, 2000
número de grupos	20, 50, 100
membros por grupo	20
trafego origem-destino	determinístico
tipo de dados	CBR
taxa de geração de pacotes	5 pacotes
intervalo de CBR	0.25s
protocolo MAC	IEEE 802.15-7-2011
taxa MAC	1Mb/s
RTS / CTS	-
distância transmitida	4m \sim 5m
visada	4m \sim 5m
modelo de propagação de rádio	Lambertian
hello DYMO interval	1s

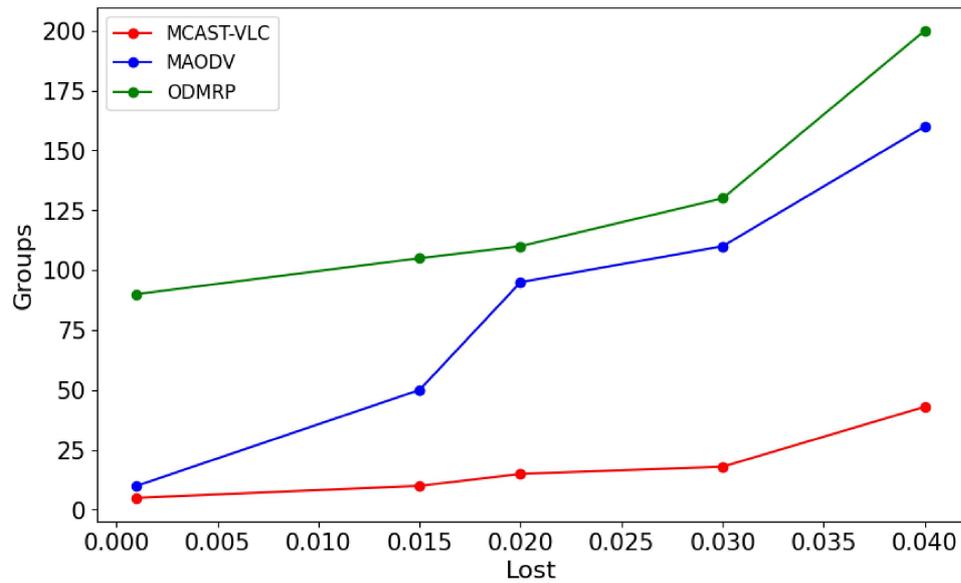
questão serve como balizador ao comportamento esperado do MCAST-VLC no simulador próprio.

É importante destacar que nos resultados a serem apresentados foi utilizado o teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov, também conhecido como teste KS ou teste K-S para determinar a distância entre as distribuições de probabilidade unidimensionais subjacentes. O teste serve como validador entre o cenário real observado e o cenário executado pelo simulador do autor.

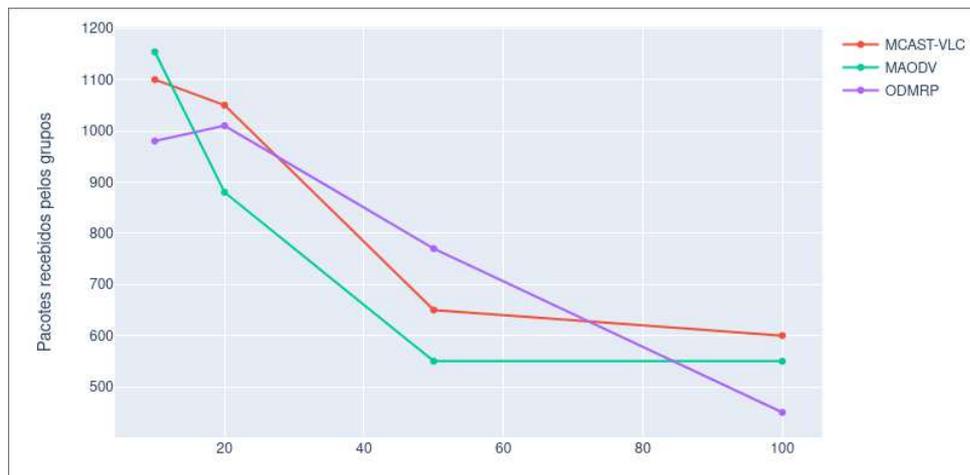
As Figuras 19 representam os ambientes de experimentação utilizados, tanto o observado (real) (a), quanto o simulado pelo autor (b). Como descrito no Capítulo 2, o protocolo DYRP-VLC (27) (roteamento) foi adotado sob o protocolo proposto MCAST-VLC (*multicast*). Nesse cenário um servidor foi configurado para aceitar requisições de fluxo de dados por clientes DYRP-VLC encaminhados por nó com taxa de 2Mb/s, sem que esse nó encaminhador consumisse o fluxo.

5.1 CENÁRIO UM - AMBIENTE REAL DE CARACTERIZAÇÃO VLC

Este cenário endossa as observações coletadas no ambiente DYRP-VLC pareadas com o protocolo proposto, MCAST-VLC. A Figura 20(a) demonstra um comportamento constante para o MCAST-VLC, e crescimento exponencial do protocolo *unicast*, representado pelo DYRP-VLC. Já a Figura 20(b) confirma a distância entre as acumuladas



(a) perda de pacotes



(b) pacotes recebidos

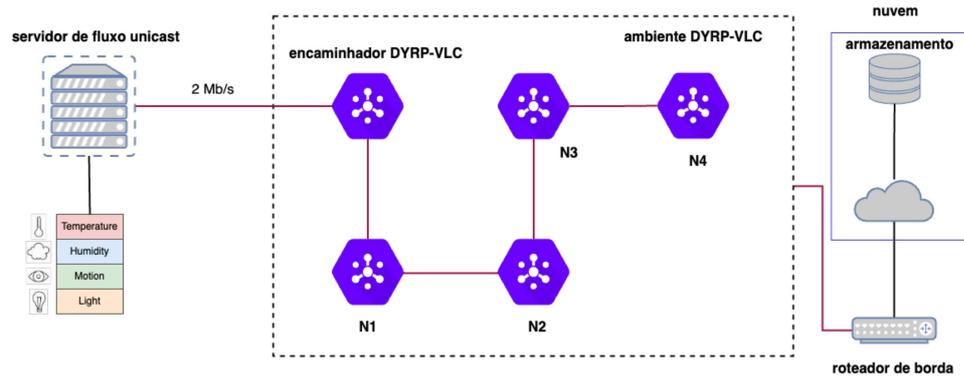
Figura 18 – Teste de sanidade realizado entre os simuladores NS-2 e numérico.

(Kolmogorov-Smirnov). Como pode-se observar na figura (b) a partir do teste estatístico não paramétrico KS, $statistic = 0.9939$, e $p-value < 0.05$, pode-se rejeitar a hipótese nula. Dessa forma, tem-se evidências para afirmar que essa amostra não tem origem em uma distribuição normal.

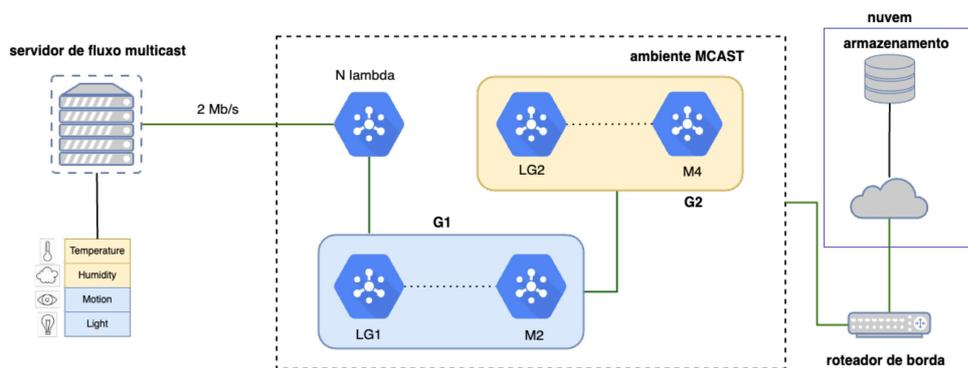
5.2 CENÁRIO DOIS - AMBIENTE OBSERVADO MCAST-VLC vs. MODELO MCAST-VLC

Nesse cenário é demonstrado que os resultados da proposta coletados utilizando o modelo numérico mantém sua tendência de comportamento constante. A Figura 21(b) representa a acumulada da média das observações.

Resultados da simulação utilizando a distribuição Markoviana, em conjunto com



(a) Ambiente de teste DYRP-VLC



(b) Kolmogorov-Smirnov entre as duas distribuições acumuladas

Figura 19 – Cenário real de caracterização dos testes VLC.

os valores iniciais da matriz de estados coletadas nas observações do ambiente real. A área mais clara na escala representa a probabilidade de ocorrência conforme o número de grupos. Confirmando o comportamento observado no Capítulo 2, mais especificamente na Figura 11.

5.3 CENÁRIO TRÊS - AMBIENTE OBSERVADO *UNICAST* vs. MODELO *UNICAST*

Os resultados dos ambientes observados e simulados *unicast* demonstram a coerência do modelo. A Figura 23(a) representa os pontos observados no protocolo DYRP-VLC utilizando o método *unicast*. A Figura 23(b) representa a distribuição acumulada da observação desse cenário.

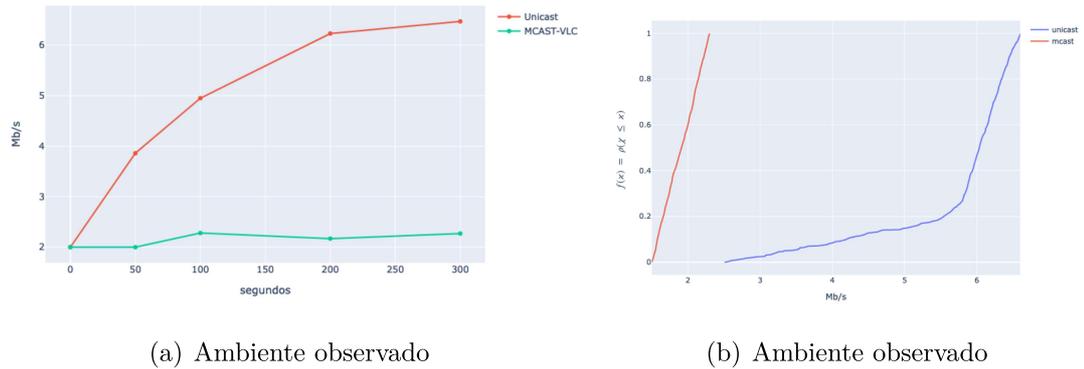


Figura 20 – Como podemos observar na figura (b) a partir do teste estatístico não paramétrico KS, $statistic = 0.9939$, e $p - value < 0.05$, podemos rejeitar a hipótese nula. Dessa forma, tem-se evidências para afirmar que essa amostra não tem origem em uma distribuição normal.

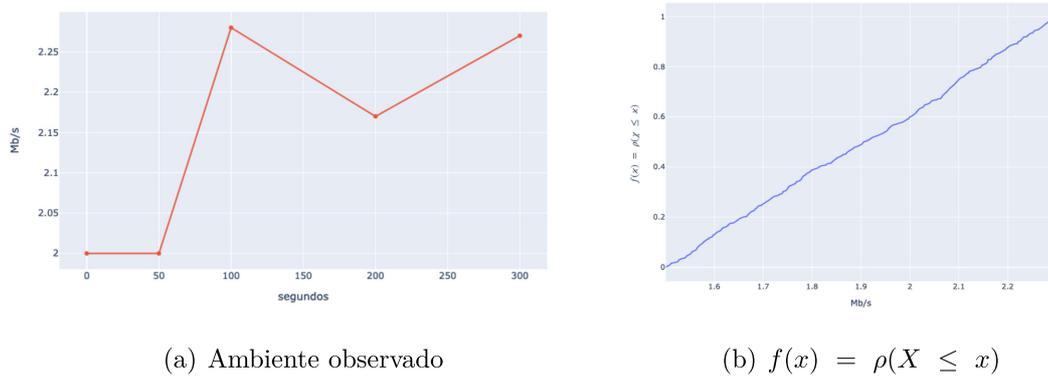
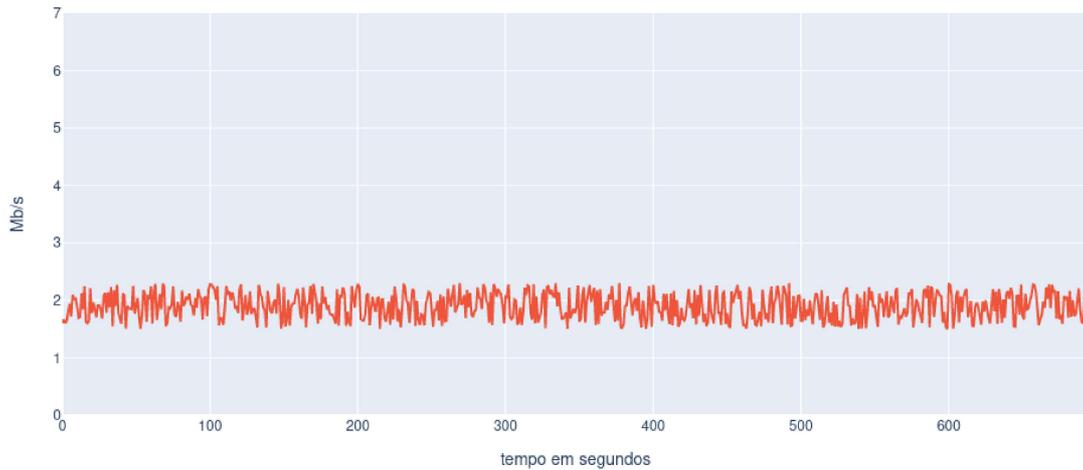


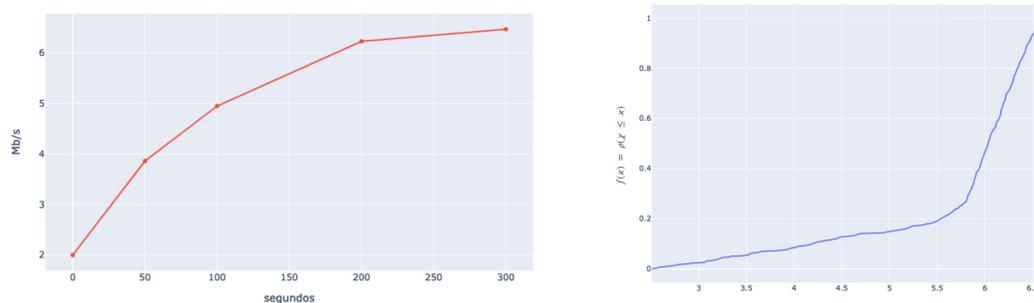
Figura 21 – Acumulada do ambiente observado.

Corroborando aos resultados, nota-se, na Figura 24, que apesar da área de abrangência, é possível perceber o comportamento constante de crescimento do modelo durante a simulação. Este comportamento se mantém até consumir toda banda disponível.



(a) MCAST-VLC

Figura 22 – Ambiente simulado MCAST-VLC - Área de possível ocorrência em azul mais claro e as áreas mais escuras correspondem a maior probabilidade de ocorrência da ocupação de banda.

(a) *unicast*(b) $f(x) = \rho(X \leq x)$ Figura 23 – Ambiente observado *unicast*, distribuição FDA

5.4 OVERHEAD

Para fins de avaliação da sobrecarga (*overhead*) do protocolo proposto, foram coletadas métricas relacionadas aos experimentos inserindo dinâmica à rede. Em todos os cenários simulados foi utilizada a mesma massa de dados, contendo $1.47 \cdot 10^8$ bytes, 147MB.

Os resultados apresentados nas tabelas seguem um crescimento da rede com 25, 50 e 100 grupos, onde cada um deles possui 20 membros. Os resultados demonstram os eventos ocorridos durante cada simulação, sendo: **status quo**, nada muda, a rede se mantém como está; **perdeu membros**, é a saída de um ou mais membros do grupos; **dissolução**, é a dissolução de um grupo existente; **perdeu líder**, é a perda de um líder

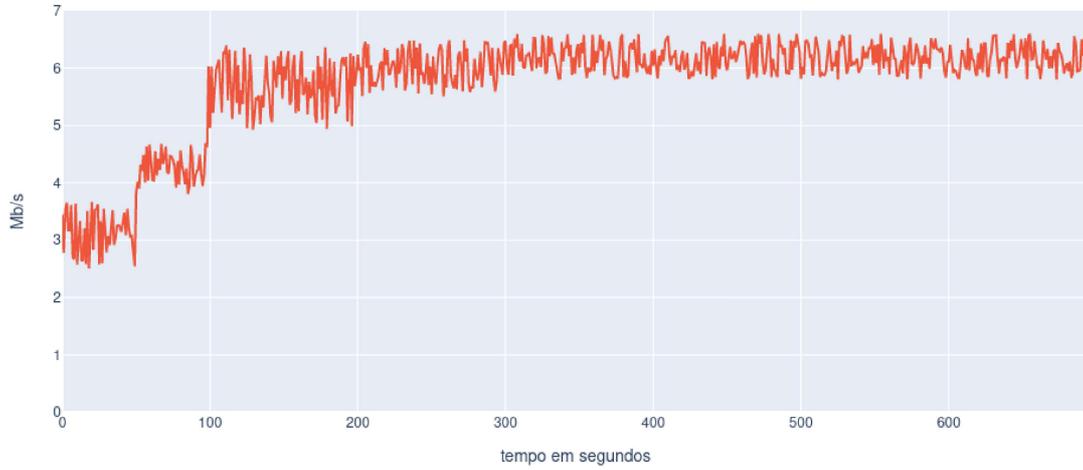
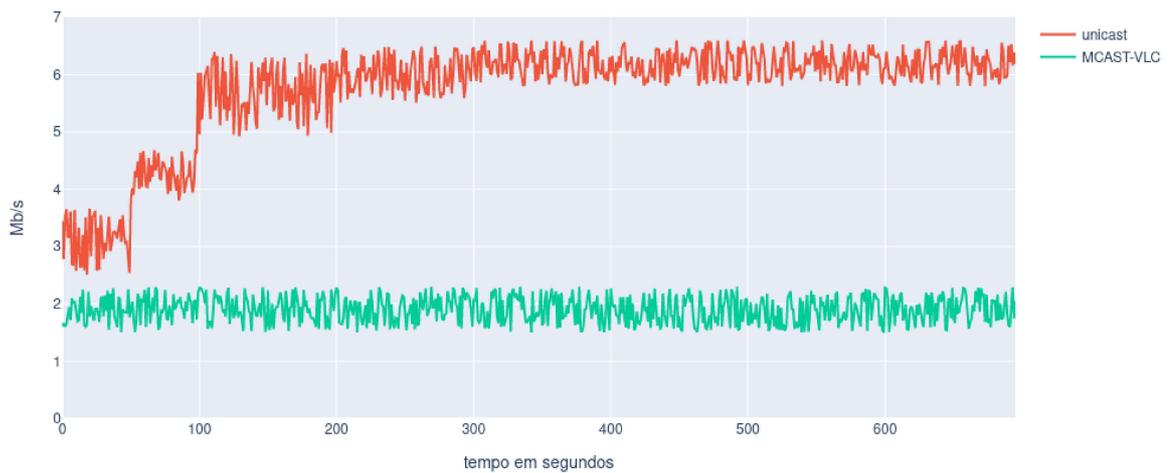
(a) Ambiente simulado *unicast*

Figura 24 – Ocupação de banda em *unicast* com o modelo proposto de caracterização.



(a) MCAST-VLC

Figura 25 – Ambiente simulado - pareamento.

e conseqüente nova eleição. Todos os eventos, à exceção do *status quo*, geram troca de mensagem entre o servidor *multicast* e os nós líderes da rede VLC.

Os resultados demonstram que a sobrecarga, mesmo com o crescimento da rede e eventos de perda de líder, é baixa. Observe que na Tabela 5, a perda de 10 líderes gerou a maior sobrecarga, mas se mantendo a um valor próximo a apenas 0.002KB de sobrecarga em troca de mensagens de controle. Fica claro que a maior sobrecarga é gerada pela perda de um líder, que como definido na proposta (Capítulo 3), gera um número expressivo de troca de mensagens até a eleição ou dissolução de um grupo.

-	grupos	sobrecarga (bytes)
status quo	79	0
perdeu membros	5	130
dissolução	8	1040
perdeu líder	8	34.960
grupos (20 membros)	100	36.130

-	grupos	sobrecarga (bytes)
status quo	31	0
perdeu membros	8	208
dissolução	4	520
perdeu líder	7	30.590
grupos (20 membros)	50	31.318

Tabela 5 – Tabela de sobrecarga para 25 grupos contendo 20 membros cada.

-	grupos	sobrecarga (bytes)
status quo	11	0
perdeu membros	2	52
dissolução	2	260
perdeu líder	10	43.700
grupos (20 membros)	25	44.012

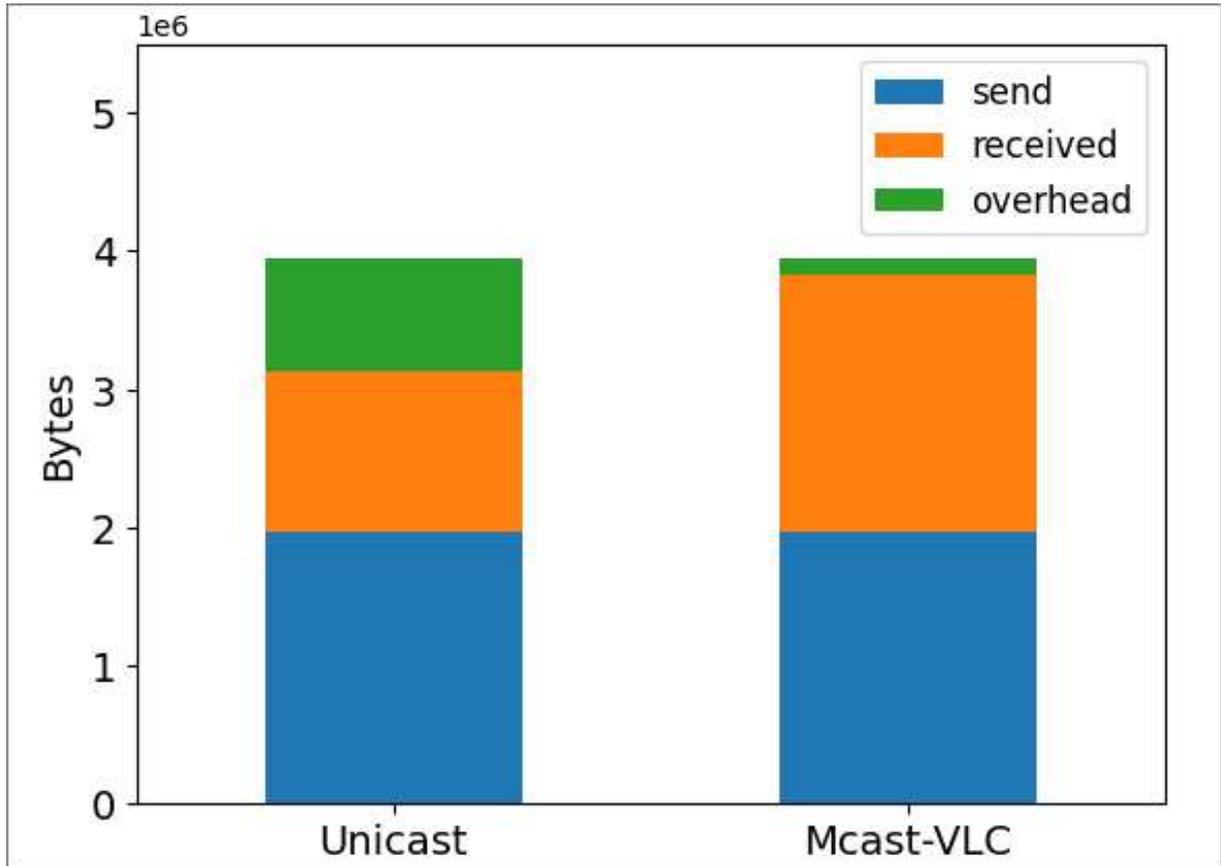
5.5 Sobrecarga

5.6 DISCUSSÕES

Para todos os experimentos coletamos a média de trinta iterações. O erro máximo admissível para todos os experimentos para uma banda disponível de 6,8Mb/s e erro:

$$1.8 + \ln(1.27 + 0.805x) \quad (5.1)$$

No experimento real e de validação, foram enviados fluxos de dados por uma rede óptica VLC. Nessa rodada de testes, exposta no Capítulo 2, foram utilizados os métodos



(a) MCAST-VLC

Figura 26 – Overhead, goodput e pacotes enviados.

multicast (MCAST-VLC) e *unicast* (DYRP-VLC). Dessa forma, foi utilizado um servidor de fluxo *multicast* ζ (MCAST-SERV) para $n \cdot \gamma$ grupos.

$$\zeta \mid n \cdot \gamma \quad (5.2)$$

Para envio de fluxo no método *unicast* utilizou-se um servidor de fluxo, um nó encaminhador e 3 clientes. Entretanto, vale registrar que somente dois clientes foram capazes de consumir o fluxo devido ao esgotamento da banda disponível. Fato que fica claro ao observar os gráficos do Capítulo 2.

Observemos que após o pareamento das rodadas notou-se que o protocolo MCAST-VLC apresenta capacidade suficiente com os recursos disponíveis para validação. Dessa forma, foi decidido propor a modelagem numérica, a fim de comprovar numericamente a escalabilidade do protocolo proposto.

Assim, podemos concluir que protocolo MCAST-VLC é mais eficiente no envio de pacotes para grupos comparado aos outros métodos pareados. O impacto na sobrecarga e complexidade de gerenciamento de grupo pode ser considerado pequeno, mesmo que comparado ao *IGMP V2* usualmente utilizado. Os resultados de escalabilidade demonstram

que o *overhead* para grupos com 20 membros e até 100 grupos, representa um montante desprezível do ponto de visto dos benefícios ($\approx 0.002KB$ no melhor caso e $\approx 0.038KB$ no pior caso).

6 CONCLUSÃO

O MCAST-VLC é uma contribuição relevante do ponto de vista científico, uma vez que representa uma proposta pioneira no suporte ao *multicast* em redes VLC. A implementação abrangeu adaptações em múltiplas camadas do sistema, incluindo o gerenciamento de grupos, conforme orientações IANA, e ajustes no cabeçalho para otimizar a interação com o protocolo UDP na camada de transporte, sobre a implementação específica do OpenVLC V1.2. No entanto, alterações em outras camadas também foram necessárias, como a adaptação do cabeçalho para enviar apenas o último octeto para o endereçamento dos nós na camada de rede, e a implementação de pequenas utilidades de redes não disponíveis na versão do Linux utilizada no *shield* Beaglebone Black com OpenVLC V1.2, Debian 8.3 2016-01-24.

Os testes foram conduzidos em ambientes que buscavam replicar situações próximas à realidade, seguindo as diretrizes da IEEE para iluminação de ambientes de trabalho ou de uma casa. Desenvolveu-se um modelo discreto para avaliar e validar as possibilidades de crescimento de malhas, visando evitar sobrecarga significativa na manutenção, gestão de grupos e rotas. O modelo também permitiu verificar a viabilidade do protocolo quanto à escalabilidade da rede. A avaliação contemplou quatro estados relativos aos impactos do crescimento da malha, proporcionando a oportunidade de ajustar dinamicamente os parâmetros do protocolo para reduzir efeitos indesejados por meio de diversos ajustes.

A implementação do protocolo MCAST-VLC em redes VLC representa um avanço para atender à crescente demanda em diversos ambientes, tanto como domésticos quanto industriais. A abordagem demonstrou por seus resultados ter um custo reduzido, possibilitando, por exemplo, adaptações em nível de *software* nos sistemas de iluminação, transformando-os em sistemas inteligentes para transmissão de dados.

O trabalho demonstrou conceitos fundamentais em redes VLC e propôs a utilização de *multicast* em contrapartida ao envio de dados somente por *unicast*. Além disso, utiliza um algoritmo de roteamento reconhecido pela literatura, o DYRP-VLC, em sua configuração atual. Os resultados comprovam a caracterização do ambiente por meio da experimentação com equipamentos VLC reais e LEDs de baixo custo. Uma vez o comportamento do protocolo MCAST-VLC motivador à pesquisa, os experimentos reais serviram como base para o desenvolvimento da caracterização do meio VLC e de redes VLC. A proposta foi então validada por meio de simulação baseada em um modelo numérico proposto, a fim de suprir tal lacuna nessa linha de pesquisa e verificar a sobrecarga do protocolo em redes com número de até 100 grupos *multicast*, cada um deles com 20 nós folha. Desta forma, foi possível confirmar a adequação do protocolo para VLC.

Como trabalhos futuros, espera-se poder avaliar o protocolo em equipamentos mais recentes, e que possuam, por exemplo, maior capacidade de taxa de transmissão. É também

interessante avaliar o protocolo MCAST-VLC sobre outros protocolos de roteamento, a fim de ter uma comparação sobre o impacto do protocolo no número total de mensagens de controle da rede. Por fim, com base no protocolo MCAST-VLC, é interessante investigar outras premissas de segurança além do isolamento de cada nó por faixa de frequência, como, por exemplo, a utilização de métodos criptográficos (simétricos e assimétricos) para troca de dados.

REFERÊNCIAS

- 1 Adoptante, E., Cadag, K., Lualhati, V., Torregoza, M. L. D., and Abad, A. C. (2015). Audio multicast by Visible Light Communication for Location Information for the Visually Impaired. In IEEE, editor, *Proc. of the HNICEM*.
- 2 Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B. (1988). Network flows.
- 3 Ariyanti, S. and Suryanegara, M. (2020). Visible light communication (vlc) for 6g technology: The potency and research challenges. In *2020 Fourth world conference on smart trends in systems, security and sustainability (WorldS4)*, pages 490–493. IEEE.
- 4 Association, I. S. et al. (2011). Ieee standard for local and metropolitan area networks-part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light. *IEEE: Piscataway, NZ, USA*, pages 1–309.
- 5 Bell, A. G. (1880). The photophone. *Science*, (11):130–134.
- 6 Cen, N., Jagannath, J., Moretti, S., Guan, Z., and Melodia, T. (2019). Lanet: Visible-light ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 84:107–123.
- 7 Christensen, M., Kimball, K., and Solensky, F. (2006a). Considerations for igmp and multicast listener discovery (mld) snooping switches. RFC 4541, RFC Editor.
- 8 Christensen, M., Kimball, K., and Solensky, F. (2006b). Considerations for igmp and multicast listener discovery snooping switches. Technical report.
- 9 Corbellini, G., Aksit, K., Schmid, S., Mangold, S., and Gross, T. R. (2014). Connecting networks of toys and smartphones with visible light communication. *IEEE Communications Magazine*, 52(7):72–78.
- 10 Corbellini, G., Schmid, S., Mangold, S., Gross, T. R., and Mkrtchyan, A. (2012). Led-to-led visible light communication for mobile applications. *Demo at ACM SIGGRAPH Mobile*.
- 11 Corson, S. and Macker, J. (1999). Rfc2501: Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations.
- 12 Deering, D. S. E. (1989). Host extensions for IP multicasting. RFC 1112.
- 13 Dowhuszko, A. A. and Guzmán, B. G. (2022). Closed form approximation of the actual spectral power emission of commercial color leds for vlc. *Journal of Lightwave Technology*, 40(13):4311–4320.
- 14 Feng, L., Hu, R. Q., Wang, J., Xu, P., and Qian, Y. (2016). Applying vlc in 5g networks: Architectures and key technologies. *IEEE Network*, 30(6):77–83.
- 15 Fenner, B. (1997). Internet Group Management Protocol, Version 2. RFC 2236.
- 16 Fenner, B., He, H., Haberman, B., and Ssandick, H. (2006). Rfc4605-internet group management protocol (igmp)/multicast listener discovery (mld)-based multicast forwarding igmp/mld proxying.
- 17 Forouzan, B. A. (2007). *Data communications and networking*. Huga Media.

- 18 Gadoury, J.-F. and Sevigny, P. (2012). Real-time media stream insertion method and apparatus. US Patent App. 13/334,712.
- 19 Garai, M., Sliti, M., and Boudriga, N. (2016). Access and resource reservation in vehicular visible light communication networks. In *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–6. IEEE.
- 20 Harte, L. (2008). *Introduction to Data Multicasting, IP Multicast Streaming for Audio and Video Media Distribution*. Althos.
- 21 Homero (Sec VIII a.c.). *Iliada*. SESI-SP Editora.
- 22 Ibhaze, A. E., Orukpe, P. E., and Edeko, F. O. (2020). High capacity data rate system: Review of visible light communications technology. *Journal of Electronic Science and Technology*, 18(3):100055.
- 23 Jung, H. and Kim, S.-M. (2021). Experimental demonstration of 3×3 mimo led-to-led communication using rgb colors. *Sensors*, 21(14):4921.
- 24 Lee, J.-S., Lee, D.-H., Kim, S.-J., and Oh, C.-H. (2019). An LED-based Visible Light Communication System for Multicast. 13(1):265–271.
- 25 Ltd, R. and Markets (2022). Global Wireless Connectivity Market 2021-2026 - Research and Markets. [Online; acessado em 25/02/2023].
- 26 Matheus, L., Pires, L., Vieira, A., Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., and Nacif, J. A. (2019a). The Internet of Light: Impact of Colors in LED-to-LED visible light communication systems. 2(1):e78.
- 27 Matheus, L. E. M., Vieira, A. B., Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., and Gnawali, O. (2019b). Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges. 21(4):3204–3237.
- 28 Matheus, L. E. M., Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., and Vieira, A. B. (2019c). Dyrp-vlc um protocolo de roteamento dinamico para redes de comunicacao por luz visivel. In SBC, editor, *Anais Estendidos do XXXVII Simposio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuidos*, pages 105–112. SBC, SBC.
- 29 Matheus, L. M., Vieira, A. B., Vieira, M. A. M., and Vieira, L. F. M. (2019d). DYRP-VLC: A Dynamic Routing Protocol for Wireless Ad-Hoc Visible Light Communication Networks. 94.
- 30 McMillin, B. K. (2006). On/off keying node-to-node messaging transceiver network with dynamic routing and configuring. US Patent 7,027,773.
- 31 Mee, C. (1958). Magnetic tape for data recording. *Proceedings of the IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering*, 105(22):373–380.
- 32 Mohsan, S. A. H., Mazinani, A., Sadiq, H. B., and Amjad, H. (2022). A survey of optical wireless technologies: Practical considerations, impairments, security issues and future research directions. *Optical and Quantum Electronics*, 54(3):187.
- 33 NRIC team (2004). History of Morse. <https://nrich.maths.org/2198>. [Online; acessado em 06/02/2024].

- 34 Proakis, J. G. and Salehi, M. (2001). *Digital communications*, volume 4. McGraw-hill New York.
- 35 Rajagopal, S., Roberts, R. D., and Lim, S.-K. (2012). IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. *IEEE Communications Magazine*, 50(3):72–82.
- 36 Rodolakis, G., Naimi, A. M., and Laouiti, A. (2007). Multicast overlay spanning tree protocol for ad hoc networks. In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communications*, pages 290–301. Springer.
- 37 Royer, E. M. (2000). Multicast AD HOC on Demand Distance Vector (MAODV) Routing.
- 38 Schmid, S., Richner, T., Mangold, S., and Gross, T. R. (2016). EnLighting: An Indoor Visible Light Communication System Based on Networked Light Bulbs. In IEEE, editor, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*.
- 39 Tanenbaum, A. (2002). *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 4th edition.
- 40 Wang, H. and Kim, S. (2015). Bit-level soft run-length limited decoding algorithm for visible light communication. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(3):237–240.
- 41 Wang, Q., Giustiniano, D., and Puccinelli, D. (2014). OpenVLC: Software-defined visible light embedded networks. In ACM, editor, *Proc. of the VLCS, ACM MobiCom Workshop on Visible Light Communication Systems*.
- 42 Wi-Fi Alliance (2023). Wi-Fi® by the numbers: Technology momentum in 2023. <https://www.wi-fi.org/beacon/the-beacon/wi-fi-by-the-numbers-technology-momentum-in-2023>. [Online; acessado em 06/02/2024].
- 43 Yang, Y., Luo, J., Chen, C., Chen, Z., Zhong, W.-D., and Chen, L. (2020). Pushing the data rate of practical vlc via combinatorial light emission. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(5):1979–1992.
- 44 Yi, Y., Lee, S.-J., Su, W., and Gerla, M. (2003). On-demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for AD HOC Networks.
- 45 Yun, G. Y., Jung, H., and Kim, J. T. (2013). Energy-saving potential of led lighting systems. *Indoor and Built Environment*, 22(1):235–241.