



Projeto Brasil 6G Fase III

Atividade 2.3 - Concepção da Rede de Transporte para Rede 6G - Parte 2



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	10/07/2026	André Pérennou Arismar Cerqueira Sodré Junior Eduardo Saia Lima Felipe Batista Faro Pinto Felipe Rudge Floriano de Almeida Neto Juliano Silveira Ferreira Laura Ghisa Luciano Leonel Mendes Luiz Augusto Melo Pereira Mário Oliveira Costa Dias Matheus Sêda Borsato Cunha Mikael Guégan Olympio Coutinho Paulo Cardieri Paulo Kiohara Romildo de Souza Véronique Quintard	Elaboração de conteúdo
2	31/07/2026	Luiz Augusto Melo Pereira Daniely Gomes Silva Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Diagrama de blocos de um sistema <i>multiple-input multiple-output</i> (MIMO) assistido por <i>analog radio over fiber</i> (A-RoF). <i>personal computer</i> (PC): computador pessoal; <i>universal software radio peripheral</i> (USRP): periférico universal de rádio definido por software; <i>single-mode fiber</i> (SMF): fibra monomodo; <i>variable optical attenuator</i> (VOA): atenuador óptico variável; <i>power monitor</i> (PM): monitor de potência.	4
2	Fotografia da montagem experimental.	6
3	EVM_{RMS} fim a fim em função da potência de <i>radio frequency</i> (RF). A Zona I corresponde aos níveis de potência em que a modulação 256- <i>quadrature amplitude modulation</i> (QAM) é suportada, enquanto a Zona II indica a região de operação com 64-QAM.	7
4	EVM_{RMS} e throughput fim a fim em função da potência óptica na saída da SMF, considerando a cadeia completa com o segmento de acesso sem fio.	7
5	Espectros de RF fim a fim medidos em diferentes pontos da cadeia de transmissão: entrada do módulo A-RoF, saída recuperada após o enlace A-RoF e sinal recebido no lado do <i>user equipment</i> (UE) após transmissão sem fio.	8
6	Diagrama de blocos do sistema híbrido bidirecional MIMO-A-RoF/ <i>free-space optics</i> (FSO). PC: computador pessoal; USRP: Universal Software Radio Peripheral; SMF: fibra monomodo.	13
7	Bancada experimental contendo os principais componentes elétricos e ópticos utilizados na validação do sistema.	14
8	Avaliação da EVM_{RMS} e do throughput em função da potência de transmissão de RF no sentido de downlink.	15
9	Avaliação da EVM_{RMS} e do throughput em função da potência de transmissão de RF no sentido de uplink.	16
10	Ordem de modulação selecionada pela plataforma SDR em função da potência de transmissão de RF utilizada para modular a portadora óptica.	16
11	Espectro de RF sem distorções aparentes no sentido de downlink, considerando uma potência de transmissão de RF de -25 dBm aplicada à entrada do receptor A-RoF.	17
12	Diagrama arquitetural da rede.	20
13	Configuração experimental totalmente alimentada por fibra óptica. a) Downlink VLC e uplink FSO; b) Sistema PoF de 808 nm; c) Visão geral do sistema completo; d) LiDAR 2D e LiFi operando com PoF; Sistema PoF de 976 nm.	21
14	EVM de downlink em função da taxa de transferência para diferentes formatos de modulação (QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM) e larguras de banda (40 MHz, 50 MHz e 100 MHz).	22
15	EVM de uplink em função da taxa de transferência para diferentes formatos de modulação (QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM) e larguras de banda (40 MHz, 50 MHz e 100 MHz).	22
16	EVM em função da largura de banda usando uma lanterna para o downlink. (a) 256 QAM; (b) 64 QAM; (c) 16 QAM; (d) QPSK.	23
17	Desempenho em termos de taxa de dados TCP e UDP do sistema Wi-Fi 6 alimentado por PoF.	24
18	Desempenho de throughput TCP do sistema LiFi alimentado por PoF.	24

19	Perfil de distância polar 2D LiDAR alimentado por PoF.	25
20	Ligação RPoF integrada com amplificação Raman óptica.	26
21	Ganho Raman em função da potência óptica de excitação proveniente do HPLS.	27
22	Ganho Raman para ligações baseadas em Raman e em EDFA.	28

Lista de Tabelas

- 1 Parâmetros de potência elétrica e eficiência de transmissão para cada enlace PoF. 21

Acrônimos

2D	<i>two-dimensional</i>
3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
5G	<i>quinta geração de rede móvel celular</i>
6G	<i>sexta geração de rede móvel celular</i>
BER	<i>bit error rate</i>
BS	<i>base station</i>
DU	<i>distributed unit</i>
EMI	<i>electromagnetic interference</i>
IoT	<i>Internet of things</i>
MAC	<i>medium access control</i>
MIMO	<i>multiple-input multiple-output</i>
PHY	<i>physical</i>
SDR	<i>software-defined radio</i>
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i>
TVWS	<i>TV white space</i>
UE	<i>user equipment</i>
UHF	<i>ultra high frequency</i>
Wi-Fi	<i>wireless fidelity</i>
ADC	<i>analog-to-digital converter</i>
A-RoF	<i>analog radio over fiber</i>
B5G	<i>beyond 5G</i>
BER	<i>bit error rate</i>
BS	<i>base station</i>
CAPEX	<i>capital expenditures</i>
CO	<i>central office</i>
CPRI	<i>common public radio interface</i>
C-RAN	<i>centralized radio access network</i>
DAC	<i>digital-to-analog converter</i>
DPD	<i>digital pre-distortion</i>
D-RoF	<i>digital RoF</i>
DU	<i>distribution unit</i>
eCPRI	<i>evolved CPRI</i>
EDFA	<i>erbium doped fiber amplifier</i>
eCPRI	<i>evolved common public radio interface</i>

EVM_{RMS} *root mean square error vector magnitude*
FDD *frequency division duplex*
FON *full optical networks*
FSO *free-space optics*
GFDM *generalized frequency division multiplexing*
GPON *gigabit passive optical network*
HPLDS *high power laser diodes*
HPLS *high power laser sources*
IIP3 *input third-order intercept point*
IoT *Internet of things*
IR *infrared*
LED *light emitting diode*
 laser diode
LiDAR *light detection and ranging*
LiFi *light fidelity*
LNA *low-noise amplifier*
MAC *medium access control*
MC *media converter*
MIMO *multiple-input multiple-output*
MMF *multimode fiber*
mmWave *millimeter-wave*
MZM *Mach-Zehnder modulator*
NF *noise figure*
OPEX *operational expenditure*
OWC *optical wireless communication*
PC *personal computer*
PCIe *peripheral component interconnect express*
PD *photodetector*
PIN *p-type, intrinsic, and n-type*
PHY *physical layer*
PM *power monitor*
PoF *power-over-fiber*
PPC *photovoltaic power converters*
QAM *quadrature amplitude modulation*
QPSK *quadrature phase shift keying*

RF *radio frequency*
RoF *radio over fiber*
RPoF *radio and power over fiber*
RRH *remote radio head*
RX *receiver*
SDR *software-defined radio*
SMF *single-mode fiber*
SNR *signal-to-noise ratio*
TCP *transmission control protocol*
THz *terahertz*
TV *television*
TX *transmitter*
UDP *user datagram protocol*
UE *user equipment*
UHF *ultra-high frequency*
UV *ultraviolet*
USRP *universal software radio peripheral*
VHF *very high frequency*
VL *visible light*
VLC *visible-light communication*
VOA *variable optical attenuator*
WDM *wavelength division multiplexing*

Índice

1	Introdução Geral	1
2	Avaliação de Desempenho de um Enlace Híbrido de Rádio Analógico sobre Fibra e MIMO 2x2 via Interface Aérea	2
2.1	Introdução	2
2.2	Desenvolvimento	3
2.2.1	Configuração Experimental e Metodologia	3
2.2.2	Resultados e Discussões	5
2.3	Conclusão	8
3	Validação Experimental de um Enlace Híbrido Bidirecional Multi-Comprimento de Onda MIMO A-RoF/FSO	10
3.1	Introdução	10
3.2	Desenvolvimento	11
3.2.1	Integração de A-RoF em sistemas MIMO	11
3.2.2	Configuração Experimental e Metodologia	12
3.2.3	Resultados e Discussões	14
3.3	Conclusão	17
4	Análise da influência de diferentes fontes de laser de alta potência em um enlace de rádio e energia sobre fibra amplificado por Raman.	19
4.1	Introdução	19
4.2	Desenvolvimento	19
4.2.1	Arquitetura de rede totalmente óptica integrada para comunicação e sensoramento	19
4.2.1.1	Descrição da Arquitetura e Camadas Funcionais	19
4.2.1.2	Subsistema RPoF de Usuário Final (Aplicações Cíveis)	20
4.2.1.3	Intranet LiFi e Sensoramento LiDAR 2D (Cenário Militar)	20
4.2.1.4	Resultados Obtidos e Análise de Desempenho da Rede FON	20
4.2.2	Enlace RPoF analógico e impacto da amplificação Raman distribuída	25
4.2.2.1	Descrição do Enlace de Longo Alcance e Configurações de Laser	25
4.2.2.2	Resultados Obtidos e Análise Comparativa de Desempenho	26
4.3	Conclusão	28
5	Conclusão Geral	30

1 Introdução Geral

Com o advento da quinta geração de rede móvel celular (5G), grande atenção tem sido direcionada ao aumento da demanda por maiores taxas de transmissão de dados, uma preocupação natural diante da tendência histórica dos sistemas de comunicações móveis exigirem vazão progressivamente mais elevada à medida que evoluem [1]. Entretanto, o conceito de 5G é muito mais amplo, abrangendo novas verticais e casos de uso que vão além do simples aumento das taxas de dados [2]. As redes modernas também devem ser capazes de suportar um número massivo de dispositivos conectados, além de prover comunicações de baixa latência e alta confiabilidade.

Seguindo essa tendência, espera-se que as redes sexta geração de rede móvel celular (6G) demandem taxas de transmissão ainda mais elevadas, o que vislumbra-se que seja alcançado por meio da integração entre diferentes tecnologias de acesso, transporte e sensoriamento [3]. Além disso, as futuras redes deverão incorporar funcionalidades nativas de comunicação e sensoriamento conjunto, inteligência distribuída e elevada eficiência energética, permitindo a criação de infraestruturas mais flexíveis e adaptáveis aos diversos cenários de aplicação previstos para a próxima década [4].

Para atender a esses requisitos, as tecnologias ópticas assumem papel de destaque na concepção das futuras arquiteturas de transporte. Soluções baseadas em *radio over fiber* (RoF), FSO, *power-over-fiber* (PoF) e *optical wireless communication* (OWC) vêm sendo amplamente investigadas devido à elevada largura de banda disponível, às baixas perdas de transmissão e à possibilidade de integração eficiente com sistemas sem fio [5, 6, 7, 8]. Em particular, arquiteturas híbridas capazes de combinar enlaces ópticos guiados e não guiados apresentam grande potencial para aplicações de *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul* em redes *beyond 5G* (B5G) e 6G, especialmente em cenários nos quais a implantação de infraestrutura física é limitada por fatores econômicos, geográficos ou operacionais [9].

Paralelamente, permanece o desafio de prover conectividade em regiões remotas e subatendidas. Embora grande parte das pesquisas relacionadas à 6G esteja concentrada em aplicações de altíssima capacidade utilizando frequências milimétricas e sub-terahertz (THz), existe também a necessidade de desenvolver soluções capazes de ampliar a cobertura geográfica, mantendo baixos custos de implantação e operação [10]. Nesse contexto, a integração entre tecnologias ópticas e sistemas sem fio operando em bandas sub-GHz surge como uma alternativa promissora para ampliar a capilaridade das futuras redes de comunicação [11].

Dentro desse contexto, este relatório apresenta os resultados desenvolvidos na Atividade 2.3 da Fase III do Projeto Brasil 6G, com foco na concepção e validação experimental de arquiteturas de transporte para redes 6G [12]. Inicialmente, é investigado o desempenho de um enlace híbrido MIMO assistido por A-RoF, considerando a integração entre fronthaul óptico e acesso sem fio. Em seguida, é apresentada a validação experimental de uma arquitetura híbrida bidirecional multi-comprimento de onda baseada na integração entre MIMO, A-RoF e FSO [13]. Por fim, são analisadas arquiteturas totalmente ópticas capazes de integrar comunicação, sensoriamento e transferência de energia por fibra, incluindo sistemas baseados em *light fidelity* (LiFi), *light detection and ranging* (LiDAR), PoF e enlaces amplificados por Raman [14]. Os resultados obtidos contribuem para a compreensão dos desafios e oportunidades associados à integração de múltiplas tecnologias ópticas e sem fio em arquiteturas de transporte para redes móveis de próxima geração.

2 Avaliação de Desempenho de um Enlace Híbrido de Rádio Analógico sobre Fibra e MIMO 2x2 via Interface Aérea

*Luiz Augusto Melo Pereira, Matheus Sêda Borsato Cunha, Felipe Batista Faro Pinto, Luciano Leonel Mendes, Juliano Silveira Ferreira, Arismar Cerqueira Sodré Junior
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)*

2.1 Introdução

Os sistemas A-RoF permitem a transmissão de sinais de RF modulados por meio de fibras ópticas, explorando a elevada largura de banda e a baixa atenuação das fibras monomodo modernas, cujas perdas típicas são da ordem de 0,2 dB/km. Nas arquiteturas A-RoF com modulação direta, o sinal de RF atua diretamente sobre a corrente de polarização de um laser semiconductor, produzindo uma portadora óptica modulada em intensidade sem a necessidade de dispositivos externos. Essa abordagem resulta em uma arquitetura mais simples, compacta e de menor custo quando comparada a soluções baseadas em modulação externa, que normalmente utilizam *Mach-Zehnder modulators* (MZMs) e demandam componentes adicionais, como circuitos de controle de polarização, elementos mantenedores de polarização e maiores orçamentos de potência óptica [15]. Por essas características, a modulação direta tem sido amplamente investigada em aplicações de *fronthaul* e redes de acesso sensíveis a custo, especialmente em cenários nos quais simplicidade, eficiência energética e redução de *capital expenditures* (CAPEX) e *operational expenditure* (OPEX) são restrições relevantes de projeto.

Apesar dessas vantagens, enlaces diretamente modulados são mais suscetíveis a distorções não lineares, *chirp* e penalidades associadas à dispersão cromática, o que pode limitar a ordem de modulação alcançável e a faixa dinâmica do sistema [16, 17]. Esses efeitos tornam-se ainda mais críticos quando a tecnologia A-RoF é integrada a arquiteturas MIMO, uma vez que o objetivo passa a incluir o aumento da capacidade do *fronthaul*, da cobertura, da vazão e da confiabilidade da rede. Em enlaces ópticos de maior alcance, especialmente aqueles com operação multi-comprimento de onda baseada em *wavelength division multiplexing* (WDM), também devem ser considerados efeitos como diafonia entre canais e degradações acumuladas ao longo da transmissão.

A literatura apresenta diferentes propostas para integração de A-RoF em sistemas MIMO, com ênfase na redução de custo e na simplificação da infraestrutura. Dahawi et al. propõem uma arquitetura de baixo custo que combina MIMO A-RoF em *millimeter-wave* (mmWave), na faixa de 60 GHz, com uma rede óptica passiva, utilizada para transmitir dois sinais MIMO e um sinal cabeado na mesma frequência de portadora por meio de um único modulador óptico e um único laser. Essa estratégia reduz a complexidade do transceptor e melhora a eficiência espectral [18]. Wei et al. apresentam um sistema 3×3 MIMO A-RoF em 60 GHz, associado à filtragem Volterra MIMO, com o objetivo de mitigar não linearidades introduzidas por amplificadores de RF de alta potência. Os resultados indicam aumento de até 26% na taxa de dados e extensão do alcance do enlace sob condições severas de distorção [19].

Outros trabalhos investigam arquiteturas 4×4 MIMO A-RoF voltadas a aplicações 5G indoor em mmWave, particularmente na faixa não licenciada de 60 GHz. Essas soluções empregam técnicas como supressão da portadora óptica, geração de subportadoras ópticas por bandas laterais e detecção heteródina na *remote radio head* (RRH), buscando simplificar o projeto e

reduzir custos. Embora essas abordagens sejam relevantes para cenários de alta capacidade em ambientes internos, elas se concentram predominantemente em frequências elevadas e em arquiteturas que ainda podem exigir maior complexidade óptica.

Como os sistemas A-RoF são afetados por distorções não lineares, especialmente durante o processo de modulação, diferentes técnicas de linearização vêm sendo propostas. Em [20], os autores apresentam um sistema de *digital pre-distortion* (DPD) analógico para enlaces de *fronthaul* A-RoF transportando sinais 5G de banda larga, com melhorias significativas em *root mean square error vector magnitude* (EVM_{RMS}) e na supressão do crescimento espectral. Um circuito de DPD de baixo custo e banda larga foi proposto em [21], alcançando aumento expressivo da faixa dinâmica livre de espúrios para frequências de 7 a 18 GHz. Técnicas de DPD e pós-distorção também foram avaliadas em [22], nas quais abordagens híbridas demonstraram compensação efetiva de não linearidades em cenários *centralized radio access network* (C-RAN). Mais recentemente, técnicas de DPD baseadas em redes neurais recorrentes foram validadas experimentalmente em [23], apresentando desempenho superior ao de modelos convencionais baseados em polinômios de memória para enlaces 5G A-RoF.

Embora os estudos sobre sistemas MIMO-A-RoF em altas frequências, como 60 GHz, sejam relevantes para aplicações de alta capacidade, ainda existe uma lacuna importante em faixas de frequência mais baixas. A oferta de conectividade ubíqua, especialmente em regiões rurais e remotas, permanece insuficiente mesmo com a evolução das redes móveis modernas. Nesse contexto, frequências nas bandas *very high frequency* (VHF)/*ultra-high frequency* (UHF) tornam-se atrativas por apresentarem melhores características de propagação e maior alcance de cobertura de rádio.

Este trabalho investiga a integração de sistemas A-RoF com MIMO, tendo como foco aplicações em regiões remotas ou de difícil acesso. A arquitetura considerada utiliza modulação direta e detecção direta, oferecendo uma alternativa de menor complexidade e melhor eficiência espectral em comparação com soluções *digital RoF* (D-RoF). O desempenho é avaliado por meio de métricas como EVM_{RMS} e vazão, considerando condições próximas de implantação prática, incluindo um enlace de SMF de 20 km com operação multi-comprimento de onda por WDM esparsa, seguido por um segmento de rede de acesso sem fio. Além das análises de EVM_{RMS} , vazão e integridade espectral no nível do *fronthaul*, são apresentados a descrição completa da arquitetura e os resultados que capturam o impacto acumulado da conversão eletro-óptica, do transporte em fibra, da recuperação optoeletrônica e da transmissão pelo enlace sem fio.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Configuração Experimental e Metodologia

Um dos cenários considerados neste relatório é ilustrado na Figura 1. A arquitetura proposta utiliza uma abordagem baseada em *software-defined radio* (SDR) para implementar as funcionalidades das camadas *physical layer* (PHY) e *medium access control* (MAC) do transceptor customizado. Assume-se que as *base stations* (BSs) sejam implantadas em regiões remotas, com o objetivo de prover conectividade a áreas sem cobertura ou com atendimento insuficiente. Todo o processamento em banda-base é centralizado na *central office* (CO), que se conecta às BSs por meio de um enlace óptico de *fronthaul*.

Esse enlace é implementado por um sistema A-RoF com laser diretamente modulado e detecção direta no receptor. Essa estratégia reduz a complexidade da arquitetura e contribui para a diminuição de OPEX e CAPEX quando comparada a uma implementação digital baseada em D-RoF. O diagrama de blocos apresentado na Figura 1 representa a implementação expe-

rimental do sistema proposto, enquanto a montagem física dos equipamentos e componentes é apresentada posteriormente na Figura 2.

A arquitetura avaliada explora a elevada largura de banda das comunicações ópticas e, simultaneamente, aumenta a robustez da comunicação por meio do uso de diversidade MIMO. O sistema emprega a técnica *frequency division duplex* (FDD), permitindo a implementação de canais separados para *downlink* e *uplink*. Para ampliar a cobertura em regiões remotas, a arquitetura opera em bandas UHF, o que possibilita a exploração do conceito de *TV white space* (TVWS), no qual canais de *television* (TV) ociosos podem ser reutilizados para comunicações 5G.

Embora os transceptores A-RoF utilizados suportem larguras de banda de RF de 20 MHz a 6 GHz, a largura de banda empregada neste trabalho foi intencionalmente limitada de acordo com o cenário de aplicação considerado. O sistema é voltado a comunicações em áreas remotas baseadas no conceito de TVWS, em que canais de televisão terrestre não utilizados são reaproveitados para conectividade 5G. No Brasil, os canais de TV são regulamentados com largura de banda de 6 MHz, o que motiva o uso de larguras de banda múltiplas desse valor. Assim, a avaliação experimental considera a agregação de quatro canais de TV adjacentes e ociosos, resultando em uma largura de banda total de 24 MHz. Em aplicações práticas, outras configurações, como 6, 12 ou 18 MHz, também podem ser adotadas conforme a disponibilidade local de espectro. Além disso, a escolha de 24 MHz considera as limitações computacionais das plataformas utilizadas na implementação em SDR, uma vez que larguras de banda maiores exigiriam maior capacidade de processamento em banda-base.

Neste trabalho, os canais de *downlink* e *uplink* foram centralizados em 674,14 MHz e 560,14 MHz, respectivamente. Foram empregados quatro transceptores A-RoF da Optical Zonu, disponíveis em diferentes comprimentos de onda ópticos. Os módulos utilizados nesta implementação operam em 1490 nm, 1510 nm, 1530 nm e 1570 nm. Cada módulo integra um fotodiodo com ampla resposta espectral, permitindo a fotodetecção efetiva dos comprimentos de onda transmitidos.

O modelo utilizado foi o transceptor OZ816, com *low-noise amplifier* (LNA) integrado no estágio de transmissão. Esse módulo fornece ganho de enlace em RF entre 15 e 19 dB, com *input third-order intercept point* (IIP3) entre +8 e +10 dBm em 1 GHz. A potência máxima admissível na entrada de RF do transmissor é de +5 dBm. A potência óptica de saída do laser varia entre 2 e 6 mW, enquanto a potência óptica máxima permitida na entrada do receptor é

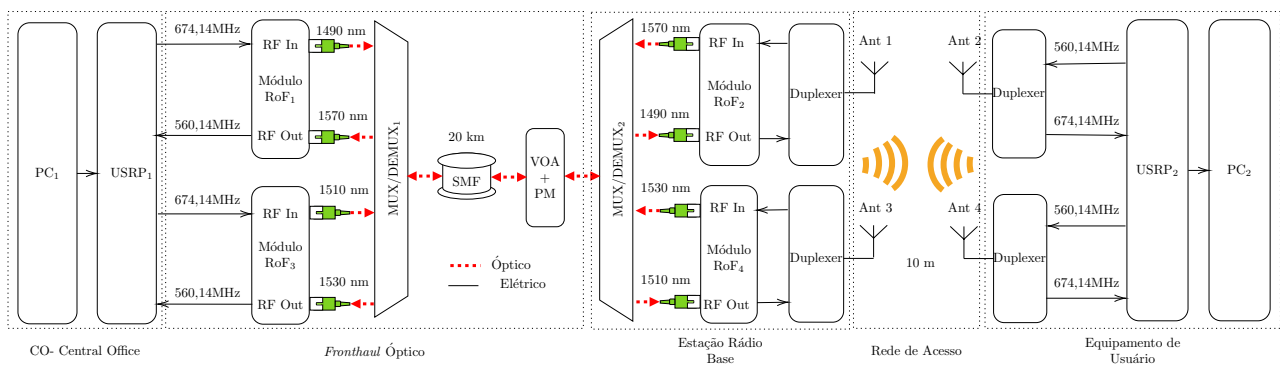


Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema MIMO assistido por A-RoF. PC: computador pessoal; USRP: periférico universal de rádio definido por software; SMF: fibra monomodo; VOA: atenuador óptico variável; PM: monitor de potência.

de 12 mW. O receptor apresenta resposta óptica ampla, cobrindo a faixa de 1270 a 1610 nm, o que permite a operação com os diferentes comprimentos de onda empregados no experimento.

A implementação em SDR possibilita o desenvolvimento de rádios altamente configuráveis, capazes de operar com formas de onda flexíveis e espectralmente eficientes, como a *generalized frequency division multiplexing* (GFDM), que apresenta baixa emissão fora da banda. O sistema de rádio foi implementado no GNU Radio, utilizando PCs conectados a dispositivos USRP 2954R da National Instruments por meio de interfaces *peripheral component interconnect express* (PCIe). Cada USRP possui duas portas de transmissão e duas portas de recepção em RF, permitindo a implementação de um sistema MIMO 2×2 . Essa configuração viabiliza diversidade de transmissão por meio do esquema de codificação espaço-temporal em blocos de Alamouti [24].

No sentido de *downlink*, os módulos A-RoF 1 e 3 recebem o sinal de RF centralizado em 674,14 MHz, que modula as portadoras ópticas em 1490 nm e 1510 nm. Em seguida, as portadoras moduladas são combinadas por meio de um WDM Mux/Demux, permitindo sua transmissão conjunta por uma única SMF de 20 km. Para fins de avaliação de desempenho, um VOA e um PM são inseridos no enlace antes da separação das portadoras ópticas por outro WDM Mux/Demux. Após a demultiplexação, os sinais ópticos são aplicados a um par de transceptores A-RoF em paralelo, onde são fotodetectados por detecção direta e encaminhados à USRP₂ para avaliação do desempenho.

A comunicação no sentido de *uplink* segue uma estrutura semelhante à do *downlink*, porém opera em frequência e comprimentos de onda distintos. Neste trabalho, a frequência de *uplink* foi definida em 560,14 MHz, com portadoras ópticas em 1570 nm e 1530 nm. O enlace de acesso utiliza duplexadores para realizar a separação entre transmissão e recepção, permitindo que cada antena opere simultaneamente nos caminhos de *transmitter* (TX) e *receiver* (RX), conforme requerido pela operação baseada em FDD. Foram empregadas antenas log-periódicas UHF modelo LAP 4/5-50/16, da ELTI, com ganho nominal de 9,5 dBi. A separação entre transmissão e recepção foi realizada por meio de duplexadores da Innowave, compatíveis com duas faixas de frequência, 488–602 MHz e 620–758 MHz, apresentando isolamento mínimo de 95 dB, perda de retorno de 20 dB e capacidade de potência de até 150 W. As interconexões de RF foram implementadas utilizando cabos e adaptadores dos tipos SMA e N.

2.2.2 Resultados e Discussões

O enlace sem fio de prova de conceito foi avaliado em uma distância de 10 m. Embora esse alcance seja limitado no ambiente experimental, a arquitetura pode ser estendida para distâncias da ordem de quilômetros mediante o uso de estágios adequados de amplificação. Foi utilizada uma configuração MIMO 2×2 , com duas antenas em cada extremidade do enlace. As antenas de cada lado foram separadas por aproximadamente 2,8 m, resultando em canais com baixa correlação espacial, em conformidade com critérios de separação em escala de comprimento de onda adotados em implantações MIMO.

Para viabilizar o segmento de acesso BS–UE, os sinais de RF recuperados no lado da BS são encaminhados às antenas transmissoras, enquanto o terminal UE possui uma configuração correspondente de RF 2×2 . Os duplexadores são utilizados em ambas as extremidades para separar os caminhos de transmissão e recepção em cada porta de antena, permitindo operação simultânea dentro da estrutura geral baseada em FDD. Dessa forma, a arquitetura integrada preserva o objetivo de baixa complexidade apresentado em [25], mantendo modulação direta e detecção direta no *fronthaul*, além da flexibilidade da plataforma SDR na camada PHY.

O objetivo desta análise é quantificar as degradações acumuladas ao longo da cadeia de transmissão, considerando: i) o *front-end* de RF e a geração da forma de onda na plataforma SDR; ii) os estágios de conversão eletro-óptica, transporte em fibra e recuperação optoeletrônica associados ao enlace A-RoF; e iii) a propagação via interface aérea, incluindo os efeitos dos arranjos de antenas e dos duplexadores.

O transceptor SDR opera com modulação adaptativa baseada na estimação da *signal-to-noise ratio* (SNR). Quando a qualidade do enlace se degrada, a ordem de modulação é reduzida automaticamente, com o objetivo de manter a *bit error rate* (BER) próxima de zero.

A Figura 3 apresenta a EVM_{RMS} medida no terminal UE em função da potência de RF aplicada à entrada do módulo RoF. Observa-se que a potência ótima de operação é aproximadamente -16 dBm. Mesmo com a inclusão do enlace sem fio, o sistema ainda suporta modulação 256-QAM na região de melhor desempenho. Potências de entrada superiores a -11 dBm não foram avaliadas nesta etapa, pois a análise anterior indicou aumento da EVM_{RMS} para níveis mais elevados de potência, associado ao comportamento não linear do LNA integrado ao módulo RoF.

A Figura 4 apresenta a evolução da EVM_{RMS} e da vazão em função da potência óptica na saída da SMF, ajustada por meio do VOA, considerando agora a cadeia completa com o segmento de acesso sem fio. Os resultados mantêm o mesmo comportamento qualitativo observado no caso em que apenas o fronthaul foi avaliado: a redução da potência óptica recebida degrada a EVM_{RMS} e força o mecanismo de modulação adaptativa a reduzir a eficiência espectral, resultando em menor vazão. À medida que a potência óptica aumenta, a EVM_{RMS} melhora e a vazão se aproxima do valor máximo suportado pela forma de onda e pela canalização utilizadas no experimento.

Esses resultados indicam que, dentro da faixa avaliada, o enlace de acesso sem fio não altera de forma fundamental a região de operação do *fronthaul* A-RoF diretamente modulado.

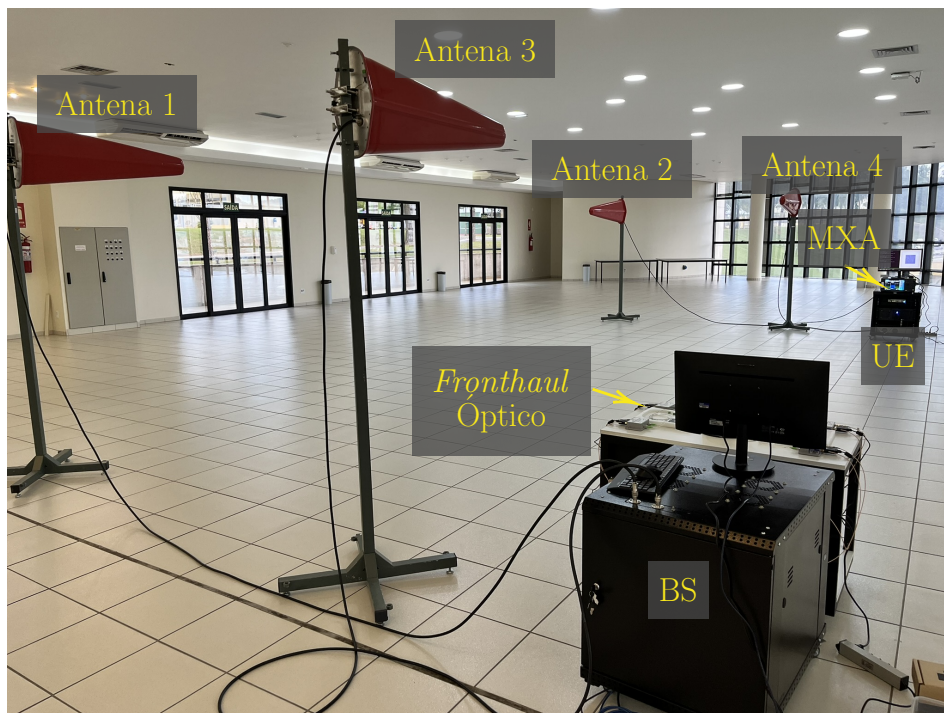


Figura 2: Fotografia da montagem experimental.

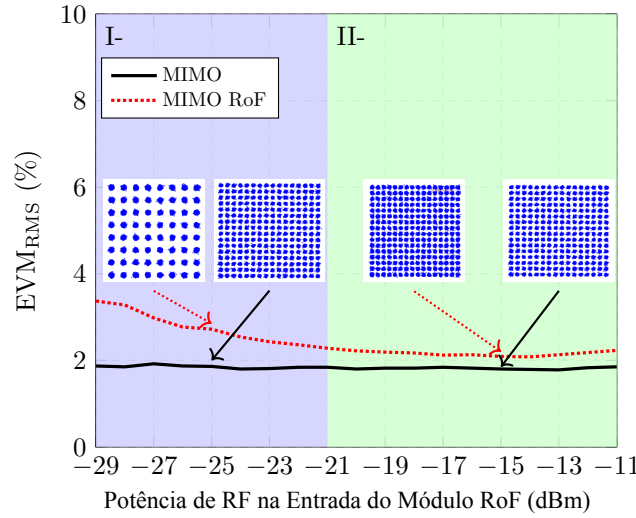


Figura 3: EVM_{RMS} fim a fim em função da potência de RF. A Zona I corresponde aos níveis de potência em que a modulação 256-QAM é suportada, enquanto a Zona II indica a região de operação com 64-QAM.

Entretanto, esse segmento adiciona degradações fim a fim que devem ser consideradas no projeto sistêmico, especialmente em cenários de maior alcance ou com condições de propagação mais severas.

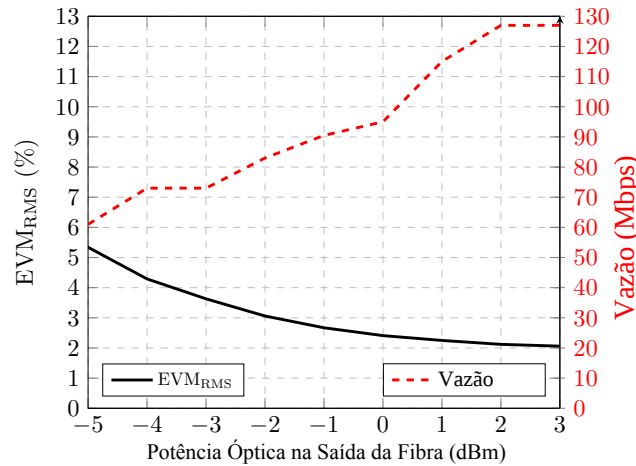


Figura 4: EVM_{RMS} e throughput fim a fim em função da potência óptica na saída da SMF, considerando a cadeia completa com o segmento de acesso sem fio.

A Figura 5 apresenta uma análise espectral da cadeia fim a fim, com medições realizadas em diferentes pontos do sistema: o sinal de RF aplicado à entrada do módulo A-RoF, o sinal de RF recuperado após o estágio receptor A-RoF e o sinal de RF observado no lado do UE após a recepção sem fio. Essa comparação permite destacar dois aspectos relevantes.

Primeiramente, sob condições adequadas de operação, a ocupação espectral permanece majoritariamente preservada ao longo dos diferentes estágios da cadeia, indicando que a combinação entre modulação direta, detecção direta e formas de onda SDR espectralmente eficientes pode ser viável para esse tipo de arquitetura. Em segundo lugar, eventuais componentes de crescimento espectral induzidos por não linearidades em níveis mais elevados de potência de RF

são propagados ao longo da cadeia completa e podem se tornar mais críticos quando estágios adicionais de RF e transmissão sem fio são incluídos.

Dessa forma, a avaliação fim a fim reforça a necessidade de técnicas de linearização, como DPD, principalmente quando potências de RF mais elevadas forem necessárias para ampliar a cobertura do sistema.

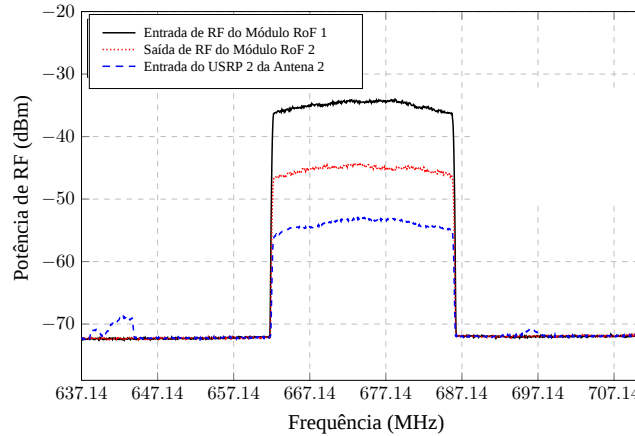


Figura 5: Espectros de RF fim a fim medidos em diferentes pontos da cadeia de transmissão: entrada do módulo A-RoF, saída recuperada após o enlace A-RoF e sinal recebido no lado do UE após transmissão sem fio.

2.3 Conclusão

Este trabalho demonstrou um sistema 2×2 MIMO fim a fim assistido por um fronthaul A-RoF diretamente modulado, enfatizando uma arquitetura prática, de baixa complexidade e compatível com processamento de rádio centralizado baseado em SDR. A avaliação do *fronthaul* óptico em um enlace de SMF de 20 km com WDM esparsos confirmou que a qualidade do enlace depende de uma faixa estreita de operação. Uma potência de excitação de RF próxima de -16 dBm permite o uso de modulações de alta ordem, enquanto níveis mais elevados de excitação, acima de aproximadamente -10 dBm, induzem distorções não lineares associadas ao LNA/*front-end* de RF e ao processo de modulação direta. Como consequência, observa-se degradação da EVM_{RMS} , redução da ordem de modulação suportada e diminuição da vazão alcançável.

A varredura de potência óptica também mostrou que potência óptica recebida insuficiente aumenta a EVM_{RMS} e limita a vazão. Por outro lado, a operação com potência acima de aproximadamente -8 dBm na saída da SMF permite atingir cerca de 130 Mbps em um canal de 24 MHz, com EVM_{RMS} próxima de 1%. Esses resultados reforçam que a calibração conjunta da potência de RF, da potência óptica lançada no enlace e da atribuição dos comprimentos de onda é essencial para preservar a integridade espectral e o desempenho do sistema.

Em relação ao escopo restrito ao *fronthaul* óptico avaliado em trabalhos anteriores, os resultados apresentados neste relatório incluem também um segmento integrado de acesso sem fio entre BS e UE. Esse segmento utiliza separação TX/RX baseada em duplexadores e um arranjo de antenas 2×2 projetado para baixa correlação entre canais, com espaçamento de 2,8 m entre antenas. Essa configuração permitiu a demonstração de um enlace fim a fim de prova de conceito com alcance de 10 m, possibilitando a avaliação do desempenho ao longo de toda a cadeia de transmissão.

De modo geral, as medições indicam a viabilidade do uso de A-RoF diretamente modulado como uma solução de *backhaul/fronthaul* de baixo custo e elevada eficiência espectral para regiões subatendidas. Entretanto, os resultados também mostram claramente que, em regimes de maior potência de excitação de RF, a não linearidade se torna o principal fator limitante, e não apenas o ruído. Dessa forma, o uso de técnicas de DPD constitui uma etapa futura tecnicamente justificada para viabilizar a operação em níveis mais elevados de potência.

Do ponto de vista de aplicação, a arquitetura MIMO assistida por A-RoF proposta é particularmente adequada para implantações rurais e remotas, nas quais a operação em bandas sub-GHz, a eficiência de custo e o aumento da área de cobertura são requisitos prioritários. Nesses cenários, o uso do espectro TVWS, combinado ao processamento centralizado em banda-base, permite soluções de acesso mais flexíveis e escaláveis, com menor complexidade de infraestrutura.

Em implantações urbanas, por outro lado, os requisitos podem estar mais associados ao aumento de capacidade e à maior densificação da rede. Nesses casos, a mesma arquitetura poderia ser adaptada por meio da operação com maiores larguras de banda, configurações MIMO de ordem superior e integração de técnicas de mitigação de não linearidades. Além disso, o sistema proposto está alinhado a casos de uso emergentes de 6G e *Internet of things* (IoT), que priorizam conectividade massiva, eficiência energética e acesso heterogêneo, incluindo aplicações como monitoramento ambiental, agricultura inteligente e sensoriamento de ampla área e baixo consumo.

3 Validação Experimental de um Enlace Híbrido Bidirecional Multi-Comprimento de Onda MIMO A-RoF/FSO

Mário Oliveira Costa Dias, Luiz Augusto Melo Pereira, Matheus Sêda Borsato Cunha,
Luciano Leonel Mendes, Felipe Rudge, Paulo Cardieri

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Instituto Nacional de Telecomunicações
(Inatel)

3.1 Introdução

Esforços crescentes têm sido direcionados ao desenvolvimento de soluções de midhaul e fronthaul mais flexíveis, ao mesmo tempo em que se busca reduzir progressivamente tanto o OPEX quanto o CAPEX em redes de acesso de última milha [26]. As arquiteturas baseadas em OWC permanecem entre as soluções mais promissoras para o suporte a redes cada vez focadas em múltiplas tecnologias. Nesse contexto, abordagens híbridas, como A-RoF e FSO, têm sido investigadas devido à sua elevada flexibilidade [27]. Além disso, sistemas MIMO constituem uma tecnologia essencial para aumentar ainda mais as taxas de transmissão de dados e viabilizar redes modernas híbridas e de alta capacidade.

Considerando a evolução em direção à 6G, a integração entre A-RoF, MIMO, FSO representa uma abordagem promissora para atender aos requisitos extremos de taxa de dados e capacidade ultraelevada. A tecnologia A-RoF permite um *fronthaul* escalável e de baixa complexidade, enquanto o MIMO melhora a multiplexação espacial e o FSO oferece *backhaul/fronthaul* óptico sem fio de alta capacidade. De forma complementar, a comunicação em THz disponibiliza larguras de banda sem precedentes para enlaces de curto alcance e taxas de transmissão ultraelevadas, constituindo um componente crítico das arquiteturas sem fio de próxima geração. Em conjunto, essas tecnologias contribuem para infraestruturas de transporte altamente e com elevada largura de banda, essenciais para o suporte a serviços e aplicações 6G.

Neste trabalho, propõe-se a integração de um enlace híbrido bidirecional e multi-comprimento de onda 2×2 MIMO A-RoF/FSO como prova de conceito, avançando em direção a arquiteturas de redes futuras baseadas em OWC e capazes de suportar tecnologias em THz. Para investigar essa arquitetura, projetamos e validamos um sistema híbrido bidirecional multi-comprimento de onda MIMO–A-RoF/FSO, com modulação e detecção diretas, operando na banda VHF. A prova de conceito proposta integra uma cadeia completa de transmissão MIMO em uma estrutura híbrida de *midhaul-fronthaul* baseada em A-RoF/FSO, na qual múltiplos comprimentos de onda ópticos são simultaneamente multiplexados e transportados por uma SMF nas direções de *downlink* e *uplink*. Os sinais ópticos são inicialmente roteados por fibra em direção à *distribution unit* (DU) no segmento de *midhaul* e, posteriormente, entregues por meio de um enlace FSO até a RRH no segmento de *fronthaul*, onde são reconvertidos para o domínio de RF, completando o caminho de transmissão híbrido fim a fim.

O sistema é avaliado utilizando taxas de dados reais de usuários, demonstrando comunicação bidirecional simultânea e robusta. A principal contribuição deste trabalho reside na validação experimental de uma arquitetura de rede híbrida bidirecional completa, que emprega conjuntamente as tecnologias MIMO, A-RoF e FSO, oferecendo uma solução escalável e flexível para redes híbridas com implementação simplificada. A robustez do sistema foi confirmada mesmo sob níveis relativamente baixos de potência de transmissão.

3.2 Desenvolvimento

Esta seção trata do desenvolvimento de todos os aspectos relacionados à implementação de um enlace híbrido bidirecional multi-comprimento de onda MIMO e A-RoF/FSO.

3.2.1 Integração de A-RoF em sistemas MIMO

A tecnologia RoF tem se consolidado como uma solução promissora para aplicações de *fronthaul* em arquiteturas C-RAN, uma vez que combina as vantagens dos sistemas ópticos e sem fio. Sua viabilidade tem sido impulsionada pelos avanços em fontes ópticas de alta linearidade e em fibras ópticas de baixa perda, permitindo enlaces ópticos de longa distância e altas taxas de transmissão.

As arquiteturas RoF podem ser implementadas principalmente por meio de duas abordagens: D-RoF e A-RoF. Na arquitetura D-RoF, o processamento digital em banda-base é realizado antes do transporte óptico, e os dados são encapsulados de acordo com padrões como *common public radio interface* (CPRI) ou *evolved common public radio interface* (eCPRI). Por outro lado, a tecnologia A-RoF surge como uma alternativa atrativa, pois permite simplificar consideravelmente a arquitetura da rede, reduzindo custos, melhorando a eficiência espectral e simplificando o projeto das RRHs. Entretanto, essa abordagem apresenta maior sensibilidade a distorções não lineares, especialmente aquelas introduzidas durante o processo de modulação óptica. Por esse motivo, estudos recentes têm investigado técnicas para mitigar tais efeitos em sistemas A-RoF, com destaque para a aplicação de DPD [23].

Nos sistemas A-RoF, a conversão eletro-óptica pode ser realizada por meio de técnicas de modulação direta ou modulação externa. As arquiteturas baseadas em modulação externa geralmente utilizam moduladores do tipo MZM, o que aumenta a complexidade do sistema, bem como os custos de projeto e implementação. Sistemas A-RoF operando na faixa de mmWave, especialmente aqueles voltados à transmissão de altas taxas de dados, normalmente dependem de MZMs associados a elementos de polarização, a fim de suportar maiores larguras de banda e preservar a linearidade do sinal.

Em contrapartida, a modulação direta torna-se uma alternativa mais atrativa em cenários nos quais se busca uma arquitetura simplificada e de menor custo. Essa abordagem é particularmente adequada para sistemas A-RoF operando em bandas sub-6 GHz, especialmente nas faixas de VHF e UHF, nas quais os requisitos de largura de banda e linearidade podem ser atendidos com menor complexidade de implementação [28].

A integração de sistemas MIMO em arquiteturas A-RoF pode ser realizada de forma eficiente. Uma possibilidade consiste em associar cada fluxo MIMO a um comprimento de onda óptico distinto, formando uma configuração multi-comprimento de onda. Nesse caso, os diferentes comprimentos de onda são multiplexados opticamente e transportados por uma única SMF. Essa estratégia pode ser aplicada tanto no sentido de *downlink* quanto no sentido de *uplink*.

Outra alternativa consiste em combinar os sinais MIMO no domínio de RF, utilizando combinadores elétricos, de modo que o sinal RF agregado module um único comprimento de onda óptico para o *downlink* e outro para o *uplink*. A escolha entre modulação direta e modulação externa depende da frequência da portadora, da largura de banda requerida e dos requisitos de desempenho do sistema.

Uma das principais vantagens dessa abordagem é que o sinal RF pode ser transportado em sua frequência original de operação, eliminando a necessidade de conversão *analog-to-digital converter* (ADC)/*digital-to-analog converter* (DAC) e de estágios adicionais de upconversion

em RF. Essa característica torna a tecnologia A-RoF especialmente interessante para ampliar a distância entre a CO e a BS, permitindo que os sinais MIMO sejam transportados opticamente, amplificados e posteriormente irradiados por arranjos de antenas apropriados.

A tecnologia OWC tem sido considerada uma solução promissora para superar as limitações associadas à implantação de fibras ópticas em regiões remotas ou de difícil acesso. Essa tecnologia permite explorar larguras de banda extremamente elevadas, operando em faixas de comprimento de onda como *ultraviolet* (UV), *visible light* (VL) e *infrared* (IR). Diferentemente dos enlaces ópticos guiados por fibra, os sistemas OWC realizam a transmissão óptica em espaço livre, utilizando o ar como meio de propagação.

Os sistemas OWC operando em configurações ponto-multiponto na faixa de luz visível são comumente classificados como sistemas *visible-light communication* (VLC). Esses sistemas são predominantemente empregados em ambientes internos, utilizando *light emitting diodes* (LEDs) como fonte óptica. Embora também possam ser aplicados em ambientes externos, sua utilização nesse contexto ainda é limitada devido ao curto alcance de transmissão característico dessas fontes ópticas.

Por outro lado, os sistemas OWC operando em configurações ponto-a-ponto na faixa do infravermelho são denominados sistemas FSO. Esses sistemas utilizam transmissores a laser capazes de atingir taxas de dados na ordem de gigahertz, tornando-se uma alternativa relevante para a implantação de enlaces de fronthaul de alta capacidade.

Apesar de serem suscetíveis a condições atmosféricas adversas, como chuva, poeira e neblina, os enlaces FSO apresentam atenuação relativamente reduzida quando comparados a enlaces de RF, principalmente devido à elevada diretividade do feixe óptico. Dessa forma, a tecnologia FSO tem se destacado como uma alternativa viável à implantação de fibra óptica em regiões remotas, rurais ou de difícil acesso, especialmente em cenários nos quais a instalação de infraestrutura cabeada é economicamente inviável ou tecnicamente limitada [29, 30].

3.2.2 Configuração Experimental e Metodologia

Foi implementado um enlace de baixo custo para viabilizar a comunicação bidirecional entre a CO e a BS, conforme ilustrado na Figura 6. Todo o processamento em banda-base, bem como o circuito de *front-end* de RF, foi centralizado na CO, que, por sua vez, é conectada à DU por meio de um enlace óptico de *midhaul*. Para prover conectividade de última milha, um enlace de *fronthaul* conecta a DU à RRH localizada na BS.

O sistema de rádio foi implementado utilizando duas unidades National Instruments USRP-2954R, controladas por PCs por meio do GNU Radio. A configuração adotada utiliza a forma de onda GFDM com modulação adaptativa. Cada USRP dispõe de duas portas de transmissão e duas portas de recepção em RF, permitindo a implementação de uma configuração 2×2 MIMO. Essa arquitetura é compatível com aplicações baseadas em TVWS, uma vez que possibilita salto em frequência e ajuste dinâmico do esquema de modulação.

O enlace de *midhaul* foi implementado por meio de um sistema A-RoF, utilizando laser diretamente modulado e detecção direta no receptor. Essa abordagem contribui para a redução do OPEX e do CAPEX, uma vez que simplifica a arquitetura do sistema e reduz a necessidade de componentes ópticos mais complexos. A tecnologia MIMO, operando com diversidade espectral, foi incorporada ao sistema com o objetivo de aumentar sua robustez. Esse enlace foi estabelecido por meio de uma SMF com comprimento de 12,5 km.

O enlace de *fronthaul* foi implementado utilizando um sistema óptico FSO sujeito a condições de turbulência, com distância de 11 m entre a DU e a RRH. Essa configuração tem como

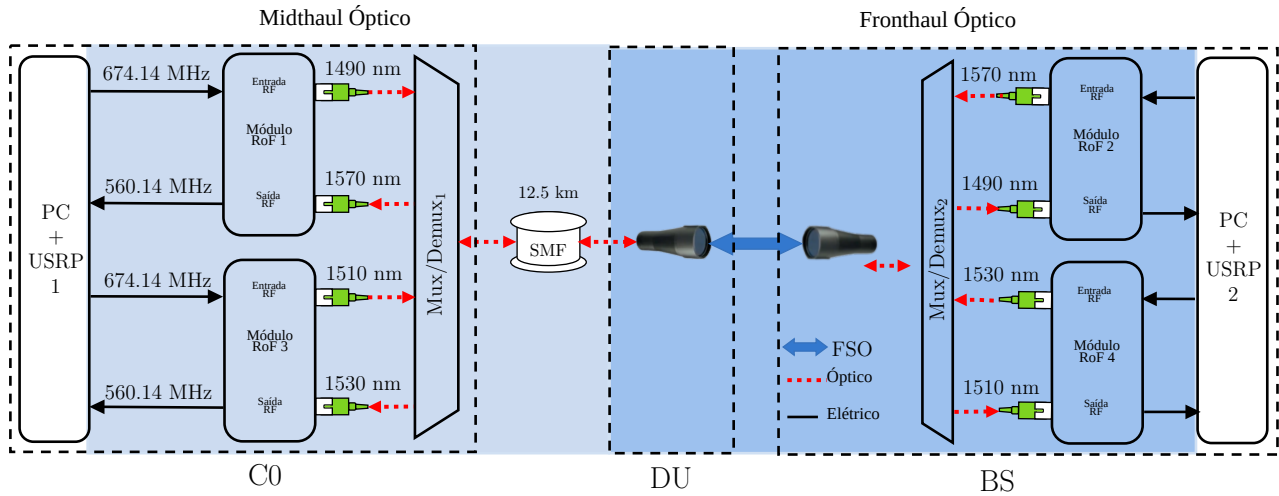


Figura 6: Diagrama de blocos do sistema híbrido bidirecional MIMO-A-RoF/FSO. PC: computador pessoal; USRP: Universal Software Radio Peripheral; SMF: fibra monomodo.

objetivo avaliar a viabilidade de prover conectividade em regiões de difícil acesso, nas quais a implantação de fibra óptica pode ser limitada por fatores técnicos, econômicos ou geográficos.

A arquitetura proposta opera em bandas de frequência UHF, permitindo explorar o conceito de TVWS. O sistema utiliza canais separados para *downlink* e *uplink*, com base na técnica de FDD. As frequências empregadas neste trabalho foram 674,14 MHz para o *downlink* e 560,14 MHz para o *uplink*.

O transceptor A-RoF utilizado foi o modelo OZ816, da Optical Zonu, que suporta largura de banda de RF na faixa de 20 MHz a 6 GHz. É importante destacar que, para aplicações futuras em comunicações na faixa de THz, serão necessários processos de modulação mais sofisticados e, conseqüentemente, de maior custo. O módulo OZ816 integra um modulador óptico direto, responsável por converter o sinal elétrico aplicado à porta de entrada de RF em um sinal óptico, encaminhado posteriormente à porta de saída óptica. Além disso, o módulo possui um fotodetector do tipo *p-type*, *intrinsic*, and *n-type* (PIN), que converte o sinal óptico recebido na porta de entrada óptica em um sinal elétrico disponibilizado na porta de saída de RF.

Um LNA é integrado às portas de RF, oferecendo ganho entre 15 e 19 dB, enquanto a potência máxima permitida na entrada de RF é de +5 dBm. O laser fornece potência óptica de saída entre 2 e 6 mW, enquanto a potência óptica máxima permitida na entrada é de 12 mW. Neste experimento, foram utilizados quatro módulos A-RoF, operando nos comprimentos de onda de 1490 nm, 1510 nm, 1530 nm e 1570 nm. Os *photodetectors* (PDs) presentes nesses módulos apresentam ampla resposta espectral, permitindo a fotodetecção eficiente de todos os comprimentos de onda transmitidos.

No *downlink*, os módulos A-RoF 1 e 3 recebem sinais de RF em 674,14 MHz, que modulam diretamente as portadoras ópticas em 1490 nm e 1510 nm. Simultaneamente, no *uplink*, os módulos A-RoF 2 e 4 recebem sinais de RF em 560,14 MHz, os quais modulam diretamente as portadoras ópticas em 1570 nm e 1530 nm. Dessa forma, estabelece-se uma comunicação bidirecional por meio de múltiplos comprimentos de onda ópticos.

As portadoras ópticas moduladas nas direções de *uplink* e *downlink* são posteriormente combinadas por meio de um WDM, permitindo sua transmissão conjunta ao longo de uma SMF de 12,5 km. Na DU e na BS, a fibra óptica é acoplada a uma lente de colimação, responsável por transformar a luz divergente em um feixe colimado, com baixa divergência e

raios aproximadamente paralelos. Durante essa etapa de acoplamento, é necessário realizar alinhamento mecânico preciso, a fim de garantir o alinhamento adequado do feixe óptico entre o transmissor e o receptor.

3.2.3 Resultados e Discussões

O experimento foi realizado em ambiente laboratorial controlado, conforme apresentado na Figura 7. A estação CO foi representada por uma estrutura projetada para acomodar o computador e a unidade USRP. A estação DU foi implementada por meio de uma base mecânica de alinhamento, responsável por posicionar adequadamente a lente de colimação em direção à lente correspondente localizada na BS. A BS, por sua vez, foi representada pela estrutura de recepção composta pela estrutura projetada e pela base mecânica de alinhamento utilizada no enlace óptico.

O alinhamento do feixe óptico entre a DU e a BS, no sistema FSO, foi realizado por meio de ajustes finos nos três eixos translacionais, isto é, nos eixos x, y e z. Inicialmente, o alinhamento aproximado foi conduzido com o auxílio de um laser de luz visível. Em seguida, o alinhamento fino foi realizado utilizando o próprio sistema A-RoF e um PM, com o objetivo de maximizar a potência óptica recebida no receptor.

A avaliação de desempenho foi conduzida por meio da transmissão simultânea de dados entre a CO e a BS nos dois sentidos de comunicação, caracterizando um sistema completamente bidirecional. A primeira análise considera os parâmetros de EVM_{RMS} e vazão em função da potência de RF aplicada à entrada do transceptor A-RoF, tanto no *downlink* quanto no *uplink*. A potência óptica de saída de cada transceptor A-RoF foi configurada em 6 mW.

O EVM_{RMS} é uma métrica utilizada para quantificar a qualidade de um sinal modulado, medindo o erro entre os símbolos recebidos e os pontos ideais esperados na constelação. À medida que a SNR é degradada por efeitos como ruído, distorção, interferência, não linearidades e imperfeições de sincronismo, espera-se um aumento do EVM_{RMS} , indicando piora na qualidade



Figura 7: Bancada experimental contendo os principais componentes elétricos e ópticos utilizados na validação do sistema.

do sinal recebido.

A Figura 8 apresenta a EVM_{RMS} e a vazão em função da potência de RF aplicada à entrada do transceptor A-RoF no sentido de *downlink*. Observa-se que, mesmo para uma potência de transmissão reduzida, aproximadamente igual a -29 dBm, a EVM_{RMS} permanece em torno de 10,5%, permitindo alcançar uma vazão de aproximadamente 31 Mbps. Esse resultado evidencia a robustez do sistema proposto. O transceptor de RF utilizado suporta a decodificação de dados para valores de EVM_{RMS} de até 12%. Para uma potência de transmissão de -11 dBm, o sistema atingiu a taxa máxima de dados suportada pelo transceptor de RF no *downlink*, igual a 130 Mbps, mantendo uma EVM_{RMS} de aproximadamente 2%.

A robustez observada pode ser atribuída à eficiência da tecnologia A-RoF operando sobre SMF, combinada com a estabilidade do enlace FSO, obtida por meio de alinhamento óptico preciso entre transmissor e receptor.

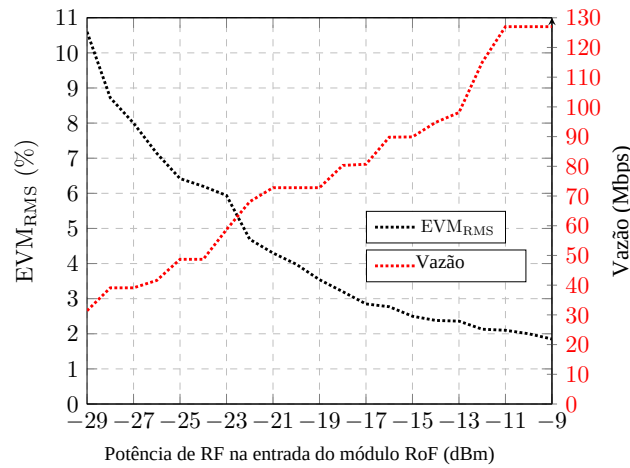


Figura 8: Avaliação da EVM_{RMS} e do throughput em função da potência de transmissão de RF no sentido de *downlink*.

A Figura 9 apresenta o EVM_{RMS} e vazão em função da potência de RF aplicada à entrada do transceptor A-RoF no sentido de *uplink*. Os resultados confirmam que a robustez observada no *downlink* também se mantém no *uplink*, permitindo alcançar vazão significativa mesmo em baixos níveis de potência de transmissão. O sistema atingiu a taxa máxima de dados do transceptor de RF no *uplink*, igual a 30 Mbps, mantendo um EVM_{RMS} de 1,7%. Esses resultados foram obtidos para o mesmo nível de potência observado no *downlink*, ou seja, -11 dBm.

É importante destacar que a transmissão em *uplink* atingiu vazão máxima devido à menor largura de banda alocada para esse sentido de transmissão, quando comparada ao *downlink*, nesta configuração assimétrica. Essa assimetria resulta de uma escolha de projeto adotada durante a implementação do transceptor baseado em SDR.

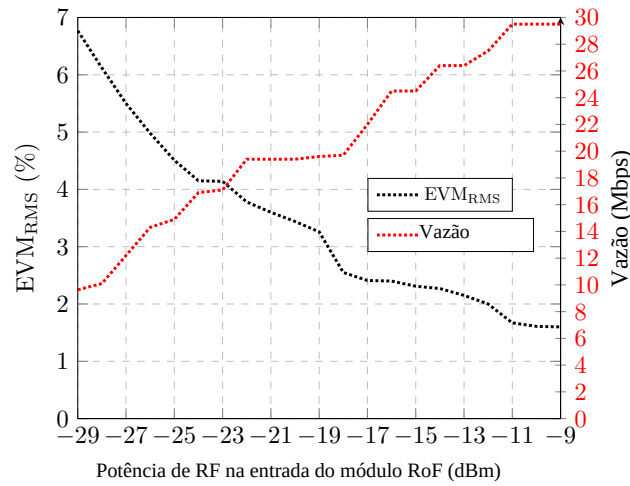


Figura 9: Avaliação da EVM_{RMS} e do throughput em função da potência de transmissão de RF no sentido de uplink.

A Figura 10 apresenta a caracterização do sistema no sentido de *downlink*, considerando os valores medidos de EVM_{RMS} e a ordem de modulação selecionada pela plataforma SDR com base na SNR estimada. Baixos valores de SNR resultam em maiores valores de EVM_{RMS} , o que tende a aumentar a BER. Para mitigar esse efeito, a plataforma SDR reduz automaticamente a ordem de modulação, buscando manter a BER o mais próxima possível de zero.

Observa-se que, para níveis de potência inferiores a -23 dBm, a plataforma SDR seleciona uma modulação de menor ordem, correspondente a 16-QAM. Para níveis de potência entre -23 dBm e -12 dBm, a plataforma seleciona a modulação 64-QAM. Por fim, para potências superiores a -12 dBm, é selecionada a modulação 256-QAM. Esse comportamento demonstra a capacidade de adaptação do sistema às condições do enlace, ajustando a eficiência espectral de acordo com a qualidade do sinal recebido.

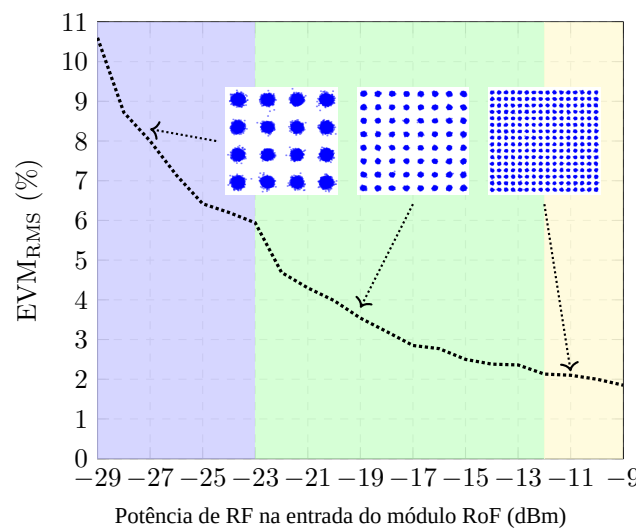


Figura 10: Ordem de modulação selecionada pela plataforma SDR em função da potência de transmissão de RF utilizada para modular a portadora óptica.

Por fim, foi avaliado o espectro do sinal de RF no sentido de *downlink*. A Figura 11 apresenta

o sinal de RF recebido na entrada da USRP2, após a propagação pelo enlace óptico híbrido A-RoF/FSO e posterior fotodetecção. Ressalta-se que todos os comprimentos de onda ópticos foram transmitidos simultaneamente nos dois sentidos, permitindo a operação bidirecional do sistema híbrido.

Como pode ser observado, não há distorções espectrais aparentes. A redução da potência recebida em relação à potência transmitida é atribuída às perdas introduzidas pelo canal, ao alinhamento óptico não ideal e aos processos de conversão eletro-óptica e optoeletrônica. Devido à robustez e à estabilidade do sistema, foi necessário utilizar um atenuador de RF de 40 dB na entrada do receptor, a fim de possibilitar a avaliação do desempenho em uma faixa mais ampla de baixos níveis de potência.

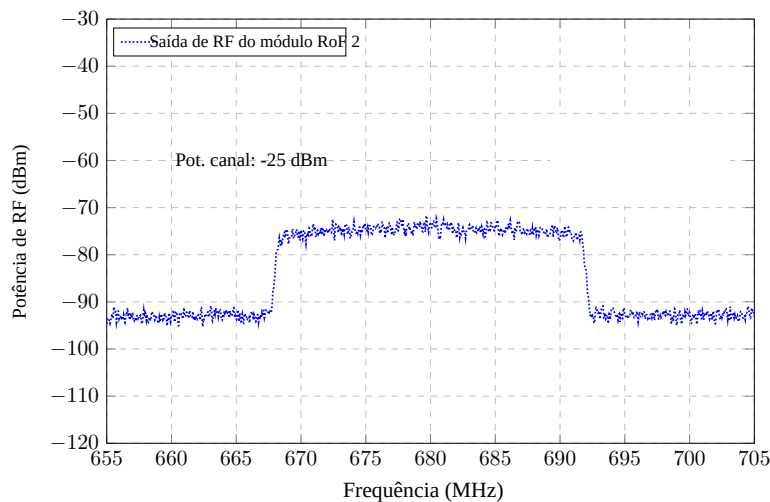


Figura 11: Espectro de RF sem distorções aparentes no sentido de downlink, considerando uma potência de transmissão de RF de -25 dBm aplicada à entrada do transceptor A-RoF.

3.3 Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto, a implementação e a avaliação experimental de uma arquitetura híbrida bidirecional, multi-comprimento de onda, 2×2 MIMO A-RoF/FSO. A arquitetura proposta integrou modulação óptica direta e detecção direta com multiplexação WDM esparsa, utilizando um enlace de *midhaul* em SMF de 12,5 km e um enlace de *fronthaul* FSO de 11 m. Além disso, o transceptor 5G implementado incorporou modulação adaptativa e diversidade MIMO.

Essa configuração permitiu explorar a simplicidade estrutural e os benefícios de custo associados à modulação e detecção diretas, ao mesmo tempo em que aproveitou a robustez proporcionada pela transmissão 2×2 MIMO baseada em diversidade. A plataforma USRP foi utilizada para implementar a forma de onda GFDM com modulação adaptativa no espectro UHF, possibilitando suporte a aplicações baseadas em TVWS. O desempenho do enlace foi avaliado em termos de EVM_{RMS} , throughput e integridade espectral, considerando tráfego totalmente bidirecional.

Os resultados confirmaram a robustez do sistema, que alcançou níveis satisfatórios de vazão mesmo para potências de transmissão relativamente baixas, em torno de -20 dBm, tanto no *downlink* quanto no *uplink*. O experimento atingiu a capacidade máxima de transmissão bidirecional suportada pelo transceptor utilizado, correspondente a aproximadamente 130 Mbps

no downlink e 30 Mbps no *uplink*, mesmo com potência de transmissão relativamente baixa, próxima de -11 dBm.

Esses resultados demonstram que a combinação das tecnologias A-RoF, FSO e MIMO representa uma alternativa de *midhaul/fronthaul* escalável, flexível e de custo reduzido.

4 Análise da influência de diferentes fontes de laser de alta potência em um enlace de rádio e energia sobre fibra amplificado por Raman.

Paulo Kiohara, Romildo de Souza, Laura Ghisa, Véronique Quintard, Mikael Guégan, Olympio Coutinho, André Pérennou, Felipe Batista Faro Pinto, Eduardo Saia Lima, Luiz Augusto Melo Pereira, Arismar Cerqueira Sodré Junior.
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

4.1 Introdução

O desenvolvimento das redes 6G preconiza o atendimento de critérios rigorosos de taxa de transmissão de dados, latência reduzida e elevada eficiência energética. A densificação de infraestruturas por meio do desdobramento de pequenas células (*small cells*) constitui uma das abordagens propostas para otimizar o consumo energético por unidade de área, viabilizando a aplicação prática de sistemas de PoF. A tecnologia PoF viabiliza o transporte de energia na forma de luz através de guias de onda ópticas para o suprimento elétrico de dispositivos remotos, mitigando a dependência de redes de distribuição elétrica convencionais ou o emprego de acumuladores locais [31]. Essa característica elimina os riscos associados à *electromagnetic interference* (EMI) e à ocorrência de centelhas em ambientes quimicamente perigosos ou instalações de segurança estratégica, tais como bases militares. Em paralelo, a integração entre o transporte de sinais de RoF e a transmissão de potência fotônica consolida enlaces híbridos designados como *radio and power over fiber* (RPoF) [32]. Para além dos cenários de quinta geração, as arquiteturas de redes móveis futuras evoluem rumo às *full optical networks* (FON), alinhadas ao conceito de B5G. Essas estruturas combinam em uma mesma plataforma heterogênea o transporte de dados, o sensoriamento integrado e a distribuição de energia para alimentar tecnologias de OWC, incluindo óptica em espaço livre FSO, VLC e LiFi. Esta seção detalha as contribuições desenvolvidas, divididas em duas frentes principais de investigação experimental: a validação de uma arquitetura de rede heterogênea totalmente óptica e energeticamente autônoma para comunicação e sensoriamento, e a análise do impacto de diferentes fontes de laser de alta potência em enlaces RPoF assistidos por amplificação Raman distribuída.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Arquitetura de rede totalmente óptica integrada para comunicação e sensoriamento

4.2.1.1 Descrição da Arquitetura e Camadas Funcionais A Figura 12 ilustra uma arquitetura de rede totalmente óptica que integra fornecimento de energia, comunicação e sensoriamento, favorecendo infraestruturas escaláveis, livres de EMI e autônomas em termos de energia para futuras redes B5G/6G. A arquitetura proposta é estruturada em duas camadas funcionais independentes, cujos nós remotos são alimentados exclusivamente por meio de energia fotônica distribuída via PoF a partir da CO.

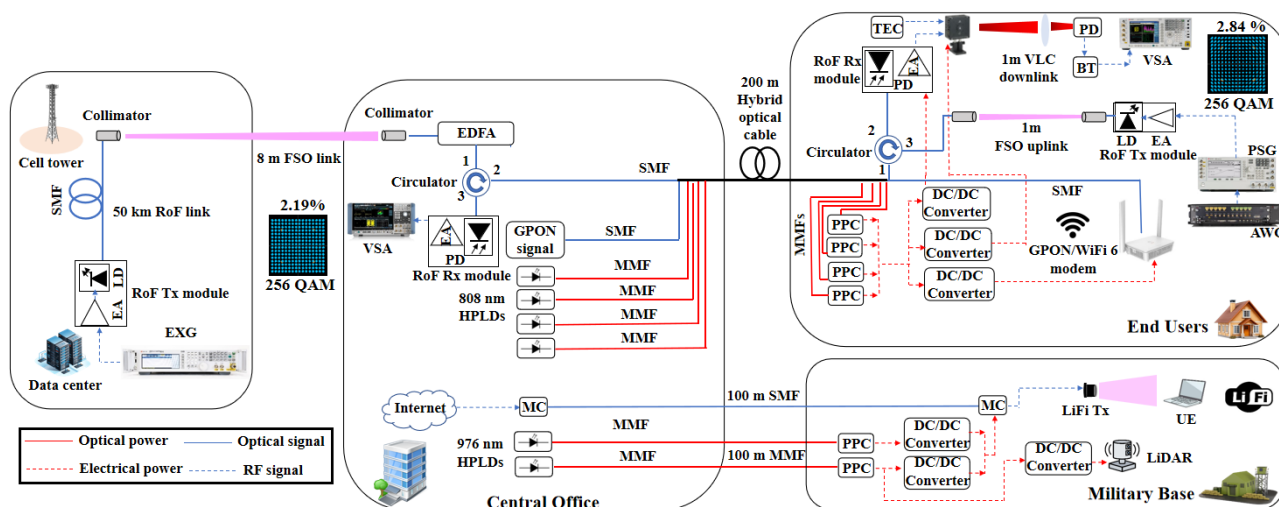


Figura 12: Diagrama arquitetural da rede.

4.2.1.2 Subsistema RPoF de Usuário Final (Aplicações Cíveis) A primeira camada aborda o acesso do usuário final, sendo voltada para aplicações cíveis de alta taxa de transmissão. O tráfego de dados emprega um enlace FSO de 1 metro para o canal de *uplink*, um enlace por VLC de 1 metro para o canal de *downlink* e um modem comercial *wireless fidelity* (Wi-Fi) 6 para o escoamento local do tráfego. O suprimento energético centralizado desse nó utiliza diodos laser de alta potência *high power laser diodes* (HPLDS) operando no comprimento de onda de 808 nm. A potência óptica é transmitida a partir da CO através de quatro linhas de *multimode fiber* (MMF) integradas em um cabo óptico híbrido de 200 metros, enquanto uma SMF dedicada transporta o sinal de uma *gigabit passive optical network* (GPON) em configuração RoF. No nó remoto, os conversores *photovoltaic power converters* (PPC) recebem a potência óptica e, por meio de estágios subsequentes de conversão CC/CC, regulam as tensões necessárias para alimentar o laser VLC, o modem Wi-Fi 6 e o módulo receptor de RoF.

4.2.1.3 Intranet LiFi e Sensoriamento LiDAR 2D (Cenário Militar) A segunda camada foi projetada para sensoriamento e comunicação em um cenário de base militar com isolamento galvânico e imunidade a EMI. A comunicação bidirecional privada em Intranet utiliza a tecnologia LiFi, enquanto o sensoriamento óptico baseia-se em um sistema de LiDAR bidimensional (LiDAR 2D) para detecção de obstáculos e mapeamento geométrico do ambiente. Neste subsistema, o suprimento energético centralizado utiliza uma fonte de HPLDS operando no comprimento de onda de 976 nm. A potência óptica é transmitida através de uma linha de MMF de 100 metros até o respectivo conversor PPC no nó remoto. O canal de dados é escoado por meio de um *media converter* (MC) conectado por uma SMF também de 100 metros. Estágios de conversão CC/CC no destino regulam as tensões de saída em níveis de 52 V, 12 V e 5 V para alimentar os transceptores ópticos, o transmissor LiFi e o sensor LiDAR *two-dimensional* (2D).

4.2.1.4 Resultados Obtidos e Análise de Desempenho da Rede FON Na caracterização da rede FON experimental, ilustra pela Figura 13, a infraestrutura PoF garantiu estabilidade operacional contínua para ambas as camadas funcionais.

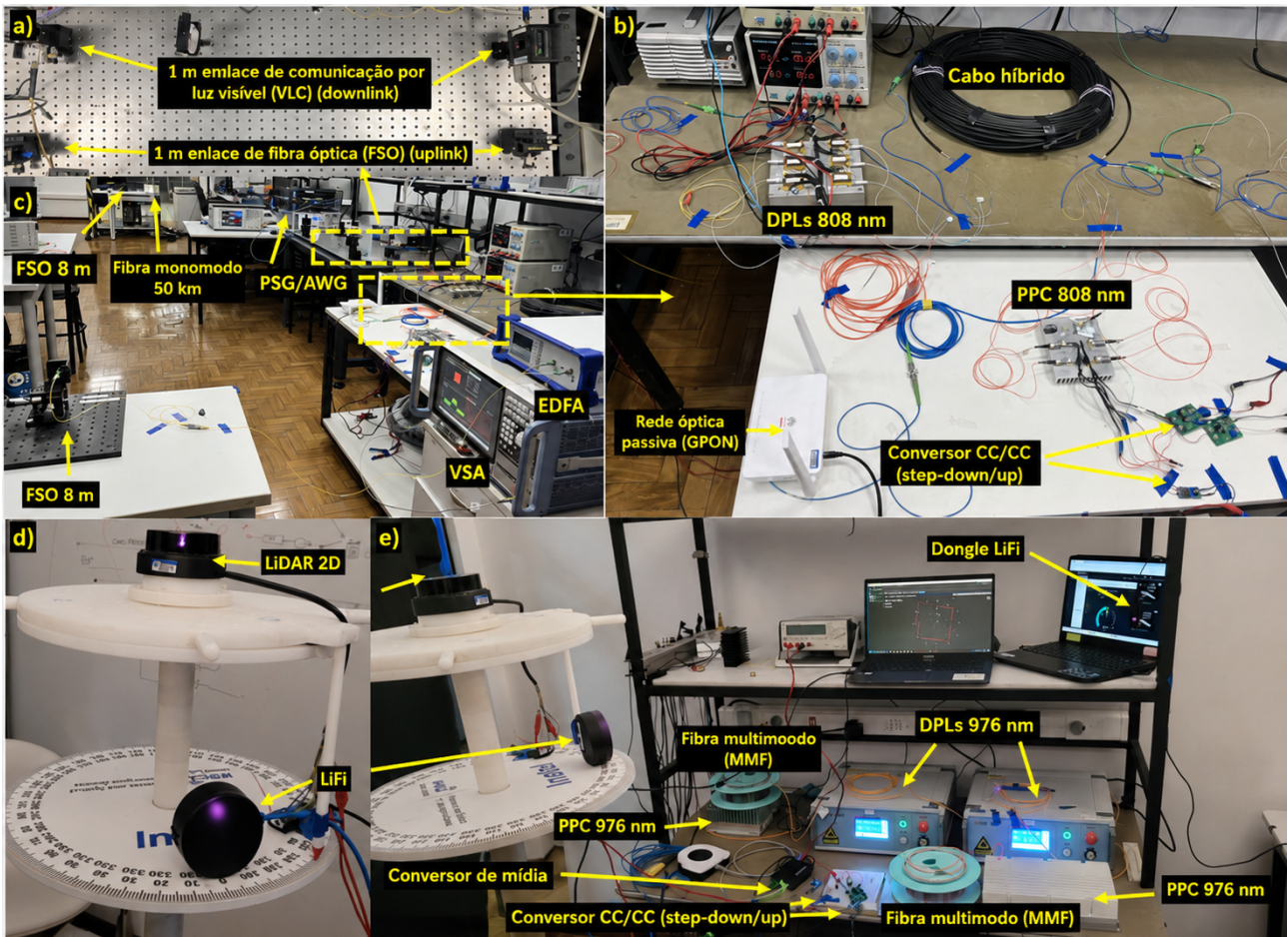


Figura 13: Configuração experimental totalmente alimentada por fibra óptica. a) Downlink VLC e uplink FSO; b) Sistema PoF de 808 nm; c) Visão geral do sistema completo; d) LiDAR 2D e LiFi operando com PoF; Sistema PoF de 976 nm.

Os parâmetros de potência elétrica e eficiência de transmissão obtidos para cada enlace estão sintetizados na Tabela 1. O nó de acesso do usuário final, ao receber uma potência elétrica convertida de aproximadamente 10,8 W após a transmissão pelo cabo híbrido de 200 metros, sustentou taxas de transmissão estáveis de 680 Mbps no *uplink* FSO e 500 Mbps no *downlink* VLC, empregando 256-QAM como ordem de modulação.

Tabela 1: Parâmetros de potência elétrica e eficiência de transmissão para cada enlace PoF.

HPLD (λ)	Dispositivo	Necessário (W)	Total (W)	Disponível (W)	OPTE (%)	PTE (%)
808 nm	VLC Laser	0.136				
	GPON/WiFi 6	4.800	5.511	10.819	74.6	33.8
	Rx Module	0.575				
976 nm	LiDAR 2D	2.400	13.656	24.656	93.1	19.7
	LiFi	11.256				

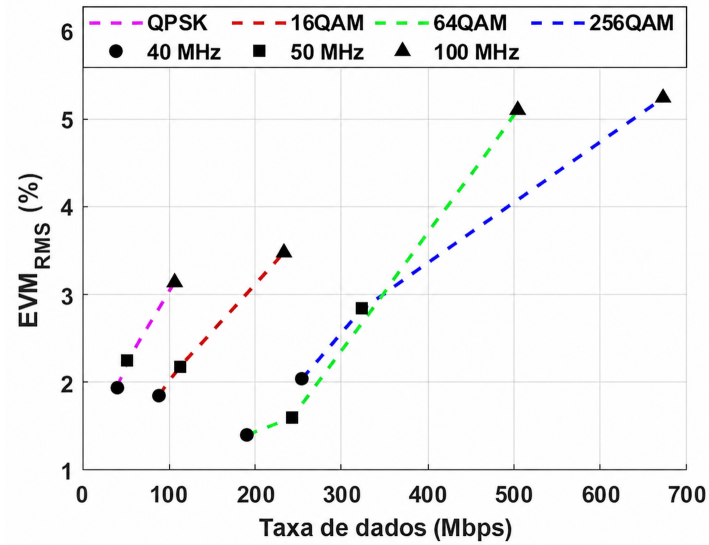


Figura 14: EVM de downlink em função da taxa de transferência para diferentes formatos de modulação (QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM) e larguras de banda (40 MHz, 50 MHz e 100 MHz).

A integridade dos sinais foi avaliada por meio do EVM_{RMS} , registrando valores médios de aproximadamente 2,9% para o enlace FSO (Figura 14) e 3,2% para o canal VLC (Figura 15).

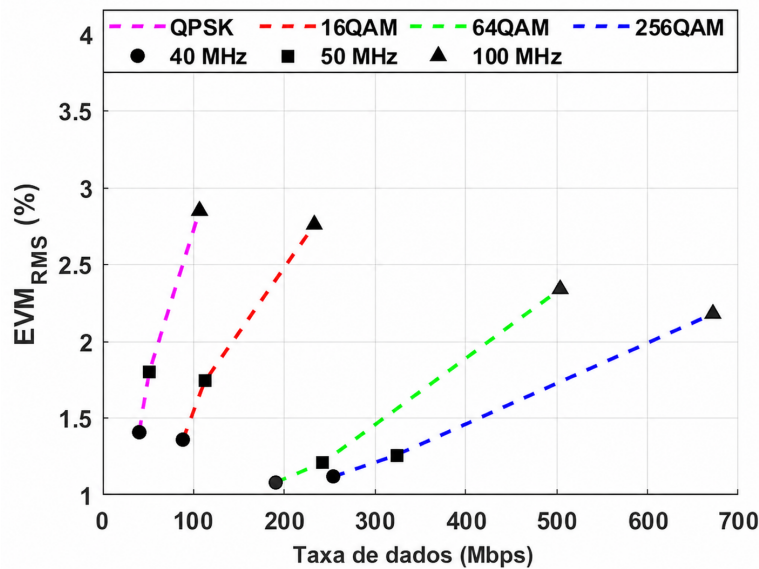


Figura 15: EVM de uplink em função da taxa de transferência para diferentes formatos de modulação (QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM) e larguras de banda (40 MHz, 50 MHz e 100 MHz).

Essas métricas situam-se abaixo do limite máximo de EVM_{RMS} de 3,5% estipulado pelas especificações do *3rd generation partnership project* (3GPP) para a constelação 256-QAM, atestando a linearidade e o reduzido nível de ruído dos estágios optoeletrônicos alimentados remotamente. Como alternativa ao laser vermelho, uma lanterna padrão de baixo custo foi empregada como transmissor óptico no sistema VLC. A Figura 16 apresenta uma comparação

do desempenho do EVM_{RMS} do laser vermelho (traço vermelho) e da lanterna (traço preto) para diferentes formatos de modulação em larguras de banda de 20 MHz, 40 MHz e 50 MHz. Como mostrado na Figura 16(a), o EVM_{RMS} para 256-QAM aumenta consideravelmente em comparação com o laser vermelho, atingindo 6,5% na largura de banda de 50 MHz e excedendo o limite 3GPP de 3,5% em todas as larguras de banda avaliadas. Para 64-QAM (Figura 16(b)), o EVM_{RMS} mais alto alcançado é de 7,28%, enquanto valores de 10,44% e 10,16% são observados para 16-QAM (Figura 16(c)) e *quadrature phase shift keying* (QPSK) (Figura 16(d)), respectivamente.

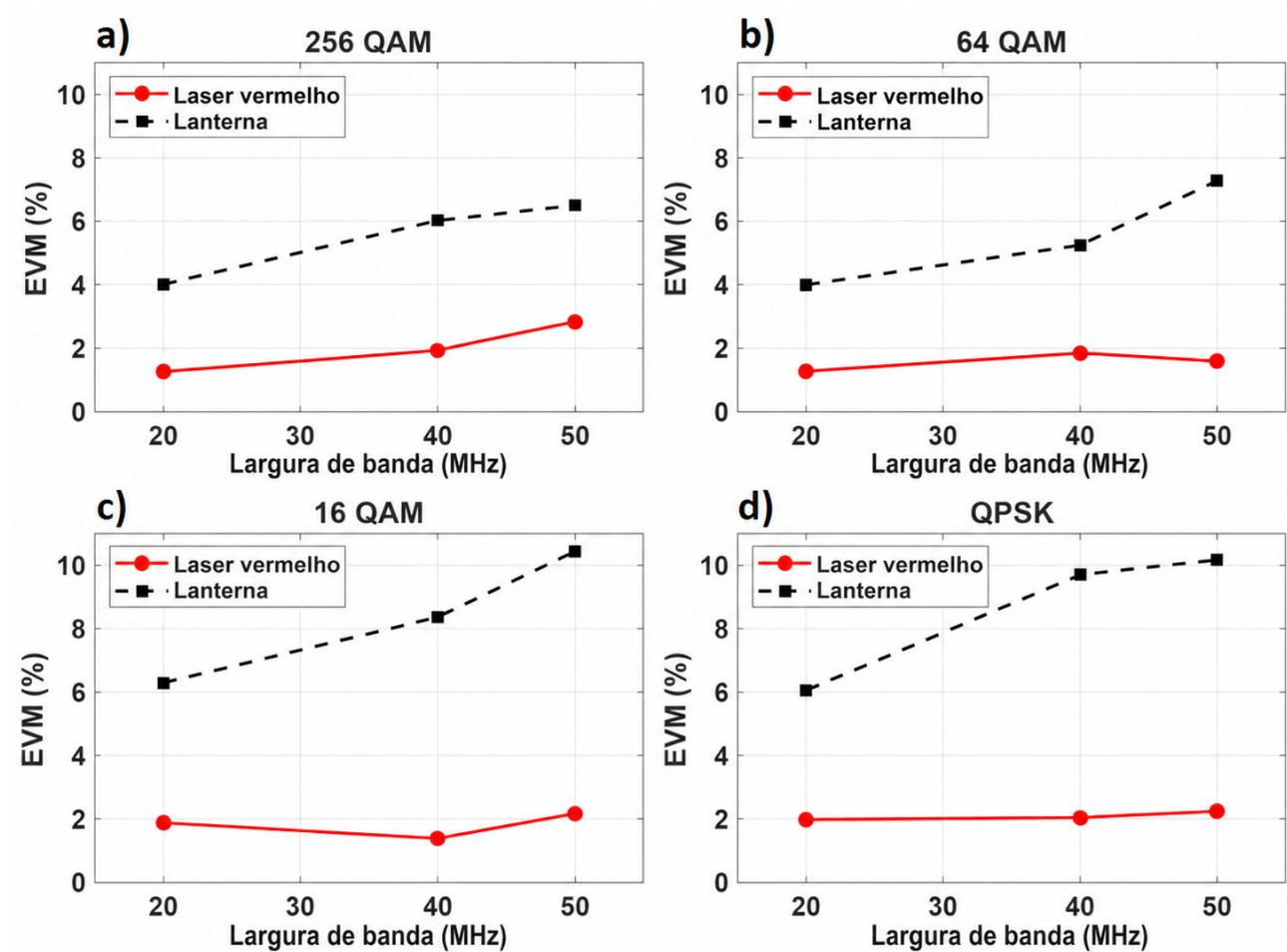


Figura 16: EVM em função da largura de banda usando uma lanterna para o downlink. (a) 256 QAM; (b) 64 QAM; (c) 16 QAM; (d) QPSK.

O modem GPON/Wi-Fi 6, posicionado na camada do usuário final, é empregado para fornecer conectividade à Internet e pode adicionalmente habilitar o descarregamento de Wi-Fi, contribuindo para a redução da latência, melhoria da cobertura da quinta rede 5G e aumento das taxas de dados. A Figura 17 ilustra a estabilidade das taxas máximas de transmissão de *uplink* e *downlink* do modem Wi-Fi 6 quando alimentado via PoF.

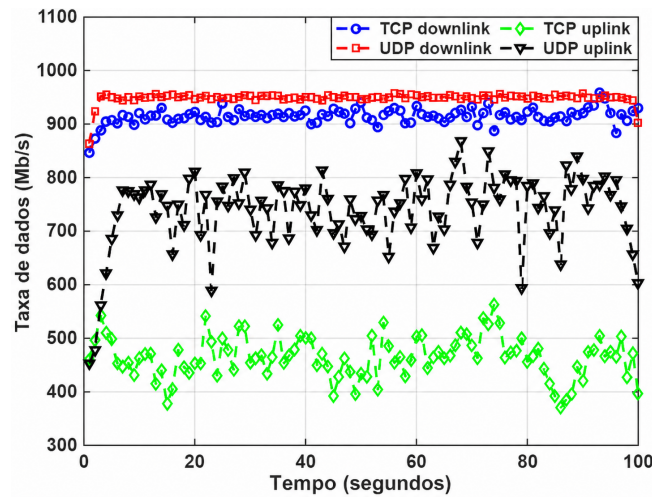


Figura 17: Desempenho em termos de taxa de dados TCP e UDP do sistema Wi-Fi 6 alimentado por PoF.

O *downlink* atingiu valores máximos de taxa de dados *transmission control protocol* (TCP) e *user datagram protocol* (UDP) de 959 Mbps e 958 Mbps, respectivamente, enquanto o *uplink* alcançou 562 Mbps e 867 Mbps. A maior flutuação observada no *uplink* é atribuída principalmente à transmissão sem fio do *notebook* para o modem Wi-Fi 6. No subsistema de aplicação militar, a potência elétrica disponível de 24,6 W a partir da fonte de 976 nm garantiu o escoamento estável de dados via LiFi, atingindo uma taxa de dados de 152 Mbps no *downlink* e 135 Mbps no *uplink* (Figura 18).

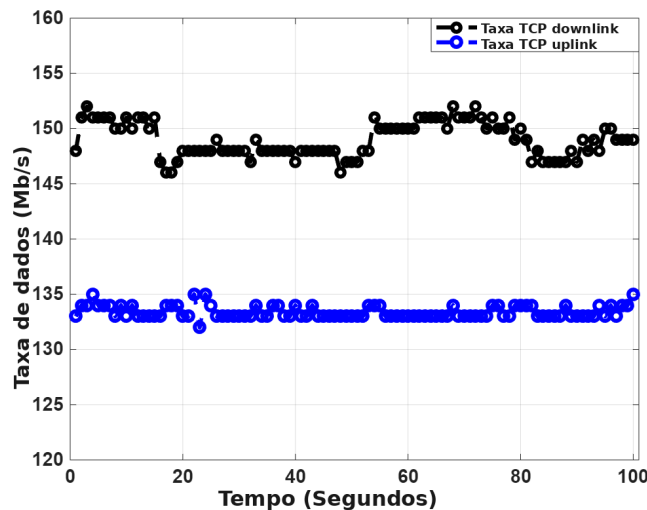


Figura 18: Desempenho de throughput TCP do sistema LiFi alimentado por PoF.

Simultaneamente, o sensor LiDAR 2D foi avaliado quanto à precisão e estabilidade temporal do mapeamento espacial sob alimentação fotônica, conforme apresentado na Figura 19.

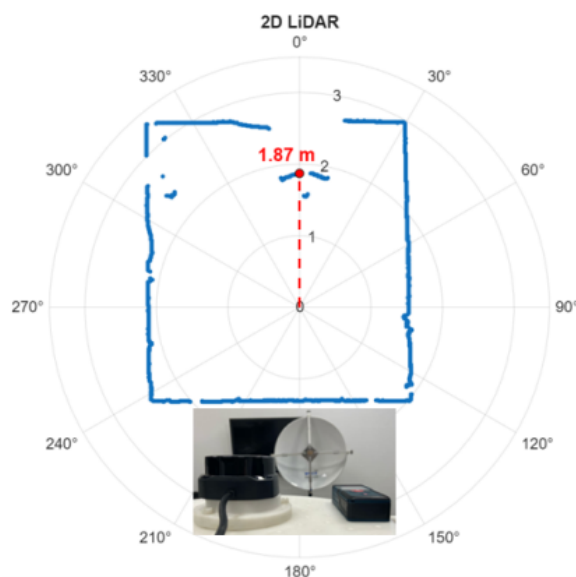


Figura 19: Perfil de distância polar 2D LiDAR alimentado por PoF.

Os dados de telemetria foram analisados em coordenadas polares, considerando a distância polar e a posição angular de alvos estáticos posicionados no perímetro de cobertura. Em ensaios contínuos com intervalos de amostragem de 5 minutos, a distância polar medida apresentou um valor médio estável de 2,004 metros, com um desvio padrão inferior a 1,2 mm. De igual modo, a coordenada angular manteve-se altamente estável, registrando um desvio padrão abaixo de 0,04°. Esses resultados numéricos demonstram a ausência de flutuações ou desvios sistemáticos nas leituras geométricas, confirmando que os estágios de regulação CC/CC mitigam com eficácia eventuais ruídos de intensidade óptica provenientes do laser de alta potência.

4.2.2 Enlace RPoF analógico e impacto da amplificação Raman distribuída

4.2.2.1 Descrição do Enlace de Longo Alcance e Configurações de Laser Como complemento voltado à extensão do alcance de transporte óptico para 10 km de fibra monomodo convencional (SMF-28), conduziu-se um ensaio focado na coexistência entre sinais analógicos de radiofrequência RoF e sistemas PoF. Avaliou-se o impacto linear e de ruído comparando duas configurações de *high power laser sources* (HPLS), destinadas simultaneamente à alimentação remota e à geração de ganho óptico distribuído na infraestrutura.

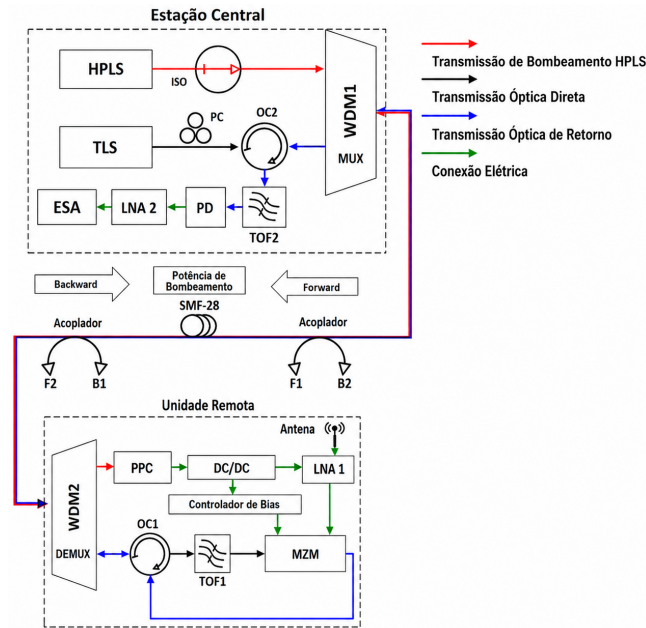


Figura 20: Ligação RPoF integrada com amplificação Raman óptica.

Avaliou-se o impacto linear e de ruído comparando duas configurações de fontes HPLS destinadas tanto à alimentação remota quanto à geração de ganho óptico distribuído. A primeira abordagem, denominada configuração baseada em Raman, emprega uma fonte HPLS em 1480 nm injetada em contra-propagação, fornecendo ganho direto ao canal de dados analógicos operando em 1550 nm. Em contrapartida, a configuração baseada na banda *erbium doped fiber amplifier* (EDFA) utiliza um HPLS posicionado em 1550 nm, cuja potência óptica residual após o transporte é direcionada ao bloco de conversão fotovoltaica, ao passo que o canal de sinal de dados é deslocado para a janela de 1610 nm. A Figura 21 apresenta o diagrama em blocos do sistema RPoF integrado com amplificação Raman.

4.2.2.2 Resultados Obtidos e Análise Comparativa de Desempenho A Figura 21 apresenta a comparação de ganho Raman em função da potência óptica de excitação da HPLS. O sistema baseado em Raman, utilizando HPLS em 1480 nm, atingiu ganho óptico máximo de 28,5 dB com injeção de 35 dBm, disponibilizando 30,5 dBm (1,1 W) no PPC, mas apresentou instabilidades por depleção de bomba a 36 dBm. Em contrapartida, a configuração associada à banda do EDFA, com HPLS em 1550 nm, alcançou ganho de 29,5 dB a 36 dBm, assegurando maior estabilidade e fornecimento contínuo de potência óptica remota.

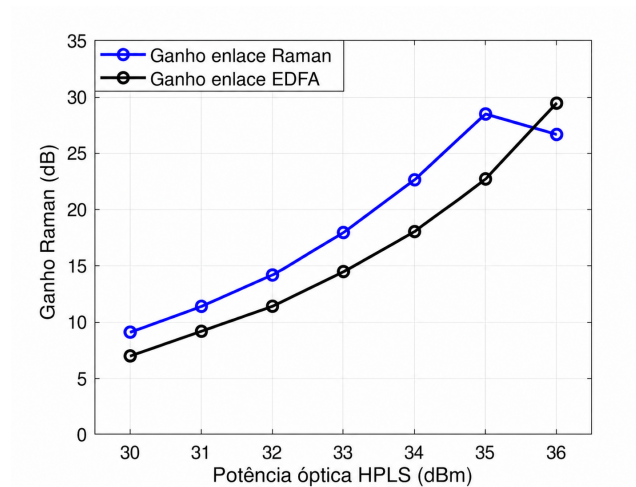


Figura 21: Ganho Raman em função da potência óptica de excitação proveniente do HPLS.

A avaliação do RoF revelou ganhos de radiofrequência RF equivalentes, registrando 21,3 dB a 35 dBm para o enlace Raman e 20,9 dB a 36 dBm para o esquema EDFA. Contudo, a transmissão na janela de 1550 nm superou a de 1480 nm ao apresentar menor *noise figure* (NF) e maior eficiência de transmissão de potência geral, devido ao menor coeficiente de atenuação linear intrínseco da fibra de sílica nessa faixa espectral.

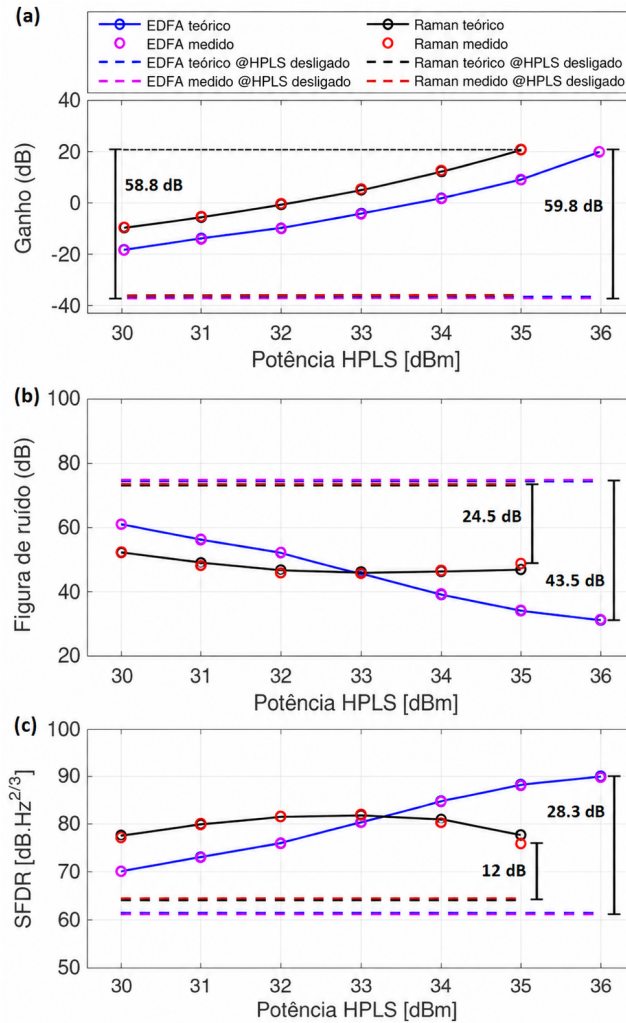


Figura 22: Ganho Raman para ligações baseadas em Raman e em EDFA.

O ensaio comprova a viabilidade da integração de sistemas PoF com amplificação distribuída em enlaces de 10 km. Entre as abordagens avaliadas, a arquitetura em 1550 nm consolida-se como a alternativa mais robusta para redes de transporte móveis, pois mitiga os efeitos de depleção em alta potência, reduz as penalidades de ruído analógico no canal de dados e otimiza a entrega de energia elétrica remota.

4.3 Conclusão

Os resultados obtidos validam a viabilidade técnica e a estabilidade operacional do emprego de arquiteturas baseadas em PoF para o atendimento dos requisitos de transporte e acesso em redes móveis de futura geração. A implementação experimental da rede FON heterogênea demonstrou a capacidade de centralizar e distribuir potências elétricas estáveis de até 24,6 W através de enlaces de fibra, garantindo o funcionamento de múltiplos serviços de OWC de alta taxa (FSO, VLC e LiFi) de forma integrada com sensoriamento óptico bidimensional. A ausência de flutuações operacionais nos subsistemas consolida essa abordagem como uma solução escalável, imune a EMI e com isolamento galvânico adequado para aplicação tanto em cenários civis de expressiva densidade quanto em ambientes militares estratégicos. Simultaneamente, a análise comparativa de enlaces RPoF assistidos por amplificação Raman distribuída demons-

trou que, embora os níveis de ganho obtidos sejam equivalentes para ambas as fontes testadas, o emprego da janela de 1550 nm otimiza a eficiência de conversão energética global e preserva a integridade linear do sinal analógico de RF, em função do perfil de atenuação intrínseco do meio de transmissão.

5 Conclusão Geral

Este relatório apresentou avanços relacionados à concepção e validação experimental de arquiteturas de transporte voltadas às futuras redes 6G, explorando diferentes abordagens baseadas na integração entre tecnologias ópticas e sem fio. Os estudos desenvolvidos contemplaram desde enlaces MIMO assistidos por A-RoF até arquiteturas híbridas envolvendo FSO, PoF e sistemas ópticos integrados para comunicação e sensoriamento.

Inicialmente, foi avaliado o desempenho de um sistema MIMO 2×2 assistido por um enlace A-RoF diretamente modulado. Os resultados experimentais demonstraram a viabilidade da utilização dessa tecnologia como solução de *fronthaul* de baixa complexidade para aplicações em regiões remotas e subatendidas. As medições realizadas evidenciaram a influência conjunta dos níveis de potência óptica e de radiofrequência sobre métricas de qualidade e desempenho, demonstrando que a correta configuração do sistema permite suportar modulações de elevada eficiência espectral e taxas de transmissão compatíveis com aplicações de acesso de próxima geração.

Posteriormente, foi apresentada a validação experimental de um enlace híbrido bidirecional multi-comprimento de onda baseado na integração entre MIMO, A-RoF e FSO. Os resultados obtidos demonstraram que a combinação de enlaces ópticos guiados e não guiados constitui uma alternativa promissora para aplicações de *midhaul* e *fronthaul* em cenários nos quais a implantação de fibra óptica é limitada por fatores geográficos, econômicos ou operacionais. A arquitetura proposta apresentou robustez operacional e capacidade de suportar comunicações bidirecionais simultâneas preservando níveis adequados de desempenho.

Adicionalmente, foram investigadas arquiteturas totalmente ópticas integrando comunicação, sensoriamento e transferência de energia por fibra. Os resultados obtidos evidenciaram o potencial de soluções convergentes baseadas em PoF, LiFi, LiDAR e sistemas RPoF, capazes de fornecer simultaneamente conectividade, alimentação energética e monitoramento do ambiente por meio de uma infraestrutura óptica compartilhada. A análise dos enlaces amplificados por Raman também permitiu avaliar estratégias para ampliação do alcance e melhoria do orçamento óptico dos sistemas.

De forma geral, os resultados apresentados ao longo desta atividade confirmam o potencial das tecnologias A-RoF, FSO, PoF e RPoF como elementos habilitadores para as futuras redes 6G. A convergência entre essas tecnologias possibilita o desenvolvimento de arquiteturas mais flexíveis, escaláveis e energeticamente eficientes, capazes de atender aos requisitos de conectividade previstos para diferentes cenários de implantação.

Como perspectivas futuras, destacam-se a investigação de técnicas avançadas de mitigação de não linearidades em sistemas A-RoF, a expansão dos estudos para frequências mais elevadas, incluindo faixas milimétricas e THz, bem como a integração dessas arquiteturas com aplicações emergentes de comunicação e sensoriamento conjunto. Tais avanços deverão contribuir para a consolidação de infraestruturas de transporte aptas a suportar os requisitos cada vez mais exigentes das redes móveis de próxima geração.

Referências

- [1] M. Latva-Aho, K. Leppänen *et al.*, “Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence,” 2019.
- [2] Series, M, “IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” *Recommendation ITU*, vol. 2083, no. 0, pp. 1–21, 2015.
- [3] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,” *IEEE network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
- [4] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE communications magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [5] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2014.
- [6] M. A. Khalighi and M. Uysal, “Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
- [7] M. Matsuura, “Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies,” in *Photonics*, vol. 8, no. 8. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, p. 335.
- [8] S. Arai, M. Kinoshita, and T. Yamazato, “Optical Wireless Communication: A Candidate 6G Technology?” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 104, no. 1, pp. 227–234, 2021.
- [9] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. T. Hossan, and Y. M. Jang, “Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 930–966, 2020.
- [10] M. Dindar, L. A. M. Pereira, L. L. Mendes, and M. A. Cox, “Hybrid Amplify and Forward TV Whitespace Radio Over Free-Space Optics,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 3457–3464, 2026.
- [11] R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. C. Ferreira, M. S. B. Cunha, E. R. Neto, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira S. Jr., “DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642–653, 2019.
- [12] L. A. M. Pereira, M. S. B. Cunha, F. B. F. Pinto, J. S. Ferreira, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira S. Jr., “Performance Evaluation of a Hybrid Analog Radio-over-Fiber and 2×2 MIMO Over-the-Air Link,” *Electronics*, vol. 15, no. 3, p. 629, 2026.
- [13] M. O. C. Dias, L. A. M. Pereira, M. S. B. Cunha, L. L. Mendes, F. R. Barbosa, and P. Cardieri, “Experimental Validation of a Bidirectional Multi-Wavelength MIMO A-RoF/FSO Hybrid Link,” Em processo de submissão no IEEE Access.

- [14] P. Kiohara, F. B. F. Pinto, E. S. Lima, L. A. M. Pereira, and Arismar Cerqueira S. Jr., “Optically Powered Joint Full-optical Communication/Sensing for B5G Networks,” Em processo de submissão no IEEE Photonics Technology Letters.
- [15] S. A. Khwandah, J. P. Cosmas, I. A. Glover, P. I. Lazaridis, N. R. Prasad, and Z. D. Zaharis, “Direct and External Intensity Modulation in OFDM RoF Links,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 1–10, 2015.
- [16] G. S. D. Gordon, M. J. Crisp, R. V. Penty, and I. H. White, “High-Order Distortion in Directly Modulated Semiconductor Lasers in High-Loss Analog Optical Links With Large RF Dynamic Range,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 23, pp. 3577–3586, 2011.
- [17] X. Fernando and A. Sesay, “Characteristics of directly modulated ROF link for wireless access,” in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)*, vol. 4, 2004, pp. 2167–2170 Vol.4.
- [18] T. H. Dahawi, Z. Yusoff, M. S. Salleh, and J. M. Senior, “Low-cost MIMO-RoF-PON architecture for next-generation integrated wired and wireless access networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 3, pp. 41–52, 2021.
- [19] C.-C. Wei, Z.-X. Xie, P.-H. Ting, Z.-W. Huang, and C.-T. Lin, “3×3 MIMO 60-GHz OFDM-RoF System With Long-Distance Wireless Transmission Enabled by MIMO Volterra Filtering,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 20, pp. 6860–6866, 2022.
- [20] G. Xu, J. Liu, W. Liu, Y. Chen, T. Liu, and S. Zhong, “Analog Predistorter for RoF Fronthaul Link Excited by a 400MHz Bandwidth 5G NR Signal,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 71, no. 8, pp. 3975–3979, 2024.
- [21] R. Zhu, X. Zhang, B. Hraimel, D. Shen, and T. Liu, “Broadband Predistortion Circuit Using Zero Bias Diodes for Radio over Fiber Systems,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 21, pp. 2101–2104, 2013.
- [22] M. Noweir, M. Helaoui, D. Oblak, W. Chen, and F. M. Ghannouchi, “Linearization of Radio-over-Fiber Cloud-RAN Transmitters Using Pre-and Post-Distortion Techniques,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 7, pp. 339–342, 2021.
- [23] M. U. Hadi, K. U. Danyaro, A. AlQushaibi, R. Qureshi, and T. Alam, “Digital Predistortion Based Experimental Evaluation of Optimized Recurrent Neural Network for 5G Analog Radio over Fiber Links,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 19 765–19 777, 2024.
- [24] S. M. Alamouti, “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications,” *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 2002.
- [25] L. A. M. Pereira, M. S. B. Cunha, F. B. Pinto, J. S. Ferreira, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira S. Jr., “Integration of Directly Modulated Analog Radio-over-Fiber with 2x2 MIMO Systems,” in *2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2025, in press.
- [26] Y. Li, F. Wang, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “Analog Radio-over-Fiber-Aided Optical-Domain MIMO Signal Processing for High-Performance Low-Cost Radio Access Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 126–132, 2021.

- [27] P. Singh and E. H. Kaur, “Analysis of FSO Based RoF-WDM System With Advance Intensity Modulation Techniques Under Various Atmospheric Conditions,” in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. IEEE, 2018, pp. 445–449.
- [28] N. K. Srivastava and R. K. Gangwar, “Radio-Over-Fiber(RoF) for 5G Fronthaul Transport,” in *2024 IEEE 11th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 2024, pp. 1–5.
- [29] C. Shekhar, A. A. B. Raj, Z. Ghassemlooy, and A. K. Majumdar, “Spectral segmentation-based rofso-channel’s mixed-rf-signal demodulation technique for the outdoor-optical 6g era network,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 17, no. 9, pp. 783–795, 2025.
- [30] C. H. de Souza Lopes, E. Saia Lima, and Arismar Cerqueira S. Jr., “RoF/FSO-based Fronthaul for 5G Systems and Beyond,” in *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2021, pp. 1–3.
- [31] J. B. Rosolem, “Power-over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities,” in *Optical fiber and wireless communications*. IntechOpen, 2017.
- [32] G. Li, Z. Zhang, R. Zhou, X. Gu, and T. Zhai, “Power-over-Fiber Co-Transmission with Analog Radio-over-Fiber over a Single Standard Single-Mode Fiber,” in *Photonics*, vol. 13, no. 2. MDPI, 2026, p. 168.