Brasil 6G

Projeto Brasil 6G
Fase III

Atividade 2.3 - Concepção da Rede de Transporte para Rede 6G - Parte 1

31/07/2025

Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	23/06/2025	Arismar Cerqueira Sodré Junior Eduardo Saia Lima Felipe Batista Faro Pinto Matheus Sêda Borsato Cunha Letícia Carneiro de Souza Luiz Augusto Melo Pereira Rubiane Heloisa Oliveira Paulo Henrique Kiohara Acyoli Bastos	Elaboração de conteúdo
2	31/07/2025	Luiz Augusto Melo Pereira Eduardo Saia Lima Daniely Gomes Silva Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1 Diagrama em blocos para o sistema A-RoF com supressão de SBS. DML - *directly modulated laser*, EDFA - *Erbium-doped fiber amplifier*; OC - *optical circulator*; VOA - *variable optical attenuator* ; SMF - *single-mode fiber*; PD - *photodetector*; USRP - *universal software radio peripheral*. 3
2 Fotografia da configuração experimental utilizada no sistema A-RoF com supressão de SBS. 4
3 Efeito da modulação de fase na potência óptica transmitida e refletida em função da potência óptica na entrada da SMF. 6
4 Impacto da variação da RF nas potências ópticas transmitida e refletida. 7
5 Espectro elétrico fotodetectado. 7
6 Desempenho da DPD baseada em aprendizado de máquina, em termos de EVM_{RMS}. 8
7 Diagrama em blocos de um sistema MIMO assistido por A-RoF. PC - computador pessoal; USRP - periférico universal de rádio por software; SMF - fibra monomodo; VOA - atenuador óptico variável; PM - monitor de potência. 9
8 Fotografia do arranjo experimental. 11
9 EVM_{RMS} em função da potência do sinal de RF que modula a portadora óptica. 11
10 Avaliação de EVM_{RMS} e taxa de transmissão em função da potência óptica incidente na ERB. 12
11 Espectros de RF transmitido e recebido na direção de *downlink*, considerando uma potência de entrada de $-12{,}9$ dBm no módulo RoF. 13
12 Espectros de RF transmitido e recebido na direção de *downlink*, considerando uma potência de entrada de $-2{,}2$ dBm no módulo RoF. 13
13 Diagrama em blocos da implementação do sistema OWC/RF 5G NR alimentado opticamente. 15
14 Implementação do sistema OWC/RF 5G NR alimentado opticamente. (a) Fotografia do experimento do lado do transceptor FSO e do Núcle 5G. (b) Fotografia do experimento do lado do enlace de 30 m e transceptor FSO. 16
15 Fotografia do experimento mostrando a implementação do sistema PoF e da femtocélula. 17
16 Caracterização de *throughput* e latência do enlace FSO em função do tamanho dos pacotes. 18
17 Medições de potência elétrica na saída do sistema PoF durante 60 minutos. . . . 20
18 Medições de espectro em RF para modos *uplink* e *downlink* nos três cenários avaliados: B2B, alimentação convencional com FSO e alimentação via PoF com FSO. 20
19 Medições de vazão para modos *uplink* e *downlink* considerando: (i) femtocélula com ligação B2B, (ii) femtocélula com FSO alimentada por fonte convencional e (iii) femtocélula com FSO alimentada por PoF. 21
20 Fotografia do arranjo experimental do sistema PoF. 24
21 Potência elétrica de saída do PPC em função da potência óptica de saída do HPLD injetada no sistema PoF. 24
22 Medidas de potência óptica e elétrica na entrada e saída do PPC ao longo de 60 minutos de teste. 25

23 Diagrama de blocos do sistema RPoF proposto. HPLD - *high-power laser diode*; MMF - fibra multimodo; PPC - *photovoltaic power converter*; TX - transmissor; RX - receptor; LNA - amplificador de baixo ruido; LD - diodo laser; EA - amplificador elétrico; PD - fotodetector; SMF - fibra monomodo; RoF - radio sobre fibra. 27
24 Fotografia do arranjo experimento do sistema RPoF. AWG - *arbitrary waveform generator*; VSG - *vector signal generator*; VSA - *vector signal analyzer*; HPLD - *high-power laser diode*; MMF - fibra multimodo; PPC - *photovoltaic power converter*; SMF - fibra monomodo. 27
25 Medidas de EVM_{RMS} em função da potência de RF na entrada do módulo RoF RX_1 para um sinal de descida centrado em 3.5 GHz com 50 MHz de banda e modulação 16-QAM. 28
26 Medidas de EVM_{RMS} em função da taxa de dados do sinal de descida centrado em 3.5 GHz. 29
27 Medidas de EVM_{RMS} em função da taxa de dados do sinal de subida centrado em 2.1 GHz. 30

Lista de Tabelas

1 Caracterização da Femtocélula 19

Acrônimos

3GPP *3rd generation partnership project*
5G quinta geração de comunicações móveis
5G-NR 5G *new radio*
6G sexta geração de comunicações móveis
AR *augmented reality*
A-RoF *analog radio-over-fiber*
AWG *arbitrary waveform generator*
AR *augmented reality*
B2B *back-to-back*
B5G *beyond* 5G
BER *bit error rate*
BS *base station*
CAPEX *capital expenditures*
CO *central office*
CPRI *common public radio interface*
C-RAN *centralized radio access network*
DCF *dichroic cube filters*
DL *downlink*
DML *directly modulated laser*
DPD *digital pre-distortion*
D-RoF *digital radio over fiber*
E/O *electrical-to-optical*
EA *electrical amplifier*
eCPRI *enhanced common public radio interface*
EDFA *Erbium-doped fiber amplifier*
ERB estação radiobase
EVM_{RMS} *root mean square error vector magnitude*
FDD *frequency division duplex*
FiWi *fiber-wireless*
FR1 *frequency range 1*
FSO *free space optical*
GFDM *generalized frequency division multiplexing*
GPS *global positioning system*
HPLD *high power laser diode*

IoE *Internet of everything*

LD *laser diode*

LNA *low-noise amplifier*

MAC *media access control*

MCF *multicore fiber*

MIMO *multiple-input multiple-output*

ML *machine learning*

MLP *multi layer perceptron*

MMF *multimode fiber*

mmWaves *millimeter waves*

MPP *maximum power point*

NR *new radio*

O/E *optical-to-electrical*

OBSAI *open base station architecture initiative*

OC *optical circulator*

OFDM *orthogonal frequency division multiplexing*

OPEX *operational expenditure*

OPM *optical power monitor*

ORI *open radio equipment interface*

OWC *optical wireless communications*

EA *electrical amplifier*

PD *photodetector*

PHY *physical layer*

PoF *power-over-fiber*

PPC *photovoltaic power converter*

PTE *power transmission efficiency*

PoE *Power-over-Ethernet*

QAM *quadrature amplitude modulation*

RAN *radio access network*

RAU *remote antenna unit*

ReLU *rectified linear unit*

RF radiofrequência

RoF *radio over fiber*

RPoF *radio- and power-over-fiber*

RX *receptor*

RSSI *received signal strength indicator*

RSRP *reference signal received power*

SA *stand-alone*

SBS *stimulated Brillouin scattering*

SDR *software defined radio*

SFP *small form-factor pluggable*

SMF *single-mode fiber*

SNR *signal-to-noise ratio*

SSS *secondary synchronization signal*

SSB *synchronization signal block*

THz tera-hertz

TVWS *TV white spaces*

TX *transmissor*

UL *uplink*

UHF *ultra high frequência*

USRP *universal software radio peripheral*

VLC *visible light communication*

VOA *variable optical attenuator*

VR *virtual reality*

VSG *vector signal generator*

WDM *wavelength division multiplexing*

Sumário

1 Introdução **1**

2 Rede de Transporte Baseada em A-RoF com Supressão de Efeito Brillouin e Compensação de Distorções Não Lineares **2**
2.1 Descrição do Experimento . . . 2
2.1.1 Aquisição do banco de dados . . . 4
2.1.2 Treinamento da DPD . . . 5
2.2 Resultados . . . 5
2.3 Conclusões . . . 8

3 Rede transporte com integração de A-RoF e MIMO 2×2 **8**
3.1 Integração do A-RoF em Sistemas MIMO . . . 9
3.2 Avaliação de Desempenho . . . 10
3.3 Conclusões . . . 13

4 Rede de transporte Baseada em Free Space Optics **14**
4.1 Implementação Experimental do FSO Para Comunicações de Última Milha . . . 15
4.2 Resultados e Discussões . . . 17
4.2.1 Caracterização do FSO . . . 17
4.2.2 Caracterização da Femtocélula . . . 18
4.2.3 Sistema Híbrido Alimentado Opticamente . . . 19
4.3 Conclusões . . . 21

5 Sistema PoF para Alimentação de Dispositivos em Redes de Transporte A-RoF **22**
5.1 Viabilização de Sistemas de Comunicações Full-Duplex de Próxima Geração em Gbps Aplicando a Integração de RoF e PoF . . . 23
5.1.1 Implementação do sistema PoF . . . 23
5.1.2 Implementação do sistema RPoF . . . 26
5.2 Conclusões . . . 30

6 Conclusões **32**

1 Introdução

A evolução da quinta geração de comunicações móveis (5G) para a sexta geração de comunicações móveis (6G) não introduz apenas melhorias em termos de largura de banda ou latência [1]. Trata-se de uma rede voltada para o usuário, que visa a consolidação de uma sociedade hiperconectada, inteligente e sensível ao contexto, com aplicações disruptivas que incluem comunicações holográficas em tempo real, veículos autônomos, e realidade aumentada distribuída e diversas outras aplicações [2]. Essa pluralidade de aplicações com diferentes requisitos, demanda que a arquitetura de rede seja flexível, especialmente a rede de transporte, a qual conecta as estação radiobases (ERBs) às centrais de processamento [3].

Neste cenário, tecnologias ópticas emergem como peças-chave para enfrentar os desafios impostos pelos requisitos rigorosos do 6G, tais como aumento da vazão agregada para a ordem de terabits por segundo, redução da latência, sincronização precisa entre os elementos da rede, resiliência a falhas e consumo energético otimizado [4]. Três tecnologias, em particular, destacam-se por sua capacidade de atender a essas exigências de forma complementar: o *analog radio-over-fiber* (A-RoF), o *free space optical* (FSO) e o *power-over-fiber* (PoF) [5, 6, 7].

O A-RoF permite a transmissão direta de sinais de radiofrequência (RF) por meio de enlaces ópticos, sem a necessidade de digitalização do sinal ou processamento complexo nas unidades remotas. Essa característica torna a arquitetura extremamente vantajosa para aplicações em redes *centralized radio access network* (C-RAN), pois desloca o processamento da rede para o *central office* (CO), permitindo ERBs mais simples, menos dispendiosas e com menor consumo de energia. Adicionalmente, a eliminação da quantização dos sinais reduz a largura de banda exigida na fibra, resultando em ganhos significativos de eficiência espectral [8].

Por sua vez, os enlaces FSO viabilizam comunicações ópticas ponto-a-ponto por meio do espaço livre, utilizando feixes colimados de luz infravermelha, geralmente em 1550 nm. Essa abordagem permite a implementação rápida de *fronthaul*/*backhaul* em cenários urbanos densos, ambientes temporários ou áreas onde o lançamento de cabos ópticos subterrâneos é inviável. Apesar da vulnerabilidade às condições atmosféricas adversas, a elevada taxa de transmissão, baixo custo e agilidade de instalação tornam o FSO uma solução estratégica complementar à fibra [9].

Por fim, o PoF aparece como uma inovação interessante para cenários em que a distribuição de energia elétrica convencional é impraticável, como em áreas remotas ou em arquiteturas ultradensas com milhares de células pequenas (*small cells*). Essa tecnologia permite transmitir potência elétrica e dados simultaneamente por fibras ópticas, utilizando fontes ópticas de alta potência e conversores fotovoltaicos nos dispositivos terminais. Isso elimina a necessidade de infraestrutura elétrica paralela e simplifica a instalação [10].

O presente relatório detalha os desenvolvimentos mais recentes das pesquisas do Inatel na concepção e implementação experimental dessas tecnologias, com foco em soluções escaláveis, energeticamente eficientes e compatíveis com os requisitos técnicos das futuras redes móveis. São discutidas abordagens inovadoras como o uso de pré-distorção digital baseada em aprendizado de máquina para linearização de enlaces A-RoF, a integração de A-RoF com sistemas *multiple-input multiple-output* (MIMO) 2×2, bem como uma prova de conceito de uma célula alimentada exclusivamente por PoF em conjunto com enlace FSO. O relatório sistematiza resultados experimentais detalhados, destaca as contribuições originais do grupo e propõe caminhos viáveis para a adoção dessas tecnologias em larga escala na futura infraestrutura nacional de comunicações 6G.

2 Rede de Transporte Baseada em A-RoF com Supressão de Efeito Brillouin e Compensação de Distorções Não Lineares

Redes de transporte ópticas que empregam padrões baseados em *digital radio over fiber* (D-RoF) estão sendo utilizadas nos últimos anos. Os principais padrões de transmissão digital comumente adotados para D-RoF incluem: *common public radio interface* (CPRI), *enhanced common public radio interface* (eCPRI), *open base station architecture initiative* (OBSAI) e *open radio equipment interface* (ORI). Contudo, o aumento da vazão de dados e a adoção de transmissões MIMO em redes 5G e nas futuras redes 6G, resultam em taxas de transmissão extremamente elevadas, o que representa um desafio significativo para as soluções baseadas em D-RoF. Essa limitação torna-se ainda mais crítica com o aumento da frequência de operação, que exige maiores taxas de amostragem. O padrão CPRI, por exemplo, utiliza de 4 a 20 bits para representar cada amostra dos componentes de quadratura e fase dos sinais transmitidos. Como consequência, o CPRI apresenta baixa eficiência espectral, já que os recursos de banda disponíveis são rapidamente consumidos com o aumento da taxa de transmissão. Diante disso, diversos métodos têm sido propostos visando melhorar a eficiência da transmissão em sistemas D-RoF, por meio da aplicação de técnicas de compressão de dados [11, 12]. Paralelamente, observa-se um crescente interesse na adoção da solução A-RoF para o *fronthaul*, como alternativa para superar essas limitações.

Os sistemas A-RoF permitem o transporte de sinais de RF diretamente por enlaces ópticos, eliminando etapas de conversão de analógico para digital e vice versa, simplificando a arquitetura da *base station* (BS). Esses sistemas oferecem vantagens importantes, como maior eficiência espectral, menor complexidade e redução de custos, quando comparado ao D-RoF. No entanto, sistemas A-RoF também enfrentam limitações impostas por efeitos não lineares e dispersivos da fibra óptica, como a dispersão cromática e o *stimulated Brillouin scattering* (SBS), especialmente em enlaces de alta potência e longa distância.

Esta seção descreve a o uso da tecnologia A-RoF, aplicados a rede de transporte, visando futuras redes 6G. O primeiro trabalho discute a implementação de um sistema A-RoF com supressão de SBS e linearização via *digital pre-distortion* (DPD) baseada em *machine learning* (ML). A técnica de mitigação do SBS é baseada na inserção de um modulador de fase, que redistribui espectralmente a potência do sinal óptico, elevando o limiar de início do efeito. Para compensar as distorções introduzidas pela operação não linear do modulador óptico, é empregada uma técnica de DPD baseada em ML, previamente desenvolvida pelo Inatel. O sistema proposto foi projetado para aplicações em enlaces ópticos de longa distância, com potencial de escalabilidade para faixas de frequência mais elevadas.

Esta subseção descreve a arquitetura de A-RoF investigada, bem como apresenta a análise de seu desempenho em ambiente de laboratório. Além disso, são detalhados o procedimento utilizado para a aquisição da base de dados e o processo de treinamento da DPD.

2.1 Descrição do Experimento

O sistema A-RoF proposto, com supressão de SBS e aplicação de DPD, foi concebido visando enlaces de comunicação óptica de longa distância, com potencial de aplicação em regiões remotas. Nessas regiões, busca-se maximizar o raio de cobertura da rede, a fim de proporcionar conectividade em áreas extensas. Para isso, adotou-se a faixa de *ultra high frequency* (UHF), com

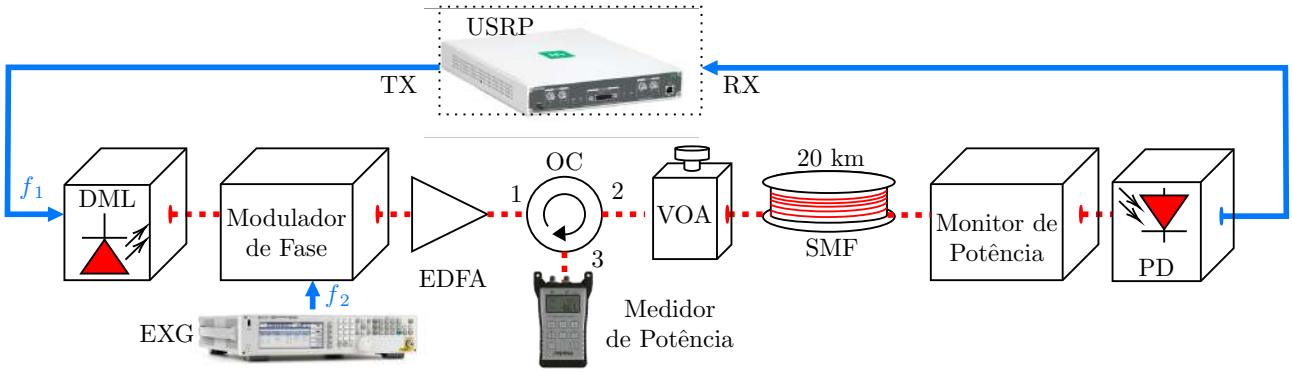

Figura 1: Diagrama em blocos para o sistema A-RoF com supressão de SBS. DML - *directly modulated laser*, EDFA - *Erbium-doped fiber amplifier*; OC - *optical circulator*; VOA - *variable optical attenuator* ; SMF - *single-mode fiber*; PD - *photodetector*; USRP - *universal software radio peripheral*.

frequência central (f_1) em 707 MHz, por permitir uma ampla cobertura geográfica. A Figura 1 ilustra o diagrama em blocos do sistema experimental. Um *directly modulated laser* (DML) (OZ101 Series) foi utilizado para modular uma portadora óptica centrada em 1550 nm com um sinal de RF, gerado por uma *universal software radio peripheral* (USRP). Essa técnica de modulação é particularmente interessante para este cenário de comunicação, por ser menos dispendiosa e de implementação mais simples quando comparada àquelas que utilizam modulação externa. A forma de onda *generalized frequency division multiplexing* (GFDM) foi adotada para esta análise. Trata-se de uma forma de onda não ortogonal, que apresenta menor emissão fora de faixa e maior eficiência espectral em comparação ao *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM), sendo, portanto, interessante para sistemas de comunicação que demandam alto desempenho espectral [13]. Empregou-se um modulador de fase com a finalidade de redistribuir a potência óptica por uma ampla gama de componentes em frequências das combinações lineares e não lineares das componentes espectrais envolvidas, ou seja, f_1 e f_2. O sinal senoidal que é inserido no modulador de fase (f_2), é produzido por um EXG N5173B, da Keysight. Essa redistribuição reduz a densidade de potência óptica injetada na fibra, o que contribui para elevar o limiar de SBS. Ou seja, o espalhamento de Brillouin, responsável por gerar um sinal que se propaga no sentido oposto ao sinal incidente, permanece presente. No entanto, o limiar para sua ativação é deslocado para níveis de potência mais elevados. Isso permite operar com potências ópticas com valores mais elevados, o que é interessante em enlaces de longo alcance.

Na sequência, um *Erbium-doped fiber amplifier* (EDFA) é utilizado para amplificar o sinal óptico, presente saída do modulador de fase. O EDFA é utilizado para amplificar sinais ópticos diretamente no domínio óptico, sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico. Ele utiliza uma fibra dopada com Érbio excitada por um laser de bombeamento, promovendo emissão estimulada e aumentando a potência do sinal. É amplamente empregado em sistemas *wavelength division multiplexing* (WDM) e enlaces de longa distância devido ao seu alto ganho, baixa taxa de ruído e compatibilidade com múltiplos banda de operação. Após o EDFA, um *optical circulator* (OC) é inserido com dois propósitos: possibilitar a medição da potência óptica refletida e proteger o EDFA contra possíveis reflexões. A potência óptica refletida é monitorada por meio de um medidor de potência óptica da Anritsu (modelo CMA5).

Na porta de transmissão do OC, foi adicionado um *variable optical attenuator* (VOA), que permite controlar a potência óptica de entrada de uma *single-mode fiber* (SMF) de 20 km.

Essa variação controlada possibilita investigar, de forma gradual, os efeitos da potência óptica sobre a SMF. Além disso, foi incluído um monitor de potência óptica *inline* para monitorar a intensidade óptica na entrada do *photodetector* (PD), evitando danos aos componentes sensíveis. O PD utilizado foi o modelo DX25HF, da Thorlabs, capaz de suportar até 20 dBm de potência óptica de entrada sem sofrer danos. A Figura 2 apresenta uma fotografia da configuração experimental utilizada.

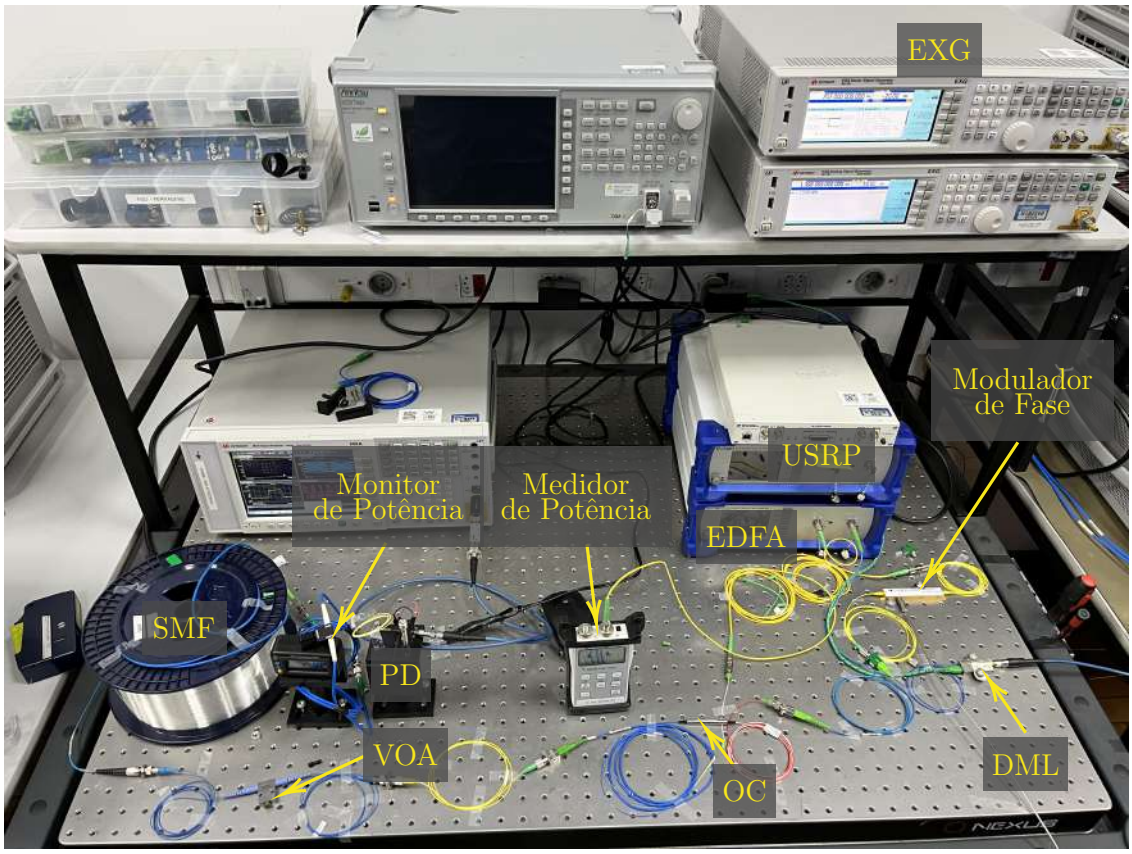

Figura 2: Fotografia da configuração experimental utilizada no sistema A-RoF com supressão de SBS.

2.1.1 Aquisição do banco de dados

A aquisição do banco de dados necessário para o treinamento do esquema de DPD proposto neste trabalho é realizada por meio da USRP. Todo o processo de geração digital da forma de onda e o controle do *front-end* de RF são implementados na plataforma GNU Radio. Além disso, o sistema de recepção, também é desenvolvido dentro do ambiente do GNU Radio. De modo geral, foi utilizado neste experimento um transceptor 5G customizado, desenvolvido pelo Inatel, que permite a inserção de novos blocos de processamento diretamente no GNU Radio [14]. Essa abordagem oferece grande flexibilidade, pois possibilita a criação e integração de blocos específicos para diferentes tarefas de processamento de sinal.

Nesse contexto, desenvolvemos um esquema de DPD baseado em aprendizado de máquina, com o objetivo de mitigar as distorções não lineares introduzidas pelas não linearidades do modulador óptico. O modelo de DPD utiliza uma rede neural do tipo *multi layer perceptron* (MLP) para executar uma tarefa de regressão supervisionada. Isso exige um conjunto de dados

representativo para treinar o modelo de forma eficaz.

A coleta de dados para o treinamento seguiu os seguintes passos: inicialmente, os sinais digitais transmitidos foram armazenados na saída digital da cadeia de transmissão, antes da conversão digital-analógica. Na recepção, os dados foram coletados após o sinal percorrer todo o sistema A-RoF e serem novamente amostrados digitalmente. Isso permite capturar sinais que percorreram o sistema A-RoF e extrair padrões de não linearidades inerentes desses sistemas. Assim, tanto os sinais transmitidos quanto os recebidos foram obtidos no domínio digital.

A coleta dessas amostras foi realizada utilizando blocos nativos do GNU Radio, como o *File Sink*, que permite armazenar os dados em arquivos binários. Esses arquivos podem ser facilmente processados posteriormente em linguagens como MATLAB, Python e outras. Antes do treinamento da rede neural, é fundamental realizar o sincronismo entre os sinais transmitidos e recebidos, de modo que cada amostra transmitida tenha sua correspondente amostra na recepção. Esse alinhamento é necessário para compensar os atrasos introduzidos ao longo da cadeia de transmissão e processamento do sinal.

2.1.2 Treinamento da DPD

A DPD implementada neste trabalho foi baseada em uma rede neural do tipo MLP. Essa rede é composta por uma camada de entrada, duas camadas ocultas e uma camada de saída. As camadas de entrada e de saída possuem dois neurônios cada, correspondentes às partes real e imaginária da forma de onda GFDM. As camadas ocultas contêm, respectivamente, 64 e 32 neurônios, valores definidos como um compromisso entre desempenho e complexidade computacional.

Nas camadas ocultas, foi utilizada a função de ativação *rectified linear unit* (ReLU), enquanto a camada de saída emprega uma função identidade, o que é uma abordagem comum em tarefas de regressão supervisionada. O treinamento do esquema de DPD consiste em fornecer à rede neural um banco de dados com exemplos de entrada e seus respectivos rótulos. Neste caso, os rótulos correspondem às amostras do sinal obtidas no lado da recepção, ou seja, o sinal original sem distorções. Por outro lado, as amostras de entrada são aquelas que passaram por todo o sistema A-RoF e, portanto, contêm as distorções não lineares que se deseja modelar.

Essa estratégia permite à rede neural aprender um conjunto de pesos que, ao aplicar transformações não lineares às amostras distorcidas, gere uma aproximação do sinal ideal (sem distorções). Após o treinamento, tanto os pesos quanto a arquitetura da rede podem ser salvos e carregados no projeto do GNU Radio. Para viabilizar a aplicação do modelo treinado, foi desenvolvido um novo bloco de processamento no GNU Radio. Esse bloco é responsável por carregar os parâmetros da rede neural (estrutura e pesos) e reconstruí-la para realizar inferências em tempo real sobre o sinal a ser pré-distorcido. Dessa forma, as distorções aplicadas pelo bloco de DPD possuem efeito oposto às distorções introduzidas pelo sistema A-RoF, resultando em uma saída linearizada ao final da cadeia de transmissão.

2.2 Resultados

Inicialmente, foi conduzida uma análise experimental dos efeitos da inserção de um modulador de fase no sistema, visando a mitigação do SBS. A Figura 3 apresenta a relação entre a potência óptica medida na saída da SMF e a potência óptica injetada em sua entrada. Para este experimento, a potência de entrada foi controlada por meio de um VOA.

Durante os testes, aplicou-se ao modulador de fase um sinal senoidal centrado em 600MHz

(f_2), com potência de RF de 24 dBm. A modulação em fase promove uma redistribuição espectral da potência óptica, dispersando-a em múltiplos componentes de frequência. Essa dispersão reduz a densidade espectral de potência óptica efetivamente injetada na SMF, resultando em uma redução do sinal óptico refletido devido ao SBS. Comparando-se com o sistema A-RoF operando nas mesmas condições, porém sem o modulador de fase, observou-se uma redução de até 1,5 dB na potência refletida no melhor cenário experimental. Vale destacar que aumentos na potência do sinal senoidal aplicado ao modulador tendem a intensificar esse efeito de mitigação. Contudo, a potência foi limitada a 24 dBm a fim de preservar a integridade do componente e evitar danos por sobrecarga.

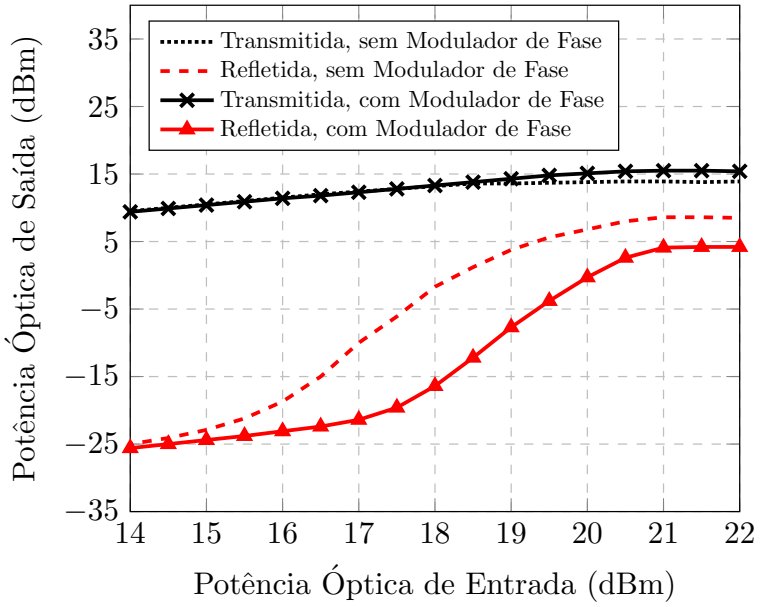

Figura 3: Efeito da modulação de fase na potência óptica transmitida e refletida em função da potência óptica na entrada da SMF.

A potência de RF aplicada à entrada do DML também foi variada, com o objetivo de investigar a interação entre os efeitos não lineares do modulador e o SBS. A Figura 4 apresenta as curvas de potência óptica transmitida e refletida, com e sem o uso de modulador de fase, mantendo-se fixa a potência óptica de entrada na SMF em 22 dBm. Observa-se que o aumento da potência de RF na entrada do DML resulta na redução da potência óptica refletida associada ao SBS. Esse comportamento está relacionado às não linearidades intrínsecas do DML, o qual incorpora um estágio de amplificação do tipo *low-noise amplifier* (LNA), já integrado ao módulo de transmissão. O aumento da potência de RF promove uma redistribuição espectral da energia, uma vez que tais não linearidades geram harmônicos e produtos de intermodulação na saída do modulador óptico, os quais são detectados pelo PD. Além disso, observa-se que a adição do modulador de fase contribui para uma redução adicional da potência óptica refletida devido ao SBS, quando comparado ao caso em que o modulador de fase não é utilizado.

A redistribuição espectral da potência, resultante dos efeitos não lineares associados ao aumento da potência de RF na entrada do DML, pode ser observada na Figura 5. Nela, nota-se a presença de harmônicos e produtos de intermodulação, que são componentes indesejados e devem ser atenuados antes da transmissão por meio de filtros de RF. Adicionalmente, as próprias antenas transmissoras atuam como elementos de filtragem, desde que a sua banda passante esteja adequadamente ajustada à faixa de frequência do sinal a ser transmitido, de

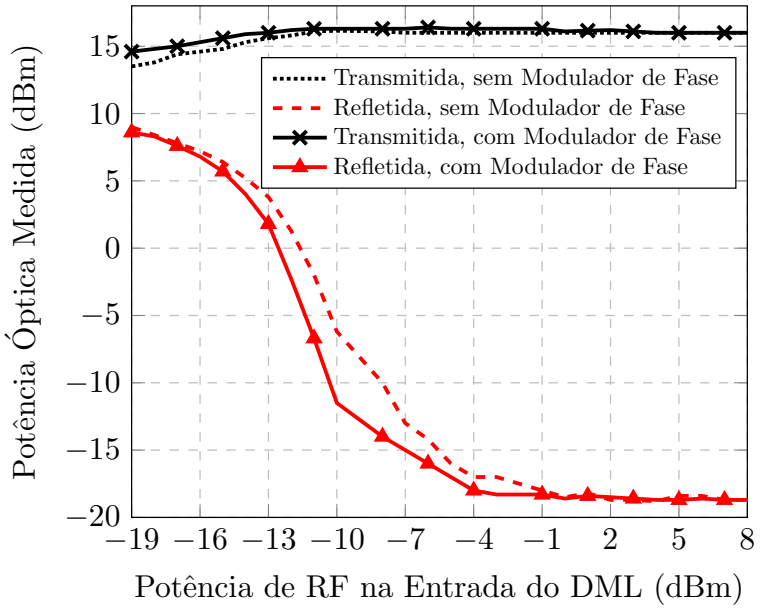

Figura 4: Impacto da variação da RF nas potências ópticas transmitida e refletida.

modo a garantir a cobertura eficiente da região de interesse.

Finalmente, avaliou-se o efeito da DPD baseada em aprendizado de máquina no sistema A-RoF com mitigação do efeito SBS. O esquema de DPD foi treinado conforme descrito na seção anterior e implementado em tempo real no transceptor 5G utilizado neste trabalho. Cabe destacar que a DPD empregada atua apenas dentro da banda do sinal, não resultando em melhorias na redução da emissão de espúrios fora da faixa de interesse. A Figura 6 apresenta as medidas de *root mean square error vector magnitude* ($\mathrm{EVM_{RMS}}$) em função da potência de RF aplicada à entrada do DML. Observa-se que o uso da DPD proporcionou uma melhoria de aproximadamente 2 dB no desempenho, quando comparado ao caso sem DPD. Em outras

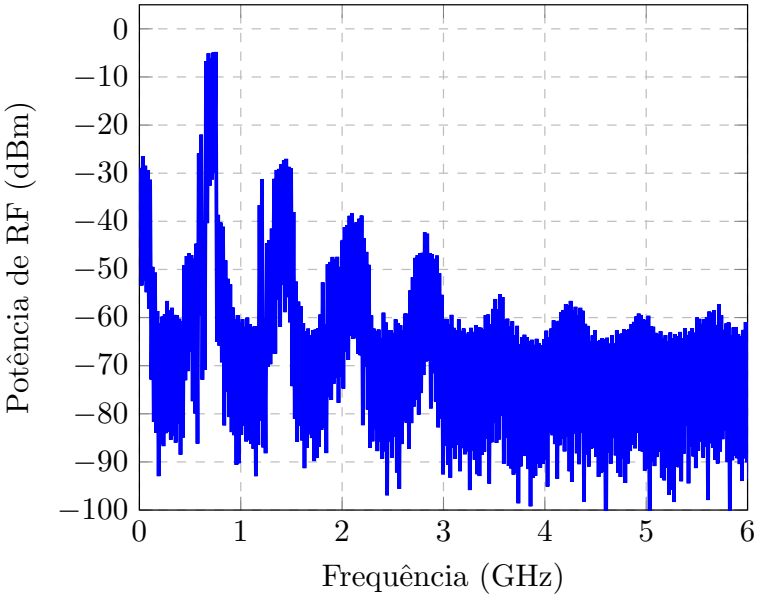

Figura 5: Espectro elétrico fotodetectado.

palavras, a utilização da DPD permite operar com potências de RF até 2 dB superiores, mantendo o mesmo valor de EVM_{RMS}. Ressalta-se que, em ambos os casos analisados, o modulador de fase estava presente para mitigação do SBS.

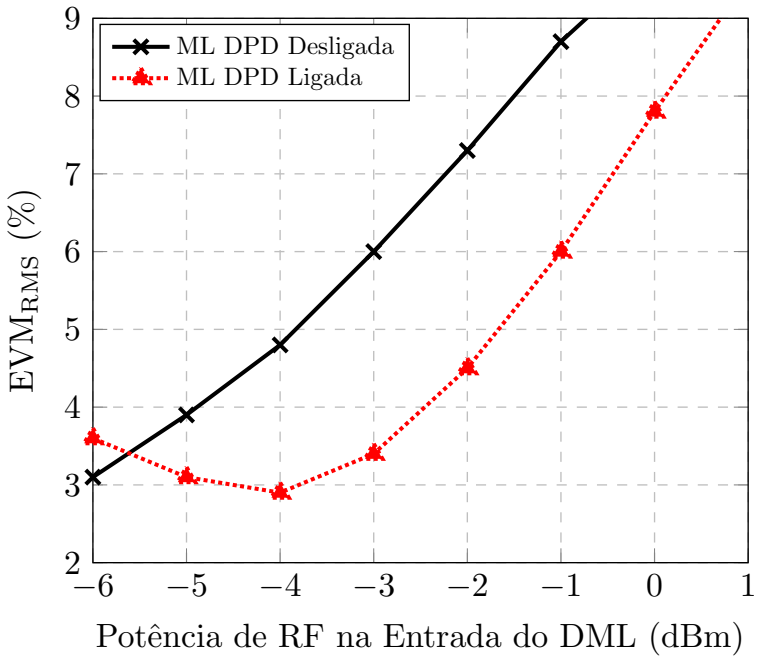

Figura 6: Desempenho da DPD baseada em aprendizado de máquina, em termos de EVM_{RMS}.

2.3 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação de desempenho de um sistema A-RoF assistido por DPD, com mitigação do efeito de SBS. O sistema proposto é particularmente relevante para aplicações em áreas remotas ou rurais, uma vez que possibilita a alocação dinâmica da potência de RF, aumentando a flexibilidade e a eficiência da transmissão.

A combinação do modulador de fase com a técnica de DPD mostrou-se eficaz, ao permitir o tratamento conjunto dos efeitos não lineares nos domínios óptico e de RF. Essa abordagem integrada possibilitou a operação com potências ópticas elevadas na fibra, aumentando a potência disponível na etapa de fotodetecção da estação remota. Contudo, a elevação da potência óptica introduziu efeitos significativos de SBS, resultando em altos níveis de potência refletida. Observou-se que a operação em regiões não lineares na modulação direta contribui para a redução do SBS, embora à custa da introdução de distorções não lineares no sinal de RF. Tais distorções, entretanto, foram mitigadas por meio da aplicação de um esquema de DPD baseado em aprendizado de máquina, restabelecendo a qualidade do sinal transmitido.

3 Rede transporte com integração de A-RoF e MIMO 2×2

A integração de A-RoF em sistemas MIMO também foi investigada. Essas duas tecnologias são consideradas elementos-chave para ampliar a capacidade das redes e facilitar a conectividade em regiões remotas ou de difícil acesso. Em particular, arquiteturas A-RoF baseadas em modulação direta se destacam por sua simplicidade e menor custo, especialmente em comparação

com soluções de modulação externa, que exigem componentes adicionais e maior complexidade de controle [15]. Apesar de suas vantagens, a integração de sistemas A-RoF com arquiteturas MIMO ainda apresenta desafios técnicos importantes, como distorções não lineares, dispersão cromática principalmente em enlaces ópticos de longa distância. Diversos estudos têm investigado formas de mitigar essas limitações, especialmente para aplicações na faixa de ondas milimétricas. No entanto, a aplicação de sistemas A-RoF-MIMO em frequências mais baixas, como UHF, continua pouco explorada, embora seja essencial para ampliar a conectividade em áreas rurais e não atendidas. Está seção propõe, implementa e avalia uma arquitetura MIMO 2×2 assistida por um enlace A-RoF de modulação direta, com foco na cobertura de regiões remotas. Utilizando *software defined radio* (SDR) e modulação adaptativa baseada na estimativa da *signal-to-noise ratio* (SNR), o sistema é avaliado em condições realistas, como enlaces ópticos de 20 km e operação em multiplexação por WDM.

3.1 Integração do A-RoF em Sistemas MIMO

O cenário do sistema proposto é ilustrado na Figura 7. Uma plataforma baseada em SDR é utilizada para implementar todas as funcionalidades das camadas *physical layer* (PHY) e *media access control* (MAC) do transceptor customizado. Assume-se que as ERBs estão implantadas em regiões remotas para prover conectividade a áreas carentes ou não atendidas. Todo o processamento em banda base é centralizado na CO, que se conecta às ERBs por meio de um enlace óptico *fronthaul*. Esse enlace é realizado usando um sistema A-RoF com laser de modulação direta e detecção direta no receptor. Essa estratégia reduz significativamente os custos *operational expenditure* (OPEX) e *capital expenditures* (CAPEX) em comparação com uma implementação digital (D-RoF).

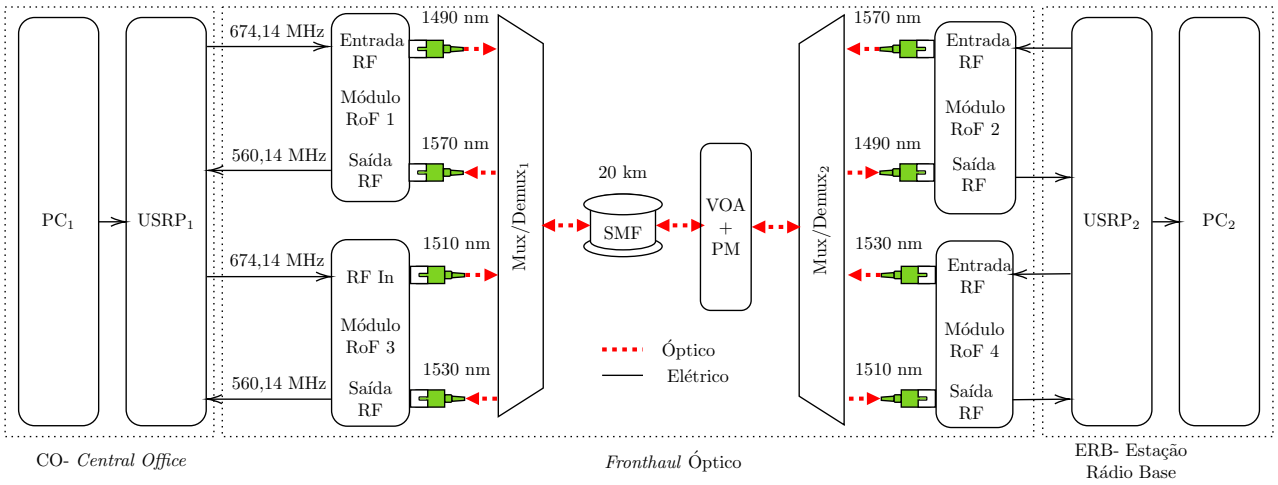

Figura 7: Diagrama em blocos de um sistema MIMO assistido por A-RoF. PC - computador pessoal; USRP - periférico universal de rádio por software; SMF - fibra monomodo; VOA - atenuador óptico variável; PM - monitor de potência.

A arquitetura avaliada, ilustrada na Figura 7, aproveita a alta largura de banda da comunicação óptica enquanto aumenta a robustez do sistema por meio do uso de MIMO com diversidade. O sistema emprega a técnica *frequency division duplex* (FDD) para implementar canais distintos de *downlink* e *uplink*. Para estender a cobertura em áreas remotas, a arquitetura utiliza bandas de UHF, que também permitem a exploração do conceito de *TV white*

spaces (TVWS), utilizando canais de TV ociosos para comunicação 5G.

Nesta implementação, os canais de *downlink* e *uplink* estão centralizados em 674, 14 MHz e 560, 14 MHz, respectivamente. Foram utilizados quatro transceptores ópticos *radio over fiber* (RoF) da Optical Zonu. Esses transceptores suportam sinais de RF com larguras de banda variando de 20 MHz a 6 GHz e estão disponíveis em diferentes comprimentos de onda de laser. Os módulos RoF utilizados nesta implementação operam em comprimentos de onda de 1490 nm, 1510 nm, 1530 nm e 1570 nm. Cada módulo inclui um PD com ampla resposta espectral, permitindo a fotodetecção eficaz de todos os comprimentos de onda transmitidos.

O conceito de SDR é empregado, permitindo rádios altamente configuráveis capazes de operar com formas de onda flexíveis e espectralmente eficientes, como o GFDM, que apresenta baixas emissões fora da banda. O sistema de rádio base é implementado com o GNU Radio, com computadores *host* conectados aos dispositivos USRP 2954R da National Instruments via interfaces PCIe. Cada USRP possui duas portas de transmissão e duas de recepção para sinais de RF, possibilitando a implantação de um sistema MIMO 2×2. Essa configuração suporta diversidade de transmissão por meio do esquema de codificação em bloco espaço-tempo de Alamouti [16].

Na direção de *downlink*, os módulos RoF 1 e 3 recebem o sinal RF centralizado em 674, 14 MHz, que posteriormente modula as portadoras ópticas em 1490 nm e 1510 nm. As portadoras ópticas moduladas são então combinadas usando um Mux/Demux do tipo WDM, permitindo o uso de uma única SMF de 20 km. Para fins de avaliação de desempenho, são inseridos em linha um VOA e um *optical power monitor* (OPM) antes que as portadoras ópticas sejam novamente separadas por outro Mux/Demux WDM. As portadoras ópticas separadas são enviadas a um par de transceptores A-RoF em paralelo, onde são fotodetectadas via detecção direta e encaminhadas ao USRP_2 para avaliação de desempenho.

A comunicação de *uplink* segue uma estrutura semelhante à do *downlink*, mas opera em frequências e comprimentos de onda distintos. Nesta implementação, a frequência de *uplink* é 560, 14 MHz, e os comprimentos de onda ópticos correspondentes são 1570 nm e 1530 nm.

3.2 Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho foi realizada em um ambiente de laboratório controlado. A Figura 8 ilustra o arranjo experimental. Como mostrado, a CO e a ERB estão alocadas dentro de um *rack* projetado especificamente para acomodar tanto o PC quanto a USRP, oferecendo uma solução robusta e prática. Além disso, foi utilizado um analisador de sinais N9021B MXA para avaliar os espectros dos sinais.

A primeira análise concentra-se na EVM_{RMS}, que quantifica a dispersão dos símbolos em um diagrama de constelação. Um valor mais alto de EVM_{RMS} indica maior dispersão dos símbolos, geralmente causada por ruído ou outras imperfeições. A Figura 9 apresenta o EVM_{RMS} em função da potência de RF aplicada à entrada do módulo RoF na direção de *downlink*. Como mostrado, o melhor desempenho de EVM_{RMS} é obtido quando a potência de RF na entrada é de aproximadamente −16 dBm, permitindo o uso da ordem de modulação 256-*quadrature amplitude modulation* (QAM). A plataforma SDR desenvolvida anteriormente pelo Inatel foi configurada para operar com modulação adaptativa, ajustando dinamicamente a ordem de modulação com base na estimativa da SNR. Isso significa que, à medida que o SNR diminui, a ordem da modulação é reduzida para manter uma *bit error rate* (BER) próxima de zero. Observa-se que o EVM_{RMS} aumenta significativamente quando a potência de entrada de RF ultrapassa −10 dBm. Nestas condições, o sistema se limita a ordens de modulação mais baixas,

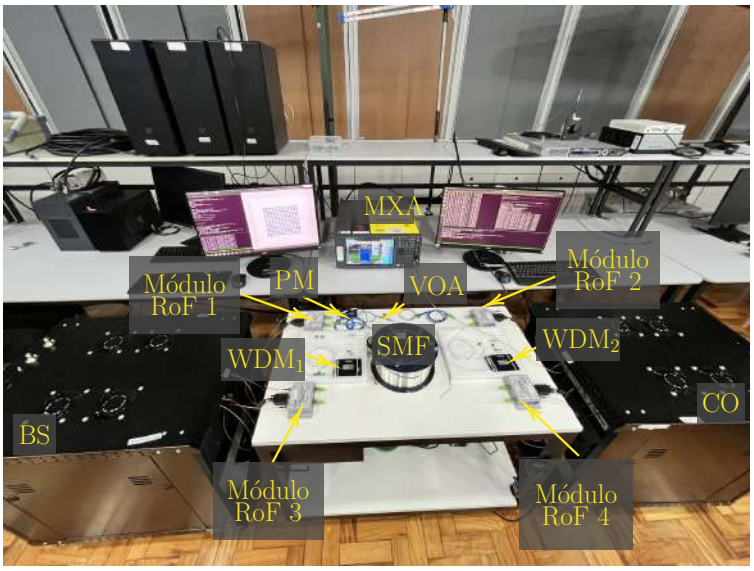

Figura 8: Fotografia do arranjo experimental.

como 64-QAM e, no pior caso, 16-QAM, o que resulta em uma redução na taxa de transmissão. Esse fenômeno é atribuído ao comportamento não linear do LNA embutidos nos módulos RoF e também à não linearidade do processo de modulação direta. À medida que a potência de RF aumenta, as distorções não lineares tornam-se mais pronunciadas, resultando em degradação da SNR e, consequentemente, na redução da ordem de modulação para preservar a integridade do sinal.

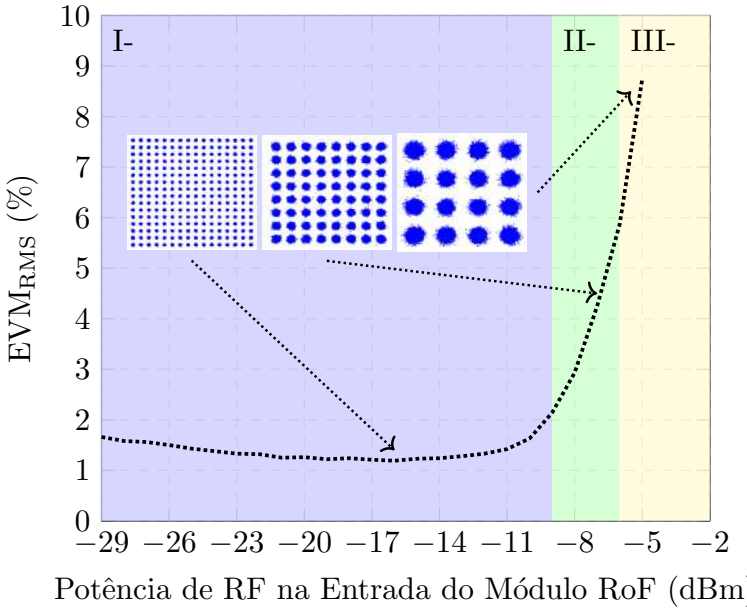

Figura 9: EVM$_{\mathrm{RMS}}$ em função da potência do sinal de RF que modula a portadora óptica.

Considerando a potência de RF ótima identificada na análise anterior (isto é, −16dBm), a potência óptica na saída da SMF foi variada para investigar seu impacto no desempenho do sistema em termos de EVM$_{\mathrm{RMS}}$ e taxa de transmissão. A Figura 10 ilustra o desempenho do sistema à medida que a potência óptica é ajustada por meio de um VOA. Como observado,

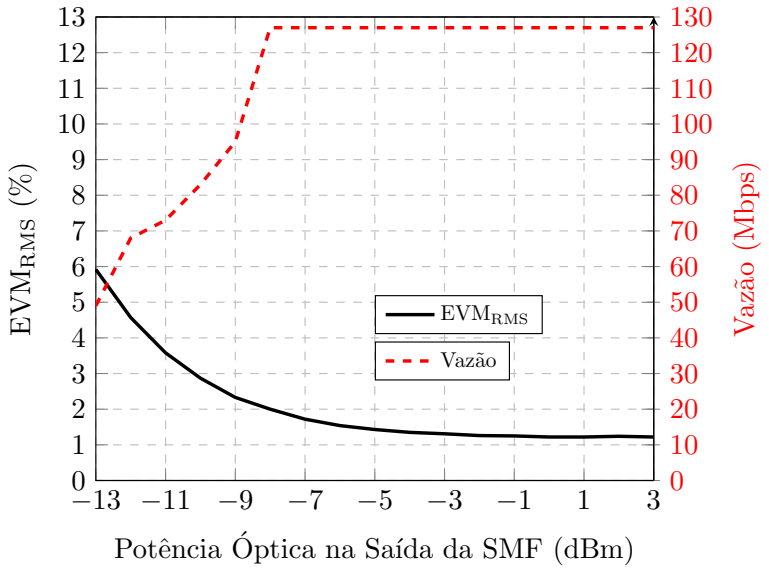

Figura 10: Avaliação de EVM_{RMS} e taxa de transmissão em função da potência óptica incidente na ERB.

potências ópticas incidentes mais baixas levam a EVM_{RMS} mais alto e menor taxa de transmissão. Quando a potência óptica incidente excede −8dBm, o sistema atinge uma taxa de transmissão de 130 Mbps, que representa a taxa máxima alcançável considerando o uso de um canal de 24 MHz. Além disso, o EVM_{RMS} diminui com o aumento da potência óptica incidente, alcançando níveis de desempenho excelentes, próximos de 1%.

Também foram avaliados os espectros dos sinais na direção de *downlink*. A Figura 11 mostra o sinal de RF na saída do USRP_1, representando o sinal gerado pelo transceptor SDR usado para modular a portadora óptica no módulo RoF. A Figura 11 também apresenta o respectivo sinal de RF recebido na entrada do USRP_2, ou seja, após a propagação pelo enlace de *fronthaul* óptico e subsequente fotodetecção. Não se observa distorção espectral aparente em nenhum dos casos; a principal diferença está nos níveis de potência do canal, que são afetados pelas perdas introduzidas durante a propagação e nas conversões eletro-óptica e optoelétrica. Especificamente, a *channel power* transmitida foi medida em −12,9 dBm, enquanto a *channel power* recebida caiu para −23,7 dBm. É importante observar que o nível de potência transmitida não é suficiente para induzir distorções não lineares, conforme corroborado pela avaliação de desempenho do EVM_{RMS} em função da potência de RF.

Por fim, aumentamos a potência do canal de RF para investigar as degradações causadas por distorções não lineares. A Figura 12 ilustra os espectros tanto do sinal de RF de entrada quanto do sinal recebido na direção de *downlink*. Neste cenário, até mesmo o *front-end* do USRP introduz uma leve degradação, indicando que o sinal utilizado para modular a portadora óptica apresenta uma leve distorção, visível através de emissões fora da banda. Do lado do receptor, após a transmissão pelo enlace de *fronthaul* óptico, as distorções tornam-se mais evidentes. Essa degradação é atribuída principalmente ao LNA presente no módulo RoF, que é inerentemente não linear, bem como ao processo de modulação direta, que também introduz não linearidades.Esses resultados demonstram que sinais de RF com potência elevada devem ser evitados. Alternativamente, pode-se empregar uma técnica de DPD para linearizar o sistema. A abordagem DPD é particularmente atrativa, pois permite a operação em níveis de potência de RF mais elevados, uma vantagem importante em cenários de comunicação para áreas remotas.

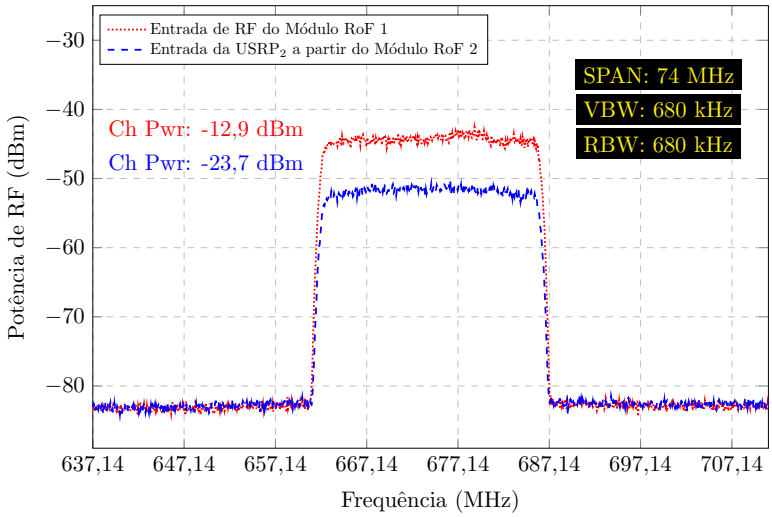

Figura 11: Espectros de RF transmitido e recebido na direção de *downlink*, considerando uma potência de entrada de −12,9 dBm no módulo RoF.

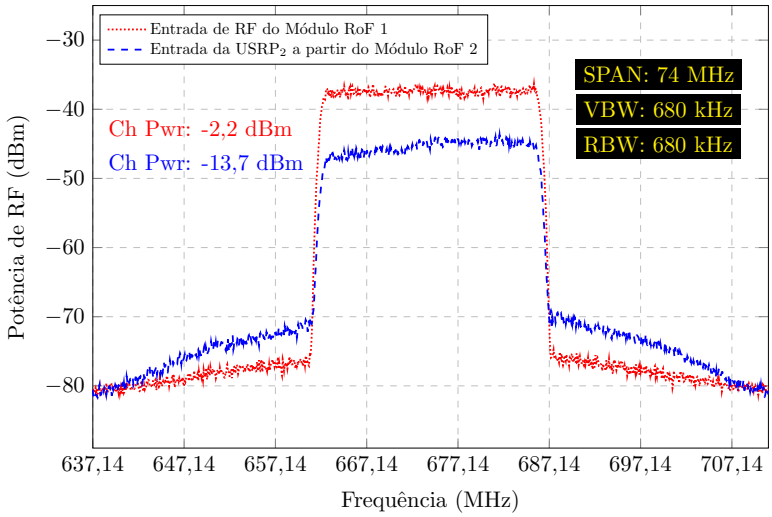

Figura 12: Espectros de RF transmitido e recebido na direção de *downlink*, considerando uma potência de entrada de −2,2 dBm no módulo RoF.

3.3 Conclusões

O estudo apresentou o projeto, a implementação e a avaliação de um sistema de comunicação MIMO 2×2 assistido por um enlace A-RoF com modulação direta, voltado à implantação em regiões remotas. Aproveitando a simplicidade e o baixo custo da modulação e detecção diretas, a arquitetura proposta oferece transmissão MIMO baseada em diversidade, ao mesmo tempo em que reduz a complexidade do *fronthaul* óptico. Uma plataforma SDR foi utilizada para implementar formas de onda flexíveis e espectralmente eficientes, com modulação adaptativa baseada na estimativa em tempo real do SNR. O desempenho foi avaliado em um enlace de 20 km de SMF, utilizando WDM com espaçamento largo entre os canais, considerando métricas-chave como EVM_{RMS}, taxa de transmissão e integridade espectral. Os resultados demonstraram que níveis ideais de potência de RF possibilitam o uso de modulações de ordem elevada (ex.:256-QAM), enquanto potências excessivas induzem distorções não lineares devido ao LNA e ao

estágio de modulação. Essas constatações confirmam a viabilidade do sistema proposto para *backhaul* econômico e eficiente em áreas carentes, além de evidenciar o potencial do uso de técnicas de DPD para melhorar ainda mais o desempenho sob condições de alta potência.

4 Rede de transporte Baseada em Free Space Optics

As chamadas *optical wireless communications* (OWC) surgem como uma tecnologia promissora, utilizando luz para transmitir dados por meio do espaço livre [17]. A faixa de frequência óptica oferece uma largura de banda não regulamentada muito maior em comparação com as faixas de ondas *millimeter waves* (mmWaves) e tera-hertz (THz), apresentando-se como uma alternativa complementar ou até substituta dos sistemas tradicionais de radiofrequência RF. Além disso, as tecnologias OWC são imunes a interferências eletromagnéticas e proporcionam comunicações seguras [18, 19].

O FSO é uma subcategoria das OWC que utiliza laseres infravermelhos para transmitir dados pelo espaço livre em distâncias curtas ou moderadas [17]. Essa tecnologia oferece diversas vantagens, como isenção de licenças, imunidade a interferência eletromagnética e ampla largura de banda [20, 21]. Embora os enlaces FSO sejam bastante afetados por condições climáticas como neblina, poeira e chuva, essa tecnologia pode ser uma alternativa viável aos enlaces ópticos por fibra em redes 5G/6G, principalmente em locais onde a instalação da fibra seja inviável ou muito cara [22].

Diversas soluções de *fronthaul* baseadas em FSO têm sido relatadas na literatura. Por exemplo, Shakir et al. e Zhang et al. implementaram soluções híbridas de *fronthaul* utilizando FSO e enlaces mmWaves em 1550 nm e 60 GHz, respectivamente [23, 24]. Em [25], foi relatado um enlace híbrido FSO em 1550 nm e RF em 28 GHz operando simultaneamente para aplicações de *fronthaul* e *backhaul* em 5G. Já em [26], foi demonstrado um fronthaul FSO para extensão de enlaces ópticos em redes 5G. Nguyen et al. demonstraram experimentalmente um *fronthaul* FSO combinado com transmissão mmWaves visando acesso banda larga [27]. Em trabalhos anteriores, nosso grupo de pesquisa demonstrou a integração de um *fronthauls* FSO com tecnologias RoF e RF em redes heterogêneas [28], além de demonstrar a integração do FSO com tecnologias *fiber-wireless* (FiWi) e *visible light communication* (VLC) para atender às exigências de redes 5G [22].

Um fator crucial para a implementação de soluções de *fronthaul* baseadas em FSO é a integração com a infraestrutura da rede de acesso, especialmente com o uso de células pequenas (*small cells*), que são componentes essenciais em redes 5G e potencialmente serão em redes 6G, para melhorar cobertura, aumentar a capacidade e otimizar a experiência do usuário em ambientes urbanos e rurais. Na arquitetura C-RAN, o enlace FSO estabelece uma conexão de *fronthaul* confiável e de alta velocidade entre o núcleo centralizado da CO e as *small cells* distribuídas. No entanto, a instalação de *small cells* em redes ultra densas enfrenta desafios relacionados à distribuição de energia. Métodos tradicionais, como alimentação via *Power-over-Ethernet* (PoE), a qual utiliza fios de cobre, sofrem com limitações como interferências eletromagnéticas, flutuações de tensão e restrições de distância [29]. Dessa forma, a tecnologia PoF, a qual será discutida com mais detalhes na próxima seção, surge como uma alternativa promissora para a distribuição de energia confiável em arquiteturas C-RAN.

4.1 Implementação Experimental do FSO Para Comunicações de Última Milha

Esta seção apresenta uma prova de conceito de uma arquitetura híbrida OWC/RF alimentada opticamente, voltada para aplicações 5G e com possível aplicação em futuras redes 6G. Primeiramente, implementou-se um enlace FSO como componente de *fronthaul*, estabelecendo um enlace óptico com alcance de 30 metros. Em seguida, integrou-se uma rede de acesso baseada em RF utilizando uma femtocélula comercial compatível com o padrão 5G *new radio* (5G-NR). Para validar a operação da rede híbrida proposta, foi realizado testes de vazão e desempenho. Além disso, demonstrou-se, pela primeira vez na literatura, a utilização da tecnologia PoF para alimentar a femtocélula comercial. A principal contribuição foi demonstrar a viabilidade e o potencial da combinação das tecnologias FSO e RF em infraestruturas avançadas de redes 5G, além de oferecer uma perspectiva prática da implementação do PoF para alimentação de componentes de rede.

O diagrama em blocos do sistema híbrido OWC/RF alimentado opticamente considerado é apresentado na Figura 13. Utilizou-se uma arquitetura centralizada, em que o núcleo 5G, desenvolvido utilizando o *software Amarisoft*, está localizado na CO. Essa configuração oferece acesso à rede para terminais e suporta transmissões de voz e dados com cobertura sem fio de banda larga em ambientes internos. O núcleo 5G é conectado ao transceptor FSO (modelo EL-10G ex, da EC Systems) por meio de um cabo Ethernet e de um módulo *small form-factor pluggable* (SFP) para Gigabit Ethernet (modelo ASF-GE-T 10/100/1000Base-T, da 10Gtek). O transceptor FSO é alimentado por uma fonte DC de 48 V. Na outra extremidade, outro transceptor FSO estabelece um enlace de comunicação óptico de 30 m. Um módulo SFP adicional é conectado a esse transceptor, permitindo a inserção do sinal no padrão 5G-NR, que irá modular a portadora óptica do enlace FSO. Um cabo Ethernet é conectado a uma femtocélula comercial (modelo nCELL-F2240 SKU, da Sunwave).

O transceptor FSO incorpora um sistema de auto alinhamento óptico, que garante o alinhamento preciso entre as aberturas de transmissão e recepção. Esse sistema opera com comprimento de onda de 785 nm, permitindo a troca de informações de serviço entre os pares de transceptores sem afetar os dados do usuário. Por outro lado, o sinal de informação proveni-

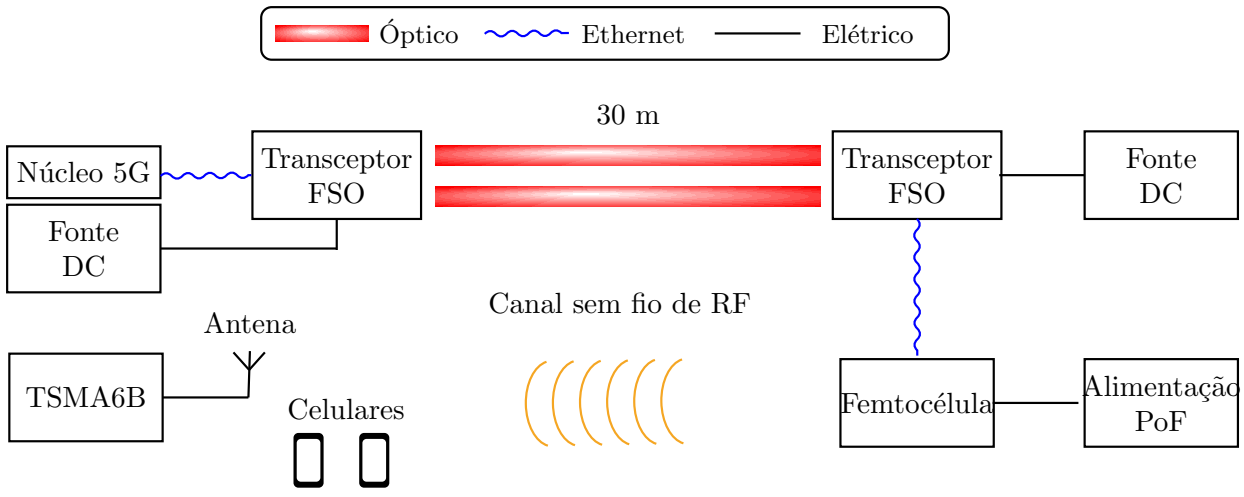

Figura 13: Diagrama em blocos da implementação do sistema OWC/RF 5G NR alimentado opticamente.

ente do núcleo 5G é convertido em sinal óptico com comprimento de onda de aproximadamente 1550 nm e então transmitido pelo canal sem fio. É importante ressaltar que os transceptores devem estar em visada direta entre si.

As Figuras 14 (a) e (b) mostram fotografias do experimento. A femtocélula comercial alcança uma taxa máxima de dados de até 780 Mbps no *downlink* e até 140 Mbps no *uplink*, suportando até 128 usuários no modo 5G *stand-alone* (SA). Além disso, opera na faixa de 3300 a 3800 MHz (banda N78), com largura de banda máxima de 100 MHz. A sincronização precisa com a infraestrutura da rede é garantida por um receptor *global positioning system* (GPS). O dispositivo emprega configuração MIMO 2×2, aumentando a taxa de transferência e a confiabilidade ao utilizar múltiplos caminhos de transmissão e recepção. Considerando todas essas características, o consumo de energia da femtocélula permanece abaixo de 45 W. Na implementação da prova de conceito, a femtocélula pode ser alimentada por uma fonte DC convencional ou via PoF.

Com relação ao sistema PoF, ilustrado na Figura 15, foram utilizados dois *high power laser diode*s (HPLDs) de 100 W com comprimento de onda central em 976 nm (modelo LSM-100, da MH GoPower Company Limited), configurados para transmitir 80 W e 55 W de potência óptica através de dois enlaces dedicados de *multimode fiber* (MMF) com 100 m de comprimento, com diâmetros de núcleo e casca de 105 μm e 125 μm, respectivamente. Posteriormente, dois *photovoltaic power converter*s (PPCs) com potências ópticas máximas de entrada de 70 W e 50 W (modelos YCH-H020-15 e YCH-H010-15, respectivamente, da MH GoPower Company

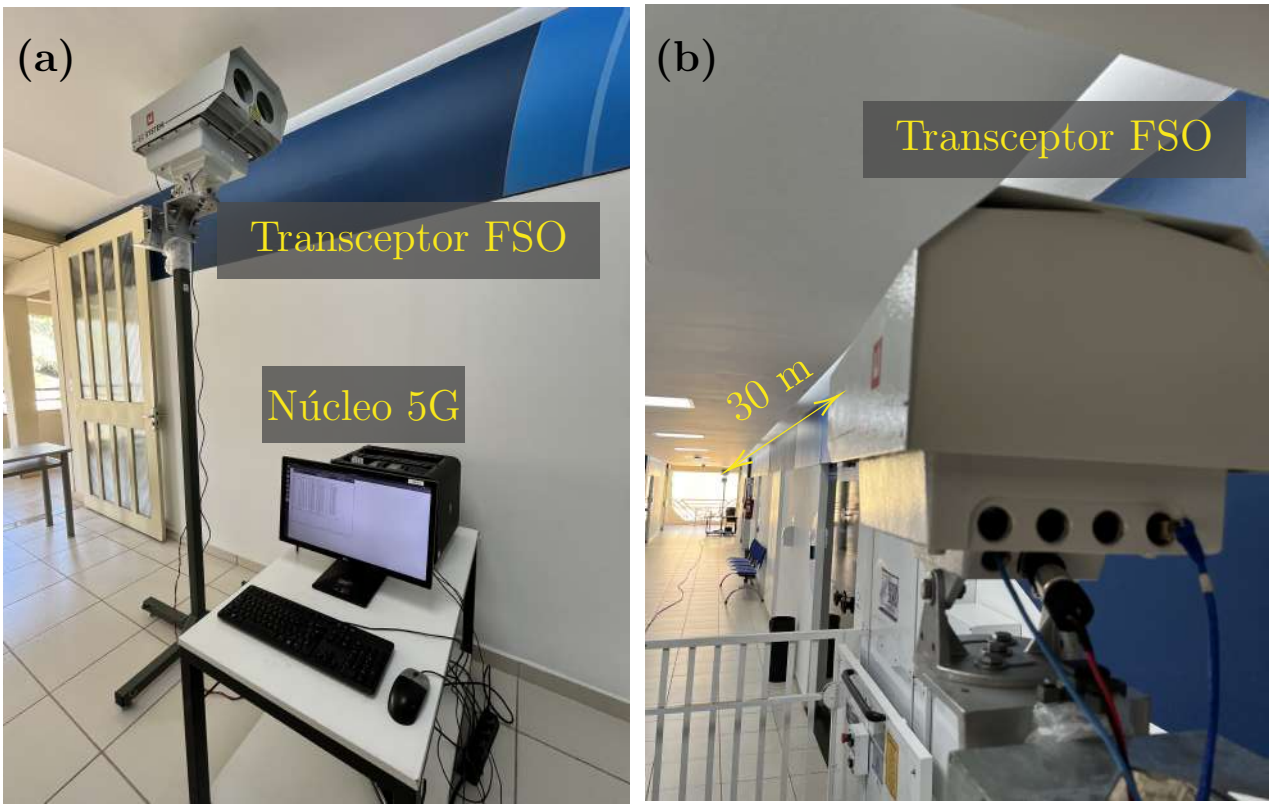

Figura 14: Implementação do sistema OWC/RF 5G NR alimentado opticamente. (a) Fotografia do experimento do lado do transceptor FSO e do Núcle 5G. (b) Fotografia do experimento do lado do enlace de 30 m e transceptor FSO.

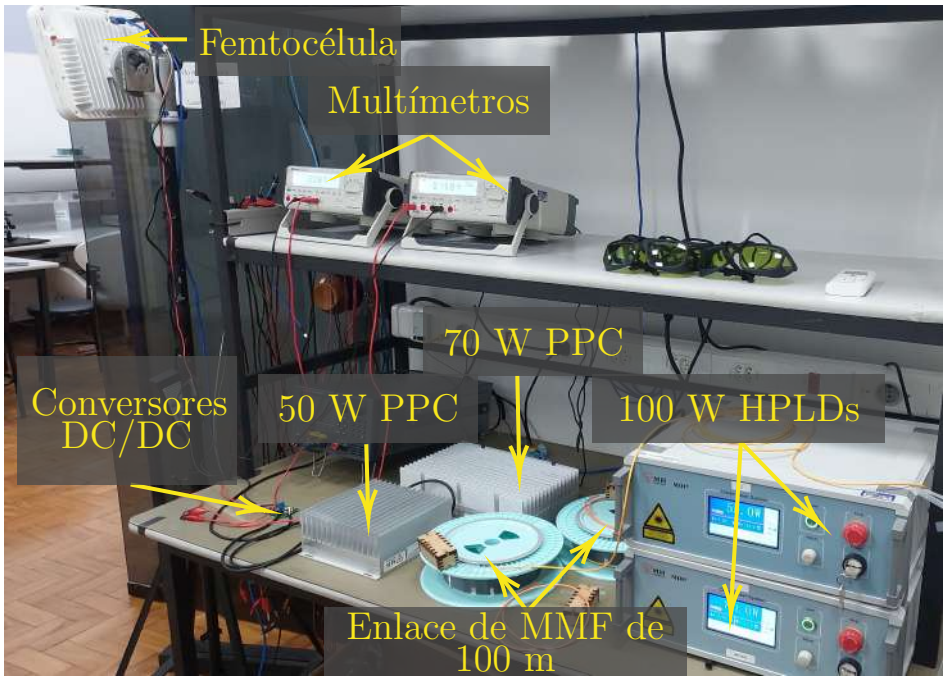

Figura 15: Fotografia do experimento mostrando a implementação do sistema PoF e da femtocélula.

Limited) foram utilizados para a conversão óptica-elétrica na extremidade dos enlaces de MMF transmitindo 80 W e 55 W, respectivamente. Devido à atenuação da fibra (1 dB), a potência óptica de saída de cada enlace foi de aproximadamente 63.5 W e 43.7 W, mantendo os níveis abaixo dos valores máximos permitidos para os PPCs. Em seguida, as saídas de cada PPC foram conectadas em paralelo à entrada de um conversor DC/DC (modelo DDH1800, da MH GoPower Company Limited), ajustado para fornecer 12 V para alimentar a femtocélula. Para fins de monitoramento, dois multímetros foram utilizados para medir corrente e tensão nos terminais de saída do conversor DC/DC, conforme pode ser observado na Figura 15, onde os modelos de PPCs utilizados permitem operação com até 50 W e 70 W.

4.2 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta a caracterização e os resultados do sistema híbrido OWC/RF 5G NR alimentado opticamente.

4.2.1 Caracterização do FSO

Inicialmente, realizou-se a caracterização do enlace FSO utilizando um par de transceptores FSO em conjunto com um par de geradores de tráfego Ethernet Wise TSW900ETH. O TSW900ETH possibilita testes de diagnóstico no meio físico, incluindo cabos elétricos e sinais ópticos, e suporta diversos testes configuráveis de tráfego de dados. Por exemplo, o equipamento pode executar testes conforme definido na RFC 2544, como vazão e latência. Para permitir a conexão direta entre os geradores de tráfego Ethernet e os transceptores FSO, utilizou-se dois módulos SFP para Ethernet Gigabit (modelo ASF-GE-T 10/100/1000Base-T, da 10Gtek) em cada transceptor. Essa configuração permitiu uma avaliação abrangente do desempenho dos transceptores FSO em ambiente controlado.

O TSW900ETH foi configurado para operar no modo *loopback*, permitindo o teste das transmissões no sentido de *downlink* e *uplink*. A Figura 16 apresenta os resultados da caracterização do enlace FSO em termos de vazão e latência. Essas métricas foram comparadas com aquelas obtidas em uma configuração *back-to-back* (B2B), onde os geradores de tráfego foram conectados diretamente por cabos Ethernet. Essa comparação serviu como referência para avaliar o impacto potencial do enlace FSO no desempenho do sinal transmitido.

Os testes de vazão e latência foram realizados utilizando pacotes com tamanhos de 128 bytes, 256 bytes, 512 bytes e 1024 bytes. Os resultados indicam que a vazão se manteve constante em comparação com a transmissão B2B, atingindo 864,69 Mbps; 927,35 Mbps; 962,22 Mbps e 980,25 Mbps para os tamanhos de pacotes mencionados, respectivamente. Isso sugere que o enlace FSO não impacta significativamente na vazão, mantendo níveis de desempenho comparáveis aos de uma conexão direta via cabo Ethernet. Quanto à latência, o enlace FSO introduziu aproximadamente 1.3 μs adicionais em relação à transmissão B2B, elevando a latência média de 2.7 μs para 4.0 μs. Esses resultados reforçam a viabilidade do uso de enlaces FSO para ampliar a distância entre o núcleo 5G e a rede de acesso, sem impacto significativo no desempenho.

4.2.2 Caracterização da Femtocélula

A caracterização da femtocélula foi realizada utilizando um *scanner* de rede da Rohde & Schwarz, modelo TSMA6B. Esse equipamento demodula sinais 5G-NR e realiza medições como EVM_{RMS}, *received signal strength indicator* (RSSI), *synchronization signal block* (SSB)-RSSI e *secondary synchronization signal* (SSS)-*reference signal received power* (RSRP). A métrica EVM_{RMS} quantifica a divergência entre o sinal recebido e o ideal, sendo afetada por ruídos, distorções ou degradações no canal [30]. O RSSI representa a potência total recebida dentro da largura de banda do canal [31]. Já o SSB-RSSI corresponde à potência recebida do bloco de sincronização (SSB), calculada pela agregação da potência de múltiplos blocos de recurso [32]. Por fim, o SSS-RSRP representa a média linear da potência dos elementos que transportam o

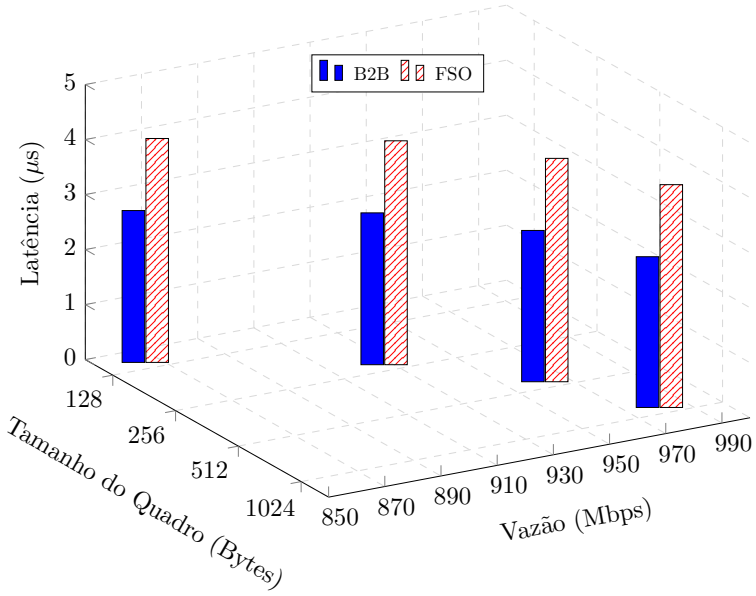

Figura 16: Caracterização de *throughput* e latência do enlace FSO em função do tamanho dos pacotes.

Tabela 1: Caracterização da Femtocélula

Distância (m)	0	10	20	30	40	50	60
Penalidade EVM (dB)	0	0.3	0. 55	0.66	1.9	2.1	7.4
RSSI (dBm)	-36.9	-69.8	-76.15	-76.6	-83.5	-83.4	-93.1
SSB-RSSI (dBm)	-33	-64.13	-72.3	-74.09	-80.6	-81.1	-89.9
SSS-RSRP (dBm)	-54.18	-86.11	-93	-96.5	-103.12	-103.8	-112.5

sinal de sincronização secundário [33]. As definições estão em conformidade com os documentos técnicos do *3rd generation partnership project* (3GPP).

A Tabela 1 apresenta as métricas de desempenho medidas em diferentes distâncias entre a antena do TSMA6B e a femtocélula. A avaliação da penalidade de EVM_{RMS} foi feita pela comparação dos valores de EVM_{RMS} a cada distância com o valor de referência obtido a 0 m. Observa-se que a penalidade de EVM_{RMS} aumentou gradualmente em aproximadamente 0.3 dB a cada 10 m, de 0 a 50 m. Entre 50 m e 60 m, houve um aumento mais acentuado, possivelmente causado pela presença de uma parede adicional obstruindo a visada direta e degradando a qualidade do enlace entre o *scanner* e a femtocélula.

O RSSI decresceu de -36.9 dBm (0 m) para -93.1 dBm (60 m), enquanto o SSB-RSSI variou de -33 dBm para -89.9 dBm. Em ambos os casos, a maior queda ocorreu entre 0 e 10 m, com posterior estabilização a partir de 20 m. Já o SSS-RSRP teve uma redução acentuada de -54.18 dBm para -86.11 dBm entre 0 e 10 m, seguindo um declínio contínuo até -112.5 dBm em 60 m. De forma geral, o aumento da distância provocou degradação da qualidade do sinal (maior EVM_{RMS}) e atenuação de potência (menores RSSI, SSB-RSSI e SSS-RSRP), o que é esperado dado que a femtocélula foi projetada para ambientes internos e curtas distâncias.

4.2.3 Sistema Híbrido Alimentado Opticamente

Antes de alimentar a femtocélula com o sistema PoF, foram realizados testes de desempenho para verificar a estabilidade da potência elétrica na saída do sistema por um período de 60 minutos. Também mediu-se o consumo de energia da femtocélula alimentada por fonte DC convencional, conforme ilustrado na Figura 17. Durante as medições, a femtocélula permaneceu em modo de espera (*standby*), sem usuários conectados, com tensão de saída de aproximadamente 12.1 V e corrente de 1.59 A, o que corresponde a cerca de 19.2 W. Observam-se picos periódicos de consumo de energia, provavelmente causados por sinais de sincronização e controle transmitidos ciclicamente. Esses picos também são visíveis nas medições com fonte convencional, o que comprova a estabilidade do sistema PoF, com desempenho equivalente ao da fonte DC.

Além disso, foi estimada a *power transmission efficiency* (PTE), definida como a razão entre a potência elétrica na saída do PPC e a potência óptica injetada pelo HPLD no enlace PoF [34]. Em operação ativa, com um celular conectado a femtocélula o consumo da aumenta: no *uplink*, chega a 22.8 W (1.9 A), enquanto no *downlink* atinge 27.6 W (2.3 A). Utilizando potência óptica de 135 W, a eficiência PTE foi de 20.4%, valor comparável a trabalhos anteriores [35]. Foram realizados testes de vazão nos sentidos de *uplink* e *downlink* com a femtocélula alimentada por PoF, comparando os resultados com duas configurações: (i) B2B, onde o núcleo 5G foi conectado diretamente à femtocélula sem enlace FSO; e (ii) enlace com FSO e fonte DC convencional, conforme apresentado na Figura 19. Os resultados mostram desempenho similar nos três cenários. A vazão de *uplink* atingiu até 115 Mbps. No *downlink*, a média foi de aproximadamente 658 Mbps. Variações nos valores iniciais e finais das medições são atribuídas ao uso da ferramenta *iPerf*. De modo geral, não houve degradação perceptível no desempenho do

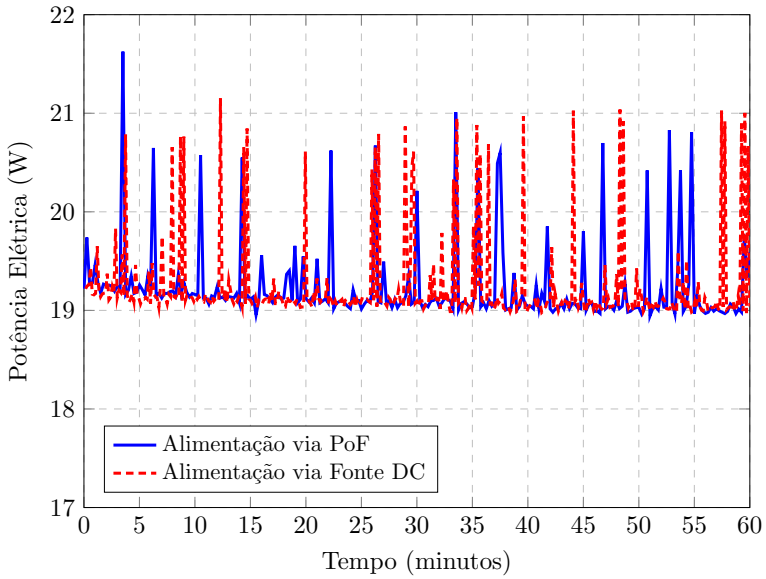

Figura 17: Medições de potência elétrica na saída do sistema PoF durante 60 minutos.

sistema alimentado opticamente.

Por fim, mediu-se o espectro de potência do sinal 5G-NR irradiado utilizando uma antena monopolo com ganho de 2.3 dBi e um analisador de espectro (modelo MXA N9020A, da Keysight). Os espectros de frequência obtidos são mostrados na Figura 18. Observa-se que os três cenários apresentaram espectros semelhantes, com pequenas variações na potência de RF. A atenuação no *uplink* pode estar associada a efeitos de multipercurso no sinal irradiado pela antena do celular.

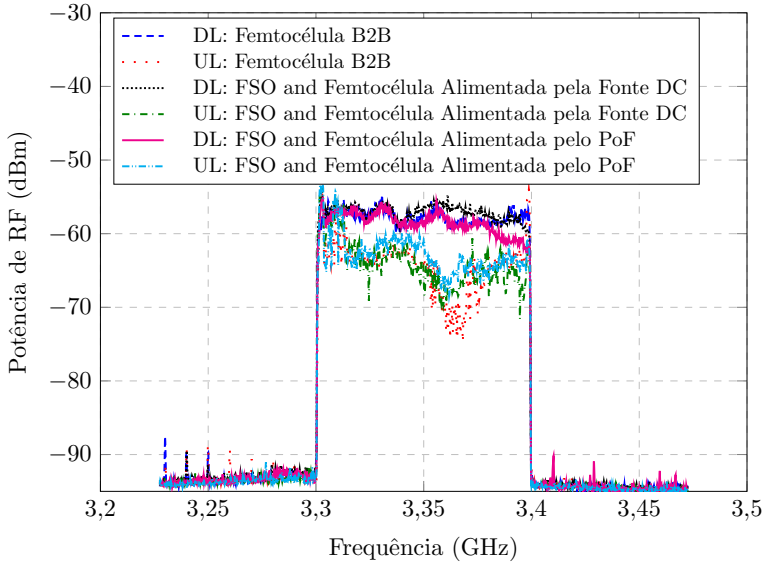

Figura 18: Medições de espectro em RF para modos *uplink* e *downlink* nos três cenários avaliados: B2B, alimentação convencional com FSO e alimentação via PoF com FSO.

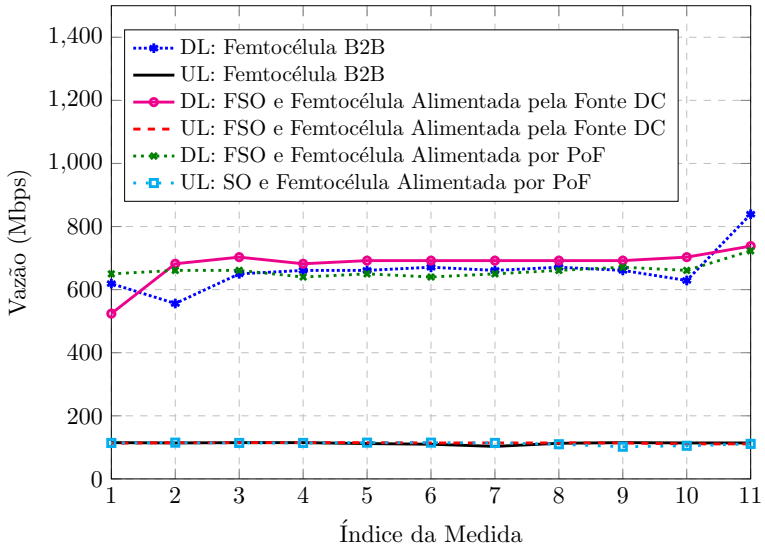

Figura 19: Medições de vazão para modos *uplink* e *downlink* considerando: (i) femtocélula com ligação B2B, (ii) femtocélula com FSO alimentada por fonte convencional e (iii) femtocélula com FSO alimentada por PoF.

4.3 Conclusões

Neste estudo foi proposto, implementado e avaliado um sistema híbrido OWC/RF alimentado opticamente, compatível com a arquitetura de rede 5G-NR. O sistema desenvolvido consiste em um enlace FSO que conecta a rede central ao *fronthaul*, ao mesmo tempo que provê energia por meio da tecnologia PoF. A solução foi validada experimentalmente em ambiente laboratorial, incluindo testes de vazão, espectro e análise da estabilidade do fornecimento de energia elétrica. Também realizamos uma caracterização detalhada do desempenho do enlace FSO e da femtocélula, destacando as principais métricas de qualidade do sinal 5G, como EVM_{RMS}, RSSI, SSB-RSSI e SSS-RSRP.

Os resultados demonstraram que o sistema proposto oferece desempenho semelhante à configuração de referência B2B, com vazão de até 658 Mbps no *downlink* e até 115 Mbps no *uplink*, além de espectros RF comparáveis. A estabilidade do fornecimento de energia pelo sistema PoF também foi confirmada, mesmo durante períodos prolongados de operação. A eficiência total de conversão de potência do sistema alcançou aproximadamente 20.4%, valor condizente com trabalhos similares na literatura.

A arquitetura híbrida proposta permite ampliar o alcance de células de acesso com significativa redução na necessidade de infraestrutura física, eliminando o uso de cabos elétricos e aproveitando os enlaces FSO para transmissão simultânea de dados e energia. Dessa forma, esta abordagem se mostra promissora para aplicações em redes móveis além da quinta geração, como *beyond* 5G (B5G) e 6G, especialmente em cenários com pontos remotos ou de difícil acesso, onde o fornecimento convencional de energia e dados não é viável.

5 Sistema PoF para Alimentação de Dispositivos em Redes de Transporte A-RoF

Com a recente implementação comercial das redes móveis de 5G, pesquisadores e especialistas da indústria já voltam sua atenção para os sistemas B5G. Em particular, as redes móveis 6G, ainda em estágios iniciais de desenvolvimento, prometem transformar radicalmente os sistemas sem fio ao oferecer transferência de dados ultra-rápida (até 1 Tbit/s), latência extremamente baixa (abaixo de 0,1 ms), conectividade massiva (1 x 10^7 dispositivos/km^2), ultra-confiabilidade (99,99999%) e eficiência energética (10 a 100 vezes maior que o 5G). Tais requisitos são impulsionados por tecnologias e aplicações emergentes como comunicações holográficas, veículos autônomos, tecnologias táteis, *Internet of everything* (IoE), *augmented reality* (AR) e *virtual reality* (VR).

Um dos principais desafios das redes 5G atuais é o alto consumo de energia da *radio access network* (RAN), que inclui as BS e outras infraestruturas de rede [36]. Espera-se que o consumo de energia aumente ainda mais, à medida que o 6G visa suportar um número massivo de dispositivos e sensores conectados, muito além das capacidades do 5G [37]. Nesse contexto, o desenvolvimento da *remote antenna unit* (RAU) de baixo consumo energético, baseadas em *small cells*, tem sido considerado fundamental para garantir uma maior eficiência energética, a qual é crucial para viabilizar a implantação em larga escala de redes e dispositivos 6G [38]. Tipicamente, as *small cells* podem ser divididas em três tipos: micro-célula, pico-célula e femto-célula, com cobertura variando de centenas a algumas dezenas de metros. Além disso, para oferecer cobertura e capacidade contínuas em ambientes urbanos e internos em frequências mais altas (faixa de THz), espera-se que as *small cells* sejam implantadas em densidades muito elevadas, viabilizando uma rede ultra-densa [39, 40].

A arquitetura da RAN também vem evoluindo para atender às demandas de escalabilidade, eficiência e flexibilidade das futuras gerações. Em particular, a arquitetura C-RAN tem atraído significativa atenção devido à sua otimização de desempenho e relação custo-benefício [41, 42]. Nessa arquitetura, o *hardware* de processamento de sinal é concentrado em um local central compartilhado, conhecido como CO, o que reduz o consumo de energia das RAU [40]. Consequentemente, a densificação de *small cells* se torna viável, uma vez que o CO é conectado a múltiplas RAU de baixa potência por meio de enlaces de fibra óptica, conhecidos como *fronthaul* [42, 43].

À medida que a implantação de *small cells* dentro da arquitetura C-RAN se expande nas redes 5G, a distribuição de energia desponta como um desafio crucial. Atualmente, emprega-se o PoE, que possibilita a transmissão simultânea de dados e energia elétrica por meio de cabos Ethernet. Contudo, o PoE apresenta limitações quanto à confiabilidade, sendo suscetível à interferência eletromagnética e a flutuações de tensão. Ademais, o comprimento máximo do cabo para aplicações PoE é restrito a aproximadamente 100 metros [44]. Com a redução no consumo de energia das RAU e a implantação de *small cells*, fibras ópticas podem ser utilizadas para transmitir luz de alta potência a fim de alimentar partes críticas das *small cells* do 6G, por exemplo, os módulos transmissor *transmissor* (TX)/receptor *receptor* (RX) e amplificadores de RF. Essa técnica é conhecida como PoF, e sua integração com a tecnologia RoF possibilita a transmissão simultânea de energia e dados na arquitetura C-RAN.

A técnica PoF tem sido empregada em diferentes aplicações. Por exemplo, Altuna et al. demonstraram a transmissão de dados e energia por 14,43 km de SMF para sistemas 5G [45]. Já em [34], foi reportada uma transmissão óptica de 150 W em *dichroic cube filters* (DCF), com até 43,7 W de potência elétrica convertida. Em [46], *multicore fiber*s (MCFs) foram utilizadas para

transmissão de alta potência, atingindo mais de 11 W de potência elétrica convertida. Em trabalhos anteriores do Inatel, demonstramos um sistema 5G full-duplex alimentado opticamente, com *throughput* superior a 4 Gbps, alimentando uma RAU composta por laser, fotodetector e amplificadores elétricos [35]. Mais recentemente, o Inatel reportou um sistema OWC alimentado por PoF, onde enlaces RoF, FSO e VLC foram energizados por uma MMF [47]. Esses estudos evidenciam o potencial da tecnologia PoF como uma solução eficiente para o fornecimento de energia em locais remotos, consolidando-se como uma alternativa promissora para as futuras redes de comunicação móvel.

5.1 Viabilização de Sistemas de Comunicações Full-Duplex de Próxima Geração em Gbps Aplicando a Integração de RoF e PoF

Essa subseção demonstra uma transmissão *radio- and power-over-fiber* (RPoF) full-duplex em um cenário com fibra individual e dedicada, utilizando enlaces de 500 metros de SMF para dados e MMF para PoF. Com o intuito de evidenciar o potencial e a aplicabilidade prática da técnica do PoF. Foi desenvolvido um sistema voltado à alimentação de um módulo RoF composto por amplificadores de RF, um PD e um *laser diode* (LD) para transmissão e recepção de sinais bidirecionais. Para tal finalidade, a conversão *optical-to-electrical* (O/E) do sistema PoF é realizada por meio de um PPC disponível comercialmente, sendo analisado seu impacto na eficiência energética global. A ênfase recai sobre a capacidade de alimentação e sustentação contínua de um módulo full-duplex, refletindo a estabilidade do sistema PoF e sua capacidade de suportar múltiplas cargas simultaneamente. Nesse contexto, são avaliadas a estabilidade das potências óptica e elétrica. Além disso, uma transmissão sem fio full-duplex em banda dupla é analisada com base no $\mathrm{EVM_{RMS}}$, utilizando como referência os requisitos estabelecidos pelas Releases do 3GPP [48]. Por fim, realiza-se uma comparação entre os sistemas full-duplex alimentados via PoF e alimentados por fontes convencionais.

5.1.1 Implementação do sistema PoF

A técnica PoF consiste na entrega de energia elétrica a um dispositivo localizado remotamente por meio de fibras ópticas [49, 50]. A Figura 20 apresenta a fotografia do arranjo experimental do sistema PoF. Um HPLD, com o comprimento de onda central de 976 nm, gera um sinal de potência óptica de até 100 W, o qual é transmitido por um enlace de 500 metros de MMF. A potência óptica é então convertida em energia elétrica por um PPC. A quantidade de energia elétrica fornecida é determinada pela potência de saída do HPLD, pelas características da fibra óptica como: atenuação, comprimento e pela eficiência de conversão do PPC.

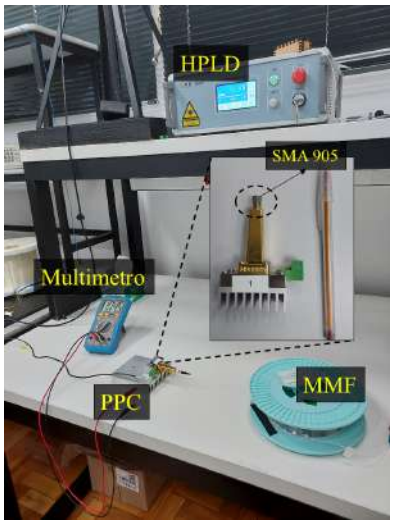

Figura 20: Fotografia do arranjo experimental do sistema PoF.

A Figura 21 apresenta o desempenho da transmissão de energia do sistema PoF. Foi medida a PTE, definida pela potência elétrica de saída do PPC em função da potência óptica de saída do HPLD [22]. Para cada nível de potência injetado no PPC, foi ajustada uma carga ótima em uma carga eletrônica (6063B, HP) para garantir o *maximum power point* (MPP). A potência óptica máxima injetada no PPC foi de 10 W, o que corresponde a uma potência óptica máxima de 12,5 W na saída do HPLD, considerando as perdas na fibra e nos conectores. À medida que a potência óptica de saída do HPLD aumentou, a potência elétrica de saída do PPC também aumentou linearmente, atingindo a potência máxima de 2,7 W.

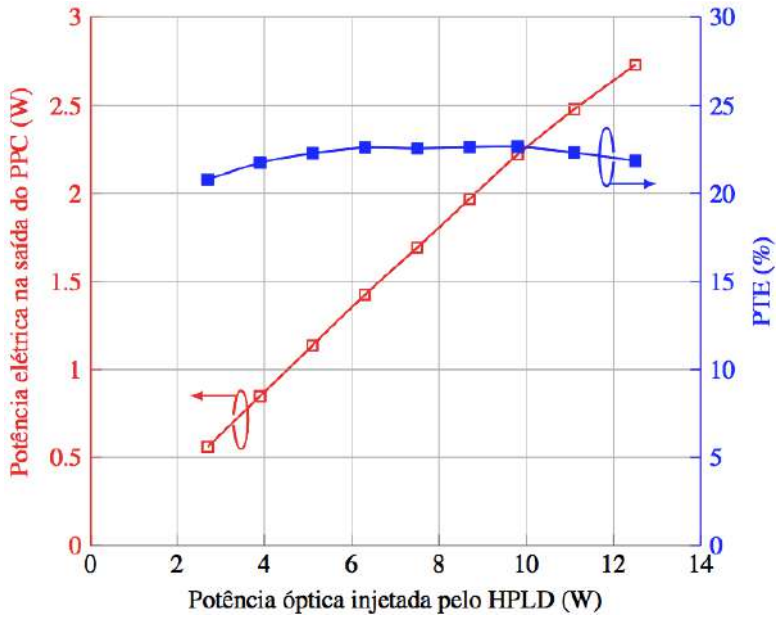

Figura 21: Potência elétrica de saída do PPC em função da potência óptica de saída do HPLD injetada no sistema PoF.

Na Figura 21, também é possível observar que a PTE é inferior quando a potência óptica de saída do HPLD é de 2,7 W, em comparação com as demais medições, situando-se em torno de 20,8%. Isso se deve à precisão da medição de corrente da carga eletrônica, especificada em

3% ± 10 mA para a faixa de 1 A. Tal especificação implica que, próximo aos limites inferiores, a precisão fixa pode prevalecer, limitando a capacidade do instrumento de refletir com exatidão pequenas variações na corrente medida. Também foi observada uma leve queda na PTE para níveis de potência do HPLD acima de 10 W, atribuída ao aumento da temperatura do PPC. Ainda assim, a PTE média foi de aproximadamente 22% e manteve-se relativamente constante independentemente da potência óptica de saída do HPLD.

Em sistemas de comunicação móvel, as RAU requerem um fornecimento de energia estável e ininterrupto para garantir uma operação confiável. Flutuações ou interrupções no fornecimento podem causar falhas nos serviços de comunicação, perda de sinal ou até mesmo falhas no sistema. Uma fonte de energia instável frequentemente resulta em aumento do consumo energético, visto que os dispositivos podem demandar mais energia para compensar variações de tensão ou corrente, o que pode acarretar em maior despesa operacional relacionada ao consumo de energia. Foram realizadas medições dos níveis de potência óptica e elétrica na entrada e na saída do PPC, respectivamente, ao longo de um período de 60 minutos, conforme apresentado na Figura 22. O PPC conforme mencionado, é capaz de suportar uma potência incidente máxima de 10 W. Assim, optou-se por avaliar a estabilidade da potência nos níveis máximos alcançáveis do sistema PoF. Como o HPLD possui sistema de resfriamento, as variações de potência óptica na entrada do PPC são mínimas. Foi registrada uma média de potência óptica de aproximadamente 9,97 W, com um desvio padrão de 0,018 W.

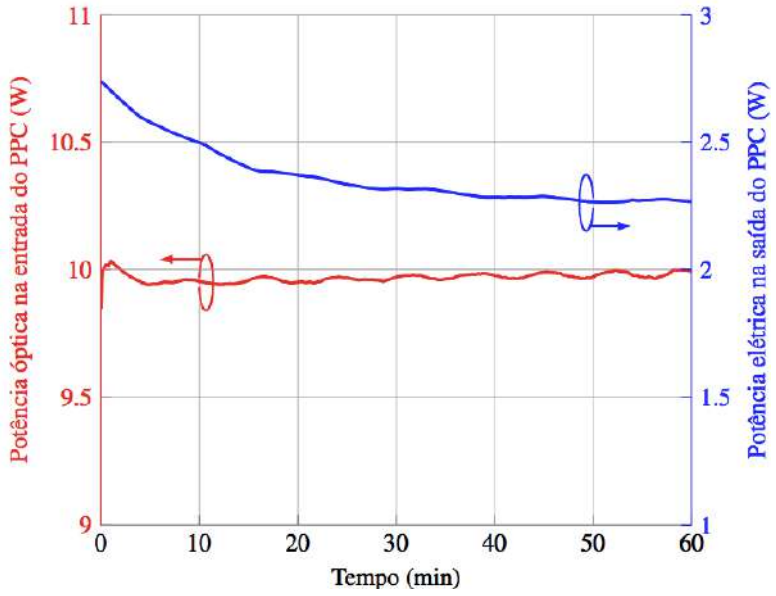

Figura 22: Medidas de potência óptica e elétrica na entrada e saída do PPC ao longo de 60 minutos de teste.

A Figura 22 também apresenta a estabilidade da potência elétrica convertida, ou seja, a potência elétrica medida na saída do PPC ao longo de 60 minutos. Com potência óptica de entrada de 10 W, o PPC apresentou uma eficiência de conversão de aproximadamente 27,8%. No entanto, observa-se que a potência elétrica convertida decresce de 2,7 W para 2,3 W nos primeiros 30 minutos de operação, o que é atribuído ao aumento de temperatura do PPC, que passou de 22 °C para mais de 50 °C durante esse intervalo. Portanto, além do uso de dissipadores de calor, pode ser necessário empregar sistemas de resfriamento por ar, por água ou por refrigeradores termoelétricos para garantir a eficiência de conversão do PPC

e, consequentemente, a estabilidade da potência elétrica fornecida. Apesar disso, observou-se que os níveis de potência elétrica se estabilizam após 60 minutos de operação. Com essa configuração, foi alcançada uma potência elétrica média de 2,73 W, com desvio padrão de 0,12 W.

5.1.2 Implementação do sistema RPoF

As Figuras 23 e 24 ilustram o diagrama de blocos e a fotografia da nossa implementação do sistema RPoF utilizando um enlace de 500 m de SMF/MMF para transmissão de dados/energia, respectivamente. O sistema PoF proposto visa alimentar opticamente um módulo RoF full-duplex, o qual consiste em um PD e *electrical amplifier* (EA) para operação em *downlink* (DL) e um LNA e LD para operação em *uplink* (UL). O sistema RoF é composto por módulos RoF comerciais TX e RX, conectados por meio de um enlace em fibra óptica. O uso de RoF analógico visa simplificar o processamento no receptor e minimizar o consumo de energia. A transmissão simultânea de DL e UL sobre uma única SMF é viabilizada por circuladores ópticos, que direcionam as portadoras ópticas para seus respectivos receptores, evitando o fluxo em direções opostas. Em particular, um *arbitrary waveform generator* (AWG) (M8190A, Keysight) gera o sinal de DL em banda base, que é convertido para 3,5 GHz por meio de um *vector signal generator* (VSG) (PSGE8267D, Keysight). A transmissão em DL é realizada pelo módulo RoF TX_1 (OZ101 mini TX, Optical Zonu Corporation), que consiste em um LNA com ganho de 22 dB e um LD de 4 dBm centrado em 1550,06 nm. Em seguida, o sinal é injetado na entrada do módulo RoF TX_1 ($RF_{ent(1)}$), amplificado e convertido em um portador óptico modulado diretamente, que é transmitido por um enlace de 500 m de SMF ($Óptico_{sai(1)}$). A recepção é realizada pelo módulo RoF opticamente alimentado RX_1 (OZ816 bidirecional, Optical Zonu Corporation), que consiste em um PD e um EA integrado com ganho de 20 dB ($Óptico_{ent(1)}$). A conversão O/E é realizada por detecção direta e o sinal de DL recebido é amplificado e injetado em um analisador vetorial de sinais (VSA) (DSAV084A, Keysight) ($RF_{sai(1)}$), o qual foi utilizado para avaliar o desempenho da transmissão em termos de EVM_{RMS}, conforme as especificações da *Release* 18 do 3GPP.

O sinal banda base de UL é gerado utilizando outro VSG (EXG N5172B, Keysight), que também é responsável por modular o sinal na frequência desejada, ou seja, 2,1 GHz. Além de receber o sinal de DL, o módulo RoF full-duplex opticamente alimentado TX_2 (OZ816 bidirecional, Optical Zonu Corporation) realiza a conversão *electrical-to-optical* (E/O) do sinal de UL, a geração do portador óptico e a modulação direta utilizando um LD de 6 dBm centrado em 1551,86 nm, além da amplificação por meio de um LNA com ganho de 17 dB ($Óptico_{sai(2)}$). A separação entre as portadoras ópticas de DL e UL é de 1,8 nm. Como não foi empregado um sistema de resfriamento para os LDs, podem ocorrer variações de comprimento de onda devido ao aumento da temperatura. No entanto, essa separação é suficiente para evitar interferências entre os portadores ópticos de DL e UL, uma vez que o experimento foi conduzido em um ambiente com controle de temperatura. Dessa forma, a portadora óptica de UL é então transmitido pelo mesmo enlace de 500 m de SMF e injetado no módulo RoF RX_2 (OZ101 mini RX, Optical Zonu Corporation) ($Óptico_{ent(2)}$), que realiza a detecção direta do sinal e sua amplificação por meio de um PD e um EA integrado com ganho de 20 dB. Ambos os módulos TX_1 e RX_2 são alimentados por fontes externas independentes. O desempenho do sinal de UL também é avaliado pelo VSA (DSAV084A, Keysight) ($RF_{sai(2)}$) em termos de EVM_{RMS}.

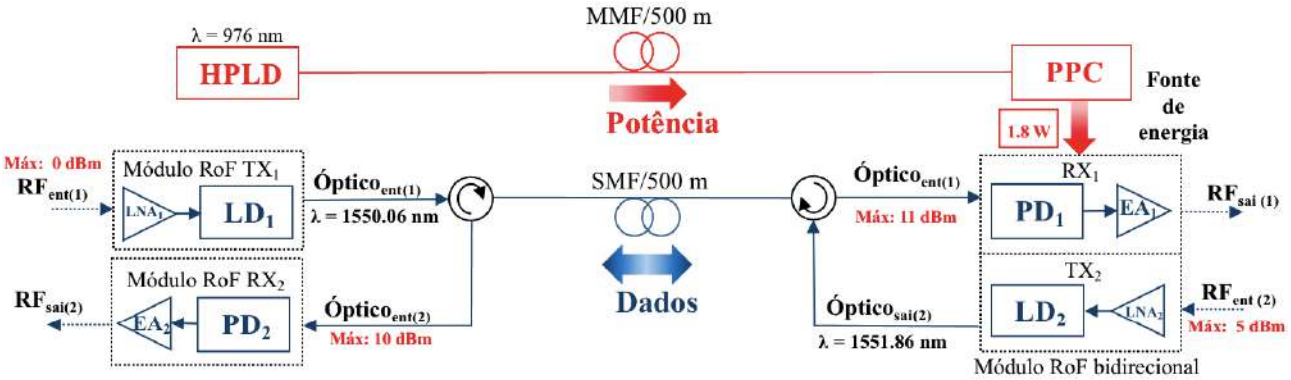

Figura 23: Diagrama de blocos do sistema RPoF proposto. HPLD - *high-power laser diode*; MMF - fibra multimodo; PPC - *photovoltaic power converter*; TX - transmissor; RX - receptor; LNA - amplificador de baixo ruido; LD - diodo laser; EA - amplificador elétrico; PD - fotodetector; SMF - fibra monomodo; RoF - radio sobre fibra.

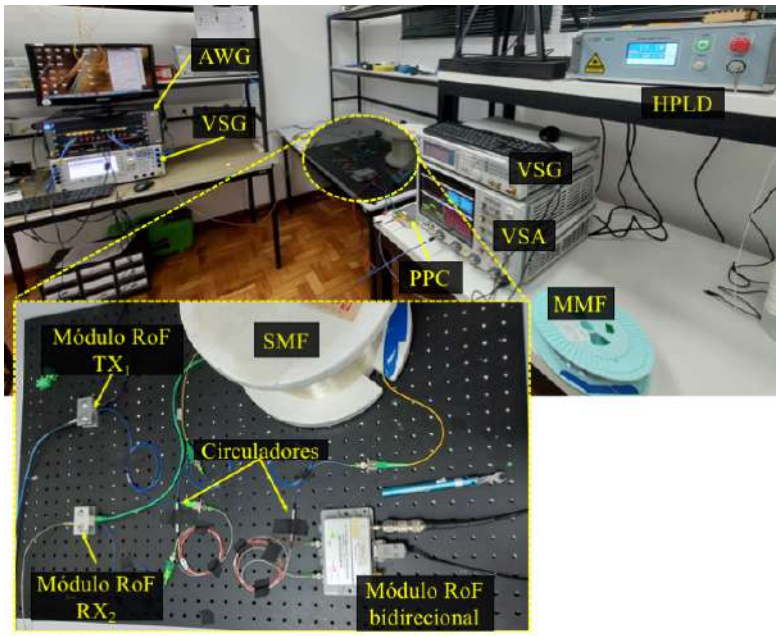

Figura 24: Fotografia do arranjo experimento do sistema RPoF. AWG - *arbitrary waveform generator*; VSG - *vector signal generator*; VSA - *vector signal analyzer*; HPLD - *high-power laser diode*; MMF - fibra multimodo; PPC - *photovoltaic power converter*; SMF - fibra monomodo.

O desempenho do sistema foi analisado comparando os resultados de EVM_{RMS} obtidos em dois cenários: módulo RoF full-duplex alimentado convencionalmente por uma fonte DC, e alimentado opticamente, ou seja, por meio do sistema PoF. A Figura 25 apresenta os resultados de EVM_{RMS} medidos em função da potência de RF injetada no módulo RoF TX_1 para um sinal de DL 16-QAM em 3,5 GHz com uma largura de banda de 50 MHz. É importante esclarecer que essas medições foram realizadas especificamente para avaliar o EVM_{RMS} nos cenários com alimentação via PoF e via fonte convencional. Neste teste específico, o foco principal não foi na taxa de transmissão, mas sim na análise da concordância das curvas entre esses dois cenários. Portanto, observa-se uma alta similaridade entre as curvas obtidas em toda a faixa testada, com variações mínimas. O sistema RPoF proposto atende aos requisitos

do 3GPP para níveis de potência de RF variando de -30 a 0 dBm em ambos os cenários. O melhor desempenho foi alcançado em -8 dBm, com EVM_{RMS} de 1,5% e 1,4% para os sistemas alimentados convencionalmente e opticamente, respectivamente, com uma diferença de apenas 0,1%. Os valores de EVM_{RMS} obtidos demonstram que o projeto mantém flexibilidade e margem para acomodar esquemas de modulação mais complexos quando aplicados ao padrão 5G *new radio* (NR). Observa-se que o EVM_{RMS} aumenta para potências de RF acima de -8 dBm, reduzindo a qualidade do sinal. Essa degradação ocorre devido à resposta não linear do EA do módulo RoF, que gera produtos de intermodulação significativos em potências de RF mais altas, distorcendo o sinal de RF, como observado nas constelações inseridas na Figura 25. Essa distorção ocorre independentemente do método de alimentação, ou seja, o EVM_{RMS} aumenta em ambos os cenários representados na Figura 25. No entanto, observa-se uma divergência entre as curvas obtidas para os sistemas alimentados convencionalmente e opticamente para potências de RF acima de -8 dBm, resultando em uma diferença de 1,4% em 0 dBm (potência máxima de entrada no TX_1).

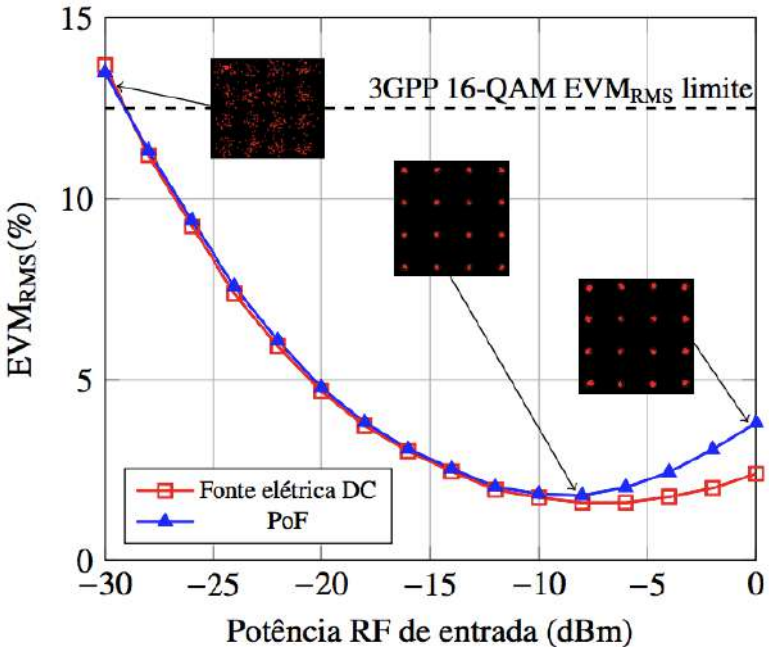

Figura 25: Medidas de EVM_{RMS} em função da potência de RF na entrada do módulo RoF RX_1 para um sinal de descida centrado em 3.5 GHz com 50 MHz de banda e modulação 16-QAM.

Amplificadores elétricos podem ser sensíveis a variações na tensão de entrada. Sem um conversor DC/DC, a tensão de alimentação pode não ser devidamente controlada, o que pode levar a alterações no comportamento do amplificador, especialmente em potências de entrada de RF mais altas. Apesar disso, esse nível de discrepância é aceitável para o sistema, considerando que ele irá operar na potência de RF ótima. Além disso, as medições de EVM_{RMS} tornam-se altamente instáveis devido à distorção do sinal. Dado que os experimentos foram realizados em momentos diferentes e envolveram leituras manuais, um maior grau de erro pode ser esperado. No contexto do sistema RoF, os valores de EVM_{RMS} e SNR obtidos sugerem uma perspectiva favorável para a extensão do enlace óptico. No entanto, para o sistema PoF, aumentar a distância representa um desafio, principalmente devido à maior atenuação da fibra em comprimentos de onda mais curtos. Embora tenhamos até 100 W de potência óptica disponível no HPLD, aumentar a potência óptica transmitida pode causar danos às conexões e à própria

fibra. Considerando a aplicação prevista em femtocélulas internas, vale ressaltar que longas distâncias de transmissão além de 1 km não são um requisito primário. A segunda análise consistiu em avaliar as medições de EVM_{RMS} em função da taxa de transmissão (*throughput*) para as transmissões DL e UL. Nessa avaliação, o foco foi direcionado para a maximização da taxa de transmissão em ambos os sentidos, UL e DL. A variação da taxa de transmissão foi obtida através da variação da largura de banda do sinal no transmissor, e os sinais foram avaliados sob os esquemas de modulação Q-PSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM, utilizando o VSG (M8190A, Keysight).

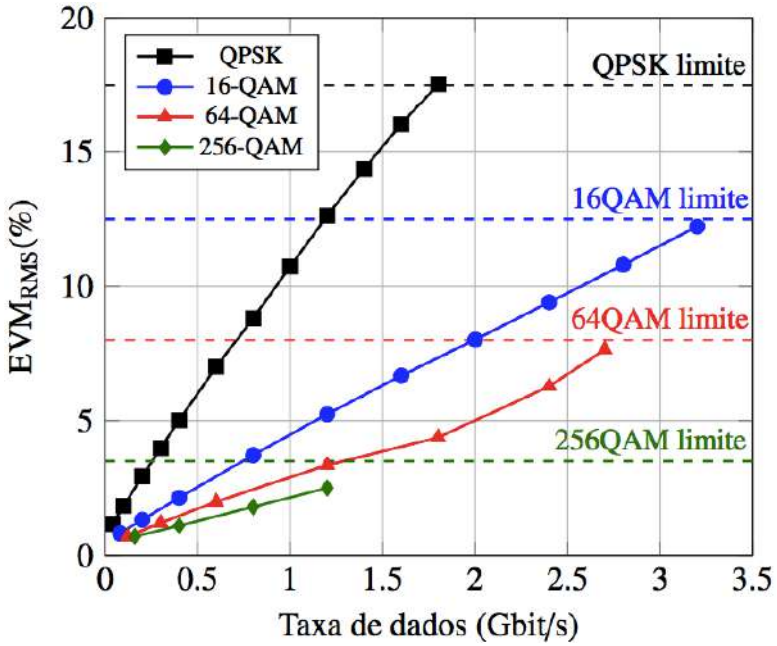

Figura 26: Medidas de EVM_{RMS} em função da taxa de dados do sinal de descida centrado em 3.5 GHz.

Os resultados estão representados nas Figuras 26 e 27. Nenhuma interferência significativa foi observada neste experimento, uma vez que a separação de frequência entre os sinais de DL e UL é de 1,4 GHz, e as maiores larguras de banda utilizadas foram 800 MHz e 250 MHz para DL e UL, respectivamente, estando bem dentro da faixa permitida. À medida que a taxa de transmissão aumenta, os valores de EVM_{RMS} se degradam. Em outras palavras, o aumento da largura de banda do sinal resulta em uma menor SNR, uma vez que a potência de RF é constante, por exemplo, -8 dBm para DL e -17 dBm para UL (pontos de operação ideais). Em particular, valores máximos de taxa de transmissão de 3,2 Gbps e 1 Gbps foram alcançados para as transmissões DL e UL, respectivamente, sob modulação 16-QAM, considerando o limite de EVM_{RMS} especificado pelo 3GPP. É importante observar que, em sistemas A-RoF, o sinal é transmitido dentro da frequência de acesso sem fio e das larguras de banda padronizadas pela 3GPP. Assim, a limitação de largura de banda decorre das restrições impostas pelo padrão 5G sem fio. De acordo com a *Release* 18 do 3GPP, utilizamos frequências dentro da faixa *frequency range 1* (FR1), ou seja, 3,5 GHz e 2,1 GHz para DL e UL, respectivamente, significando que a largura de banda máxima alocada para o 5G (FR1) é de 100 MHz. Em contraste, foi utilizado até 800 MHz (8 vezes maior que o padrão) para demonstrar a qualidade e desempenho efetivo do sistema. Experimentos futuros poderão incluir um enlace sem fio para transmitir o sinal de DL. Considerando uma aplicação prevista em femtocélulas internas, um enlace sem fio de 50 m

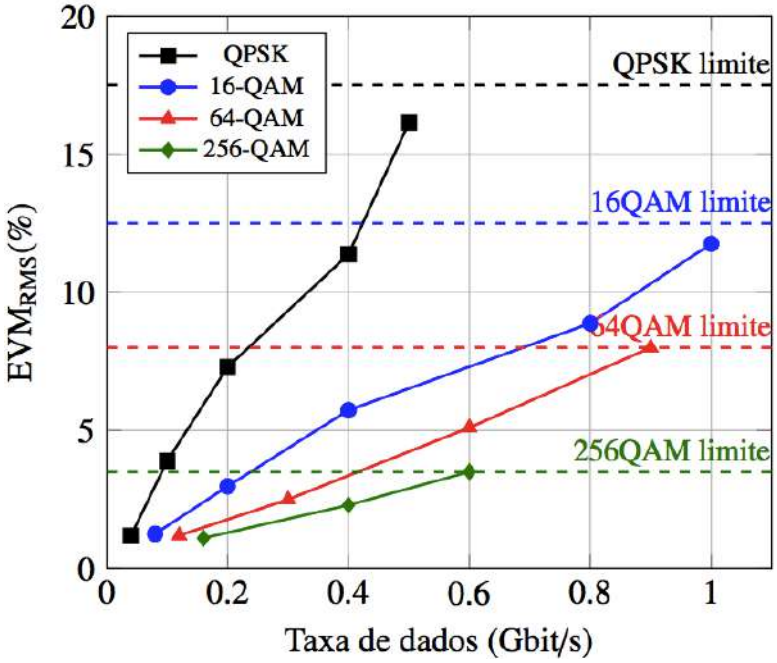

Figura 27: Medidas de EVM_{RMS} em função da taxa de dados do sinal de subida centrado em 2.1 GHz.

seria adequado. Nesse caso, um amplificador de RF com ganho de 30 dB poderia ser empregado para aumentar a potência de $RF_{out(1)}$ (-45 dBm). Como nem toda a potência disponível no PPC foi utilizada, é possível alimentar o amplificador de RF adicional. As transmissões DL e UL foram realizadas por módulos RoF distintos, resultando em divergências no desempenho dos sinais, uma vez que não foi utilizada amplificação óptica. Vale ressaltar que o aumento na ordem de modulação não reflete necessariamente um aumento na taxa de transmissão, pois os limites de EVM_{RMS} do 3GPP devem ser respeitados.

5.2 Conclusões

Foi proposto e implementado com êxito um sistema de comunicação full-duplex alimentado opticamente para cenários B5G, por meio da integração das técnicas RoF e PoF, originando o sistema RPoF. Especificamente, a demonstração experimental foi baseada em um cenário com fibras independentes dedicadas, nas quais os sinais de dados e de energia são transmitidos por enlaces ópticos de 500 metros de SMF e MMF, respectivamente. O sistema PoF desenvolvido é composto por componentes disponíveis comercialmente, como HPLD, MMF e PPC, cujas características e limitações foram avaliadas detalhadamente para demonstrar a aplicabilidade da solução proposta. O sistema PoF foi capaz de fornecer até 2,73 W com uma eficiência média de transmissão de potência PTE de 22% e uma eficiência energética global de 10%. Além disso, foram analisadas as curvas de estabilidade da potência óptica e elétrica, evidenciando a capacidade do sistema em fornecer energia ininterrupta ao longo de um período de 60 minutos. Consequentemente, o sistema PoF foi capaz de alimentar opticamente um módulo RoF composto pelas partes de TX e RX, ou seja, LD e LNA para a operação de UL, LD e EA para a operação de DL, respectivamente. O desempenho das transmissões DL e UL foi avaliado em termos de EVM_{RMS}, de acordo com os requisitos estabelecidos pelo 3GPP. A comparação entre os resultados de EVM_{RMS} obtidos com o sistema alimentado convencionalmente e com

o sistema alimentado via PoF demonstrou o potencial desta técnica para integrar sistemas de comunicação de próxima geração como uma evolução do PoE. Além disso, foram alcançadas taxas de transmissão de 3,2 Gbps para DL e 1 Gbps para UL, atendendo às recomendações do 3GPP. Considerando ambas as direções, obteve-se uma taxa máxima de transmissão combinada de 4,2 Gbps.

6 Conclusões

A complexidade e os requisitos técnicos das redes móveis de sexta geração demandam um redesenho completo das arquiteturas de transporte, com foco em flexibilidade, escalabilidade, eficiência espectral e energética. Os estudos e experimentações descritos neste relatório demonstram o potencial das tecnologias ópticas A-RoF, FSO e PoF para cumprir esse papel.

No caso do A-RoF, foi possível validar experimentalmente um sistema robusto e funcional com supressão do efeito de SBS via modulação de fase, aliado à linearização do enlace por meio de uma técnica de DPD implementada com redes neurais do tipo MLP. Essa abordagem combinada possibilitou a operação com níveis ópticos elevados, fundamentais para enlaces de longa distância, mantendo a integridade do sinal e melhorando o desempenho do sistema.

Na sequência, a integração do A-RoF com sistemas MIMO 2×2 demonstrou a viabilidade de arquiteturas de *fronthaul* óptico simplificadas, baseadas em modulação direta e detecção direta, com suporte a WDM. Avaliações de desempenho mostraram que, ao se operar com potência de RF adequada, é possível manter ordens de modulação elevadas (até 256-QAM), mesmo após 20 km de transmissão óptica. Além disso, a análise espectral demonstrou que as principais degradações estão relacionadas a distorções não lineares induzidas por amplificadores de RF e moduladores, que podem futuramente ser mitigadas via DPD.

Já na implementação do sistema híbrido FSO/RF, alimentado exclusivamente por PoF, foi demonstrado que é possível operar uma femtocélula comercial em pleno funcionamento com desempenho comparável a um enlace Ethernet cabeado tradicional. Os testes de vazão em *uplink* e *downlink*, além das medições de espectro e análise de estabilidade de fornecimento de energia, validaram a robustez e a confiabilidade da solução. O sistema PoF demonstrou eficiência de conversão em torno de 20%, e operou de forma estável durante longos períodos, mesmo em operação ativa da femtocélula.

Portanto, os resultados obtidos nesta fase do projeto Brasil 6G não apenas comprovam a viabilidade técnica das tecnologias propostas, como também apontam para sua maturidade em cenários de uso reais. Os sistemas testados são altamente reconfiguráveis, compatíveis com plataformas SDR, e adaptáveis a diferentes requisitos de cobertura, vazão e custo. Além disso, o uso de enlaces ópticos para transporte de sinal e energia representa uma convergência promissora. Nesta fase do projeto Brasil 6G explorou-se soluções com profundidade técnica e visão sistêmica, avançando significativamente na direção de uma infraestrutura nacional de telecomunicações que não apenas atenda aos requisitos das futuras redes 6G, mas que também reflita os desafios e particularidades do território brasileiro.

Referências

[1] S. Alraih, I. Shayea, M. Behjati, R. Nordin, N. F. Abdullah, A. Abu-Samah, and D. Nandi, "Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations Towards 6G Mobile Communications," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 762, 2022.

[2] S. A. A. Hakeem, H. H. Hussein, and H. Kim, "Vision and Research Directions of 6G Technologies and Applications," *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, pp. 2419–2442, 2022.

[3] C. Ranaweera, C. Lim, Y. Tao, S. Edirisinghe, T. Song, L. Wosinska, and A. Nirmalathas, "Design and Deployment of Optical x-haul for 5G, 6G, and Beyond: Progress and Challenges," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, no. 9, pp. D56–D66, 2023.

[4] C.-X. Wang, X. You, X. Gao, X. Zhu, Z. Li, C. Zhang, H. Wang, Y. Huang, Y. Chen, H. Haas *et al.*, "On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 905–974, 2023.

[5] N. Chen and M. Okada, "Toward 6G Internet of Things and the Convergence with RoF System," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 8719–8733, 2020.

[6] C.-W. Chow, "Recent Advances and Future Perspectives in Optical Wireless Communication, Free Space Optical Communication and Sensing for 6G," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, no. 11, pp. 3972–3980, 2024.

[7] C. Vázquez, G. Otero, R. Altuna, J. López-Cardona, and D. Larrabeiti, "Power over Fiber Pooling as Part of 6G Optical Fronthaul," *Journal of Lightwave Technology*, 2024.

[8] H. Ji, C. Sun, and W. Shieh, "Spectral Efficiency Comparison Between Analog and Digital RoF for Mobile Fronthaul Transmission Link," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 20, pp. 5617–5623, 2020.

[9] H. Dahrouj, A. Douik, F. Rayal, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Cost-Effective Hybrid RF/FSO Backhaul Solution for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 98–104, 2015.

[10] J. B. Rosolem, F. R. Bassan, R. S. Penze, A. A. Leonardi, J. P. V. Fracarolli, and C. Floridia, "Optical Sensing in High Voltage Transmission Lines Using Power over Fiber and Free Space Optics," *Optical Fiber Technology*, vol. 26, pp. 180–183, 2015.

[11] M. Xu, Z. Jia, J. Wang, L. Alberto Campos, and G.-K. Chang, "Statistical Data Compression and Differential Coding for Digital Radio-over-Fiber-Based Mobile Fronthaul," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 1, pp. A60–A71, 2019.

[12] M. Xu, F. Lu, J. Wang, L. Cheng, D. Guidotti, and G.-K. Chang, "Key Technologies for Next-Generation Digital RoF Mobile Fronthaul With Statistical Data Compression and Multiband Modulation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 17, pp. 3671–3679, 2017.

[13] M. Matthé, L. L. Mendes, and G. Fettweis, "Generalized Frequency Division Multiplexing in a Gabor Transform Setting," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 1379–1382, 2014.

[14] L. A. M. Pereira, L. L. Mendes, M. A. Cox, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Open Dataset Initiative for Machine Learning-Based Linearization in Analog Radio over Fiber Systems," *Optics Communications*, 2025, accepted for Publication.

[15] N. H. Zhu, Z. Shi, Z. K. Zhang, Y. M. Zhang, C. W. Zou, Z. P. Zhao, Y. Liu, W. Li, and M. Li, "Directly Modulated Semiconductor Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 1–19, 2017.

[16] 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.

[17] S. A. Al-Gailani, M. F. M. Salleh, A. A. Salem, R. Q. Shaddad, U. U. Sheikh, N. A. Algeelani, and T. A. Almohamad, "A survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353–7373, 2020.

[18] Z. Wei, Z. Wang, J. Zhang, Q. Li, J. Zhang, and H. Fu, "Evolution of optical wireless communication for B5G/6G," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 83, p. 100398, 2022.

[19] K. Wang, T. Song, Y. Wang, C. Fang, J. He, A. Nirmalathas, C. Lim, E. Wong, and S. Kandeepan, "Evolution of short-range optical wireless communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 1019–1040, 2022.

[20] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 218–224, 2018.

[21] M. A. Esmail, H. Fathallah, and M.-S. Alouini, "Outdoor FSO communications under fog: attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE photonics journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2016.

[22] C. H. de Souza Lopes, T. P. V. Andrade, L. A. M. Pereira, A. Bogoni, E. Conforti, and A. C. Sodré, "Implementation of a Hybrid FiWi System Using FSO, VLC and mm-waves Towards 6G Applications," *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023.

[23] W. M. R. Shakir, "Performance Evaluation of a Selection Combining Scheme for the Hybrid FSO/RF System," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2017.

[24] J. Zhang, J. Wang, Y. Xu, M. Xu, F. Lu, L. Cheng, J. Yu, and G.-k. Chang, "Fiber–Wireless Integrated Mobile Backhaul Network Based on a Hybrid Millimeter-Wave and Free-Space-Optics Architecture with an Adaptive Diversity Combining Technique," *Optics letters*, vol. 41, no. 9, pp. 1909–1912, 2016.

[25] M. A. Esmail, A. M. Ragheb, H. A. Fathallah, M. Altamimi, and S. A. Alshebeili, "5G-28 GHz Signal Transmission over Hybrid All-Optical FSO/RF Link in Dusty Weather Conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24 404–24 410, 2019.

[26] A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira, and P. P. Monteiro, "Demonstration of a Hybrid Optical Fiber–Wireless 5G Fronthaul Coexisting With End-to-End 4G Networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 72–78, 2020.

[27] D.-N. Nguyen, J. Bohata, M. Komanec, S. Zvanovec, B. Ortega, and Z. Ghassemlooy, "Seamless 25 GHz Transmission of LTE 4/16/64-QAM Signals over Hybrid SMF/FSO and Wireless Link," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 24, pp. 6040–6047, 2019.

[28] C. H. de Souza Lopes, E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges, A. C. Ferreira, M. Abreu, W. D. Dias, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. C. S. Junior, "Non-Standalone 5G NR Fiber-Wireless System Using FSO and Fiber-Optics Fronthauls," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 406–417, 2021.

[29] H. Holma and M. Simanainen, "Small Cell Products," *LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13*, pp. 77–90, 2015.

[30] Q. Yu, B. Qiu, X. Shen, S. Chen, and W. Xia, "Research on Tunable EVM Digital Signal Generation System," in *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, 2018, pp. 1–3.

[31] Z. Yang, Z. Zhou, and Y. Liu, "From RSSI to CSI: Indoor Localization via Channel Response," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 46, no. 2, pp. 1–32, 2013.

[32] U. Dogdu, "2G/3G/4G/5G signals Demodulation with MATLAB Using RTL-SDR 2832U and USRP B210," Master's thesis, U. Dogdu, 2024.

[33] L. C. Alexandre *et al.*, "Análise da coexistência do 5g nr com comunicações terrestres e satelitais," 2020.

[34] M. Matsuura, H. Nomoto, H. Mamiya, T. Higuchi, D. Masson, and S. Fafard, "Over 40-W Electric Power and Optical Data Transmission Using an Optical Fiber," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4532–4539, 2020.

[35] L. C. Souza, T. P. Andrade, F. B. Pinto, E. S. Lima, F. M. Junior, E. L. Anderson, and A. C. S. Junior, "Enabling Next-generation Gbps Full-duplex Communications Systems Applying Radio-and Power-over-Fiber Integration," *Optics Communications*, vol. 557, p. 130315, 2024.

[36] A. M. Abdalla, J. Rodriguez, I. Elfergani, and A. Teixeira, *Energy Efficiency in the Cloud Radio Access Network (C-RAN) for 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons, 2019, pp. 225–248.

[37] Y.-S. Lee, N.-K. Yu, J. Chun, J.-E. Yang, C.-S. Lim, H. Kim, G. Park, J.-A. Lee, K. Lee, B.-K. Kaang, and J.-H. Lee, "Identification of a novel Shank2 transcriptional variant in Shank2 knockout mouse model of autism spectrum disorder," *Molecular Brain*, vol. 13, no. 1, 2020, cited by: 13; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85083071553&doi=10.1186%2fs13041-020-00595-4&partnerID=40&md5=22a9066d24039bfde356aba8685eab09

[38] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.

[39] J. Liu, M. Sheng, L. Liu, and J. Li, "Network Densification in 5G: From the Short-Range Communications Perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 12, pp. 96–102, 2017.

[40] R. Maximidis, C. Vagionas, G. Kalfas, Y. Leiba, A. Miliou, and N. Pleros, "A 51 Gb/s Reconfigurable mmWave Fiber-Wireless C-RAN Supporting 5G/6G MNO Network Sharing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 14, pp. 4705–4712, 2023.

[41] H. Rodrigues Dias Filgueiras, E. Saia Lima, M. Sêda Borsato Cunha, C. H. De Souza Lopes, L. C. De Souza, R. M. Borges, L. Augusto Melo Pereira, T. Henrique Brandão, T. P. V. Andrade, L. C. Alexandre, G. Neto, A. Linhares, L. L. Mendes, M. A. Romero, and A. Cerqueira S., "Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9232–9259, 2023.

[42] I. A. Alimi, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, "Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 708–769, 2018.

[43] T. Pfeiffer, "Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures [Invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 11, p. B38 – B45, 2015, cited by: 267. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84960081700&doi=10.1364%2fJOCN.7.000B38&partnerID=40&md5=566dbbdefcb10a2b6db62536bd155512

[44] H. Holma and M. Simanainen, *Small Cell Products*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015, ch. 6, pp. 77–90. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118912560.ch6

[45] R. Altuna, J. López-Cardona, F. M. Al-Zubaidi, D. Montero, and C. Vázquez, "Power-Over-Fiber Impact and Chromatic-Induced Power Fading on 5G NR Signals in Analog RoF," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 20, pp. 6976–6983, 2022.

[46] H. Yang, S. Wang, D. Peng, Y. Qin, and S. Fu, "Optically powered 5G WDM Fronthaul Network with Weakly-Coupled Multicore Fiber," *Optics Express*, vol. 30, no. 11, pp. 19 795–19 804, 2022.

[47] F. Pinto, L. C. de Souza, T. Andrade, E. Lima, L. Silva, F. Portelinha, E. L. Anderson, and A. Cerqueira, "Power-over-Fiber-Based Optical Wireless Communication Systems Towards 6G," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, no. 8, pp. D86–D95, 2024.

[48] 3GPP, "Base station (BS) radio transmission and reception," 2021.

[49] T. C. Banwell, R. C. Estes, L. A. Reith, P. W. Shumate, and E. Vogel, "Powering the Fiber Loop Optically-A Cost Analysis," *Journal of Lightwave*

Technology, vol. 11, no. 3, p. 481 – 494, 1993, cited by: 50. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027554655&doi=10.1109%2f50.219583&partnerID=40&md5=007fa8a575096243427b9b54b659f716

[50] J.-G. Werthen, "Powering next generation networks by laser light over fiber," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2008, p. OWO3.