Supressão de Efeito Brillouin e Compensação de Distorções em Moduladores Ópticos Não Lineares

Luiz Augusto Melo Pereira, Felipe Batista Faro Pinto, Luciano Leonel Mendes e Arismar Cerqueira Sodré Junior

***Resumo*— Este trabalho apresenta um sistema analógico de rádio sobre fibra (A-RoF) para enlaces ópticos de longa distância, incorporando técnicas de supressão do espalhamento Brillouin estimulado (SBS) e de pré-distorção digital (DPD) baseada em aprendizado de máquina. A mitigação do SBS é alcançada usando um modulador de fase que redistribui espectralmente a potência óptica, elevando o limiar de SBS. Por outro lado, as distorções não lineares são compensadas usando uma DPD baseada em MLP. Resultados experimentais demonstram ganhos na qualidade do sinal, em termos de (EVM_{RMS}), permitindo operar com potências mais elevadas sem degradar o desempenho.**

***Palavras-Chave*— A-RoF, Distorções não lineares, DPD e Espalhamento de Brillouin.**

***Abstract*— This work presents an analog radio-over-fiber (A-RoF) system for long-distance optical links, incorporating techniques for suppressing stimulated Brillouin scattering (SBS) and applying machine learning-based digital predistortion (DPD). SBS mitigation is achieved using a phase modulator that spectrally redistributes the optical power, raising the SBS threshold. On the other hand, nonlinear distortions are compensated using a DPD based on a multilayer perceptron (MLP). Experimental results demonstrate improvements in signal quality, in terms of (EVM_{RMS}), enabling operation at higher power levels without degrading performance.**

***Keywords*— A-RoF, Brillouin Scattering, DPD and Nonlinear Distortion.**

I. Introdução

As discussões sobre a evolução do quinta geração de comunicações móveis (5G) seguem em andamento, mesmo enquanto esta nova geração de redes móveis continua a ser implementada globalmente. O 5G trouxe uma nova perspectiva para a telefonia móvel, introduzindo casos de uso que vão muito além do simples aumento na vazão de dados. Embora grandes esforços tenham sido dedicados ao desenvolvimento do 5G, a versão atualmente em implantação não contempla todas as funcionalidades originalmente previstas, em função de desafios técnicos e comerciais. Nesse contexto, surgiram os primeiros estudos sobre a sexta geração de comunicações móveis (6G). Esta nova geração traz consigo o desafio de atender aos requisitos dos casos de uso atuais e emergentes, exigindo avanços que vão muito além das capacidades das redes 5G operando na faixa sub-6 GHz [1]. A pluralidade de aplicações e funcionalidades previstas para essa futura geração de comunicações móveis, demanda que a camada física seja flexível e conte com o uso de várias tecnologias distintas. Uma tecnologia chave para redes de transporte 6G é o rádio sobre fibra analógico (A-RoF), que permite que sinais no formato analógico sejam transportados usando enlaces de fibra óptica.

Luiz Augusto Melo Pereira, Felipe Batista Faro Pinto, Luciano Leonel Mendes and Arismar Cerqueira Sodré Junior, Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG 37536-001, Brazil (e-mails: luiz.melo@inatel.br; felipe.pinto@dtel.inatel.br; lucianol@inatel.br; e arismar@inatel.br).

Sistemas A-RoF estão sujeitos a diversos efeitos não lineares intrínsecos às fibras ópticas, tais como *four-wave mixing* (FWM), *stimulated* Raman *scattering* (SRS) e *stimulated* Brillouin *scattering* (SBS). Dentre esses fenômenos, o SRS e o SBS são tipicamente evitados em sistemas ópticos de comunicação por meio da limitação da potência óptica abaixo de seus respectivos limiares de não linearidade [2]. Especificamente, o SBS resulta da interação entre ondas ópticas e acústicas geradas por efeitos que ocorrem na fibra, culminando na formação de uma onda retroespalhada que impõe uma restrição à potência óptica máxima que pode ser transmitida. Contudo, em aplicações específicas, como enlaces ópticos de longa distância, pode ser necessário operar com potências ópticas mais elevadas para compensar as perdas acumuladas ao longo do trajeto. Nesses cenários, a redução da potência não é uma opção viável, o que favorece o surgimento do SBS e demanda estratégias eficazes para sua mitigação.

Sistemas A-RoF para o transporte de sinais entre a central office (CO) e a estação rádio base (ERB) mostra-se promissora. Esses sistemas de transporte óptico podem ser aplicados a diversas faixas de frequência de interesse, como a *ultra-high frequency* (UHF), e apresentam potencial para serem escalonados no futuro, de modo a suportar faixas de frequência mais elevadas. Em particular, os sistemas de A-RoF oferecem uma solução atrativa para o transporte de sinais, possibilitando inclusive a utilização da infraestrutura já existente de provedores de Internet [3]. Esses sistemas permitem o transporte de sinais analógicos de radio-frequência (RF) diretamente na frequência de radiação, eliminando a necessidade de conversão de frequência por meio de misturadores e osciladores na ERB, e proporcionando ganhos em eficiência espectral em comparação aos sistemas baseados em rádio sobre fibra digital (D-RoF) [4]. Uma vantagem adicional dos sistemas A-RoF é a eliminação dos conversores *analog-to-digital converter* (ADC) e *digital-to-analog converter* (DAC) na ERB, resultando em arquiteturas mais simples e de menor custo. Entretanto, esses sistemas são mais suscetíveis à dispersão cromática e aos efeitos não lineares da fibra óptica, quando comparados às soluções baseadas em D-RoF [5].

Sistemas A-RoF podem ser implementados via modulação externa ou direta. Na modulação externa, emprega-se um Mach-Zehnder *modulator* (MZM) para modular uma fonte de luz proveniente de um *laser diode* (LD) com um sinal de RF analógico, enquanto que na modulação direta, o sinal de RF é aplicado diretamente na alimentação do LD. A

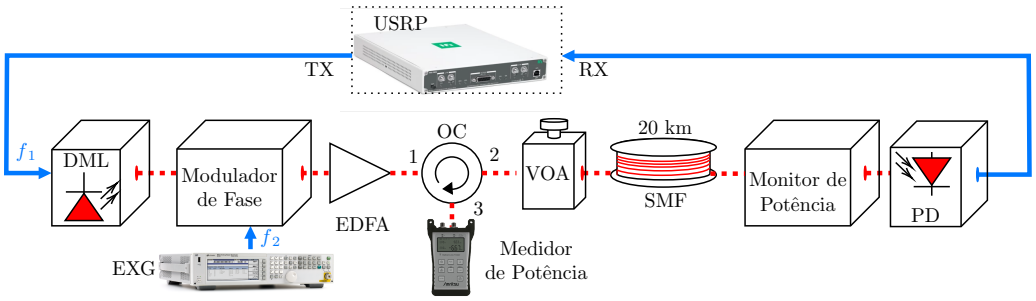

Fig. 1. Diagrama em blocos para o sistema A-RoF com supressão de SBS. DML- *directly modulated laser*, EDFA - *Erbium-doped fiber amplifier*; OC- *optical circulator*; VOA- *variable optical attenuator* ; SMF - *single-mode fiber*; PD- *photodetector*; USRP- *Universal Software Radio Peripheral*.

modulação direta, frequentemente utilizada pela simplicidade de implementação, apresenta algumas limitações relevantes para sistemas de comunicação óptica de alta performance [6]. A largura de banda é restrita pela resposta intrínseca do dispositivo emissor, dificultando a operação em frequências elevadas.

Em ambas as abordagens, as não linearidades dos moduladores ópticos constituem uma limitação significativa, podendo ser mitigadas pela aplicação de técnicas de *digital predistortion* (DPD) [7–9]. A DPD busca linearizar a resposta do sistema compensando previamente as não linearidades previstas. Em moduladores ópticos, isso envolve modelar a sua resposta não linear aplicando uma função inversa aproximada. As não linearidades dos moduladores ópticos tornam-se críticas ao aumentar a potência de RF do sinal modulante. Este efeito pode ser evitado reduzindo a potência de operação. No entanto, uma alocação dinâmica da potência de RF é desejável especialmente para enlaces de longa distância, que visam aumentar a região de cobertura. Em paralelo, o aumento da potência óptica inserida na fibra óptica, resulta em efeitos não lineares. O SBS, é um exemplo de efeito não linear presente em comunicações ópticas de elevada potência. Diversos trabalhos tratam da redução do SBS em sistemas de comunicações ópticas [10–12].

Paralelamente, o aumento da potência óptica inserida na fibra intensifica efeitos não lineares, como o SBS, fenômeno que pode limitar significativamente o desempenho de sistemas ópticos de alta potência. Diversos estudos têm investigado técnicas para mitigar o impacto SBS em sistemas de comunicações ópticas [10–12]. Mais recentemente, os autores de [10] propuseram e demonstraram uma técnica para suprimir a degradação da relação sinal ruído (SNR) causada pelo SBS em enlaces A-RoF de alta potência e longa distância. Técnicas como modulação de fase aplicam um espalhamento espectral da portadora, reduzindo a densidade espectral de potência e elevando o limiar de início do SBS, conforme demonstrado em [10].

Este trabalho propõe um sistema A-RoF assistido por aprendizado de máquina, combinando supressão do SBS via modulação de fase e compensação de distorções não lineares por meio de DPD com rede neural *multi layer perceptron* (MLP), previamente desenvolvido por nosso grupo de pesquisa [13]. O diferencial da abordagem está na integração prática em tempo real no ambiente GNU Radio, possibilitando a operação com maiores potências ópticas e de RF sem degradar o desempenho. Os resultados são analisados em termos de *root mean square error vector magnitude* (EVM_{RMS}) e potência refletida, evidenciando melhorias frente ao estado da arte.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve os detalhes de implementação do sistema A-RoF com supressão de SBS e DPD. A Seção III apresenta os resultados experimentais, e discussões sobre o desempenho do sistema proposto. Por fim, a Seção IV expõe as principais discussões e conclusões.

II. Sistema A-RoF com Supressão de Brillouin

Essa seção apresenta a configuração experimental adotada para o desenvolvimento do sistema A-RoF de alta potência com supressão SBS e aplicação de DPD. Além disso, descreve-se o procedimento utilizado para aquisição do banco de dados e o treinamento da DPD.

A. 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. Para isso, adotou-se a faixa de UHF, com frequência central em 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). O sinal de RF utiliza a forma de onda *generalized frequency division multiplexing* (GFDM), uma modulação não ortogonal que apresenta menor emissão fora de faixa e maior eficiência espectral em comparação ao *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) [14], sendo, portanto, mais adequada para sistemas de comunicação que demandam alto desempenho espectral. Adicionalmente, foi empregado um modulador de fase com a finalidade de redistribuir a potência óptica por uma ampla gama de componentes em frequências laterais, dependentes de da frequência (f_2) de um sinal senoidal gerado pelo EXG N5173B, da Keysight. Essa redistribuição reduz a densidade de potência óptica injetada na fibra, o que contribui para elevar o limiar de SBS.

Na sequência, um *Erbium-doped fiber amplifiers* (EDFA) é utilizado para amplificar o sinal à saída do modulador de fase.

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, adiciou-se um *variable optical attenuator* (VOA), para 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.

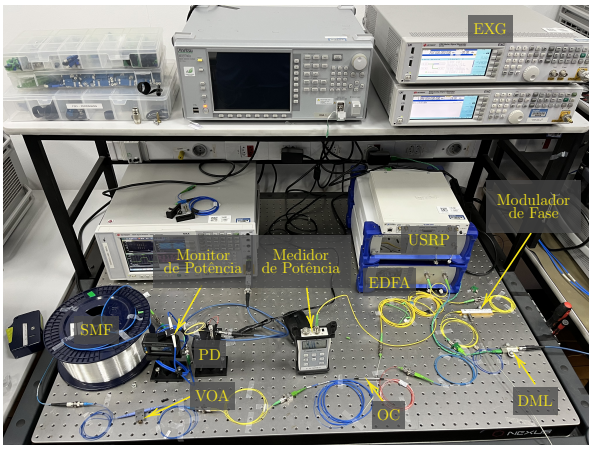

Fig. 2. Fotografia da configuração experimental utilizada.

B. 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 nosso grupo de pesquisa, que permite a inserção de novos blocos de processamento diretamente no GNU Radio [15]. Essa abordagem oferece grande flexibilidade, pois possibilita a criação e integração de blocos específicos para diferentes tarefas de processamento de sinal.

Nesse contexto, desenvolveu-se 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 MLP para executar uma tarefa de regressão supervisionada. Isso exige um conjunto de dados representativo para treinar o modelo de forma eficaz. Durante a coleta de dados, amostras do sinal transmitido foram armazenadas na saída da cadeia de transmissão, antes da conversão digital-analógica. Na recepção, os dados foram coletados após o sinal percorrer o sistema A-RoF e serem novamente amostrados. 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, utilizando blocos nativos do GNU Radio, como o File Sink, para armazenar os dados em arquivos binários, os quais podem ser facilmente processados posteriormente em linguagens como MATLAB e Python. 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.

C. Treinamento da DPD

A DPD implementada neste trabalho foi baseada em uma rede neural do tipo MLP. A arquitetura MLP foi escolhida por sua capacidade de modelar relações não lineares contínuas entre entrada e saída em tarefas de regressão. 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. O treinamento da rede neural MLP foi realizado utilizando o algoritmo de otimização Adam, com taxa de aprendizado fixada em 0,001. A função de perda adotada foi o mean-squared error (MSE). O processo de treinamento foi conduzido ao longo de 3000 épocas, com aplicação de critério de parada antecipada e paciência de 100 épocas, a fim de evitar sobreajuste ao conjunto de dados de treinamento.

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. 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.

III. 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 VOA.

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 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 o efeito de mitigação. Contudo, a potência foi limitada a 24 dBm para manter a integridade do componente e evitar danos.

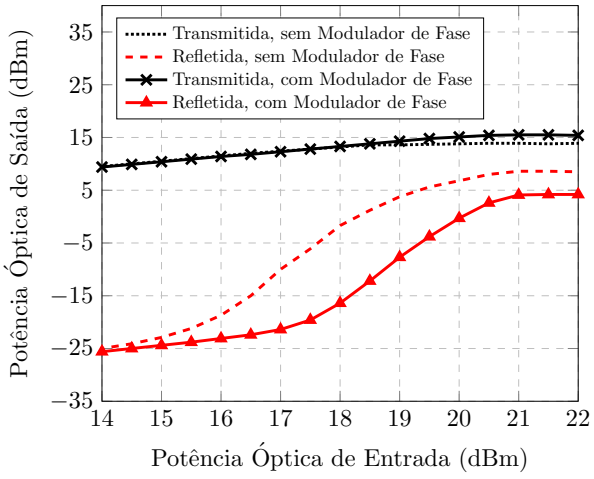

Fig. 3. Efeito da modulação de fase na potência óptica transmitida e refletida em função da potência óptica na entrada SMF.

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 efeito de 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

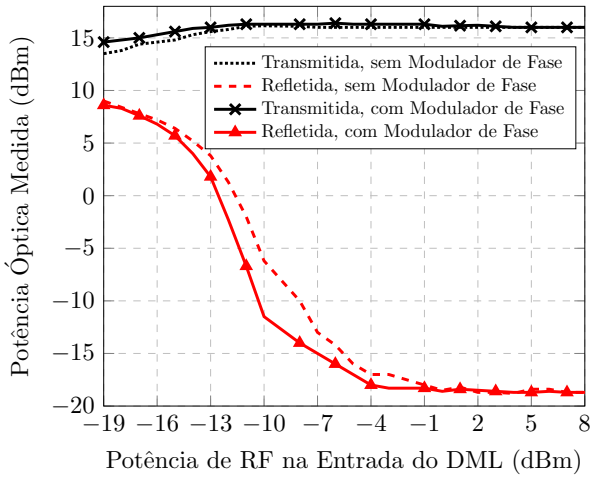

Fig. 4. Impacto da variação da RF nas potências ópticas transmitida e refletida.

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 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 de 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 espúria fora da faixa de interesse. A Figura 6 apresenta as medidas de

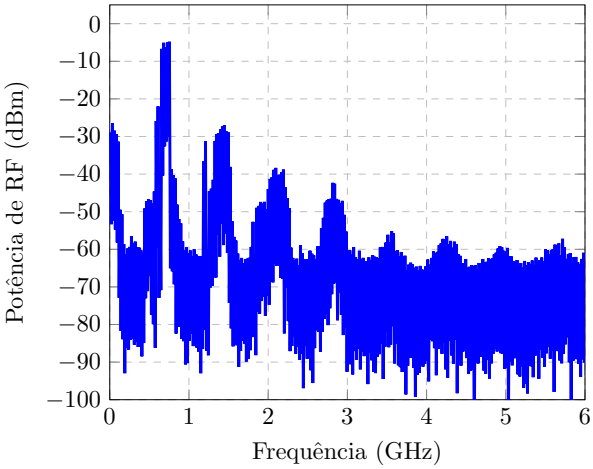

Fig. 5. Espectro elétrico fotodetectado.

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 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.A Figura 6 também apresenta a constelação do sinal recebido para uma potência de RF de -4 dBm, considerando o uso da técnica de DPD. Observa-se uma modulação 256-QAM com EVM_{RMS} inferior a 3%, evidenciando a eficácia da linearização promovida pela DPD na mitigação das distorções não lineares.

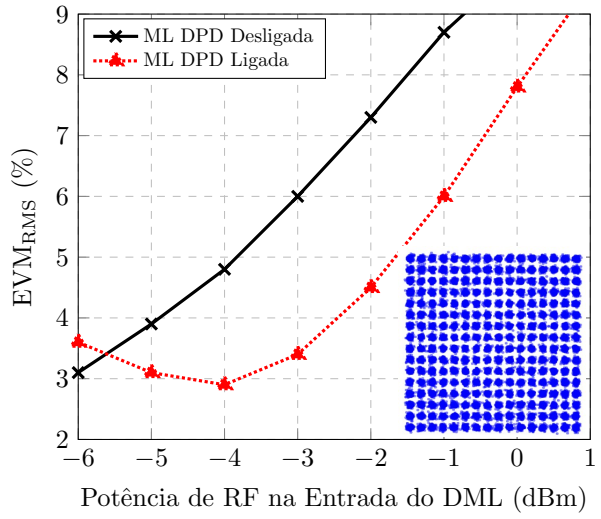

Fig. 6. Desempenho da DPD baseda em aprendizado de máquina, em termos de EVM_{RMS}.

IV. 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. 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 do modulador de 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.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelos seguintes projetos de pesquisa: Projeto Brasil 6G com apoio da RNP/MCTI (Concessão 01245.010604/2020-14), Projeto xGMobile código XGM-AFCCT-2024-2-15-1 com recursos da EMBRAPII/MCTI (Concessão 052/2023 PPI IoT/Manufatura 4.0 e FAPEMIG Concessão PPE-00124-23), Projeto SEMEAR com apoio da FAPESP (Concessão nº 22/09319-9), Projeto SAMURAI com apoio da FAPESP (Concessão nº 20/05127-2), Projeto Ciência por Elas com recursos da FAPEMIG (Concessão APQ-04523-23), Projeto Fomento à Internacionalização das ICTMGs com recursos da FAPEMIG (Concessão APQ-05305-23), Programa de Apoio a Instalações Multiusuários com recursos da FAPEMIG (Concessão APQ-01558-24), e Redes Estruturantes de Pesquisa Científica ou de Desenvolvimento Tecnológico com recursos da FAPEMIG (Concessão RED-00194-23). Este trabalho também contou com apoio de bolsas de mestrado/doutorado da CAPES, CNPq, FAPEMIG, FAPESP e xGMobile/EMBRAPII/MCTI.

Referências

[1] I. Tomkos, D. Klonidis, E. Pikasis, and S. Theodoridis, "Toward the 6G Network Era: Opportunities and Challenges," *IT Professional*, vol. 22, no. 1, pp. 34–38, 2020.

[2] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics," in *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*. Springer, 2000, pp. 195–211.

[3] R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. C. Ferreira, M. S. B. Cunha, E. R. Neto, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. Cerqueira, "DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642–653, 2019.

[4] D. Che, "Analog vs Digital Radio-over-Fiber: A Spectral Efficiency Debate from the SNR Perspective," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 16, pp. 5325–5335, 2021.

[5] C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T. A. Nirmalathas, E. Wong, and K.-L. Lee, "Evolution of Radio-over-Fiber Technology," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647–1656, 2019.

[6] 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.

[7] Z. Cheng and X. Zhang, "Low Complexity Digital Pre-Distortion (DPD) for Multi-Band Radio over Fiber Transmission Systems," *Journal of Computer and Communications*, vol. 12, no. 11, pp. 241–262, 2024.

[8] M. U. Hadi, K. U. Danyaro, A. AlQushaibi, R. Qureshi, and T. Alam, "Digital Predistortion Based Experimental Evaluation of Optimized Recurrent Neural Network for 5G Analog Radio Over Fiber Links," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 19 765–19 777, 2024.

[9] X. Xie, M. Hui, T. Liu, and X. Zhang, "Hybrid Linearization of Broadband Radio-over-Fiber Transmission," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 8, pp. 692–695, 2018.

[10] S. Chen, Z. Zhang, H. Tian, Y. Zhang, W. Lyu, X. Zou, L. Zhang, Z. Zeng, H. Li, and Y. Liu, "High-Power High-Performance Radio-over-Fiber Link for Minimalist Wireless Base Station," *Optics Express*, vol. 33, no. 2, pp. 1995–2007, 2025.

[11] H. Lee and G. P. Agrawal, "Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers Using Fiber Bragg Gratings," *Optics Express*, vol. 11, no. 25, pp. 3467–3472, 2003.

[12] N. Yoshizawa and T. Imai, "Stimulated Brillouin Scattering Suppression by Means of Applying Strain Distribution to Fiber with Cabling," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 10, pp. 1518–1522, 1993.

[13] L. A. M. Pereira, L. L. Mendes, C. J. A. Bastos-Filho, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Linearization Schemes for Radio over Fiber Systems Based on Machine Learning Algorithms," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 279–282, 2022.

[14] 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.

[15] 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.