

Transmissão Óptica de Energia e Dados em Sistemas Bidirecionais para Aplicações 6G

Letícia C. Souza, Felipe B. F. Pinto, Tomás P. V. Andrade, Eduardo S. Lima, Sofia B. Vasconcellos, Luis G. Silva, Francisco M. Portelina Jr., Rodnei Carçola, Evandro Lee Anderson, Arismar Cerqueira S. Jr.

Resumo— Este trabalho relata a implementação experimental de um sistema *radio-over-fiber* (RoF) bidirecional baseado na transmissão óptica de energia e dados por meio da técnica *power-over-fiber* (PoF). No sistema proposto, um módulo RoF utilizado para transmissão/recepção bidirecional de sinais é alimentado utilizando PoF. O desempenho do sistema PoF foi avaliado em termos de eficiência e estabilidade de potência, enquanto que medições de EVM_{RMS} demonstraram o funcionamento do sistema RoF. Aproximadamente 2,7 W de potência elétrica foram obtidos para alimentar o sistema RoF, resultando em taxas de transmissão de até 3,2 Gbps para *downlink* e 1 Gbps para *uplink*.

Palavras-Chave— 5G, 6G, PoF, RoF, sistemas bidirecionais.

Abstract— This work reports the implementation of a bidirectional radio-over-fiber (RoF) system based on the optical transmission of power and data using the power-over-fiber (PoF) technique. In the proposed system, an RoF module is optically powered for bidirectional signal transmission/reception. The PoF system performance was evaluated in terms of power efficiency and stability, whereas EVM_{RMS} measurements demonstrated the RoF system operation. Approximately 2.7 W of electrical power was obtained to power the RoF system, which achieved maximum downlink and uplink throughput of 3.2 Gbps and 1 Gbps, respectively.

Keywords— 5G, 6G, PoF, RoF, bidirectional systems.

I. INTRODUÇÃO

A recente implantação comercial de redes móveis de quinta geração (5G) e a demanda crescente por taxas de dados ainda mais elevadas têm impulsionado o desenvolvimento das redes móveis de sexta geração (6G), previstas para 2030. É esperado que o 6G ofereça transmissão de dados em altíssima velocidade (até 1 Tbit/s), latência extremamente baixa (abaixo de 0,1 ms), conectividade massiva, ultraconfiabilidade e alta eficiência energética [1,2]. Esses requisitos visam atender

Letícia C. Souza, Felipe B. F. Pinto, Tomás P. V. Andrade, Luis G. Silva, Sofia B. Vasconcellos, Francisco M. Portelina Jr. e Arismar Cerqueira S. Jr., Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG 375400-000 Brasil (e-mails: leticiacarneiro@get.inatel.br, felipe.faro@mtel.inatel.br, tomasvillena@dtel.inatel.br, sofia.b@get.inatel.br, luis.gustavo@inatel.br, franciscoportelina@inatel.br, arismar@inatel.br); Eduardo S. Lima, VS Telecom, São Paulo, SP 04213-001 Brasil (e-mail: eduardo.lima@vstelecom.com.br); Rodnei Carçola, Evandro Lee Anderson, MPT Cable, Indaiatuba, SP 13347-340 Brasil (e-mail: rodnei.carcola@mptcable.com.br, evandro.souza@mptcable.com.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.020548/2021-07, sob o projeto Brasil 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil, e pela Huawei, sob o projeto Formação Avançada em Redes e Sistemas de Telecomunicações, contract No PPA6001BRA23032110257684. Os autores também agradecem o apoio financeiro do CNPq, da CAPES, da FINEP, da FAPEMIG, da FAPESP e da MPT Cable.

novas aplicações, como tecnologias tátis e holográficas, inteligência artificial (IA), Internet de Tudo (IoE - *Internet of Everything*) e Indústria 5.0. [3].

Um dos principais desafios das redes 5G atuais é o alto consumo de energia das redes de acesso de rádio (RANs - *radio access networks*) [4]. Aproximadamente 30% do custo total da rede está relacionado aos gastos com energia, sendo que somente a estação rádio base consome em média cerca de 60% da potência total disponível nos sistemas celulares [5]. Nas redes 6G, o consumo de energia previsto será ainda maior, visto que haverá um aumento considerável no número de dispositivos e sensores conectados em comparação ao 5G [6]. Nesse contexto, é necessário garantir maior eficiência energética por meio do desenvolvimento de unidades de antena remotas (RAUs - *remote antenna units*) de baixo consumo de energia e *small cells*. Para que a implantação em larga escala de redes 6G seja viável, as *small cells* serão implantadas em densidades muito altas, possibilitando uma rede ultradensa [7].

A arquitetura da RAN também tem evoluído para atender às demandas futuras redes 6G, como escalabilidade, eficiência e flexibilidade. A arquitetura RAN centralizada (C-RAN - *centralized RAN*), em especial, tem sido considerada potencial para redes 6G [2]. Nessa arquitetura, o processamento do sinal é concentrado na central de operações (CO), reduzindo o consumo de potência das RAUs. Consequentemente, a densificação de *small cells* se torna viável, uma vez que a CO é conectada a várias RAUs por meio de enlaces de *fronthaul* baseados em fibra óptica [4,8]. No entanto, à medida que o número de *small cells* implantadas aumenta, a distribuição de energia se torna um desafio nas redes 6G. Atualmente, implementa-se uma central de suprimento de energia e distribuição direta por meio de fios de cobre, os quais são altamente suscetíveis a interferências eletromagnéticas, curtos-circuitos e faíscas, o que pode afetar a confiabilidade da energia [9]. Portanto, soluções inovadoras de distribuição de energia são necessárias para garantir uma rede 6G ultra densa confiável e economicamente viável.

Com o consumo reduzido de energia das RAUs, a técnica *power-over-fiber* (PoF) se torna viável para alimentar partes críticas das *small cells* 6G. Essa técnica consiste na transmissão de energia por meio de fibras ópticas, as quais permitem a integração com a técnica de *radio-over-fiber* (RoF), resultando em um sistema denominado *radio- and power-over-fiber* (RPoF). Nesses sistemas, uma única fibra óptica pode ser utilizada para a transmissão simultânea de energia e dados. Em [10] e [11], enlaces de fibra monomodo (SMF - *single-mode fiber*) de 1 km foram implementados para co-transmitir

energia e dados em sistemas 5G. Embora as SMFs apresentem baixa atenuação e custo, efeitos não-lineares podem limitar a potência transmitida e degradar a qualidade do sinal. Fibras multimodo (MMFs - *multimode fibers*) teoricamente permitem transmissão de maior potência; no entanto, a taxa de dados é limitada, devido à dispersão modal. Nesse contexto, técnicas complexas têm sido empregadas para possibilitar a co-transmissão de dados e energia em enlaces de MMF [12]. Fibras especiais, como as fibras de casca dupla (DCFs - *double-clad fibers*), também têm sido implementadas em sistemas PoF, permitindo a co-transmissão de dados e potência óptica de até 150 W [13]. Além disso, foi proposto um sistema RoF alimentado por PoF empregando um enlace de fibra multinúcleo (MCF - *multicore fiber*) para aplicações 5G [14]. No entanto, a disponibilidade de fibras especiais é limitada, o que reduz a flexibilidade dos sistemas PoF e aumenta a complexidade e o custo. Além disso, a maioria dos sistemas PoF relatados na literatura focam na análise da potência óptica recebida sem considerar sua conversão em potência elétrica. Como resultado, aspectos críticos relacionados à potência elétrica, como estabilidade e eficiência de conversão opto-elétrica, não são avaliados.

Este trabalho apresenta uma demonstração experimental de um sistema RPoF no qual dados e energia são transmitidos simultaneamente e individualmente através de enlaces dedicados de SMF e MMF de 500 m, respectivamente. De forma a demonstrar a aplicabilidade da técnica PoF, o sistema desenvolvido alimenta um módulo composto por amplificadores, um diodo *laser* (LD - *laser diode*) e um fotodetector (PD - *photodetector*) para transmissão/recepção de sinais bidirecionais, consideradas partes críticas de uma *small cell*, conforme ilustrado na Fig. 1. Para esse fim, realiza-se medidas de eficiência e estabilidade da potência óptica e elétrica para avaliar o desempenho do sistema PoF. Em relação à transmissão de dados, o desempenho da transmissão *downlink* (DL) operando em 3,5 GHz e *uplink* (UL) em 2,1 GHz é avaliado em termos de erro quadrático médio da magnitude

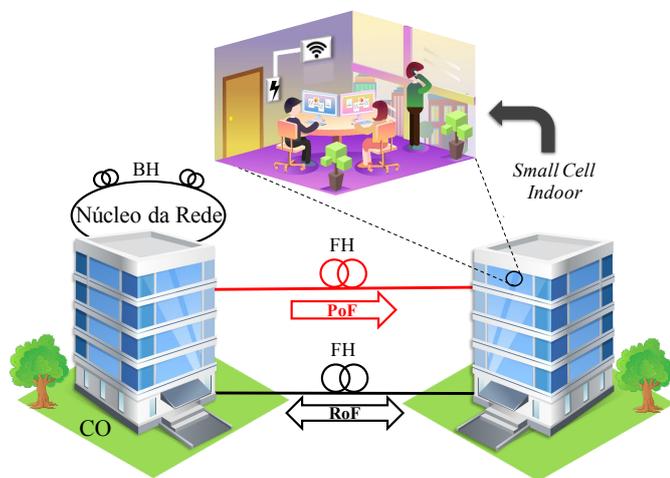


Fig. 1. Transmissão RPoF para alimentar *small cells indoor* em cenários 6G. RoF - *radio-over-fiber*; PoF - *power-over-fiber*, FH - *fronthaul*; BH - *backhaul*.

do vetor de erro (EVM_{RMS} - *root mean square error vector magnitude*) e taxa de dados de acordo com os requisitos do *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* [15]. Além disso, é feita uma comparação dos resultados de EVM_{RMS} entre o sistema alimentado por PoF e o sistema alimentado de maneira convencional. O manuscrito está estruturado em quatro seções. A Seção II apresenta a descrição do sistema RPoF implementado. A Seção III relata os resultados experimentais, enquanto as conclusões e trabalhos futuros são descritos na Seção IV.

II. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA RPOF

A Fig. 2 ilustra o diagrama em blocos do sistema RPoF implementado. O sistema PoF, especificamente, tem como objetivo alimentar de forma óptica um módulo RoF bidirecional, o qual consiste em um PD e um amplificador de RF para recepção do sinal DL (RX_1), e um LD e um amplificador de baixo ruído (LNA - *low-noise amplifier*) para transmissão do sinal UL (TX_2). A implementação é baseada em um cenário dedicado, no qual o sinal de dados e o de alta potência são transmitidos simultaneamente por fibras individuais. Nesse cenário não são necessários demultiplexadores e multiplexadores de alta potência e a degradação do sinal devido à dispersão modal, *crosstalk* e efeitos não-lineares é evitada. Neste contexto, um diodo laser de alta potência (HPLD - *high-power laser diode*) centrado em 976 nm (LSM-100, MH GoPower Company Limited) gera potência óptica de até 100 W, a qual é transmitida por um enlace de 500 m de MMF. A

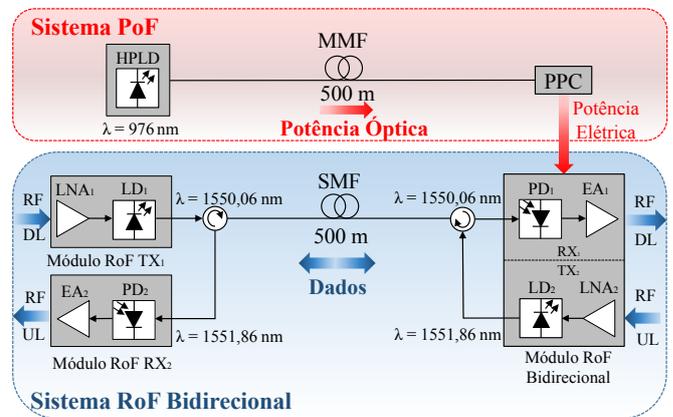


Fig. 2. Diagrama em blocos do sistema RPoF proposto.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA POF

Componente	Especificações
HPLD	Comprimento de onda central: 976 nm \pm 10 nm Potência de saída: 0 - 100 W Largura de linha: 6 nm Eficiência de conversão: 47 %
Fibra Óptica	Tipo: MMF 105/125 μ m Comprimento: 500 m
PPC	Comprimento de onda de operação: 915 - 980 nm Tensão e Corrente de saída: até 20 V e 155 mA Potência máxima incidente: 10 W Eficiência de conversão: 26 - 30 %

potência óptica é então convertida em potência elétrica por um conversor fotovoltaico de potência (PPC - *photovoltaic power converter*) (YCH-H6424-15-SM-A, MH GoPower Company Limited). A Tabela I apresenta as principais especificações dos componentes do sistema PoF utilizados.

O sistema RoF é composto por módulos comerciais, conectados via uma fibra óptica. A transmissão simultânea de sinais DL e UL em uma única SMF é viabilizada por meio de circuladores ópticos, os quais direcionam as portadoras ópticas para seus respectivos receptores, evitando o fluxo nas direções opostas. A transmissão de DL é realizada pelo módulo RoF TX₁ (OZ101 mini TX, Optical Zonu Corporation), o qual é composto por um LNA e um *laser* de 4 dBm centrado em 1550,06 nm. O sinal de DL em banda base é sintetizado por meio de um gerador de forma de onda arbitrária (AWG - *arbitrary waveform generator*) (M8190A, Keysight) e trasladado para a frequência de 3,5 GHz utilizando-se um gerador de sinais vetorizados (VSG - *vector signal generator*) (PSGE8267D, Keysight). A modulação do sinal foi realizada por meio do *software IQ tools*, no qual 3000 símbolos foram gerados de forma aleatória e processados a uma taxa de amostragem de 8 GHz. Posteriormente, o sinal é injetado no módulo RoF TX₁, amplificado e convertido em uma portadora óptica modulada diretamente, a qual é transmitida por um enlace de SMF de 500 m. A recepção é realizada por um módulo RoF bidirecional RX₁ (OZ816, Optical Zonu Corporation), o qual é alimentado por meio do sistema PoF. O módulo é composto por um PD e um amplificador elétrico integrado, os quais realizam a conversão opto-elétrica por detecção direta e amplifica o sinal recebido de DL, respectivamente. O sinal de DL é injetado em um analisador de sinais vetoriais (VSA - *vector signal analyzer*) (DSAV084A, Keysight), o qual foi utilizado para avaliar o desempenho da transmissão em termos de EVM_{RMS}, em conformidade com as especificações do 3GPP Release 15.

O sinal de UL banda base é gerado por meio de outro VSG (EXG N5172B, Keysight), o qual também é responsável por modular o sinal na frequência desejada i.e., 2,1 GHz. Além da recepção do sinal de DL, o módulo RoF bidirecional TX₂ alimentado por PoF também realiza a conversão eletro-óptica, geração da portadora óptica e modulação direta do sinal de UL utilizado um LD de 6 dBm centrado em 1551,86 nm e um LNA para amplificação. A portadora óptica do sinal de UL é então transmitida pelo mesmo enlace de SMF de 500 m. A separação entre os comprimentos de onda de DL e UL é de 1,8 nm. Podem ocorrer variações no comprimento de onda com o aumento de temperatura, já que os LDs não possuem resfriamento. Como o experimento foi realizado em temperatura controlada, a separação é o suficiente para evitar interferência entre as portadoras ópticas de DL e UL. Dessa forma, a portadora óptica de UL é detectada diretamente e convertida em RF por meio de um PD, o qual constitui o módulo RoF RX₂ (OZ101 mini receptor (RX), Optical Zonu Corporation), juntamente com um amplificador elétrico integrado. Ambos os módulos TX₁ e RX₂ são alimentados por fontes externas independentes. O desempenho do sinal de UL também é avaliado pelo VSA (DSAV084A, Keysight) em termos de EVM_{RMS}.

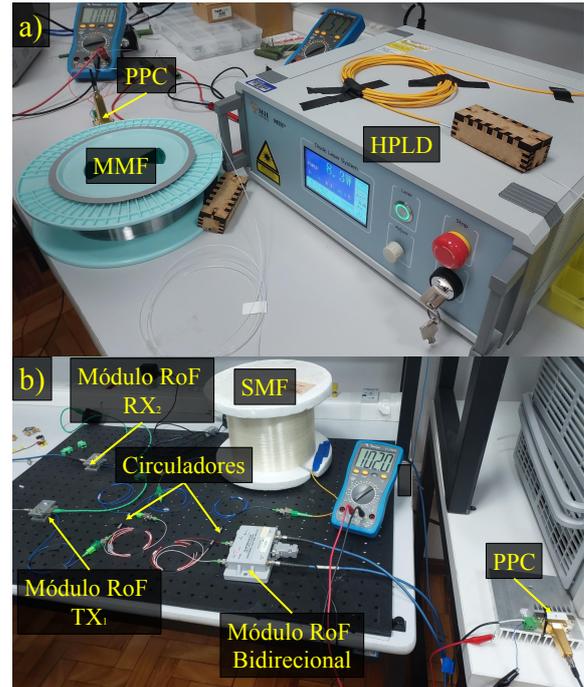


Fig. 3. Fotografias do arranjo experimental. (a) Sistema PoF; (b) Sistema RoF bidirecional.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta a avaliação de desempenho da solução RPoF proposta. A Fig. 3 apresenta as fotografias da montagem experimental do sistema RPoF implementado de acordo com o diagrama em blocos descrito na Fig. 2. A Fig. 3 (a) mostra o sistema PoF, incluindo os componentes comerciais utilizados, como o HPLD e PPC, enquanto a Fig. 3 (b) reporta o sistema RoF implementado, incluindo o módulo RoF bidirecional, o qual é alimentado pelo sistema PoF. A primeira investigação está relacionada ao desempenho do sistema PoF em termos de eficiência e estabilidade. Após aplicá-lo ao sistema RoF bidirecional, o desempenho geral do sistema foi avaliado com base em medições de EVM_{RMS}.

A. Sistema PoF

O PPC desempenha um papel crucial na conversão de energia elétrica a partir da luz óptica incidente, e seu desempenho afeta diretamente a eficiência geral e a confiabilidade do sistema PoF. Considerando a potência óptica máxima incidente de 10 W, o PPC comercial utilizado apresenta potência elétrica máxima de 2,73 W, a qual é conhecida como ponto de máxima transferência de potência (MTP). A corrente elétrica gerada para cada potência incidente é praticamente constante, sendo aproximadamente 150 mA. Ao atingir o ponto de MTP a corrente decai rapidamente até 0 A e a tensão atinge o valor de 21,26 V, a qual é denominada tensão de circuito aberto (V_{oc}). A eficiência de conversão opto-elétrica do PPC é um parâmetro que mede quão efetivamente a energia provida por luz é convertida em energia elétrica e é definida como a razão entre a potência elétrica de saída e a potência de luz incidente no PPC, e geralmente é expressa em porcentagem [13].

A eficiência de transmissão de potência (PTE - *power transmission efficiency*) do sistema PoF é definida como a razão entre a potência óptica injetada no sistema PoF e a potência elétrica convertida na saída do PPC [13]. Para calcular o PTE, foi necessário configurar uma carga ótima para cada valor de potência óptica incidente para garantir a MTP. A máxima potência obtida foi de 2,73 W para a potência óptica de saída do HPLD de 12,5 W. Dessa forma, obteve-se aproximadamente 22% de PTE, o qual se manteve praticamente constante para todos os valores de potência avaliados. Além disso, avaliou-se a estabilidade do sistema PoF. A Fig. 4 exibe os histogramas normalizados obtidos das medidas de estabilidade de potência óptica injetada na entrada do PPC e potência elétrica convertida na saída do PPC. Ambas as medidas foram realizadas em um intervalo de tempo de 60 minutos utilizando-se um medidor de potência óptica para a estabilidade óptica e voltímetros/amperímetros para a estabilidade elétrica. Dessa forma, analisou-se a estabilidade nos níveis de potência mais altos possíveis no sistema PoF, ou seja, 10 W de potência óptica injetada no PPC. Como o HPLD possui um sistema de refrigeração, ocorrem apenas pequenas variações na potência óptica na entrada do PPC. Mediu-se aproximadamente 9,97 W de potência óptica média com desvio padrão de 0,018 W. Por outro lado, a potência elétrica convertida depende da eficiência de conversão do PPC. Obteve-se média de aproximadamente 2,37 W e desvio padrão de 0,12 W, o qual é significativamente maior do que o obtido na potência óptica. Foi observado que a potência elétrica convertida diminuiu de 2,7 W para 2,3 W nos primeiros 30 minutos de operação, devido ao aumento de temperatura no PPC de 22°C para mais de 50°C durante este período. À medida que a temperatura do PPC aumenta, a banda proibida

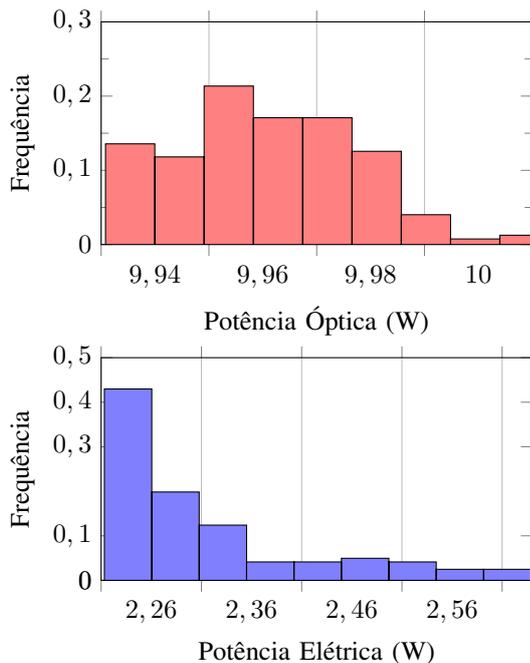


Fig. 4. Histogramas normalizados das medidas de estabilidade de potência óptica na entrada do PPC e elétrica na saída do PPC.

do material diminuiu, reduzindo o V_{oc} e afetando a eficiência de conversão [16]. No entanto, observamos que os níveis de potência elétrica se estabilizam após 60 minutos de operação. Dessa forma, o sistema PoF é capaz de alimentar o módulo RoF bidirecional do sistema proposto.

B. Sistema RoF alimentado por PoF

O módulo RoF bidirecional opera com tensões na faixa de 8 a 32 V e corrente mínima de aproximadamente 100 mA. Como o sistema PoF pode fornecer tensões de até 18 V e corrente de até 150 mA, foi possível alimentar o módulo sem o uso de um conversor DC/DC. O desempenho do sistema RoF alimentado por PoF foi avaliado em função do EVM_{RMS} , o qual é especificado pelo 3GPP, sendo 12,5% e 8% os limites máximos para as modulações 16-QAM e 64-QAM. Primeiramente, foi utilizado o VSA (DSAV084A, Keysight) para demodular o sinal de DL na saída do RX_1 , enquanto o sinal de UL, recebido pelo RX_2 , foi injetado em um analisador de espectro (MT8222B, Anritsu). De forma análoga, a mesma análise foi realizada para a transmissão UL. De qualquer forma, as transmissões de DL e UL foram realizadas simultaneamente e não foram observadas interferências significativas.

Primeiramente, foi analisada a transmissão DL, comparando-se os resultados de EVM_{RMS} obtidos em dois cenários: módulo RoF bidirecional alimentado de forma convencional, ou seja, por uma fonte DC, e alimentado pelo sistema PoF. A Fig. 5 apresenta os resultados de EVM_{RMS} medidos em função da potência de RF injetada no módulo RoF TX_1 para um sinal DL 64-QAM de 3,5 GHz com banda de 50 MHz. É possível notar uma grande similaridade entre as curvas obtidas em toda a faixa de valores testados com variações mínimas, as quais podem ser atribuídas ao erro nas medições de EVM_{RMS} . O sistema RPoF proposto atende aos requisitos do 3GPP para níveis de potência de RF variando de -20 dBm a 0 dBm, em ambos os cenários. O melhor desempenho foi alcançado em -8 dBm, com EVM_{RMS} de 1,4% e 1,3% para o sistema alimentado de forma

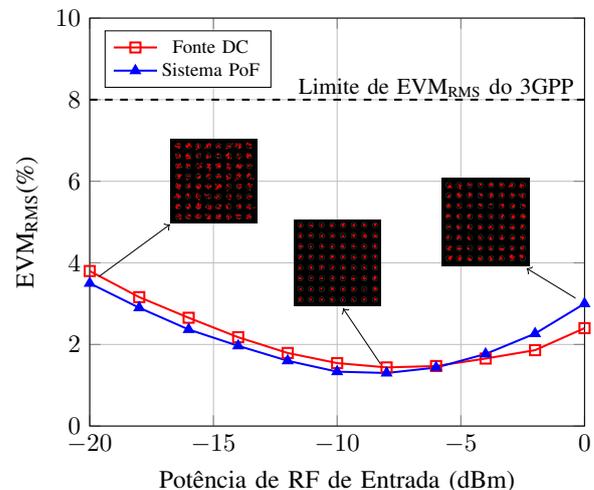


Fig. 5. EVM_{RMS} medido em função da potência de RF injetada no módulo RoF TX_1 para um sinal DL 64-QAM de 3,5 GHz com largura de banda de 50 MHz.

convencional e com PoF, respectivamente, com diferença de apenas 0,1%. Pode-se observar que o EVM_{RMS} aumenta para potências de entrada de RF acima de -8 dBm, diminuindo a qualidade do sinal. Essa degradação ocorre devido à resposta não-linear dos amplificadores elétricos dos módulos RoF, que gera produtos de intermodulação significativos em potências de RF mais altas, distorcendo o sinal, conforme observado nas constelações destacadas na Fig. 5.

O desempenho das transmissões DL e UL foi avaliado em função da largura de banda para as modulações 16-QAM e 64-QAM no cenário em que o módulo RoF bidirecional foi alimentado por PoF, conforme apresentado na Tabela II. Nesse caso, a potência de RF foi mantida constante em -8 dBm para DL e -12 dBm para UL, identificados como melhores pontos. Considerando os limites máximos de EVM_{RMS} definidos pelo 3GPP, verificou-se a máxima largura de banda obtida para cada ordem de modulação nas transmissões DL e UL. Na transmissão DL obteve-se 800 MHz e 450 MHz, e na transmissão UL, 250 MHz e 150 MHz foram alcançadas para as ordens de modulação 16-QAM e 64-QAM, respectivamente. Observa-se que na transmissão DL e UL, as taxas máximas de transmissão obtidas foram de 3,2 Gbps e 1 Gbps, demonstrando o potencial e a viabilidade do sistema RPoF proposto.

TABELA II

MEDIDAS DE EVM_{RMS} EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA E ORDENS DE MODULAÇÃO - TRANSMISSÕES DL E UL.

BW (MHz)	DL		UL	
	16-QAM	64-QAM	16-QAM	64-QAM
100	2,0%	1,9%	6,0%	5,1%
150	3,0%	3,1%	7,0%	8,0%
200	4,0%	3,5%	8,7%	-
250	4,5%	4,0%	11,8%	-
400	6,7%	5,7%	-	-
450	7,1%	8,0%	-	-
800	12,3%	-	-	-

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a implementação de um sistema RPoF, o qual consiste em enlaces de fibras independentes para transmissão de dados e energia utilizando as técnicas RoF e PoF. Um módulo RoF bidirecional, composto de amplificadores, um LD e um PD, foi alimentado de forma óptica visando demonstrar a aplicabilidade da técnica PoF em sistemas 6G bidirecionais. Dessa forma, analisou-se a capacidade do sistema PoF de prover potência elétrica suficiente para garantir a operação contínua do módulo RoF por meio de medições de eficiência e estabilidade. Além disso, analisou-se o desempenho do sistema RoF com base nos valores de EVM_{RMS} . Um sinal de DL de 3,5 GHz foi transmitido com largura de banda de 50 MHz e o EVM_{RMS} foi medido em função da potência de RF injetada. Dois cenários foram explorados, nos quais o módulo RoF foi alimentado de forma convencional e de forma óptica (pelo sistema PoF). As curvas obtidas apresentaram comportamento muito parecidos e atenderam aos requisitos do 3GPP, demonstrando o potencial da técnica PoF. Além disso, a transmissão de UL em 2,1 GHz

foi avaliada em função da largura de banda transmitida. Os valores de EVM_{RMS} medidos ficaram abaixo dos limites do 3GPP para ambas modulações 16-QAM e 64-QAM. Taxas de transmissão máximas de 3,2 Gbps e 1 Gbps foram atingidas nas transmissões DL e UL, respectivamente. Os trabalhos futuros dizem respeito à implementação da transmissão sem-fio bidirecional, bem como o aumento de eficiência do sistema PoF por meio do resfriamento do PPC.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Tariq, M. R. Khandaker, K.-K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 4, pp. 118–125, 2020.
- [2] H. R. D. Filgueiras, E. S. Lima, M. S. B. Cunha, C. H. D. S. Lopes, L. C. De Souza, R. M. Borges, L. A. M. Pereira, T. H. Brandão, T. P. V. Andrade, L. C. Alexandre *et al.*, "Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9232–9259, 2023.
- [3] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, 2021.
- [4] I. A. Alimi, A. M. Abdalla, A. Olapade Mufutau, F. Pereira Guiomar, I. Otung, J. Rodriguez, P. Pereira Monteiro, and A. L. Teixeira, "Energy Efficiency in the Cloud Radio Access Network (C-RAN) for 5G Mobile Networks: Opportunities and Challenges," *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*, pp. 225–248, 2019.
- [5] P. Gandotra, R. K. Jha, and S. Jain, "Green Communication in Next Generation Cellular Networks: A Survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11 727–11 758, 2017.
- [6] Y. L. Lee, D. Qin, L.-C. Wang, and G. H. Sim, "6G massive radio access networks: Key applications, requirements and challenges," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 2, pp. 54–66, 2020.
- [7] 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.
- [8] T. Pfeiffer, "Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 11, pp. B38–B45, 2015.
- [9] 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.
- [10] F. M. Al-Zubaidi, J. D. Lopez-Cardona, D. S. Montero, and C. Vazquez, "Optically powered radio-over-fiber systems in support of 5G cellular networks and IoT," *Journal of Lightwave Technology*, 2021.
- [11] H. Yang, D. Peng, Y. Qin, J. Li, M. Xiang, O. Xu, and S. Fu, "10-w power light co-transmission with optically carried 5g nr signal over standard single-mode fiber," *Optics Letters*, vol. 46, no. 20, pp. 5116–5119, 2021.
- [12] H. Kuboki and M. Matsuura, "Optically powered radio-over-fiber system based on center-and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber," *Optics letters*, vol. 43, no. 5, pp. 1067–1070, 2018.
- [13] M. Matsuura, N. Tajima, H. Nomoto, and D. Kamiyama, "150-W power-over-fiber using double-clad fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 401–408, 2020.
- [14] T. Umezawa, P. T. Dat, K. Kashima, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "100-GHz radio and power over fiber transmission through multicore fiber using optical-to-radio converter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 617–623, 2018.
- [15] 3GPP, "5G NR Base Station (BS) radio transmission and reception," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.104, 2021, (TS 38.104 version 17.5.0, Release 17).
- [16] C. Algorta, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, M. Hinojosa, and I. Rey-Stolle, "Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light," *Joule*, 2021.