

# Tecnologia PoF Aplicada a Sistema B5G com FiWi e VLC

Felipe. B. F. Pinto, Letícia. C. Souza, Tomás P. V. Andrade, Arismar Cerqueira. S. Jr.

Laboratório WOCA

Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

Santa Rita do Sapucaí, Brasil

felipe.pinto@dtel.inatel.br; arismar@inatel.br

Eduardo S. Lima  
5G Innovation Office  
VS Telecom  
São Paulo, Brasil

E. Lee Anderson  
MPTcable  
Indaiatuba, Brasil

F. M. Portelinha Jr.  
Inatel Competence Center (ICC)  
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)  
Santa Rita do Sapucaí, Brasil

**Resumo**—Este artigo propõe o conceito e demonstração prática de um sistema *Fiber/Wireless* (FiWi) 5G *new radio* (5G NR) energizado opticamente com *power-over-fiber* (PoF), composto por uma rede de acesso usando comunicações por luz visível (VLC - *visible light communication*) e utilizando antenas, visando aplicações *indoor* além do 5G (B5G - *beyond 5G*). O sistema PoF implementado foi configurado para alimentar dois componentes simultaneamente, um módulo rádio sobre fibra (RoF - *radio over fiber*), que contém um fotodetector e um amplificador RF, e um diodo laser em 650 nm. Uma fibra óptica multimodo (MMF - *multimode fiber*) convencional de 500 m com diâmetro de núcleo de 62,5  $\mu\text{m}$  é utilizada para transportar 8,1 W de potência óptica com uma eficiência de transmissão de energia (PTE - *power transmission efficiency*) de 14%. Em relação ao arranjo de comunicação, um sinal 5G NR é transmitido através de um enlace RoF com 10 km de fibra monomodo (SMF - *single-mode fiber*) para ser irradiado em enlaces de antena e VLC. A investigação de desempenho do sistema de comunicação B5G é baseada no erro vetorial médio quadrático ( $\text{EVM}_{\text{RMS}}$ ). No enlace VLC, alcança-se uma taxa de transferência de 1,2 Gbps usando 64-QAM de modulação e uma largura de banda de 200 MHz, apresentando 4,02% de  $\text{EVM}_{\text{RMS}}$ . Enquanto, o enlace de RF em 3,5 GHz fornece 360 Mbps com  $\text{EVM}_{\text{RMS}}$  de 2,67%. Por fim, uma comparação de desempenho entre o sistema PoF e uma fonte de alimentação elétrica convencional valida a aplicabilidade da técnica proposta para comunicações móveis B5G.

**Palavras-Chave**—5G, B5G, *power-over-fiber*, RoF e VLC.

## I. INTRODUÇÃO

A quinta geração de redes móveis (5G) está sendo comercializada em todo o mundo cobrindo três principais cenários de aplicação: *enhanced mobile broadband* (eMBB); *ultra-reliable and low latency communications* (URLLC); *massive machine-type communications* (mMTC) [1], [2]. Paralelamente, a sexta geração de redes móveis (6G) já está em estudo, visando maior segurança e privacidade, menor consumo de energia, e largura de banda extremamente grande em comparação com o 5G [3]–[5]. Deste modo, a tecnologia rádio sobre fibra (RoF - *radio over fiber*) desempenha um papel importante no cumprimento desses requisitos, conciliando a largura de banda extremamente ampla e a imunidade a interferências eletromagnéticas dos sistemas ópticos com a flexibilidade e

mobilidade dos sistemas de comunicações móveis [6], [7]. Essencialmente, um sistema RoF consiste em transportar sinais de radiofrequência (RF - *radiofrequency*) através de enlaces de fibra óptica, tornando-se uma solução interessante não apenas para a o núcleo da rede, mas também para enlaces de backhaul, midhaul e fronthaul. Particularmente, a arquitetura de rede de acesso de rádio centralizada (C-RAN - *centralized radio access network*) permite simplificar as estações de rádio base e reduzir seu consumo de energia, centralizando e processando todos os sinais de banda base na *central office* (CO) [8]. Além disso, o rádio sobre fibra analógico (A-RoF - *analog radio over fiber*) surge com a vantagem de transmitir sinais de banda passante através de enlaces ópticos, eliminando custos com conversões analógico-digital e *upconversion* de frequência nas estações rádio base [9].

Em relação à rede de acesso, a utilização de antenas é a abordagem mais comum para atender à variedade de usuários, que combinada com um fronthaul óptico compõe um sistema *fiber-wireless* (FiWi). No entanto, outras tecnologias surgiram como alternativas para complementar os enlaces sem fio convencionais baseado em RF. Uma destas alternativas é a comunicação por luz visível (VLC - *visible light communication*) que é um tipo de comunicação óptica sem fio (OWC - *optical wireless communication*) que aparece com grande potencial para as redes *beyond 5G* (B5G) e 6G, oferecendo larguras de banda maiores em comparação com ondas milimétricas (*mm-waves*), bem como alta segurança e imunidade a interferências eletromagnéticas para os sinais de RF presentes no ambiente [10]. A tecnologia VLC tem sido amplamente proposta para aplicações internas, não apenas em escritórios, mas também em hospitais, indústrias e aviões, que são tipicamente muito críticos em termos de interferência [11]. Além disso, o VLC também pode ser implementado em cenários externos, como comunicações de veículo para veículo (V2V - *vehicle-to-vehicle*), de estrada para veículo (R2V - *road-to-vehicle*) e de edifício para edifício (B2B - *building-to-building*) [12].

Outra técnica promissora envolve o fornecimento de energia

elétrica utilizando fibra óptica como meio de transmissão. Essa técnica, conhecida como *power-over-fiber* (PoF), é tipicamente composta por três componentes principais: um diodo laser de alta potência (HPLD - *high-power laser diode*), que fornece alta potência óptica; uma fibra óptica para a transmissão da energia; um conversor de energia fotovoltaica (PPC - *photovoltaic power converter*) para converter a energia do domínio óptico para o elétrico. Os sistemas PoF oferecem algumas vantagens sobre o uso de fios metálicos, como baixa perda, imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso e isolamento galvânico [13]. Essas características tornam o PoF uma solução interessante para fornecer energia a componentes em minas, fábricas e outros ambientes adversos [14]. A literatura especializada apresenta sistemas PoF aplicados a diferentes cenários usando diferentes tipos de fibra óptica. Por exemplo, em [15], os autores implementaram um sistema PoF utilizando 10 km de fibra monomodo (SMF - *single-mode fiber*) para transmitir simultaneamente 2 W de potência óptica e dados, visando redes 5G e aplicações de Internet das Coisas (IoT). No final do sistema PoF, foi extraído 870 mW de potência elétrica. Em [16], H. Yang et al. relataram uma co-transmissão de 10 W de potência óptica com um sinal 5G NR ao longo de um enlace SMF de 1 km, coletando 7,18 W de potência óptica recebida. Um enlace de fibra multimodo (MMF - *multimode fiber*) dedicado de 300 m com diâmetro de núcleo de 200  $\mu\text{m}$  foi usado para transmitir 1,5 W em [17]. 360 mW foi obtido após a conversão óptico-elétrica, que foi usado para alimentar um sensor de proximidade para aplicações em ambientes adversos. Em particular, nosso grupo de pesquisa utilizou 100 m de MMF com diâmetro de núcleo de 105  $\mu\text{m}$  em um enlace dedicado para transmitir 2,2 W de potência óptica para alimentar um módulo RoF em um sistema 5G *new radio* (5G NR) baseado em SMF [18].

Este trabalho apresenta o conceito e a implementação prática de um sistema FiWi que usa uma rede de acesso híbrida VLC/RF, visando aplicações B5G. Neste sistema, aplica-se a tecnologia PoF utilizando MMF convencional com diâmetro do núcleo de 62,5  $\mu\text{m}$ , e, diferente dos trabalhos mencionados na literatura, alimenta-se simultaneamente dois componentes de telecomunicações localizados no lado remoto (um módulo RoF e um diodo laser em 650nm para o sistema VLC) usando um único PPC. O artigo está estruturado em quatro seções. A Seção 2 apresenta os componentes utilizados para no sistema PoF, além da caracterização do sistema em termos de eficiência e estabilidade. A Seção 3 descreve a implementação do sistema FiWi alimentado opticamente proposto para B5G, que é baseado na integração de um fronthaul óptico baseado em tecnologia RoF seguido por uma rede de acesso híbrida VLC/RF, ambos alimentados pelo sistema PoF. Finalmente, na Seção 4 discute-se as conclusões do trabalho.

## II. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POF

O sistema PoF implementado consistiu na utilização dos seguintes componentes: um HPLD, modelo TY80812W01, capaz de gerar até 12 W de potência óptica centrada em 808 nm; um controlador termo-elétrico (TEC), modelo TED200C, para

garantir o resfriamento do HPLD e consequentemente uma maior estabilidade da potência óptica; 500 m de fibra MMF convencional com 62.5  $\mu\text{m}$  de diâmetro do núcleo; um PPC, modelo YCH-H6424-15-SM-B, que suporta até 20 W; e dois conversores DC/DC, modelo DDH1800, para regular a tensão de saída do PPC para cada componente a ser opticamente alimentado. Como forma de verificar a viabilidade do sistema PoF, duas métricas foram avaliadas, a eficiência de transmissão óptica (OPTE) e a eficiência de transmissão (PTE). OPTE indica a razão entre a potência óptica de saída medida no final do enlace de fibra e a potência óptica de entrada na fibra ou potência de saída do HPLD, enquanto o PTE descreve a razão entre a potência elétrica obtida nos terminais de saída do PPC e a potência de entrada na fibra óptica. Para estimar o OPTE, 8,11 W de potência óptica foi gerada no HPLD e ao final do enlace de 500 m de MMF aferiu-se aproximadamente 5,11 W, obtendo um OPTE de 63%. De forma similar, para estimar o PTE, o mesmo nível de potência óptica foi gerada pelo HPLD, e nos terminais de saída do PPC, foi configurada um equipamento para carga eletrônica programável, modelo 6063B, para garantir a máxima transferência de potência. Desta maneira, foi possível medir aproximadamente 1,06 W e PTE de 13,07%, que corresponde a máxima potência elétrica e eficiência obtida pelo sistema PoF, considerando 8,11 W de potência óptica de entrada. O valor de PTE ainda pode ser considerado baixo, pois além das perdas devido ao enlace da fibra óptica, há também a baixa eficiência de conversão óptico-elétrico do PPC, que apresenta, para o comprimento de onda de 808 nm, uma eficiência de aproximadamente 20%.

De forma a avaliar a estabilidade do sistema PoF implementado, foram realizadas medições de potência óptica de saída da fibra e também da potência elétrica na saída do PPC durante 1 hora. As medições de estabilidade óptica e elétrica podem ser observadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. A representação por histogramas indica a concentração dos valores medidos de potência através da frequência relativa, obtendo uma média de 5,11 W e desvio padrão de 0,017 W para as medidas de estabilidade óptica, enquanto uma média de 1,061 W e desvio padrão 0,0026 W foram obtidos a partir das medições de estabilidade elétrica. Portanto, verificou-se uma boa estabilidade do sistema PoF implementado, com um coeficiente de variação de 0,245% (estabilidade elétrica), indicando a sua aplicabilidade para alimentação de componentes que necessitem de até 1,06 W de potência elétrica.

## III. SISTEMA B5G COM REDE DE ACESSO DUPLA ENERGIZADO POR POF

O esquemático e a fotografia do arranjo experimental do sistema 5G com duas redes de acesso simultâneas alimentada por PoF podem ser observadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Para a geração do sinal 5G em bandabase foi utilizado o gerador de onda arbitrária (AWG), modelo M8190A, e, para realizar o traslado em frequência do sinal bandabase para banda passante, utilizou-se o gerador de RF, modelo PSG E8267D. Como o AWG era o único equipamento capaz de gerar um sinal no padrão 5G NR, um outro gerador de RF,

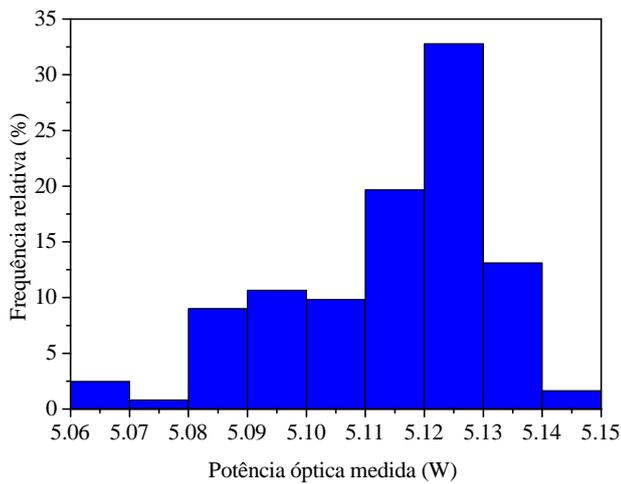


Figura 1. Medições de potência óptica de saída do sistema PoF durante 1 hora.

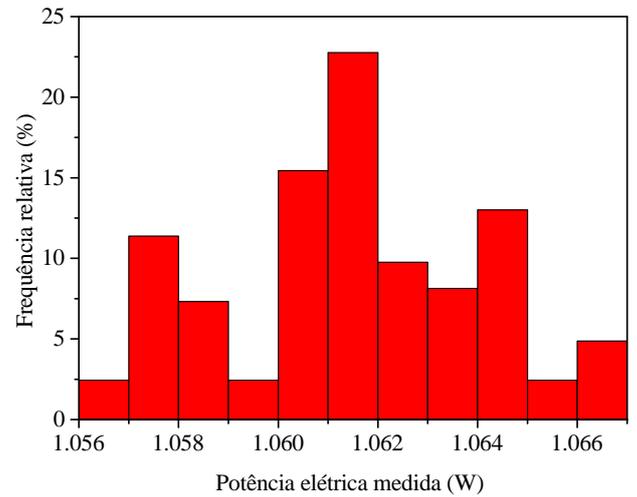


Figura 2. Medições de potência elétrica na saída do PPC durante 1 hora.

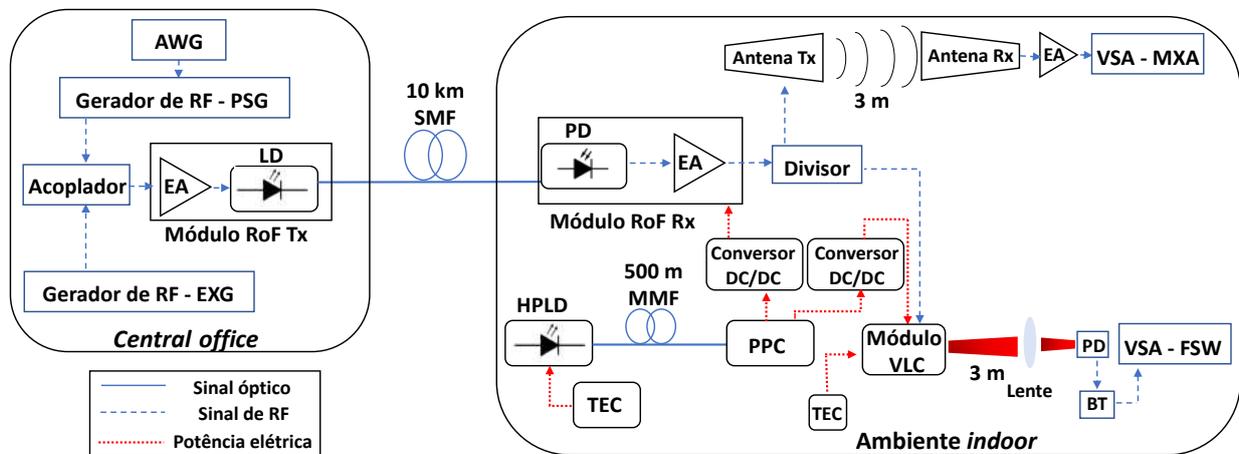


Figura 3. Esquemático do sistema PoF aplicado a sistema B5G com FiWi e VLC.

modelo EXG N5172B, foi configurado para gerar um sinal digital modulado sem padrão afim de garantir a transmissão de dados simultâneos nos dois enlaces de acesso. Um combinador de RF foi utilizado para juntar ambos sinais. A saída deste combinador foi conectada ao módulo RoF Tx, modelo A13-Z101-D55-AS-SL, para amplificar o sinal e modular diretamente o diodo laser interno do módulo. Desta maneira, o sinal combinado no domínio óptico foi transmitido ao longo de um enlace RoF de 10 km de fibra SMF. No fim do enlace, o sinal foi convertido novamente para o domínio elétrico e amplificado pelo módulo RoF Rx, modelo A23-Z101-00AS-S, o qual contém um fotodetector e um amplificador elétrico. Para realizar uma divisão de potência dos sinais combinados utilizou-se um divisor elétrico, com uma porta de saída conectada a uma antena *tri-band* para um enlace de RF sem fio de 3m, e outra porta conectada em um módulo VLC para um enlace de luz visível também de 3 m. Para demodulação e análise dos sinais, foram utilizados dois analisadores de sinais vetoriais (VSA), dos modelos MXA N9020A e FSW67, para o enlace de antenas e VLC, respectivamente.

Primeiramente, o arranjo AWG e PSG foi utilizado para gerar um sinal 5G NR com modulação de 64-QAM e frequência central de 600 MHz para ser transmitido no enlace de VLC. Variou-se as bandas de modulação em 60, 100 e 200 MHz, e como métrica de avaliação de qualidade do sinal foi utilizado o *root mean square error vector magnitude* ( $EVM_{RMS}$ ), analisando a conformidade dos limites padronizados pelo *3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project* (3GPP). Simultaneamente, o EXG foi utilizado para gerar um sinal centrado em 3,5 GHz com 64-QAM de modulação e banda de 25 MHz, para ser radiado no enlace de RF. Posteriormente, o sinal 5G NR centrado em 3,5 GHz foi gerado pelo AWG e PSG, para ser transmitido no enlace RF sem fio. De forma análoga ao primeiro caso, o EXG gerou um sinal digital modulado com banda de 35 MHz centrado em 600 MHz para ser transmitido no enlace de VLC. Figura 5 reporta as taxas obtidas em cada enlace com o sinal 5G NR, variando as bandas para a modulação de 64-QAM, em função do  $EVM_{RMS}$ . É possível observar que ambos enlaces de acesso conseguem operar com boa margem em relação ao limite de  $EVM_{RMS}$  para 64-

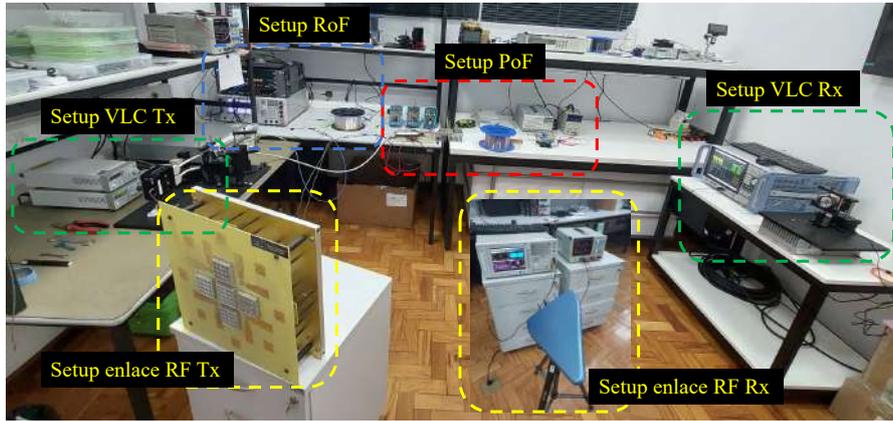


Figura 4. Fotografia do arranjo experimental.

QAM. Além disso, nota-se que o enlace de VLC consegue prover taxas maiores que o enlace de RF, atingindo uma taxa máxima de 1,2 Gbps, enquanto o enlace de antenas oferece até 0,36 Gbps. Isso pode ser atribuído aos ruídos presentes no enlace de RF sem fio, os quais foram amplificados pelo amplificador elétrico na recepção, diminuindo a largura de banda que o enlace seria capaz de demodular. A adição de um filtro de RF centrado em 3,5 GHz poderia ser considerado uma solução para melhorar a taxa do sistema.

mostram que com o aumento de potência óptica, indica-se um melhor desempenho do sistema, ocasionando em valores de  $EVM_{RMS}$  menores. Portanto, observa-se que ambas as curvas permaneceram abaixo do limite de  $EVM_{RMS}$  para todos os valores de potência óptica de saída analisados, demonstrando que mesmo o sistema operando com até 50 km de enlace RoF, ele ainda estaria atendendo aos requisitos do 3GPP em ambas redes de acesso.

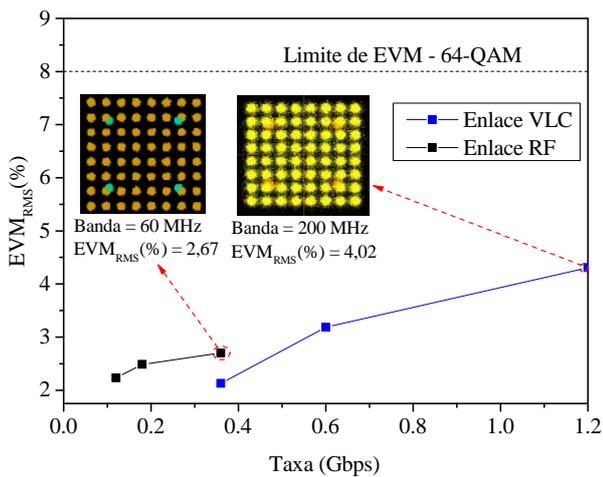


Figura 5. Medidas de  $EVM_{RMS}$  em função das taxas obtidas em ambos enlaces de acesso.

De modo a avaliar a escalabilidade do sistema, um possível aumento do enlace RoF foi emulado por meio da inserção de um atenuador óptico variável e de um medidor de potência no fim do enlace de SMF, na entrada do módulo RoF Rx. Uma atenuação de até 8 dB foi configurada para simular um aumento de 40 km no enlace de SMF, considerando uma perda típica de 0,2 dB/km. A Figura 6 apresenta as curvas das medições de  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica de saída do enlace RoF, para o sinal 5G NR com 60 MHz de banda no enlace VLC, e um sinal digital modulado com 25 MHz de banda no enlace RF. Ambos sinais foram configurados com 64-QAM de ordem de modulação. As medidas coletadas

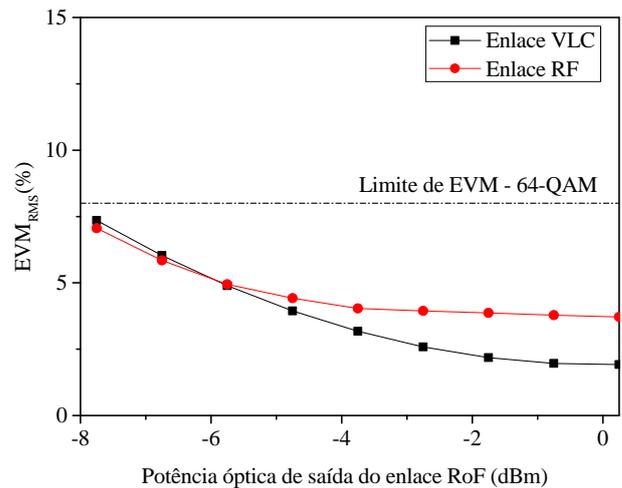


Figura 6. Medidas de  $EVM_{RMS}$  em ambas redes de acesso em função da potência de saída do enlace RoF.

Por fim, uma comparação de desempenho entre o sistema PoF e uma fonte elétrica de alimentação convencional foi realizada para validar o sistema PoF implementado, conforme mostrado na Figura 7. Um sinal 5G NR com 64 QAM de modulação com largura de banda de 60 MHz foi configurado no enlace de VLC, enquanto um sinal digital com largura de banda de 25 MHz e também com 64 QAM, foi configurado no enlace RF sem fio. Como pode ser observado, as curvas do enlace de VLC para ambos os casos quase se sobrepõem, indicando grande similaridade entre o sistema PoF proposto e a fonte elétrica convencional. Já as curvas de desempenho do enlace RF sem fio apresentam o mesmo comportamento,

embora haja uma suave diferença nos valores de  $EVM_{RMS}$ , especialmente para os menores valores de potências de RF. Essa diferença pode ser atribuída as diferentes condições ambientais sobre os componentes, e também aos ruídos presentes no enlace que foram acentuados pelo amplificador na recepção, acrescentando instabilidade no processo de medição. Em todo caso, para potência de RF de -8 dbm (menor valor de  $EVM_{RMS}$ ), a penalidade devido a inserção do sistema PoF é menor que 1%. Portanto, com base nesta análise comparativa, pode-se observar que o sistema PoF implementado teve um desempenho semelhante ao da fonte de alimentação convencional, o que demonstra seu potencial de aplicação para redes de comunicação móveis B5G.

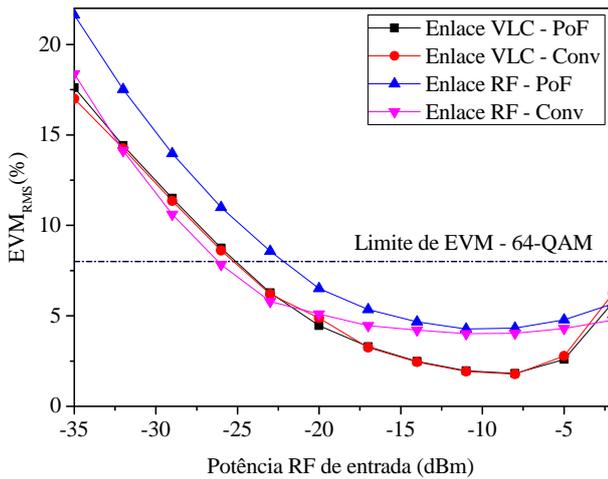


Figura 7. Comparação de desempenho entre o sistema PoF proposto com uma fonte elétrica convencional.

#### IV. CONCLUSÕES

Um sistema PoF foi implementado com sucesso para energizar simultaneamente dois componentes a partir de um mesmo PPC, um módulo RoF (fotodetector e um amplificador elétrico) e um diodo laser em 650 nm. Esses dois componentes faziam parte de um sistema 5G NR composto por duas redes de acesso, RF e VLC, respectivamente. Neste contexto, 500 m de MMF com 62,5  $\mu\text{m}$  de diâmetro de núcleo foi utilizada para transmitir 8,11 W, e na saída do PPC obteve-se aproximadamente 1,06 W com 14% de PTE. O sinal 5G NR gerado foi transmitido por meio de um enlace RoF baseado em SMF de 10 km para ser irradiado nos enlaces VLC e RF.

Uma taxa de transferência de 1,2 Gbps foi alcançada no enlace VLC para um sinal 5G NR de 200 MHz de largura de banda e modulação 64 QAM, resultando em aproximadamente 4,02% de  $EVM_{RMS}$ . Enquanto no enlace de RF, foi obtido 360 Mbps com 2,67% de  $EVM_{RMS}$  para um sinal 5G NR de 60 MHz de largura de banda e 64 QAM. Para fins de validação, foi realizada uma comparação de desempenho entre o sistema de PoF proposto e uma fonte de alimentação elétrica convencional. A similaridade entre as curvas de  $EVM_{RMS}$  com uma penalização de menos de 1% para -8 dbm de potência de RF de entrada, corroborou o bom desempenho do sistema de PoF e sua aplicabilidade para os sistemas B5G.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto XGM-AFCCT-2024-2-15-1 suportado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII em Tecnologia e Infraestrutura em Conectividade 5G e 6G, com recursos financeiros oriundos do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI, através do Termo de Cooperação 052/2023, firmado com a EMBRAPII. Adicionalmente, os autores também agradecem o apoio financeiro do CNPq, da CAPES, da FINEP, da FAPEMIG, da FAPESP (Contratos # 2021/06569-1 e # 2022/09319-9), e MPT cable.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz, and J. M. Lopez-Soler, "A survey on 5G usage scenarios and traffic models," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 905–929, 2020.
- [2] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [3] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6G be?" *Nature Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020.
- [4] M. Latva-Aho *et al.*, "Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence," 2019.
- [5] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
- [6] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragón-Zavala, and G. Campuzano, "Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: a survey," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1593–1619, 2013.
- [7] E. S. Lima *et al.*, "Integrated optical frequency comb for 5G NR Xhuals," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 16421, 2022.
- [8] 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.
- [9] J. P. Santacruz, "Analog Radio-over-Fiber for 5G/6G Millimeter-Wave Communications," *TU/e*, 2022.
- [10] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 126–132, 2020.
- [11] L. Feng *et al.*, "Applying VLC in 5G networks: Architectures and key technologies," *IEEE Network*, vol. 30, no. 6, pp. 77–83, 2016.
- [12] A. R. Ndjiongue and H. C. Ferreira, "An overview of outdoor visible light communications," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 29, no. 7, p. e3448, 2018.
- [13] J. D. L. Cardona, P. C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno-Hernández, X. Barreiro, and C. Vázquez, "Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with sleep modes," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 24, pp. 7948–7955, 2021.
- [14] R. H. Souza, P. Kiohara, L. Ghisa, M. Guegan, V. Quintard, O. L. Coutinho, A. Pérennou, and V. R. Almeida, "Analog response in optically powered radio-over-fiber links with distributed amplification in single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, 2023.
- [15] F. M. Al-Zubaidi, J. L. 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*, vol. 39, no. 13, pp. 4262–4269, 2021.
- [16] 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.
- [17] J. D. López-Cardona, C. Vázquez, D. S. Montero, and P. C. Lallana, "Remote optical powering using fiber optics in hazardous environments," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 748–754, 2017.
- [18] L. C. de Souza, E. S. Lima, and A. C. S. Junior, "Implementation of a full optically-powered 5G NR fiber-wireless system," *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2022.