

Implementação de um Sistema Híbrido FiWi utilizando FSO, VLC e Ondas Milimétricas para Aplicações 6G

C. H. S. Lopes, L. A. M. Pereira, T. P. V. Andrade, E. Conforti e Arismar Cerqueira S. Jr

Resumo—Neste trabalho, avaliamos experimentalmente uma arquitetura híbrida FiWi (*fiber/wireless*) que combina fibra óptica, (FSO, *free space optical*), ondas milimétricas e (VLC, *visible light communication*) em uma mesma topologia de rede. Para o *fronthaul*, um enlace de 20 km de fibra óptica seguido por um enlace FSO de 1,5 m foi implementado. Para o acesso, um enlace 5G NR sem fio de 2 m operando em 39 GHz e um enlace VLC ponto-a-ponto de 3 m em 550 MHz garantiram uma vazão de dados total do sistema na ordem de 1,5 Gbit/s, atendendo aos requisitos do 3GPP Release 18.

Palavras-Chave—5G, 5G-NR, 6G, FiWi, FSO, mm-waves, VLC e X-Haul.

Abstract—In this work, we experimentally evaluated a hybrid FiWi (*fiber/wireless*) architecture that combines optical fiber, free space optical (FSO), millimeter waves, and visible light communication (VLC) in the same network topology. For the *fronthaul*, a 20 km optical fiber link followed by a 1.5 m FSO link was implemented. For the access, a 2 m 5G NR wireless link operating at 39 GHz and a 3 m point-to-point VLC link at 550 MHz ensured a total system data throughput in the order of 1.5 Gbit/s, meeting the requirements of 3GPP Release 18.

Keywords—5G, 5G-NR, 6G, FiWi, FSO, mm-waves, VLC e X-Haul.

I. INTRODUÇÃO

Motivados pela crescente necessidade de altas taxas de dados, aumento na densificação de células e baixa latência para comunicação humana e/ou entre máquinas, os sistemas sem fio de quinta geração, incluindo as redes de acesso de rádio (RAN, *radio access network*), têm sido objeto de considerável atenção perante a academia e indústria [1]. A implantação da tecnologia de redes móveis de quinta geração (5G, *fifth-generation of mobile network*) permite a implementação de uma variedade de novas aplicações, tendo como foco principal o acesso móvel operando em banda larga [1], [2]. Soluções técnicas como o novo padrão de rádio 5G (5G NR, *new radio*) utilização de espectro na faixa de ondas milimétricas (mm-wave, *millimeter waves*), RANs heterogêneas e centralizada (C-RAN, *centralized-RAN*), comunicação óptica sem fio (OWC, *optical wireless communication*) são propostas para atender as demandas iminentes [2], [3]. Ao mesmo tempo, a sexta geração de redes móveis (6G, *sixth-generation of*

mobile networks) surge como um tópico popular para abordar as promessas não cumpridas do 5G e atender às demandas futuras a partir de 2030 com maior eficiência [4]. Na rede 6G, espera-se que surjam novos cenários de utilização, abrangendo telepresença, comunicação onipresente, utilização de robôs em diferentes áreas do cotidiano, biossensores e potenciais aplicações ainda não identificadas [5]. Soluções técnicas potenciais para o 6G incluem o uso de comunicações na faixa de terahertz (THz), inteligência artificial/aprendizado de máquina para atender redes autônomas e superfícies refletoras inteligentes [4], [5].

O objetivo fundamental de avançar em direção às redes 6G é fornecer velocidades de dados ultrarrápidas, alta capacidade e serviços confiáveis para usuários móveis. As células pequenas continuam sendo uma solução promissora para aumentar a velocidade e a densidade, pois aumentam a capacidade dividindo uma macrocélula em zonas menores e reutilizando os recursos de rádio de forma espacial [6]. No entanto, a implantação densa de células pequenas representa um desafio em termos de custos e consumo de energia dos locais de instalação, que normalmente representam os maiores custos e consumo de energia para um provedor de serviços móvel [6], [7]. A arquitetura C-RAN foi proposta para dar suporte de forma econômica à densificação da RAN, concentrando as funcionalidades avançadas de processamento de sinal em uma unidade centralizada (CU, *centralized unit*) que atende a múltiplas unidades remotas de rádio (RRUs, *remote radio units*) [8]. A proposta consiste em instalar uma CU com múltiplas unidades de processamento em uma única localização da rede e portanto interconectá-la dinamicamente a várias RRUs implantadas no campo por meio de arquiteturas X-Haul [9]. O objetivo principal de utilizar esta arquitetura centralizada é a possibilidade de explorar os benefícios da multiplexação estatística de recursos de hardware, resultando em maior eficiência energética e redução de custos [9], [10].

As redes 5G/6G devem operar em múltiplas faixas de frequências para suportar uma ampla gama de cenários e aplicações. Para atender a esse requisito, o 3GPP definiu três cenários de operação para o padrão 5G NR [11]. A primeira faixa de frequência (FR1) abrange de 0,410 GHz a 7,125 GHz, suportando larguras de banda (BW, *bandwidth*) de até 100 MHz. A segunda faixa de frequência (FR2-1) abrange as ondas milimétricas na faixa de 24,5 GHz a 52,6 GHz, com BW de até 400 MHz. E por fim, a terceira faixa de frequências (FR2-2) que vai de 52,6 GHz a 71 GHz com BW de até 2 GHz. No entanto, considerando um dos principais

C. H. S. Lopes, L. A. M. Pereira, T. P. V. Andrade e Arismar Cerqueira S. Jr. Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG 37400-000 Brasil (e-mails: celso.henrique@dtel.inatel.br luiz.melo@inatel.br; tomasvillena@dtel.inatel.br; arismar@inatel.br). E. Conforti. DECOM-Universidade Estadual de Campinas, Campinas 13083-970, Brazil (e-mail:conforti@unicamp.br).

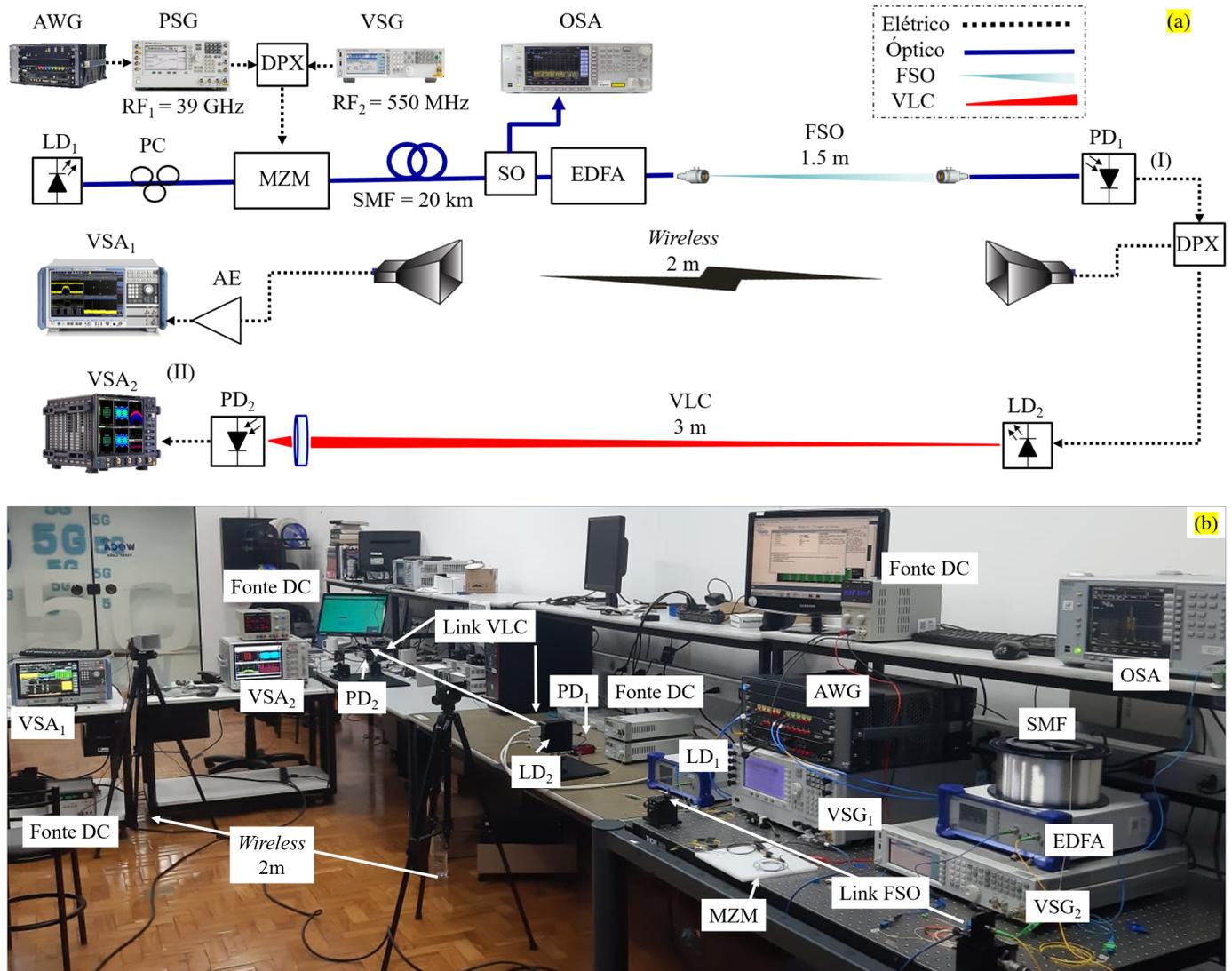


Fig. 1. Diagrama em blocos (a) e fotografia (b) do sistema FiWi proposto: AWG – arbitrary waveform generator; VSG – vector signal generator; OSA – optical spectrum analyzer; SO – splitter optical; EDFA – amplifier erbium-doped fiber; LD – laser diode; MZM – mach-zehnder modulator; SMF – single mode fiber; PD – photodetector; VSA – vector signal analyzer.

desafios de operar em frequências mais altas, que é a perda de transmissão e a necessidade de uma interface de *fronthaul* de alta capacidade, as tecnologias rádio analógico sobre fibra (A-RoF, *analog radio over fiber*) e óptica no espaço livre (FSO, *free space optical*) tornam-se extremamente interessantes [12]. Essas tecnologias possibilitam a transmissão de sinais com elevada BW, imunidade a interferências eletromagnéticas e baixa atenuação.

Soluções técnicas e inovadoras estão sendo propostas para atender as demandas requeridas pelo 5G/6G. A utilização de A-RoF para aplicações 5G foram descritas em [13], [14], [15]. No artigo [16], foram propostas duas soluções non-standalone 5G NR para atender às demandas iniciais do 5G. Foram empregadas diferentes tecnologias para a aplicação no fronthaul da rede, incluindo fibra óptica e FSO para aplicações de última milha. Os resultados experimentais demonstraram uma convergência segura e efetiva entre essas tecnologias, alcançando uma vazão de dados de até 3 Gbit/s e de acordo com as especificações do 3GPP Release 15. Em [17] os

autores apresentaram uma campanha de medição experimental envolvendo uma proposta de arquitetura híbrida baseada em A-RoF e FSO para compor o fronthaul da rede 5G. Para isso, eles utilizaram 10 km de fibra óptica seguidos por um enlace FSO de 50 m. Para a rede de acesso eles transmitiram um sinal 5G NR em 39 GHz a uma distância equivalente a 1 m, atingindo uma taxa de transferência total de 2,4 Gbit/s. Foi demonstrado em [19] por meio de uma investigação experimental, o uso de óptica integrada para gerar sinais 5G NR na faixa de 26 GHz. A arquitetura explorou o conceito X-Haul, aplicando soluções baseadas em fibra óptica, FSO e transmissão sem fio para compor a camada física da rede. Foi observado uma taxa de transmissão de 900 Mbit/s demonstrando a viabilidade da técnica para gerar sinais de ondas milimétricas sintonizáveis de baixo ruído de fase. O trabalho relatado em [20] descreve a implementação de uma prova de conceito para um fronthaul A-RoF de 12,5 km seguido por um enlace de acesso baseado em VLC com comprimento de 1,2 m para soluções 6G. A prova de conceito inicial alcançou uma vazão de dados de

60 Mbit/s, considerando a convergência entre as tecnologias.

Neste trabalho, propõe-se a investigação experimental de uma arquitetura de rede híbrida baseada no conceito X-Haul. Na *fronthaul* da rede, a fibra óptica e FSO são utilizados para o transporte simultâneo de sinais operando em diferentes faixas de frequências. No acesso da arquitetura de rede proposta, um enlace 5G NR operando em 39 GHz é implementado e avaliado, enquanto que um segundo enlace de acesso baseado em luz visível opera em 550 MHz para aplicações 6G. A Seção II descreve o arranjo experimental do sistema proposto. A Seção III apresenta os resultados da investigação de desempenho digital em termos de magnitude de erro vetorial médio (EVM_{RMS}). Por fim, as conclusões e comentários finais são apresentadas na Seção IV.

II. ARQUITETURA PROPOSTA

A configuração experimental é representada na Fig.1 em forma de diagramas em blocos (a) e fotografia do *setup* (b). Todas as tecnologias utilizadas no experimento são convergidas em uma arquitetura unificada, que emprega um enlace híbrido RoF e FSO para integrar o *fronthaul* da rede. Para o acesso é implementado um enlace *wireless* de 2 m operando em 39 GHz e paralelamente um enlace VLC operando em 550 MHz. O sinal 5G NR em banda base é projetado usando o *software* Keysight Signal Studio e gerado por um gerador de forma de onda arbitrária (AWG, *arbitrary waveform generator*) M8190A da Keysight. O modelo de teste escolhido foi o 3.1 (TM 3.1) especificado pelo 3GPP. Este modelo especifica que o sinal 5G NR operando na faixa de frequência 2.1 (FR2-1) tenha larguras de banda de até 400 MHz utilizando ordens de modulação QPSK, 16- e 64-QAM. O sinal de banda base é aplicado a um VSG₁ (PSG-E8267D), que é usado para converter o sinal para $RF_1 = 39$ GHz e transmitir a uma potência de 4 dBm. Em paralelo, o sinal *M*-QAM é gerado por um VSG₂ (EXGN5172B) a $RF_2 = 550$ MHz com potência de transmissão igual a -10 dBm. Os dois sinais de RF são combinados por um diplexer (DPX, 1721) antes de serem injetados em um MZM (FTM7937EZ). O MZM modula a portadora óptica do laser (LD) centrado em 1551 nm usando os sinais de RF combinados. A potência de transmissão do LD é igual a 15 dBm, e o sinal óptico modulado é então lançado em uma fibra monomodo (SMF) de 20 km, dando origem ao *fronthaul* óptico.

Antes da transmissão, o sinal óptico foi dividido utilizando um divisor óptico (SO, *splitter optical*) 80/20, no qual 20% do sinal é aplicado a um analisador de espectro óptico (OSA, *optical spectrum analyzer*) para medições no domínio da frequência em tempo real, e o equivalente a 80% é amplificado por um amplificador de fibra dopada com erbium (EDFA, *amplifier erbium-doped fiber*). O EDFA está localizado na unidade de distribuição (DU, *distribution unit*) que está conectado a um RRH por meio de um enlace *fronthaul* óptico. Posteriormente, o sinal óptico modulado é transportado por um enlace FSO de 1,5 m de comprimento. Dois colimadores (CFS18) são utilizados na transmissão e na recepção do enlace FSO, implementando como prova de conceito a rede híbrida RoF/FSO. Na recepção, o sinal óptico é fotodetectado por

um (PD₁, *photodetector*) com largura de banda de 50 GHz (DMX50AF) e após o PD₁ os sinais são separados por um DPX (1721) para serem transmitidos em dois enlaces distintos e paralelos.

TABELA I
PARAMETROS DO SISTEMA.

Parâmetro	Valor
Comprimento de onda do LD ₁	1551 nm
Potência de transmissão do LD ₁	15 dBm
Potência de RF ₁ em 39 GHz	4 dBm
Potência de RF ₂ em 550 MHz	-10 dBm
Comprimento da Fibra	20 km
Potência de Saída do EDFA	8 dBm
Comprimento do FSO	1,5 m
Potência óptica recebida no PD ₁	5 dBm
Largura de banda do PD ₁	50 GHz
Responsividade do PD ₁	0,75 A/W @ 1550 nm
Comprimento do enlace sem fio	2 m
Comprimento de onda do LD ₂	650 nm
Potência de transmissão do LD ₂	4 dBm
Comprimento do enlace VLC	3 m
Potência óptica recebida no PD ₂	4 dBm
Largura de banda do PD ₂	1,2 GHz
Responsividade do PD ₂	0,4 A/W @ 650 nm

Duas redes de acesso distintas foram consideradas neste estudo. A primeira é uma transmissão sem fio usando um par de antenas tipo corneta com ganhos de 30 dBi cada. Nesse caso, o sinal recebido é amplificado por um amplificador elétrico (EA, *electrical amplifier*) com ganho de 35 dB antes de ser recebido e analisado por um VSA₁ (R&S FSW67). A outra rede de acesso é baseada em um enlace VLC de alcance de 3 m para aplicações ponto-a-ponto. Um LD₂ com comprimento de onda de 650 nm é usado para transmitir o sinal. Do lado do receptor, uma lente óptica é empregada para focalizar o sinal, que será fotodetectado por outro PD₂ (EOT, 3020). Finalmente, a qualidade do sinal é avaliada usando um VSA₂ (V084A) da Keysight. A Tabela I resume os principais parâmetros do sistema proposto.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A análise de desempenho da arquitetura proposta foi realizada em duas etapas. A primeira etapa foi avaliar a qualidade dos sinais recebidos após o enlace de *fronthaul* óptico e FSO, ou seja, após a conversão eletro/óptica no fotodetector, demarcado na Fig. 1 (a) no ponto (I). O espectro elétrico ilustrado na Fig. 2 apresenta os níveis de potência de recepção para o sinal 5G NR transmitido em 39 GHz e para diferentes BWs, como determina a faixa de frequências FR2-1, 50, 100, 200 e 400 MHz representados por BW₁, BW₂, BW₃ e BW₄, respectivamente. Como o modelo de testes empregado na geração deste sinal foi o TM 3.1, algumas características relacionadas à geração dos sinais serão descritas a seguir: para larguras de banda de 50 e 100 MHz com espaçamento entre as subportadoras de 60 kHz, alcançou-se vazões de dados de 178 e 360 Mbit/s, respectivamente. Considerando os sinais com bandwidth (BW) de 200 e 400 MHz e espaçamento entre as subportadoras de 120 kHz, o sistema atingiu vazão de dados na ordem de 692 e 1386 Mbit/s, respectivamente [21].

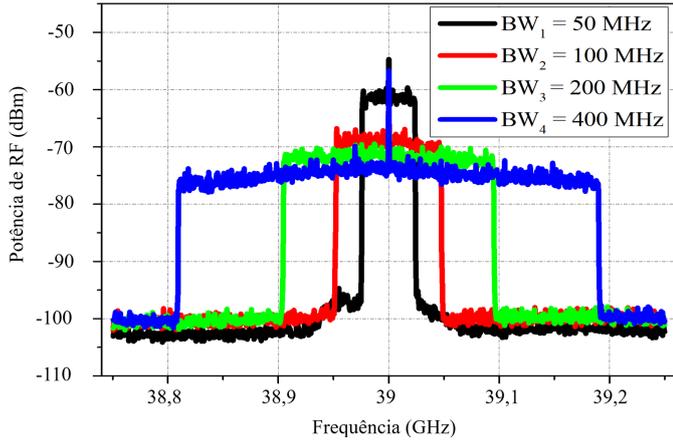


Fig. 2. Espectro elétrico medido na saída do fotodetector para larguras de banda 50, 100, 200 e 400 MHz.

A Fig. 3 reporta os diagramas de constelação para os sinais 5G NR recebidos no ponto (I) da arquitetura proposta. Para o sinal com BW_1 de 50 MHz, atingiu-se 3,3% de EVM_{RMS} , medido para uma potência óptica de recepção de 5 dBm. Enquanto que o BW_2 e BW_3 operando em 100 e 200 MHz atingiram 3,8 e 4,7%, respectivamente para o mesmo nível de potência óptica. Finalmente, o nível de EVM_{RMS} de 5,9% foi observado para a $BW_4 = 400$ MHz, considerando as mesmas condições de níveis de potência avaliadas anteriormente.

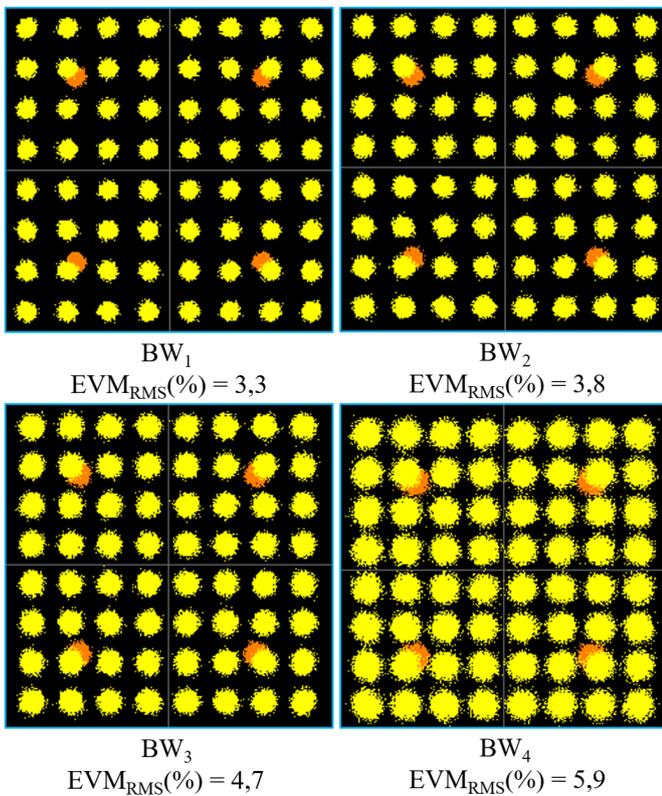


Fig. 3. Constelações 5G NR medidas para larguras de banda de 50, 100, 200 e 400 MHz e ordem de modulação 64-QAM.

Os valores de EVM_{RMS} observados estão abaixo do valor limite estipulado pelo 3GPP Release 18 para a ordem de

modulação 64-QAM empregada, que é de 8%. Com isto, a transmissão explorando a faixa de frequências FR2-1, demonstrou ser viável do ponto de vista do *fronthaul* híbrido RoF/FSO da rede.

O sistema VLC proposto como uma opção de acesso ponto-a-ponto da rede, foi avaliado considerando uma transmissão simultânea e paralela ao enlace 5G NR em 39 GHz. Três campanhas de medição distintas foram realizadas, empregando a mesma BW de 20 MHz para o sinal *M*-QAM, valor limitado pelo equipamento de geração. Com o objetivo de aumentar a taxa de dados do enlace VLC, foram utilizadas três ordens de modulação diferentes: QPSK, 16-QAM e 64-QAM. É importante ressaltar que ordens de modulação mais altas requerem uma relação sinal-ruído (SNR) aprimorada para manter o mesmo nível de desempenho do sistema.

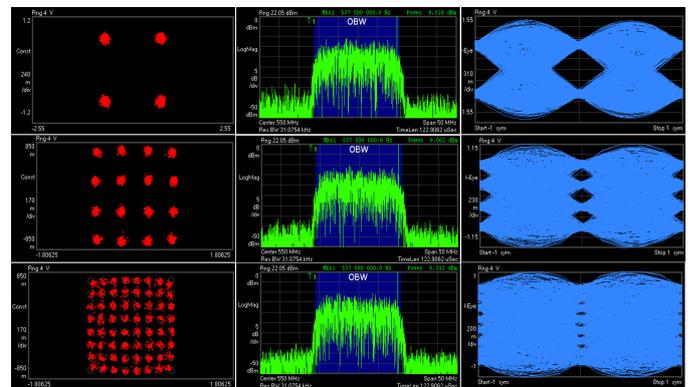


Fig. 4. Análise de desempenho VLC: Luz vermelha com modulação QPSK, 16- e 64-QAM com largura de banda de 20 MHz.

Para avaliar o desempenho do enlace VLC, variou-se o nível de potência do sinal de RF transmitido de -22 a 0 dBm. Para o sinal QPSK, observamos um valor de EVM_{RMS} de 16,4% para uma potência de RF de transmissão de -20 dBm, alcançando uma taxa de dados de 40 Mbit/s. Para aumentar a taxa de dados do sistema, as ordens de modulação 16-QAM e 64-QAM foram empregadas, exigindo um aumento na potência de RF para -18 e -15 dBm, respectivamente, para atingir níveis de EVM_{RMS} de 11,8% e 8,5%. A Fig. 4 ilustra o diagrama de constelação, o espectro elétrico e o diagrama de olho para as respectivas ordens de modulação transmitidas (a) QPSK, (b) 16-QAM e (c) 64-QAM, alcançando uma vazão total de 120 Mbit/s. Vale ressaltar que a Fig. 4 apresenta os diagramas medidos para uma potência do sinal de RF transmitido de -10 dBm, enquanto que a potência óptica na recepção foi de aproximadamente 4 dBm. Observou-se que estes valores otimizam o desempenho do sistema.

Após caracterizar o sistema RoF/FSO com relação a valores otimizados de potência transmitida de RF para o enlace VLC e de potência óptica recebida para o sinal em 39 GHz, foi implementado um enlace sem fio com distancia de 2 m. A Fig. 5 retrata o espectro elétrico medido na saída do amplificador elétrico. Conforme ilustrado, o sinal 5G NR transmitido a 39 GHz não aparenta degradações severas devido a fenômenos físicos de propagação tais como: reflexão, difração e bloqueio encontrados ao longo de um canal sem fio. Um *span* de 67 GHz foi capturado com objetivo de demonstrar

a viabilidade do sistema proposto. O espectro mais definido é observado na caixa representada na figura por um *span* de 500 MHz, e com o emprego de um EA com ganho de 35 dB na recepção, a perda devido ao canal sem fio foi compensada e o nível de EVM_{RMS} observado foi de 7,5%, atingindo assim uma taxa de transmissão de 1,5 Gbit/s considerando as duas redes de acesso.

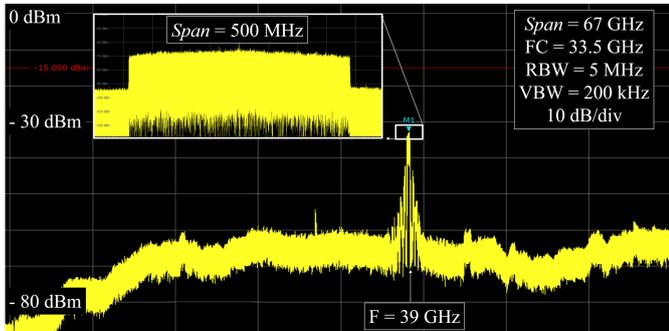


Fig. 5. Espectro elétrico medido após transmissão FiWi 5G NR a 39 GHz.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu a investigação experimental de uma proposta de arquitetura de rede híbrida baseada em A-RoF, FSO e VLC para atender às demandas das redes 5G e 6G. A arquitetura de rede demonstrada utiliza uma conexão de fronthaul baseada em A-RoF e FSO, enquanto o acesso é realizado por meio de ondas milimétricas operando a 39 GHz e VLC na faixa de 550 MHz. Os resultados experimentais comprovaram que as diversas tecnologias empregadas podem oferecer uma solução para a demanda crescente de largura de banda necessária para atender às diferentes aplicações. Foi obtida uma vazão máxima de dados de aproximadamente 1,5 Gbit/s utilizando uma modulação 64-QAM no sistema FiWi proposto. O desempenho do sistema foi avaliado de acordo com os parâmetros de EVM_{RMS} estabelecidos pela especificação 3GPP Release 18. Como trabalhos futuros, propõe-se a implementação da arquitetura avaliada em um sistema WDM, permitindo a transmissão simultânea de diferentes tecnologias para atender a um número maior de usuários

AGRADECIMENTOS

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. Adicionalmente, os autores também agradecem o apoio financeiro do CNPq, da CAPES, da FINEP, da FAPEMIG e da FAPESP.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Dogra, R. K. Jha and S. Jain, "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67512-67547, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031234.
- [2] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939938.
- [3] Borges, R.M.; de Souza Lopes, C.H.; Lima, E.S.; de Oliveira, M.A.; Cunha, M.S.B.; Alexandre, L.C.; da Silva, L.G.; Pereira, L.A.M.; Spadoti, D.H.; Romero, M.A.; Sodré Junior, A.C. Integrating Optical and Wireless Techniques towards Novel Fronthaul and Access Architectures in a 5G NR Framework. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5048. <https://doi.org/10.3390/app11115048>
- [4] E. -K. Hong et al., "6G R&D vision: Requirements and candidate technologies," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 232-245, April 2022, doi: 10.23919/JCN.2022.000015.
- [5] L. Augusto Melo Pereira, L. L. Mendes, C. J. A. Bastos Filho and A. Cerqueira Sodre, "Amplified radio-over-fiber system linearization using recurrent neural networks," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 144-154, March 2023, doi: 10.1364/JOCN.474290.
- [6] R. Maximidis and others, "A 51 Gb/s Reconfigurable mmWave Fiber-Wireless C-RAN supporting 5G/6G MNO Network Sharing," in *Journal of Lightwave Technology*, doi: 10.1109/JLT.2023.3246597.
- [7] E. Ruggeri et al., "A 5G Fiber Wireless 4Gb/s WDM Fronthaul for Flexible 360° Coverage in V-Band massive MIMO Small Cells," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 4, pp. 1081-1088, 15 Feb.15, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3029608.
- [8] C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T. A. Nirmalathas, E. Wong and K. -L. Lee, "Evolution of Radio-Over-Fiber Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647-1656, 15 March15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2876722.
- [9] C. Vagionas et al., "End-to-End Real-Time Service Provisioning Over a SDN-Controllable Analog mmWave Fiber -Wireless 5G X-Haul Network," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 1104-1113, 15 Feb.15, 2023, doi: 10.1109/JLT.2023.3234365.
- [10] R. M. Borges et al., "Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468-4477, Oct.1, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2826483.
- [11] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception; Part-1," Technical Specification (TS) 38.104, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2023). TS 38.104 version 18.1.0 Release 18.
- [12] H. Rodrigues Dias Filgueiras et al., "Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9232-9259, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239807.
- [13] R. M. Borges et al., "DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642-653, 1 Feb.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2947916.
- [14] G. K. M. Hasanuzzaman and others, "Self-Oscillating Optical Frequency Comb: Application to Low Phase Noise Millimeter Wave Generation and Radio-Over-Fiber Link," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4535-4542, Oct.1, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2844344.
- [15] F. Shi, Y. Fan, X. Wang, W. Zhang and Y. Gao, "High-performance dual-band radio-over-fiber link for future 5G radio access applications," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 4, pp. 267-277, April 2022, doi: 10.1364/JOCN.440530.
- [16] C. H. d. S. Lopes et al., "Non-Standalone 5G NR Fiber-Wireless System Using FSO and Fiber-Optics Fronthauls," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 406-417, 15 Jan.15, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3029500.
- [17] J. Bohata et al., "Performance Evaluation of Seamless 5G Outdoor RoFSO Transmission at 39 GHz," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, no. 1, pp. 7-10, 1 Jan.1, 2022, doi: 10.1109/LPT.2021.3134559.
- [18] J. Bohata, D. N. Nguyen, J. Spáčil, M. Komanec, B. Ortega, L. Vallejo, Z. Ghassemlooy, and S. Zvánovec, "Experimental comparison of DSB and CS-DSB mmW formats over a hybrid fiber and FSO fronthaul network for 5G," *Opt. Express* 29, 27768-27782 (2021).
- [19] Lima, E.S., Borges, R.M., Andriolli, N. et al. Integrated optical frequency comb for 5G NR Xhuals. *Sci Rep* 12, 16421 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20553-5>
- [20] Tomás P. V. Andrade, Letícia Carneiro de Souza, Eduardo Saia Lima, and Arismar Cerqueira Sodré, "Demonstration of a hybrid A-RoF/VLC system for beyond 5G applications," *Appl. Opt.* 62, C115-C121 (2023)
- [21] Dong-Nhat Nguyen, Jan Bohata, Jan Spacil, Daniel Dousek, Matej Komanec, Stanislav Zvanovec, Zabih Ghassemlooy, and Beatriz Ortega, "M-QAM transmission over hybrid microwave photonic links at the K-band," *Opt. Express* 27, 33745-33756 (2019)