

Rede *Opto-Wireless* Amplificada baseada em Tecnologia Fotônica

A. L. M. Muniz¹, D. F. Noque¹, R. M. Borges¹, T. N. Rodvalho^{1,2}, Regivan N. Da Silva¹, R. A. Santos¹ e Arismar Cerqueira S. Jr.¹

Resumo—Este artigo apresenta a validação experimental de um amplificador de radiofrequência (RF) baseado em tecnologia fotônica e a sua implementação em uma rede óptico-*wireless* real de telefonia móvel da operadora TIM. O amplificador proposto faz uso do efeito óptico não-linear denominado *four-wave mixing*, com a finalidade de prover ganho no domínio elétrico. Este efeito é intensificado por meio do uso de uma fibra HNLf especial com coeficiente não-linear $\gamma = 28 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. O parâmetro EVM, relacionado à qualidade do sinal digital, é fortemente dependente da potência óptica na entrada da HNLf, no qual as modulações QPSK e 16QAM obtiveram valores de EVM iguais a 4,1 e 6,5 %rms respectivamente. Além do aprimoramento de desempenho no sinal com modulação digital, demonstra-se ausência de distorções e ganho elétrico de 16 dB com o uso do sistema proposto em comparação ao sistema de rádio sobre fibra convencional.

Palavras-Chave—*amplificador de RF; fotônica de micro-ondas; four-wave mixing; rádio sobre fibra.*

Abstract—This article presents the experimental validation of a radio frequency amplifier based on photonics technology and its implementation in a real optical-wireless network from TIM mobile network operator. The proposed photonics-based amplifier takes advantage of the nonlinear optical effect *four-wave mixing* in order to provide gain in the electrical domain. This effect is enhanced by using a special HNLf fiber with a nonlinear coefficient $\gamma = 28 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. The EVM as a performance parameter of the digital signal proved to be strictly dependent on the optical power at the HNLf input, in which the QPSK and 16QAM modulations obtained EVM values of 4.1 and 6.5 %rms respectively. Moreover, it was demonstrated RF gain up to 16 dB and no distortion with the use of the proposed system compared to the conventional radio-over-fiber system.

Keywords— *four-wave mixing; microwave photonics; radio-over-fiber; RF amplifier.*

I. INTRODUÇÃO

A área de fotônica de micro-ondas têm atraído grande interesse nos últimos anos devido ao seu potencial de geração, transmissão, detecção, processamento e controle de sinais de micro-ondas e ondas milimétricas no domínio óptico [1]. Os sistemas rádio sobre fibra (RoF – *radio-over-fiber*) proveem diversos benefícios, tais como ampla largura de banda de operação, baixa atenuação, imunidade à interferência eletromagnética, menor peso e facilidade em multiplexar os sinais ópticos [2]. Suas vantagens impulsionam as pesquisas das próximas gerações de sistema sem fio que suportarão altas frequência de portadora com elevadas taxas de transmissão e

permitirão a convergência de diferentes tecnologias [3]. Os *front-ends* de RF atualmente demonstram-se ineficientes, devido as suas características como estreita banda de operação e necessidade de diferentes *hardwares* para cada frequência de operação. Além disso, geradores e amplificadores de micro-ondas e de ondas milimétricas no domínio elétrico apresentam alto grau de complexidade e os desempenhos dos conversores analógicos-digitais são limitados para baixa frequência, devido à resposta dos componentes elétricos [4].

Entretanto, desenvolvimentos em fotônica de micro-ondas demonstram proeminentes vantagens no uso de sistemas ópticos para os *front-end* de RF, possibilitando amplificação [5], filtragem [6], translação de frequência de RF [7], processamento e amostragem de sinais [8]. Os efeitos não-lineares têm sido investigados na área de fotônica de micro-ondas; o espalhamento estimulado de Brillouin (SBS - *stimulated Brillouin scattering*) e a auto modulação de fase (SPM – *self-phase modulation*) têm sido usados em sistemas RoF para melhorar as bandas laterais do sinal modulado [9] e soluções de múltiplos FWM (*four-wave mixing*) [10] foram propostas para obtenção de ganho de RF em sistemas RoF [5][11][12].

O presente artigo reporta os principais avanços na área de pesquisa em amplificação de RF baseada em tecnologia fotônica nos sistemas de rádio sobre fibra. Adicionalmente, pela primeira vez na literatura, uma transmissão em condição real de uma rede de telefonia móvel da operadora TIM valida a implementação do sistema proposto em sistemas com modulação digital. Análises detalhadas de desempenho do sistema proposto também são apresentadas para maximizar a relação sinal-ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*) e minimizar o parâmetro de desempenho EVM (*error vector magnitude*).

O trabalho foi estruturado em quatro seções. A Seção II descreve a técnica de amplificação de RF utilizando o efeito não-linear FWM. Já a Seção III apresenta a implementação de uma rede de telefonia móvel em condições reais no sistema de amplificação proposto, além de uma análise de desempenho experimental. Conclusões e trabalhos futuros são descritos na Seção IV.

II. TÉCNICA DE AMPLIFICAÇÃO DE RF BASEADA EM TECNOLOGIA FOTÔNICA

Esta seção apresenta os conceitos empregados na técnica de amplificação de RF baseada em tecnologia fotônica, mais precisamente utilizando o efeito não-linear *four-wave mixing*.

¹Laboratório WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*), Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. E-mail: arismar@inatel.br. ²TIM Brasil, RATNA, São Paulo-SP, Brasil.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep/Funtel (Convênio 01.14.0231.00 - Centro de Referência em Radiocomunicações ou CRR).

Assim como anteriormente proposto em [5], o ganho de RF analisado, em comparação entre o sistema proposto e o sistema de RoF convencional, definiu-se sendo a diferença de potência elétrica fotodetectada para uma mesma potência óptica de recepção.

O sistema RoF convencional baseia-se na transmissão do sinal de RF, empregando um laser, um modulador de amplitude (MZM – *Mach-Zehnder modulator*), uma fibra monomodo (SMF – *single mode fiber*) e um fotodetector. O sistema de amplificação proposto, apresentado na Fig. 1, é composto por dois lasers de bombeio contínuos nos comprimentos de ondas de 1.555,35 e 1.558,65 nm, que são mantidos em mesmo estado de polarização com a ajuda dos controladores de polarização (PC – *polarization controller*), acoplados a um MZM. Este, recebe o sinal de RF proveniente de um gerador de sinais vetorial (VSG – *vector signal generator*) e a tensão de polarização.

Em seguida, os sinais já no domínio óptico são amplificados por um amplificador de fibra dopada a érbio (EDFA – *erbium-doped fiber amplifier*), e transmitidos em uma fibra altamente não-linear (HNLF – *high non-linear fiber*) com as seguintes propriedades: comprimento de onda de dispersão cromática nula $\lambda_0=1.557$ nm; comprimento $L=470$ m; atenuação $\alpha=0,8$ dB/km; *dispersion slope (1.550 nm)* $S_0=0,023$ ps/nm²/km; coeficiente não-linear $\gamma=28$ W⁻¹km⁻¹. O espectro óptico e a existência de produtos de FWM são observados em um analisador de espectro óptico (OSA – *optical spectrum analyzer*). Em sequência, um filtro óptico configurável (TPBF – *tunable pass-band filter*) seleciona a subportadora óptica à ser transmitido em 15 km de fibra SMF. Por fim, o sinal elétrico, fotodetectado, é analisado em um analisador de espectro elétrico (ESA – *electronic spectrum analyzer*) e transmitido por uma antena para análises de desempenho e de conectividade de um sistema de transmissão sem fio.

O efeito de FWM na saída da fibra HNLF pode ser observado na Fig. 2. Este efeito é resultante da interação não-linear de terceira ordem ($\chi^{(3)}$) e é mais intenso em meios altamente não-lineares como as HNLFs. A interação entre as duas ondas ópticas ω_1 e ω_2 implica na criação de duas novas portadoras ópticas ω_3 e ω_4 espaçadas de $2\omega_1-\omega_2$ e $2\omega_2-\omega_1$ respectivamente. Subsequentemente, o efeito se repete entre todas as portadoras, incluindo as portadoras recentemente criadas. Assim, se houver potência suficiente, o efeito irá se estender por todo o espectro óptico. No experimento proposto, utilizou-se os dois lasers de bombeio espaçados de 3,3 nm e centrados no comprimento de onda de dispersão cromática nula com o intuito de minimizar o descasamento de fase entre portadoras ópticas [13].

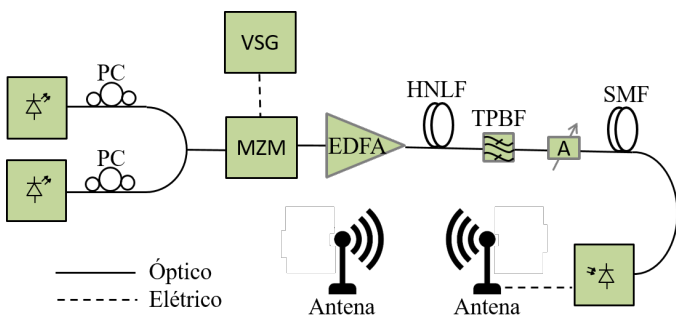


Fig. 1. Técnica de amplificação de RF baseada em tecnologia fotônica.

Para a obtenção do espectro óptico na saída da HNLF, apresentado na Fig. 2, empregou-se uma potência óptica total de 20 dBm. O piso de ruído óptico foi intensificado devido à figura de ruído introduzida pelo amplificador óptico EDFA com ganho de 14 dB. Para as análises experimentais do ganho de RF, o primeiro produto de FWM da esquerda ($\lambda_1 = 1552,05$ nm) foi devidamente filtrado, transmitido através de um enlace óptico de 15 km e fotodetectado para fins de comparação com o sistema RoF convencional.

Para os sistemas RoF convencionais, a maior parte da energia está contida na portadora óptica e não nas bandas laterais de modulação, como pode ser visto na Fig. 3, o que limita a eficiência do enlace devido à saturação de potência no processo de detecção. No sistema proposto, como a envoltória das bandas laterais do sinal óptico tem uma relação não-linear entre as portadoras ópticas, a energia total contida nas bandas laterais é comparativamente maior, dando assim origem ao ganho de RF baseado em tecnologia fotônica. Tal ganho é obtido por meio da manipulação da tensão de polarização do modulador óptico, a qual implica em mudanças no índice de modulação.

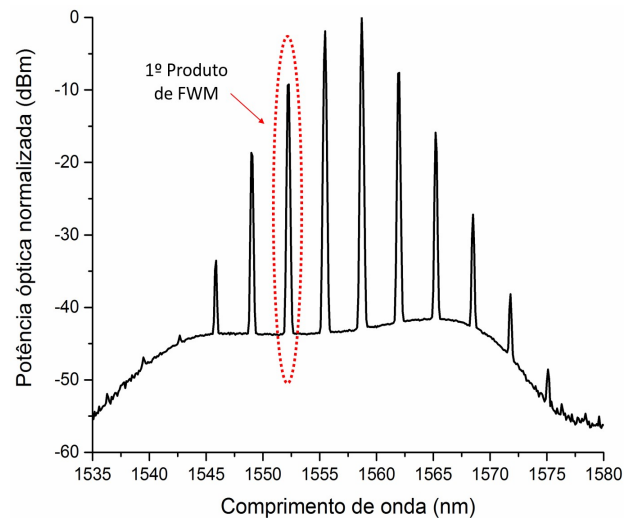


Fig. 2. Espectro óptico obtido na saída da HNLF com múltiplos produtos de FWM.

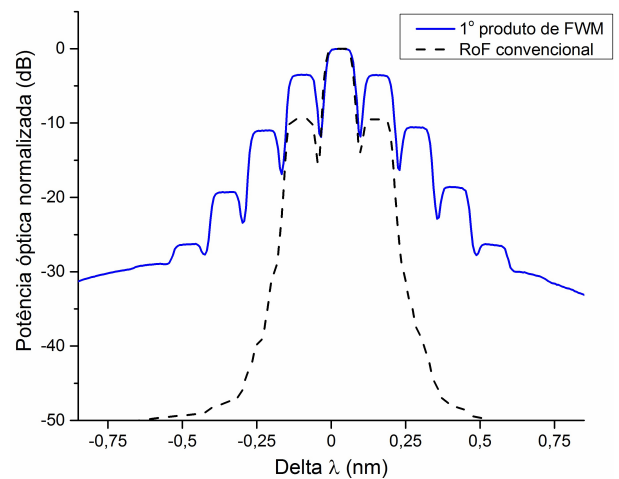


Fig. 3. Comparação entre os espectros ópticos do sistema RoF convencional e 1º produto de FWM do sistema proposto.

O ganho de RF baseado no processo não-linear FWM depende significativamente de duas características do *comb* óptico gerado [5]: o número de bandas laterais e a equalização de potência entre as portadoras iniciais (bombeios) e os produtos de FWM das bandas laterais. Tais características fazem com que o sinal fotodetectado obtenha uma maior potência de RF, em comparação com o sistema RoF convencional para uma mesma potência óptica de recepção.

Para analisar os espectros ópticos dos dois sistemas, utilizou-se uma portadora de RF centrada em 16 GHz, com a finalidade de explorar a resolução mínima do OSA (0,07 nm). Entretanto, as medidas de ganho de RF foram obtidas para a frequência de 12 GHz, respeitando o limite de frequência do fotodetector (13 GHz). A Fig. 4 apresenta os sinais fotodetectados dos dois sistemas. Observa-se que o sinal amplificado, obtido utilizando o 1º produto de FWM, apresenta pureza espectral, ausência de distorções e potência de -32,2 dBm, enquanto que a potência de RF do sistema convencional resultou em -48 dBm. Portanto, o ganho de RF obtido foi de 16 dB. Por outro lado, a SNR no sistema proposto atingiu o valor de 63 dB, sendo que no sistema convencional tal parâmetro foi de 53 dB.

Adicionalmente, foi utilizado o gerador vetorial de sinais sintonizado em 2,1275 GHz com modulação digital e potência de 16 dBm para análise dos parâmetros ótimos de transmissão no sistema proposto. Como premissa, o sistema deve apresentar ganho de RF a partir do 1º produto de FWM, além de maximizar a relação sinal-ruído e minimizar a taxa de erro de bits. Para isso, variou-se a potência óptica na entrada da HNLF e, por meio um osciloscópio digital, foi analisado o parâmetro EVM. Este parâmetro representa a magnitude do vetor de erro, calculado a partir da diferença entre os fasores do sinal medido e do sinal ideal. Na Fig. 5(a) demonstra-se a análise do parâmetro EVM em relação à potência óptica na entrada da HNLF para as modulações QPSK e 16QAM, com ambos os sinais fotodetectados em mesma potência. Os resultados de desempenho do EVM apresentados foram diretamente ligados à eficiência do processo não-linear FWM e do ruído ASE incrementado pelo EDFA. Para uma potência óptica de 20 dBm na entrada da HNLF, o parâmetro EVM atingiu o melhor desempenho para as modulações QPSK e 16QAM, com os valores de 4,1 e 6,5 %rms respectivamente. Porém, o EVM elevou-se para acima de 20 %rms para potências ópticas abaixo de 16 dBm, devido à baixa eficiência do processo FWM. Analogamente, o EVM superou 20 %rms para potências ópticas acima de 25 dBm, ocasionado pelo alto ruído ASE do amplificador EDFA e também pela saturação do 1º produto de FWM.

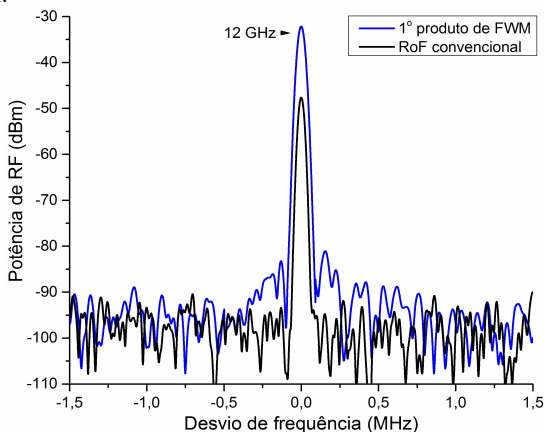


Fig. 4. Espectros elétricos medidos para demonstração do ganho de RF.

Contudo, podemos observar na Fig. 5(b) a constelação 16QAM para o sinal fotodetectado pelo sistema proposto (esquerda) e pelo sistema RoF convencional (direita). Ambos os sinais foram fotodetectados para uma potência óptica de recepção igual a 0 dBm e o sistema proposto configurado no ponto ótimo. Para o sistema de RoF convencional, a potência elétrica fotodetectada apresentou-se menor em relação ao sistema proposto. Assim, a constelação do sistema baseado em FWM exibiu-se mais “limpa”, devido à maior relação sinal-ruído.

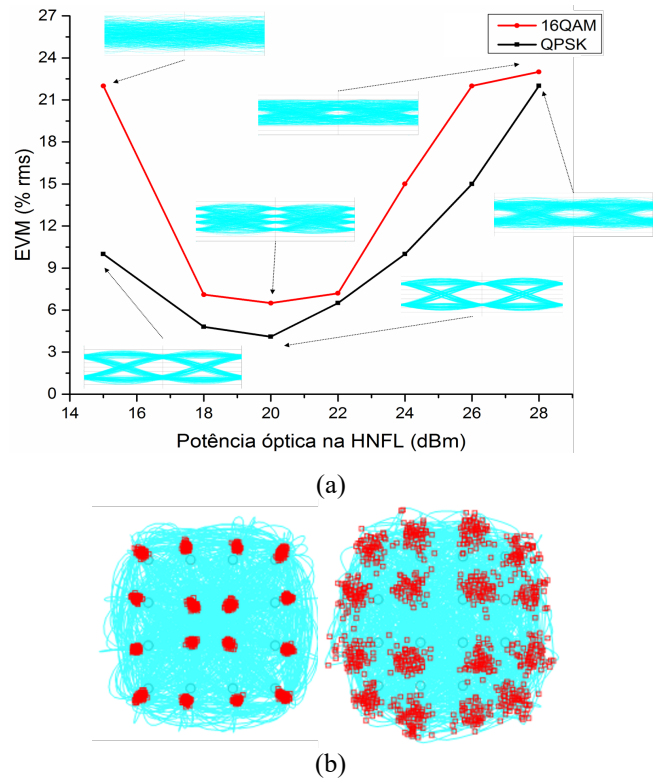


Fig. 5. Análise de desempenho do sistema de amplificação proposto. (a) Curva de EVM em função da potência aplicada à HNLF. (b) Constelação do sinal 16QAM, transmitido e fotodetectado em mesma potência, com o sistema proposto (esquerda) e com o RoF convencional (direita).

III. IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR DE RF BASEADO EM FWM EM UM SISTEMA REAL DE TELEFONIA MÓVEL

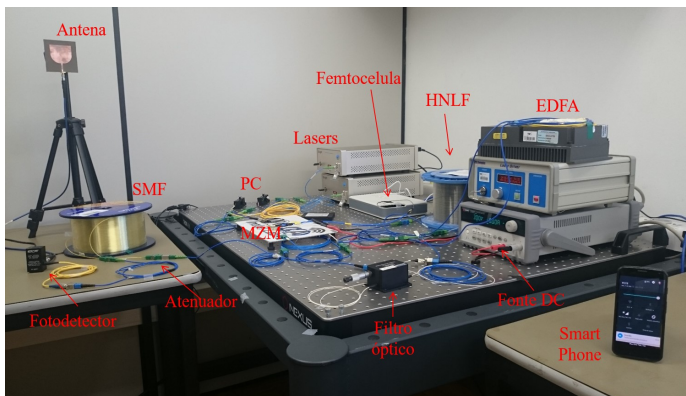
Nesta seção, o sistema de amplificação de sinais de RF baseado em FWM é implementado em uma rede de telefonia móvel real da operadora de telecomunicações TIM, como mostra a Fig. 6. O principal objetivo é demonstrar os testes de conectividade e melhoria de transmissão em um cenário *óptico-wireless* de uma estação rádio base femtocelula 3G.

A Fig. 6(a) demonstra o *setup* experimental da estação rádio base femtocelula, chamada de “Blue Zone TIM”, conectada à entrada do modulador MZM. Com isso, o sinal de dados, provido pelo padrão 3G UMTS (*universal mobile telecommunication system*) utilizando uma portadora de 2,1275 GHz, é transmitido através do sistema proposto. A potência óptica aplicada na fibra HNLF foi de 20 dBm para atender ao ponto ótimo de operação demonstrado na análise anterior. Uma antena impressa de ganho igual a 3 dBi e banda de operação de 1,7 a 2,7 GHz, com diagrama onidirecional no plano horizontal em toda a faixa de operação, transmitiu o sinal fotodetectado proveniente do 1º produto de FWM.

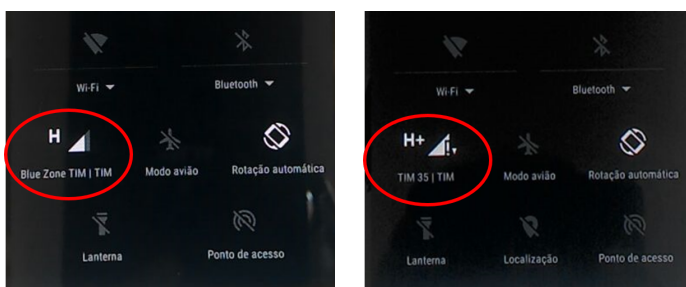
Com o sistema de transmissão ligado, o *smartphone*, apresentado na Fig. 7(a), comuta da rede celular externa “TIM

35” (ERB padrão da cidade de Santa Rita do Sapucaí – MG, local onde foi realizado o experimento) para a rede interna “Blue Zone TIM”. Se o sistema de transmissão for desligado, o aparelho celular comuta de volta para a rede celular externa, assim como mostrado nas Figs. 6(b) e 6(c) respectivamente. As comutações entre as redes celulares acontecem devido ao nível de potência elétrica da rede interna ser maior ao da rede externa quando o sistema proposto é ligado. Portanto, a conectividade do *smartphone* com a rede “Blue Zone TIM” valida que o sistema proposto de amplificação conseguiu transmitir, sem falhas, o sinal de dados da femtocelula. Adicionalmente, a Fig. 8 mostra os dois espectros elétricos fotodetectados, provenientes da femtocelula, pelo sistema proposto e pelo RoF convencional. O sinal derivado do 1º produto de FWM obteve ganho de RF de 16 dB em toda banda do sinal, além de não aumentar o piso de ruído do sistema.

Para transmitir os sinais pela antena, utilizou-se um amplificador elétrico de 30 dB com o intuito de compensar as atenuações causadas na transmissão sem fio. O espectro de recepção medido a partir de um enlace de 2 metros de distância pode ser visto na Fig. 9. O sinal da rede OWC (*optical-wireless communication*), provido pela femtocelula e aprimorado com o sistema proposto, foi capaz de incrementar a potência do sinal de recepção, possibilitando aumentar a área de cobertura, diminuir a quantidade de amplificadores elétricos e aprimorar a SNR do sinal recebido. É importante mencionar que o uso da femtocelula é diretamente ligada às aplicações *indoor*, assim a distância do enlace do sistema sem fio poderá se estender para um enlace de maior alcance com o mesmo desempenho de ganho.



(a)



(b)

(c)

Fig. 7. Validação da conectividade do sinal da estação rádio base utilizando a técnica de amplificação proposta. (a) Setup experimental. (b) Tela do *smartphone* ilustrando a comunicação com a rede interna “Blue Zone TIM” (femtocelula). (c) Tela do *smartphone* ilustrando a comunicação com a rede móvel externa.

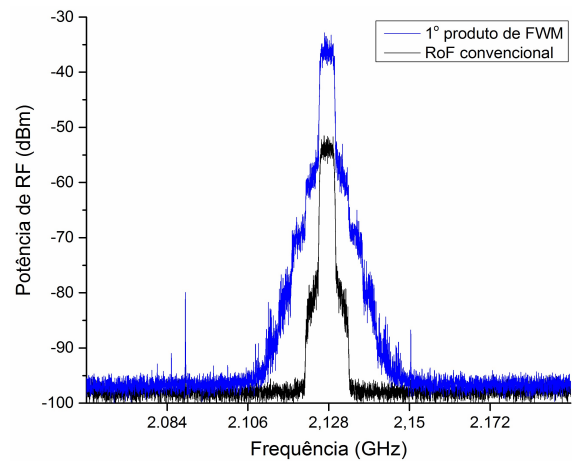


Fig. 8. Espectro elétrico do sinal, proveniente da femtocelula, fotodetectado com o sistema proposto e com o RoF convencional.

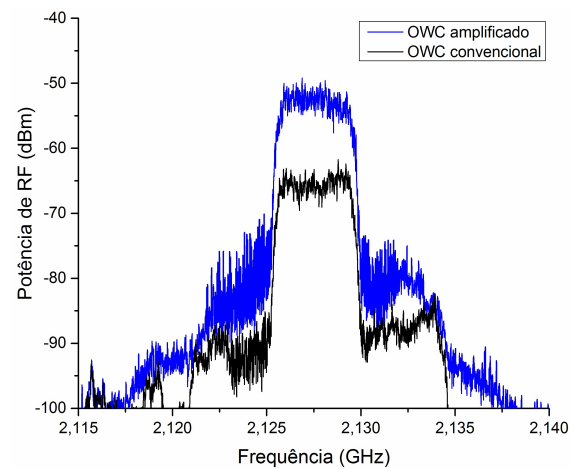


Fig. 9. Espectros elétricos das redes OWC, proveniente da femtocelula, considerando o sistema proposto e RoF convencional.

IV. CONCLUSÕES

O trabalho relatou a implementação de uma rede *optical-wireless* amplificada de telefonia móvel real da operadora TIM. A proposta de utilizar o amplificador de RF baseado em tecnologia fotônica tem o objetivo de alcançar uma maior energia fotodetectada em comparação com o sistema de RoF convencional. Os resultados experimentais mostraram que, para uma mesma potência óptica na recepção, o sistema de amplificação proposto alcançou 16 dB a mais de potência de RF fotodetectada. Além disso, tal sistema foi capaz de melhorar a SNR do sinal com modulação digital sem apresentar distorções. A partir de uma análise de potência óptica na entrada da fibra HNLF, encontrou-se o ponto no qual os valores de EVM são melhores quando comparado ao RoF convencional.

A amplificação de sinais de RF em sistemas RoF traz vantagens como amplificação faixa larga desde DC até 100 GHz, limitada somente pela largura de banda dos moduladores ópticos e fotorreceptores comerciais, além de aumento na área de cobertura e melhoria na relação sinal-ruído, favorecendo a amplificação de elevadas frequências de portadoras de RF sem a necessidade de nenhuma modificação de *hardware*. Outro benefício alcançado com a técnica refere-se à redução de distorções e/ou alargamentos tipicamente causados pela saturação em amplificadores elétricos. Sugere-se como

trabalhos futuros a realização de experimentos com o amplificador atuando na faixa de ondas milimétricas, aplicações em redes celulares 5G, assim como análises de desempenho para modulações de alta ordem e elevadas taxas de bits em enlaces com alcance superior a 2 metros.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Finep/Funtel (Convênio 01.14.0231.00 - Centro de Referência em Radiocomunicações ou CRR), CNPq, CAPES, FAPEMIG, MCTI e FINATEL. Em especial, agradecemos ao Engenheiro Masaaki Hirano da empresa Sumitomo pela doação da fibra HNLF utilizada nos experimentos. Os autores também agradecem à operadora TIM Brasil pela Femtocelula 3G utilizada no experimento e o apoio técnico das empresas KeySight e Anritsu.

REFERÊNCIAS

- [1] Capmany, J. e Novak, D., "Microwave photonics combines two worlds", *Nature Photonics*, 2007, 1, pp. 319–330.
- [2] Thomas R. Clark e Rodney Waterhouse, "Photonics for RF Front Ends", *IEEE Microwave Magazine*, 2011, v. 12, pp. 87-95.
- [3] T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!" *IEEE Access*, v.1, pp. 335-349, Maio 2013.
- [4] R. Baldemair et al., "Evolving wireless communications: addressing the challenges and expectations of the future," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, v. 8, no.1, pp. 24-30, Março 2013.
- [5] Arismar Cerqueira S. Jr., N. Cañas-Estrada, Dionisio F. Noque, Ramon M. Borges, Suzanne A. S. Melo, Neil G. González, Julio C.R.F. Oliveira, "Photonic-assisted microwave amplification using four-wave mixing", *IET Optoelectron*, pp. 1–6, 2015.
- [6] B. Little et al, "Very High-Order Microring Resonator Filters for WDM Applications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, v. 16, no. 10, p. 2263-2265, Outubro 2004.
- [7] R. M. Borges, T. N. Rodovalho e Arismar Cerqueira S. Jr., "Reconfigurable multi-band radio-frequency transceiver based on photonics technology for future optical wireless communications," *IET Optoelectron*, v. 9, no. 5, pp. 257-262, Outubro 2015.
- [8] Alan E. Willner et al., "Optically Efficient Nonlinear Signal Processing," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 17, no. 2, Março 2011.
- [9] Tonda-Goldstein et al., "40 dB dynamic enhancement of modulation depth for optically carried microwave signals", *Electron. Lett.*, 2003, v. 39, no 10, pp. 790–792.
- [10] Arismar Cerqueira S. Jr. et al., "Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products", *Optics Express*, 2008, v. 16, no 4, pp. 2816-2828.
- [11] Walter S. Wall and Mark. A. Foster, "Ultra-Wideband Gain in Microwave Photonic Links using Four-Wave Mixing", *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO Technical Digest* © OSA, 2012
- [12] N. Cañas-Estrada, Arismar Cerqueira S. Jr., D. F. Noque and R. M. Borges, Neil Guerrero Gonzalez, J. C. R. F. Oliveira, "Development and Performance Analysis of a Photonic-Assisted RF Amplifier", *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics*, Novembro 2015.
- [13] G. P. Agrawal, "Capítulo 2 – Fibra Ópticas", em *Fiber-Optic Communication System* (Terceira Edição), G. P. Agrawal, Org. San Diego: Academic Press, 2006, p. 23–75.