

# Impacto do Efeito Brillouin em Sistemas Óptico-*wireless* com Amplificação de RF no Domínio Fotônico

E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges e Arismar Cerqueira S. Jr.

**Resumo**— Este trabalho reporta o impacto do efeito Brillouin (SBS - *stimulated Brillouin scattering*), bem como a redução do mesmo, em um sistema óptico-*wireless* amplificado. Tal sistema utiliza 470 m de fibra altamente não-linear (HNLF - *highly nonlinear fiber*) para estimular o efeito mistura de quatro ondas (FWM - *four-wave mixing*) e prover ganho de radiofrequência no domínio elétrico. Resultados numéricos e experimentais comprovam que o SBS limita a eficiência de potência do referido sistema. Identificou-se o comprimento ótimo de 35 m para a HNLF, que garante FWM e proporciona um aumento de 14 dB no limiar de SBS.

**Palavras-Chave**— Espalhamento Brillouin estimulado, Fibra altamente não-linear, Mistura de quatro ondas, Sistema óptico-*wireless*

**Abstract**— This work reports the Brillouin (SBS) impact, as well as its reduction, in an amplified optical-*wireless* system. Such system employs 470 m of highly nonlinear fiber (HNLF) for stimulating the four-wave mixing (FWM) effect and providing radiofrequency gain in the electrical domain. Numerical and experimental results prove that SBS limits the system power efficiency. It has been identified an optimum HNLF length (35 m), which ensures FWM and enables a SBS threshold increase of 14 dB.

**Keywords**— Four-wave mixing, Highly nonlinear fiber, Optical-*wireless* system, Stimulated Brillouin scattering

## I. INTRODUÇÃO

Há alguns anos foram iniciados os serviços de comunicação móvel com a primeira geração (1G). Desde de então, cada nova geração apresenta serviços e características de acordo com as tendências de mercado e com o perfil de uso dos dispositivos móveis. Demandas por taxas elevadas de tráfego de dados (na ordem de Gbit/s), maior cobertura, conexões massivas de dispositivos e redes confiáveis de baixa latência, saturam a capacidade da tecnologia móvel atual (4G) [1,2]. Tais demandas impulsionam o desenvolvimento da quinta geração de telefonia móvel (5G). Com tecnologias baseadas em comunicações ópticas aplicadas às redes de acesso, almeja-se atender a pluralidade de aplicações previstas para o 5G. Neste contexto, fotônica de micro-ondas (MWP - *microwave photonics*) é reconhecida como uma área-chave de estudo que

une as vantagens das comunicações ópticas e móveis em um único sistema.

MWP pode ser utilizada para geração, processamento, distribuição e até mesmo amplificação de sinais de radiofrequência (RF - *radiofrequency*) em enlaces rádio sobre fibra (RoF - *radio-over-fiber*). Viabiliza-se, assim, superar limitações de *hardware* impostas pelas respostas em frequência dos componentes eletrônicos. Mais especificamente, a tecnologia RoF aplicada a sistemas de comunicação óptico-*wireless* compreende uma solução atrativa para transportar sinais de RF em diferentes faixas de frequência, incluindo a faixa de ondas milimétricas, com o benefício de impor atenuação fixa de aproximadamente 0,2 dB/km independente da banda de operação [3–5].

Efeitos não-lineares oriundos da transmissão de sinais por fibra óptica são tipicamente indesejados e conseqüentemente, evitados em sistemas de transmissão de dados. Para tal, procura-se não ultrapassar os limiares de potência óptica que implicam na presença dos mesmos. Entretanto, efeitos não-lineares podem ser explorados com o intuito de proporcionar benefícios aos sistemas de comunicações ópticas. A mistura de quatro ondas (FWM - *four-wave mixing*), por exemplo, pode ser utilizada para geração de múltiplos comprimentos de onda [6], multiplicação ou conversão em frequência [7] e amplificação do sinal de RF em sistemas RoF [8–10]. No campo de amplificação em sistemas RoF, fibras altamente não-lineares (HNLF - *highly nonlinear fiber*) são utilizadas para intensificar o FWM. Estas fibras tipicamente possuem altos coeficientes de não-linearidade ( $\gamma$ ) bem como comprimento de onda de dispersão nula ( $\lambda_0$ ) na janela de transmissão [11]. Complementarmente, elevadas potências de bombeio são utilizadas para melhorar a eficiência na geração de produtos FWM. No entanto, a máxima potência de bombeio é limitada pelo espalhamento Brillouin estimulado (SBS - *stimulated Brillouin scattering*), o qual possui menor limiar de potência ( $P_{th}$ ) em relação aos outros efeitos não-lineares [12,13].

Quando a potência óptica excede o  $P_{th}$ , fótons de Stokes são gerados e propagam no sentido contrário dos fótons originais. Esta potência refletida causa perda de potência nas portadoras, reduzindo a relação sinal-ruído óptica (OSNR - *optical signal-to-noise ratio*) no receptor, o que resulta em queda de desempenho no sistema. Técnicas para intensificar os efeitos não lineares sem a limitação de potência imposta pelo efeito Brillouin foram propostas: distribuição de tensão mecânica na fibra [13], utilização de modulação em fase [14], alteração do diâmetro do núcleo ao longo da fibra óptica [15].

E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges e Arismar Cerqueira S. Jr. Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG 37400-000 Brasil (e-mails: elima@get.inatel.br; luiz.augusto@get.inatel.br; ramonmb@inatel.br; arismar@inatel.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil.

O presente trabalho reporta o impacto do efeito Brillouin em um sistema óptico-*wireless* amplificado, o qual utiliza um trecho de 470 m de HNLF para estimular o efeito FWM e prover ganho de RF no domínio óptico [9]. As principais contribuições são: comparação entre as curvas de potência óptica transmitida e refletida no referido sistema; comprovação da presença do SBS e medição do desvio de frequência na potência óptica refletida por meio do método heterodino; identificação do comprimento ótimo de HNLF que reduz o SBS e gera produtos FWM; redução da potência refletida e consequente melhora da eficiência de FWM no sistema alvo de estudo.

O trabalho foi estruturado em cinco seções. A Seção II descreve as principais características da rede óptico-*wireless* com amplificação de RF no domínio fotônico. A Seção III detalha conceitualmente o efeito Brillouin e apresenta a técnica utilizada para constatar experimentalmente a presença do mesmo. A Seção IV apresenta os resultados da investigação de desempenho realizada. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na Seção V.

## II. SISTEMA ÓPTICO-*wireless* COM AMPLIFICAÇÃO DE RF NO DOMÍNIO FOTÔNICO

Esta seção apresenta os conceitos da técnica de amplificação do sinal de RF no domínio fotônico, por meio do efeito de mistura de quatro ondas. O conceito de amplificação é definido em [8–10], como a diferença entre a potência elétrica do sinal fotodetectado entre o sistema proposto e o RoF convencional (CRoF - *conventional radio-over-fiber*), considerando um mesmo nível de potência óptica na entrada do fotodetector. A arquitetura do sistema CRoF pode ser descrita de maneira resumida por um diodo laser (LD - *laser diode*), um modulador (MZM - *Mach-Zehnder modulator*), um enlace de fibra monomodo (SMF - *single mode fiber*) e um fotodetector (PD - *photodetector*).

O diagrama do sistema de amplificação proposto em [9] é apresentado na Fig. 1. Onde dois lasers espaçados de 3,35 nm em torno do  $\lambda_0$  da fibra HNLF são conservados na mesma condição de polarização com o auxílio de dois controladores de polarização (PC - *polarization controller*). As portadoras polarizadas são combinadas utilizando um acoplador óptico (OC - *optical coupler*), conforme apresentado na Fig. 1.(i). Sequencialmente, o dispositivo PBRA (*photonic-based RF amplifier*) aplica a técnica de amplificação de RF baseada em fotônica. Para isso utiliza-se um modulador MZM, um amplificador à fibra dopada com érbio (EDFA - *Erbium-doped fiber amplifier*) e um trecho de fibra HNLF. O sinal de RF oriundo de um gerador de sinais vetoriais, é modulado por um MZM no domínio óptico e polarizado pela tensão  $V_{bias}$ . A fibra HNLF utilizada apresenta as seguintes características: *dispersion slope* (1.550 nm)  $S_0 = 0,023$  ps/nm<sup>2</sup>/km; comprimento  $L = 470$  m; atenuação  $\alpha = 0,8$  dB/km; área efetiva  $A_{eff} = 8,9$   $\mu\text{m}^2$ ;  $\lambda_0 = 1557$  nm;  $\gamma = 28$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>. O alto valor de  $\gamma$  e a pequena área efetiva da fibra fazem com que a elevada potência oriunda do EDFA intensifique a ação dos efeitos não-lineares. O inset (ii) da Fig. 1 expõe o espectro óptico na saída da HNLF, medido por um analisador

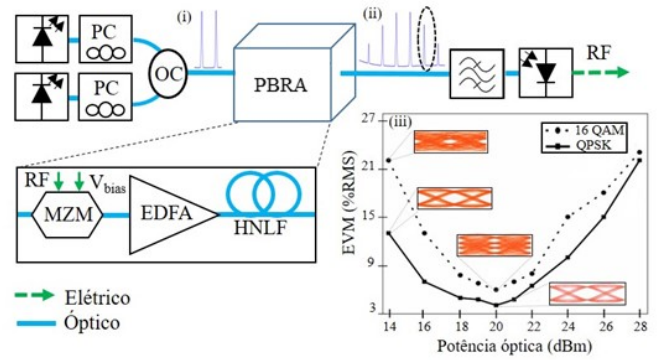


Fig. 1. Diagrama em blocos da técnica de amplificação de RF no domínio óptico. LD- diodo laser; PC- controlador de polarização; OC- combinador óptico; PBRA- amplificador de RF baseado em fotônica; MZM- modulador de Mach Zehnder; EDFA- amplificador com fibra dopada à érbio; HNLF- fibra altamente não-linear; PD- fotodetector; RF- radiofrequência (i) Portadoras ópticas combinadas; (ii) Espectro da mistura de quatro ondas; (iii) Análise digital com modulação QPSK e 16-QAM.

de espectro óptico (OSA - *optical spectrum analyzer*), onde o batimento entre as portadoras por meio do efeito Kerr, dá origem a novos comprimentos de onda, provenientes do efeito FWM. Um filtro óptico configurável em  $\lambda$  com banda de 0,8 nm, seleciona o primeiro produto FWM da direita ou esquerda e o transmite até o PD. Finalmente, o sinal elétrico fotodetectado é entregue ao analisador de espectro elétrico (ESA - *electrical spectrum analyzer*).

Uma análise de desempenho digital foi realizada, a fim de validar a aplicabilidade do dispositivo [9]. Na referida investigação, avaliou-se o desempenho analisando a magnitude do vetor de erro (EVM - *error vector magnitude*), em função da potência óptica na entrada da HNLF, conforme apresentado na Fig 1.(iii). O parâmetro  $EVM_{RMS}$  pode ser entendido como um desvio dos pontos da constelação ou o quão longe os pontos estão do valor ideal. O parâmetro  $EVM_{RMS}$  foi medido considerando uma mesma potência óptica na entrada no fotodetector, para modulações em fase (QPSK - *quadrature phase shift-keyng*) e amplitude em quadratura (16-QAM - *quadrature and amplitude modulation*). Pode-se observar que o  $EVM_{RMS}$  depende fortemente da potência inserida na HNLF, e apresenta um ponto ótimo de funcionamento entre 18 e 21 dBm de potência na HNLF, no qual os diagramas de olho estão abertos. A utilização de potências menores que 16 dBm degradam o  $EVM_{RMS}$  devido à baixa eficiência no processo de FWM. Contudo, o emprego de potências acima de 21 dBm, geram degradações consideráveis no desempenho do sistema. Tais degradações ocorrem devido a saturação da eficiência do FWM, resultando em menor OSNR. Em razão disso, este trabalho realiza uma investigação do efeito SBS na HNLF utilizada para prover amplificação em [8–10], a fim de minimizar o SBS e potencializar a eficiência de conversão do FWM para potências acima de 21 dBm.

## III. ANÁLISE DO ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO

O espalhamento Brillouin estimulado é causado pela interação dos fótons do sinal transmitido com fônons acústicos,

os quais modulam o sinal de luz gerando fótons de Stokes. Tal fenômeno foi inicialmente observado em transmissões ópticas em 1964 [16]. Este efeito é caracterizado como não-linear uma vez que, para intensidades de luz acima do limiar, ocorre um espalhamento de energia, que cresce exponencialmente, no sentido contrário de propagação [17]. Desta forma, este processo resulta em perda de potência na frequência de interesse, já que, as componentes espectrais do sinal refletido são deslocadas de acordo com as características da fibra óptica utilizada. O desvio de frequência da portadora transmitida em relação à refletida pode ser estimado por

$$\Delta f = 2f_0 \frac{V}{c/n_1}, \quad (1)$$

onde  $f_0$  é frequência original do sinal óptico,  $V$  é a velocidade da onda acústica,  $c/n_1$  é a velocidade de grupo da luz na fibra e  $n_1$  e  $c$  são o índice de refração do núcleo da fibra e a velocidade da luz no vácuo, respectivamente. Valores típicos de deslocamento estão entre 9 e 11 GHz, sendo 11 GHz comum para fibras SMF e valores próximos a 9 GHz ocorrem em fibras com grande concentração de dióxido de germânio (GeO<sub>2</sub>) [12].

Os fótons de Stokes possuem sentido de propagação contrário aos fótons do sinal original. Portanto, sinais transmitidos em uma mesma fibra óptica com direção e frequência iguais aos da onda de Stokes, podem ser amplificados pelo processo de SBS. No entanto, a natureza estreita do espectro do sinal de Stokes limita aplicações de amplificadores baseados em SBS. Por outro, lado em transmissões ópticas de longo alcance o efeito SBS é um dos principais limitantes em termos de potência máxima na transmissão, de acordo com o cálculo de limiar apresentado em

$$P_{th} \approx \frac{21 \times A_{eff}}{g_B(V_B) \times L_{eff}}, \quad (2)$$

onde  $A_{eff}$  representa a área efetiva do modo óptico,  $g_B(V_B)$  é o coeficiente de ganho de Brillouin, tipicamente entre 3 e  $5 \times 10^{-11}$  m/W e  $L_{eff}$  é o comprimento efetivo da fibra. Sendo  $\alpha$  o fator de atenuação e  $L$  o comprimento do enlace, o  $L_{eff}$  pode ser definido por

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (3)$$

O efeito SBS é inerente às comunicações por meio de fibras ópticas e torna-se significante em transmissões de longas distâncias. Por conseguinte, técnicas de medida e supressão de SBS são estudadas. A Fig. 2(a) apresenta a arquitetura proposta para medidas experimentais do deslocamento de Brillouin. O diodo laser gera o sinal lançado na fibra óptica com polarização orientada pelo controlador de polarização. O amplificador óptico à fibra dopada com érbio é responsável por elevar o nível do sinal, a fim de aumentar a densidade de potência no núcleo da fibra, instigando efeitos não-lineares. No divisor óptico (1X2), parte do sinal (i) é aplicado no circulador óptico e lançado na fibra HNLF, a qual favorece efeitos não-lineares devido ao elevado valor do coeficiente de não-linearidade ( $\gamma = 28 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ). O sinal transmitido é reduzido em 20 dB pelo atenuador óptico variável (VOA

- *variable optical attenuator*), com o propósito de manter o nível do sinal dentro do limite aceito pelo monitor de potência (PM - *power monitor*). O sinal refletido, devido ao efeito SBS (iii) e parte do sinal originalmente transmitido (ii), são agrupados pelo combinador óptico (2X1) e posteriormente atenuados. O VOA garante que o nível de potência dos sinais combinados não exceda o nível máximo permitido no fotodetector. Finalmente, na Fig. 2(b) é ilustrado o espectro de Brillouin gerado pelo método heterodino, no qual, o batimento entre os sinais original e refletido gera uma portadora em 9,1 GHz, referente ao deslocamento de Brillouin.

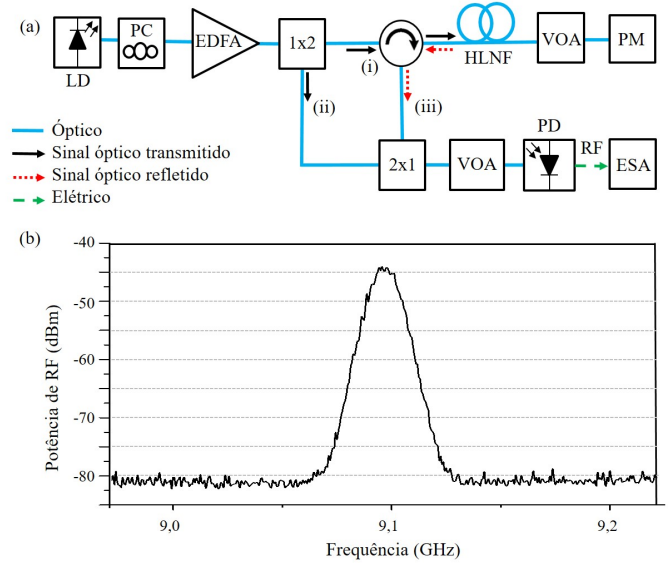


Fig. 2. Medida do deslocamento Brillouin: (a) Arquitetura proposta. (b) Espectro do ganho Brillouin.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

O limiar de potência Brillouin  $P_{th}$  definido na Equação 2, indica que potências acima deste valor, resultam na saturação da potência transmitida e um crescimento exponencial da potência refletida. Uma investigação experimental foi realizada na HNLF, a fim de encontrar seu  $P_{th}$  e o ponto onde a potência refletida atinge o mesmo nível da transmitida. Para tal análise foi utilizado a arquitetura ilustrada na Fig. 3.

Dois lasers, são mantidos na mesma condição de polarização por meio de dois PCs, um combinador agrega as duas portadoras e lança o feixe óptico para um EDFA

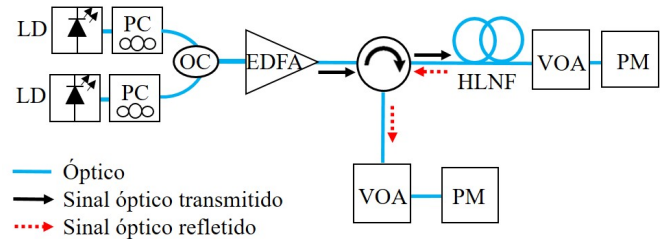


Fig. 3. Esquema proposto para medida do limiar de Brillouin na fibra HNLF.



de ganho configurável. O sinal amplificado é inserido em um circulador óptico, que tem sua porta de transmissão conectada a HNLf e sua porta de reflexão acoplada a um VOA e um monitor de potência. Similarmente, a potência transmitida pela fibra é inserida em um VOA e medida por um monitor de potência. A Fig. 4 apresenta as curvas de potência transmitida e refletida em função da potência óptica de entrada na HNLf. O limiar de potência Brillouin pode ser observado no ponto onde a potência óptica na HNLf é aproximadamente 15 dBm. Nota-se neste ponto uma saturação da potência transmitida e um crescimento exponencial da potência refletida. O ponto de interseção das curvas se dá quando a potência óptica na HNLf é 21 dBm. Observa-se que a potência transmitida se mantém constante e todo acréscimo de potência na HNLf é refletido por meio do efeito SBS. Desta forma, conforme apresentado no inset (iii) da Fig. 1, podemos concluir que a degradação no desempenho do sistema para potências acima de 21 dBm é originária do efeito Brillouin.

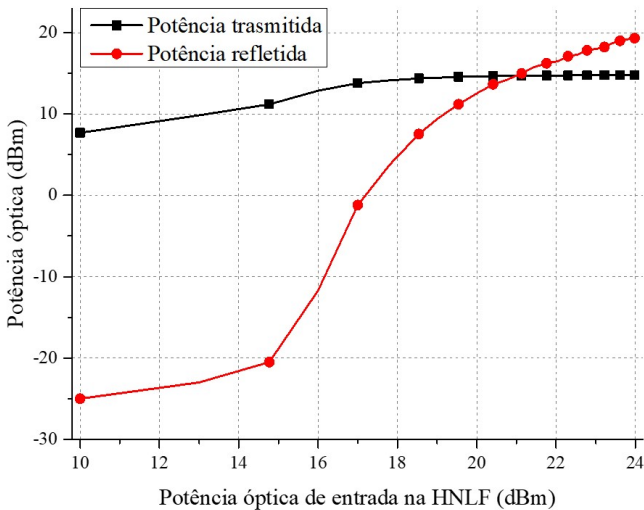


Fig. 4. Análise do efeito Brillouin em função da potência de entrada para 470 metros de HNLf.

Foram realizadas análises numéricas por meio do *software* Optisystem, a fim de aumentar o limiar de potência do efeito Brillouin e conseqüentemente, reduzir o impacto do efeito no desempenho dos sistemas óptico-*wireless* amplificados. Como a  $A_{eff}$  da fibra e o ganho Brillouin são específicos da HNLf, o comprimento efetivo da fibra foi o parâmetro avaliado. Para enlaces de grande extensão o  $L_{eff}$  tende para o inverso do fator de atenuação e para pequenas distâncias, dado por  $\alpha L \ll 1$ , o  $L_{eff}$  é o próprio comprimento físico da fibra [18]. Desta forma, reduzir o comprimento da HNLf, implica em aumentar o limiar de SBS. A análise numérica considerou todas as características da fibra HNLf, e uma potência fixa de 20 dBm, por ser o ponto de melhor  $EVM_{RMS}$  do sistema. A Fig. 5 apresenta as curvas de potência transmitida e refletida em função do comprimento da HNLf. Observa-se um decaimento da potência transmitida com o aumento do comprimento da HNLf e quando a HNLf tem 470 metros, grande parte da potência inserida na fibra está sendo refletida. Uma ampliação em Fig. 5 permite observar que o ponto de interseção entre as

curvas ocorre quando a HNLf tem aproximadamente 54 m. Desta forma, a fibra HNLf foi cortada de maneira a minimizar o efeito Brillouin, potencializando a eficiência de geração FWM. Portanto, o corte da HNLf foi realizado em 35 metros, pois, o nível de potência transmitida está acima da refletida, visando atender a relação de compromisso.

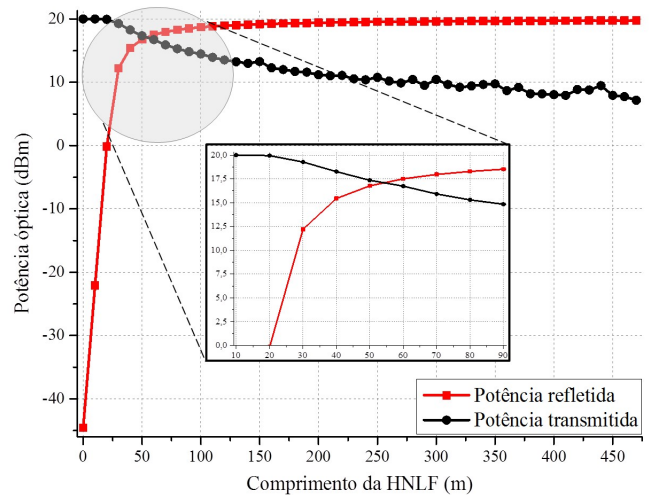


Fig. 5. Potência transmitida na HNLf e potência refletida devido ao efeito SBS, em função do comprimento.

A investigação de desempenho com o novo comprimento de HNLf, foi realizada para o mesmo *setup* experimental apresentado na Fig. 3. Desta forma, foi realizada uma nova análise das potências transmitida e refletida na HNLf de 35 metros. A Fig. 6 apresenta as curvas de potência transmitida e refletida em função da potência óptica de entrada na HNLf. Observou-se um deslocamento do limiar de Brillouin de 15 para 29 dBm. Tal deslocamento permite que o sistema óptico-*wireless* amplificado opere com potências até 29 dBm, sem impacto significativo do efeito Brillouin. O ponto de interseção entre as curvas de transmissão e reflexão não foi determinado devido a saturação da potência de saída do EDFA ocorrer próximo de 33 dBm.

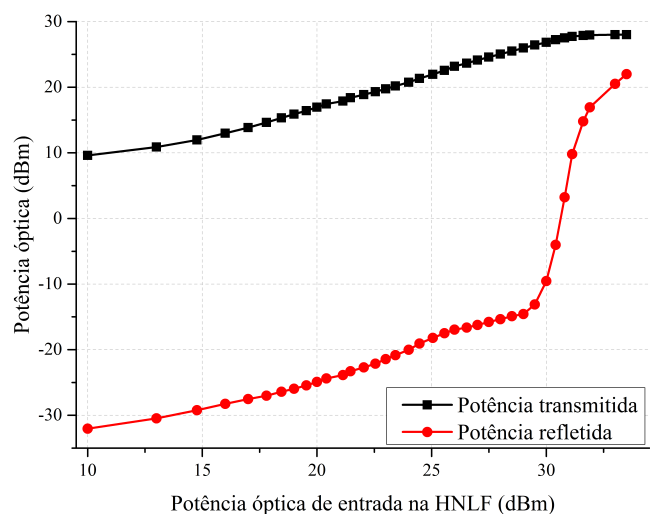


Fig. 6. Potências transmitida e refletida em função da potência de entrada para 35 metros de HNLf .

## V. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou o impacto do efeito Brillouin em uma rede óptico-*wireless* amplificada. Análises experimentais com a fibra HNLF de 470 metros demonstraram limitações na eficiência de potência do referido sistema para potências ópticas acima de 21 dBm, condição esta que impede o incremento da potência de saída da HNLF devido ao efeito SBS. Por meio do método heterodino, mediu-se o deslocamento em frequência ocasionado na reflexão pelo Brillouin, que resultou em uma componente de RF em 9,1 GHz. Análises numéricas mostraram que a interseção das curvas de potências refletida e transmitida ocorre em 54 metros de HNLF. Logo, foi apontado que 35 metros é um comprimento potencial para satisfazer a relação de compromisso entre minimizar SBS e aumentar a eficiência de FWM. O corte da HNLF em 35 metros resultou em um aumento de 14 dB no limiar do efeito Brillouin, permitindo que o sistema óptico-*wireless* amplificado opere com potência de até 29 dBm sem impacto significativo do efeito SBS. Vislumbra-se como trabalhos futuros, a realização de análises de desempenho de sinais digitais em sistemas celulares de quinta geração (5G), utilizando o transceptor 5G nacional, previamente desenvolvido pela equipe de pesquisa do Inatel [19].

## REFERÊNCIAS

- [1] 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, Junho. 2017.
- [2] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, Maio. 2014.
- [3] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 6, pp. 319–330, Junho. 2007.
- [4] J. Yao, "Microwave Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 314–335, Fevereiro. 2009.
- [5] B. Skubic, G. Bottari, A. Rostami, F. Cavaliere, and P. Ohlen, "Rethinking Optical Transport to Pave the Way for 5G and the Networked Society," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1084–1091, Março. 2015.
- [6] Arismar Cerqueira S. Jr., J. M. Chavez Boggio, A. A. Rieznik, H. E. Hernandez-Figueroa, H. L. Fragnito, and J. C. Knight, "Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products," *Optics Express*, vol. 16, no. 4, p. 2816, Fevereiro. 2008.
- [7] B. Vidal, "Photonic millimeter-wave frequency multiplication based on cascaded four-wave mixing and polarization pulling," *Optics Letters*, vol. 37, no. 24, p. 5055, Dezembro. 2012.
- [8] A. L. M. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, T. N. Rodovalho, Regivan N. Da Silva, R. A. Santos, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Rede Opto-Wireless Amplificada baseada em Tecnologia Fotônica," in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, Santarém-PA, 2016.
- [9] A. L. M. Muniz, R. M. Borges, Regivan N. Da Silva, D. F. Noque, and A. C. S. Jr., "Ultra-broadband Photonics-Based RF Front-End Toward 5G Networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 11, p. B35, Novembro. 2016.
- [10] D. Noque, R. Borges, A. Muniz, A. Bogoni, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier," *Optics Communications*, vol. 414, pp. 191–194, Maio. 2018.
- [11] S. Melo, A. do Nascimento, Arismar Cerqueira S. Jr., L. Carvalho, D. Pataca, J. Oliveira, and H. Fragnito, "Frequency comb expansion based on optical feedback, highly nonlinear and erbium-doped fibers," *Optics Communications*, vol. 312, pp. 287–291, Fevereiro. 2014.
- [12] G. P. Agrawal and Elsevier Science Publishers., *Nonlinear fiber optics*. Academic Press, 2001.
- [13] M. Takahashi, J. Hiroishi, M. Tadakuma, and T. Yagi, "Improvement of FWM conversion efficiency by SBS-suppressed highly nonlinear dispersion-decreasing fiber with a strain distribution," in *2008 34th European Conference on Optical Communication*. IEEE, 2008, pp. 1–2.
- [14] F. Willems, W. Muys, and J. Leong, "Simultaneous suppression of stimulated Brillouin scattering and interferometric noise in externally modulated lightwave AM-SCM systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 12, pp. 1476–1478, Dezembro. 1994.
- [15] K. Shiraki, M. Ohashi, and M. Tateda, "Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius," *Electronics Letters*, vol. 31, no. 8, p. 668, 1995.
- [16] R. Y. Chiao, C. H. Townes, and B. P. Stoicheff, "Stimulated Brillouin Scattering and Coherent Generation of Intense Hypersonic Waves," *Physical Review Letters*, vol. 12, no. 21, pp. 592–595, Maio. 1964.
- [17] R. G. Smith, "Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering," *Applied Optics*, vol. 11, no. 11, p. 2489, Novembro. 1972.
- [18] S. P. Singh and N. Singh, "Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 73, pp. 249–275, 2007.
- [19] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. B. Cunha, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, R. N. da Silva, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468–4477, Outubro. 2018.