

Técnicas de Otimização da Faixa Dinâmica Livre de Espúrios de Enlaces Analógicos a Fibra Óptica

Bruno Elias Ribeiro, Olympio Lucchini Coutinho e Vilson Rosa de Almeida*

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Praça Marechal do Ar Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias – São José dos Campos - SP – CEP 12228-900

Resumo —A demanda por enlaces analógicos a fibra óptica (EAFO) de alto desempenho aumenta consideravelmente a importância da otimização da faixa dinâmica livre de espúrios (SFDR – *Spurious Free Dynamic Range*). Várias técnicas têm sido propostas visando elevar esta importante figura de mérito em EAFO. Este artigo apresenta considerações acerca da análise de desempenho de EAFO, assim como uma revisão das principais metodologias existentes para atingir uma elevada SFDR. Propõe-se, ainda, uma técnica para atingir a mesma finalidade, baseada na compensação da distorção introduzida pelo modulador de Mach-Zehnder (MZM) por meio da saturação no fotodetector.

Palavras-Chave —faixa dinâmica livre de espúrios, RF em Fotônica, enlace analógico a fibra óptica.

I. INTRODUÇÃO

A pesquisa na área de RF em Fotônica, apresentada na literatura científica como *Microwave Photonics*, ganhou impulso com a busca por sistemas de comunicações mais eficientes [1]. Um EAFO para a transmissão de sinais de radiofrequência (RF) conta com a importante característica de baixa atenuação das fibras ópticas, bem como a possibilidade de operar com grande largura de banda e de forma imune a interferências eletromagnéticas [2], [3]. Essas são algumas das figuras-de-mérito que tornam atraentes a sua utilização, em detrimento de um enlace convencional de RF, que usa cabos coaxiais ou guias de ondas como meio de propagação [2]. Há características vantajosas adicionais, como peso e dimensões reduzidas quando comparado a um enlace convencional de RF [4]. Isso leva a aplicações diversificadas do EAFO, desde aplicações comerciais, como ocorre na distribuição dos sinais de TV a cabo, até aplicações na área de defesa, como o uso de antenas remotas para a transmissão de sinais de radar [3].

O EAFO é composto por dispositivos que possibilitam a modulação de sinais de radiofrequência sobre uma portadora óptica, a transmissão do sinal modulado por um trecho de fibra óptica e a posterior recuperação do sinal elétrico na extremidade final deste enlace [3]. Similarmente aos enlaces convencionais para a transmissão de RF, os EAFO são caracterizados por meio dos sinais elétricos de entrada e saída do sistema, sendo que os principais parâmetros de avaliação de desempenho dos EAFO são o ganho de potência, a figura de ruído e a faixa dinâmica livre de espúrios (SFDR – *Spurious Free Dynamic Range*) [4].

*Bruno Elias Ribeiro, eribeiro@ita.br; Olympio Lucchini Coutinho, olympio@ita.br; Vilson Rosa de Almeida, vilsonra@ita.br.

É desejável que este tipo de enlace, bem como o enlace de RF convencional, tenha o melhor desempenho possível, ou seja, ganho elevado, grande largura de banda, baixa figura de ruído e elevada faixa dinâmica livre de espúrios. Em cenários de guerra modernos, estas características são demandadas por sistemas de comunicações, guerra eletrônica e radares [4], [5]. São, portanto, fatores que justificam a pesquisa pelo alto desempenho do EAFO, em especial os estudos para obter uma SFDR elevada.

Este artigo apresenta a revisão de algumas técnicas para ampliação da faixa dinâmica livre de espúrios e, conseqüentemente, linearização e melhoria no desempenho de um EAFO. A Seção II apresenta breves considerações teóricas gerais sobre o enlace analógico a fibra óptica. A Seção III, por sua vez, aborda algumas técnicas de aumento da faixa dinâmica livre de espúrios; nessa mesma seção, tendo em vista as técnicas anteriormente apresentadas, propõe-se uma metodologia para o aumento da SFDR que explora diretamente os efeitos de não-linearidade do EAFO. A Seção IV conclui o artigo, ratificando a importância deste assunto para as áreas de defesa.

II. ENLACE ANALÓGICO A FIBRA ÓPTICA

As configurações possíveis para o enlace em estudo são diversificadas. O enlace em si, independentemente dos dispositivos empregados, resume-se à modulação de uma portadora óptica, na faixa de frequências de centenas de THz, por um sinal no espectro de radiofrequência, na faixa de até algumas dezenas de GHz. O sinal óptico modulado é, então, transmitido por um trecho de fibra óptica, até que seja detectado por um fotodetector acoplado ao final da fibra. Este fotodetector converte a intensidade óptica em um sinal de corrente elétrica correspondente ao sinal de RF que previamente modulara a portadora óptica.

A Fig. 1 apresenta um diagrama esquemático de EAFO com modulação externa de intensidade e detecção direta (IMDD – *Intensity Modulation and Direct Detection*). Além desse exemplo, pode-se modular o sinal óptico em fase, bem como diretamente em amplitude. A detecção, além da direta, pode ser coerente ou balanceada [3].



Fig. 1. Diagrama esquemático do Enlace Analógico a Fibra Óptica (EAFO) com modulador de intensidade e detecção direta (IMDD).

No processo de modulação, utiliza-se uma fonte laser como portadora óptica para o enlace. A modulação é direta quando o sinal de RF é imposto ao laser sem o uso de um dispositivo externo de modulação, de acordo com a largura de banda de modulação do laser semiconductor [3]. O uso de dispositivos externos para modular o sinal óptico com sinais de RF caracteriza a modulação externa, que é mais vantajosa, por possibilitar modulação em frequências mais altas, bem como melhorar a eficiência de modulação [2]. Podem ser empregados na modulação externa moduladores do tipo Mach-Zehnder, como o apresentado na Fig.1, ou outros tipos de moduladores como, por exemplo, um modulador de eletroabsorção [3].

No estágio de detecção, utilizam-se em geral diodos fotodetectores, que produzem uma corrente elétrica de saída proporcional à potência óptica incidente. A detecção se classifica em direta, coerente ou balanceada.

A detecção direta está exemplificada na Fig. 1, onde o sinal óptico modulado que incide no fotodetector é diretamente convertido em sinal elétrico. Para realizar a detecção coerente, utiliza-se um oscilador local que combina o sinal modulado a outro sinal óptico. Se o sinal proveniente do oscilador tem frequência similar à da portadora óptica, tem-se a detecção coerente homodina; caso seja diferente da portadora óptica, corresponde à detecção coerente heterodina. Finalmente, a detecção balanceada prevê o uso de mais de um fotodetector para a conversão da intensidade óptica em corrente elétrica [4].

Os fotodetectores disponíveis comercialmente apresentam uma resposta linear de aumento da corrente em função do aumento da potência incidente, até que se atinja um limiar de saturação, onde o aumento de potência óptica incidente não resulta em aumento da corrente fotodetectada. Na próxima seção deste artigo, será visto que esta resposta não-linear pode ser explorada para melhorar o desempenho do EAFO, em especial para aumentar a sua SFDR.

Além dos dispositivos que compõem o EAFO, também devem ser considerados a transmissão e o processamento de sinais de RF. Nesse sentido, definem-se como parâmetros de desempenho o ganho de potência, a figura de ruído e a SFDR [3].

O ganho de potência é definido como sendo a relação entre a potência de saída do sinal elétrico e a potência de entrada por ocasião da modulação. A figura de ruído, por sua vez, representa a quantidade de ruído de diversas fontes inserida no sistema, sendo as principais fontes em um EAFO a de ruído térmico, a de ruído balístico e a de intensidade relativa. A SFDR está relacionada ao comportamento linear, onde apenas o sinal fundamental, sem distorções, é detectado pela faixa de passagem do sistema [3].

A Fig.2 [6] ilustra os parâmetros do enlace. No eixo das abscissas, tem-se a potência de entrada do sinal de RF que modula a portadora óptica. As linhas em azul e vermelho denotam a potência de saída do sinal de RF, conforme a escala no eixo das ordenadas, em função da potência de entrada de RF. Elas representam, na cor azul, o sinal fundamental e na cor vermelha, o sinal espúrio referente ao termo de intermodulação de terceira ordem. Observa-se no gráfico que ocorre transferência de energia do sinal

fundamental para o sinal espúrio, impedindo que o sinal fundamental atinja o nível correspondente ao ponto de interseção de 3ª ordem, definido como IP_3 . A linha de pontos e traços estabelece o limiar de ruído de saída a ser transcendo para que os sinais de RF sejam interpretados na faixa de passagem do enlace. Este ruído depende da temperatura, do tamanho da faixa de passagem, do ganho do enlace e da figura de ruído, conforme a fórmula apresentada no próprio gráfico.

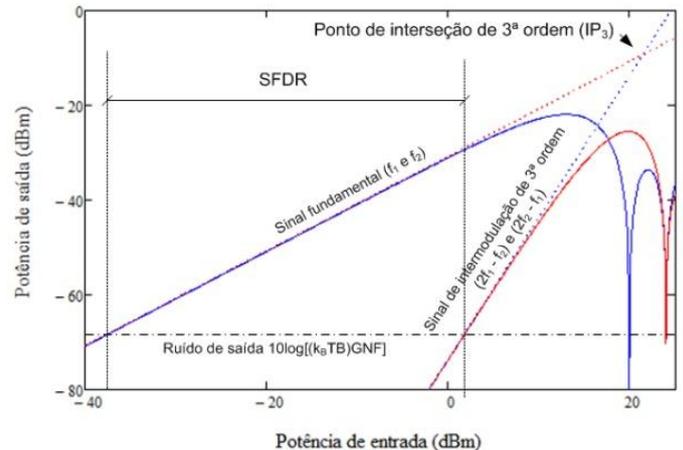


Fig. 2. Faixa Dinâmica Livre de Espúrios (SFDR) [6]. As constantes na equação para o ruído de saída são: k_B – constante de Boltzmann; T – temperatura; B – largura de banda; G – ganho do enlace; NF – figura de ruído.

É possível determinar pelo mesmo gráfico o ganho do enlace em dB por meio da subtração dos valores de saída pelos valores de entrada de potência em dBm referentes ao sinal fundamental. A informação da figura de ruído está presente no ruído de saída apresentado no gráfico, multiplicada pelo ganho do enlace, pela largura de banda, pela temperatura e pela constante de Boltzmann. Finalmente, a SFDR é a faixa de operação aproximadamente linear do enlace, onde não existe o surgimento de componentes espectrais na saída diferentes da componente fundamental aplicada à entrada do EAFO. Ela é limitada inferiormente pelo ponto onde o sinal fundamental transcende o nível de ruído de saída e limitada superiormente pelo surgimento da primeira componente espúria na faixa de passagem do enlace.

Quanto maior a faixa dinâmica de um sistema, maior a possibilidade do sistema em operar sem a inserção de sinais espúrios gerados por ele mesmo, independente do nível de potência de entrada ser muito baixo ou muito elevado, permitindo a identificação do sinal fundamental. Essa é uma característica desejável em sensores radar e em receptores de guerra eletrônica, já que há o interesse em captar sinais de alvos a grandes distâncias, que sensibilizem o receptor a níveis reduzidos de potência, bem como em evitar que sinais de potência elevada saturarem o receptor com o surgimento de componentes espúrias. A partir do surgimento das componentes indesejáveis na faixa de passagem do EAFO, fica caracterizada a resposta não-linear do sistema, a ser solucionada.

Neste sentido, por inspeção do gráfico da Fig. 2, o aumento da faixa dinâmica pode ocorrer de duas formas

distintas. Pode-se reduzir a figura de ruído do enlace, reduzindo o limiar de ruído para a detecção do sinal de interesse. Por outro lado, para aumentar a SFDR em seu limite superior, deve-se evitar o surgimento da componente espúria na mesma faixa de passagem do sinal fundamental.

Para reduzir a figura de ruído, deve-se atuar sobre suas principais fontes. Em condições de baixa potência óptica, onde o ganho de RF do enlace não é expressivo, o ruído térmico, o ruído balístico e o ruído de intensidade relativa contribuem para o valor elevado do ruído de saída em relação ao sinal fundamental. Na medida em que se aumenta a potência óptica incidente, aumentando o ganho de RF do EAFO, ocorre a redução do efeito das outras fontes de ruído que não sejam provenientes do ruído térmico. Este aumento da potência óptica combinada ao desvio do ponto de quadratura na operação do modulador externo proporcionam um aumento do ganho de RF associado a redução do ruído de saída do enlace [3], [7]. Consegue-se, assim, gerar um aumento no limite inferior da SFDR.

Contudo, para evitar o surgimento das componentes espúrias na faixa de passagem do enlace, deve-se recorrer a outras técnicas, algumas delas presentes na seção seguinte deste artigo. Sabe-se que o surgimento das componentes espúrias é devido às respostas não-lineares do processo de modulação de intensidade [8], bem como às respostas não-lineares no processo de fotodetecção do sinal óptico modulado [9].

Isso posto, são apresentadas a seguir algumas técnicas para a linearização ou aumento da faixa dinâmica livre de espúrios em um enlace analógico a fibra óptica que utiliza modulação externa de intensidade e detecção direta.

III. TÉCNICAS PARA AUMENTO DA SFDR

Quando se busca alta eficiência em um EAFO, a demanda por elevadas SFDR tem seu obstáculo imposto tanto pela curva característica do fotodetector [9] como pela função de transferência não-linear do modulador eletro-óptico [10]. A faixa dinâmica livre de espúrios pode ser aumentada até certo limite pela redução da figura de ruído, mas, a partir daí, deve-se buscar a linearização do enlace [11].

Diversas são as técnicas estudadas para aumentar a SFDR. Aqui estão presentes algumas daquelas em que se utilizam as características de não-linearidade dos dispositivos que compõem o EAFO, a fim de realizar a otimização da faixa dinâmica livre de espúrios.

A primeira técnica abordada leva em conta o uso de um modulador de polarização [12]. Promove-se a combinação destrutiva no domínio elétrico dos sinais que geram distorção utilizando, para isso, a configuração apresentada no esquema da Fig. 3.

A onda óptica proveniente da fonte laser sintonizável é polarizada linearmente e incide no modulador de polarização com um ângulo de 45° referente a um dos eixos principais do modulador. Esta onda incidente é então dividida entre os braços superior e inferior com potências idênticas. No braço inferior, um controlador de polarização PC1 e um divisor de feixes PBS equivalem a um MZM polarizado em seu ponto de quadratura e, no braço superior, um controlador de

polarização PC2 e o PBS equivalem a um MZM também polarizado no ponto de quadratura, mas opostamente ao braço inferior. O atenuador do braço inferior equilibra as perdas por inserção dos dois canais, e a grade de Bragg do braço superior garante a supressão da portadora. Após a combinação dos sinais provenientes de cada braço e a amplificação pelo dispositivo a fibra óptica dopada com érbio, a detecção no fotodetector tem como resultado o cancelamento das componentes IMD3, resultantes do produto de intermodulação de terceira ordem, responsáveis pela distorção neste tipo de enlace [12].

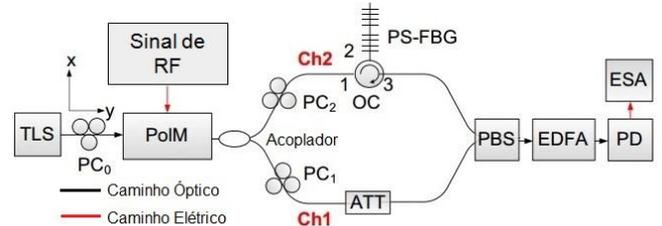


Fig. 3. Diagrama esquemático adaptado de [12]. TLS é a fonte de laser sintonizável, PC são os controladores de polarização, PolM é o modulador de polarização, OC é um circulador óptico, PS-FBG é o controlador de fase que utiliza fibra com grade de Bragg, EDFA é o amplificador de fibra dopada com érbio, PD é o fotodetector e ESA é o analisador de espectro.

A Fig. 4 mostra o resultado experimental da aplicação desta técnica, na qual foi possível obter um aumento de 10 dB na faixa dinâmica livre de espúrios. Dentre os modelos que apresentam a linearização do enlace analógico a fibra óptica, este é um dos de mais simples implementação, levando em conta inclusive o custo para inserção de outros dispositivos que aumentem a SFDR [12]. Esta técnica não considera, contudo, os efeitos não-lineares de um fotodetector saturado.

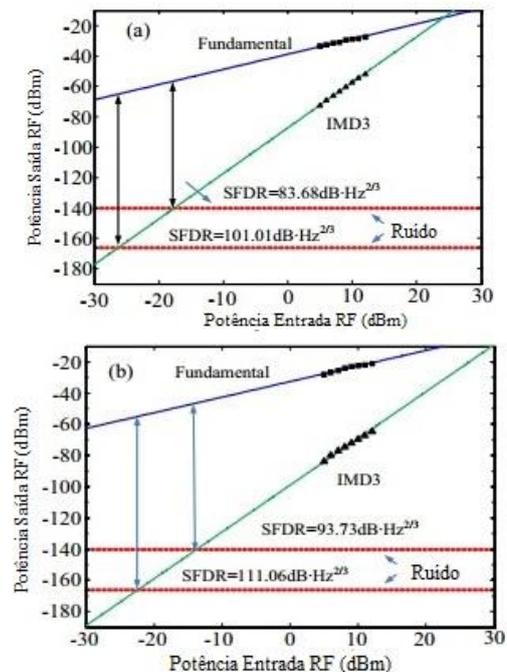


Fig. 4. Desempenho da SFDR (a) apenas no canal inferior e (b) com os canais inferior e superior conectados, adaptado de [12].

Um segundo método faz uso do arranjo *dual parallel* de MZM, conforme mostrado no diagrama esquemático da Fig. 5. Nesta técnica, elimina-se a componente de intermodulação de terceira ordem sem o uso de processamento digital [8]; este efeito é obtido por meio do controle da fase do sinal na faixa de micro-ondas [13].

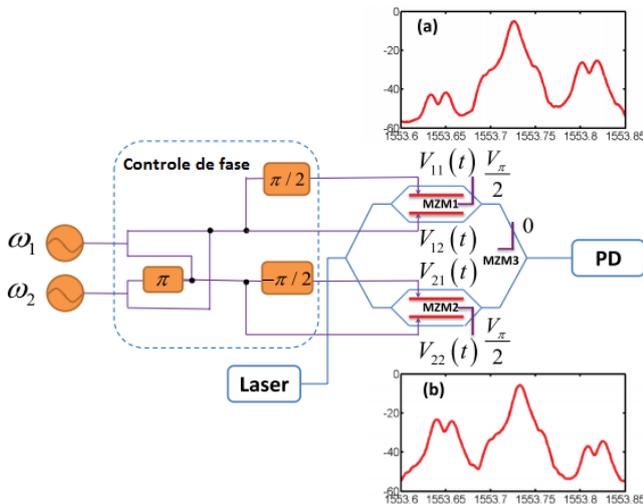


Fig. 5. Modulação lateral superior e modulação lateral inferior no *dual-drive dual-parallel* MZM com controle da fase do sinal modulante para supressão do sinal espúrio, adaptado de [13].

A modulação da portadora óptica prevê o uso de dois moduladores eletro-ópticos de intensidade similares, com a mesma tensão-de-meia-onda V_{π} , e polarizados no ponto de quadratura, associados em paralelo e inseridos em um modulador Mach-Zehnder maior. Por meio do ajuste apropriado das fases dos sinais de RF aplicados aos MZMs, obtém-se a modulação de intensidade em banda lateral única (SSB – *Single Side Band*) em ambos os moduladores. No braço superior, obtém-se a modulação em banda lateral superior (USB – *Upper Side Band*) e, no braço inferior, a modulação em banda lateral inferior (LSB – *Lower Side Band*).

Verificou-se experimentalmente um aumento de 12 dB na SFDR, obtido pela diminuição do efeito da componente espúria na faixa de passagem do enlace. No entanto, não foram exploradas, nessa técnica, as características de não-linearidade dos dispositivos para compensação mútua da distorção, tendo em vista a operação do modulador na região mais linear de sua curva característica [13].

Outra proposta é o uso de um MZM em que a tensão de polarização é intencionalmente deslocada para compensar as distorções provocadas pelos harmônicos de ordem par gerados por um fotodetector [14].

Para que ocorra a compensação, utiliza-se um MZM simples, polarizado ligeiramente fora de seu ponto de quadratura, sem que ocorra mudança considerável no nível de potência do sinal fundamental. O ajuste da tensão de polarização no modulador eletro-óptico gera não-linearidades de ordem par, anteriormente suprimidas pela operação no ponto de quadratura, com amplitudes comparáveis às de mesma ordem geradas pelo fotodetector. As componentes harmônicas de ordem par geradas pelo modulador e pelo fotodetector podem, então, estar fora de fase, o que permite o

cancelamento da distorção. A expansão em séries de Taylor em ordens elevadas comprova a possibilidade da compensação [14].

O arranjo experimental para a comprovação da técnica é mais complexo: utiliza-se um arranjo similar ao da Fig. 1 para demonstrar o cancelamento e um arranjo como o da Fig. 6 para isolar a componente que gera a distorção induzida pelo fotodetector. Neste caso, duas fontes laser são moduladas externamente no ponto de quadratura e com o mesmo índice de modulação em cada braço. Obtém-se assim, no fotodetector, a componente que gera a distorção em função do produto de intermodulação de segunda ordem.

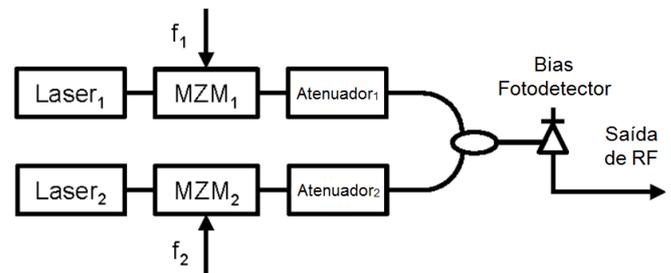


Fig. 6. Diagrama esquemático adaptado de [14] para isolar a distorção harmônica de ordem par do fotodetector, operando em modo fotocondutivo

Com esta metodologia, atingiu-se um incremento na SFDR do EAFO que utilizou a não-linearidade característica das conversões de sinal elétrico em sinal óptico, e vice-versa. Não foi utilizado, contudo, o aumento da potência do sinal óptico para o aumento do ganho do enlace, o que promoveria um aumento ainda maior da SFDR pela redução da figura de ruído e, conseqüentemente, do ruído de saída do enlace.

Outra técnica para o aumento da SFDR prevê que ocorra o cancelamento do segundo harmônico induzido pela não linearidade do fotodetector por meio do uso de MZM na configuração *dual parallel*. Essa combinação prevê o uso de dois moduladores associados em paralelo formando um terceiro grande modulador, em uma configuração que utiliza dois sinais de RF defasados de 90° e tensões de controle, que são as tensões DC de *bias* correspondentes a cada um dos moduladores apresentados [9]. O esquema utilizado é apresentado na Fig. 7.

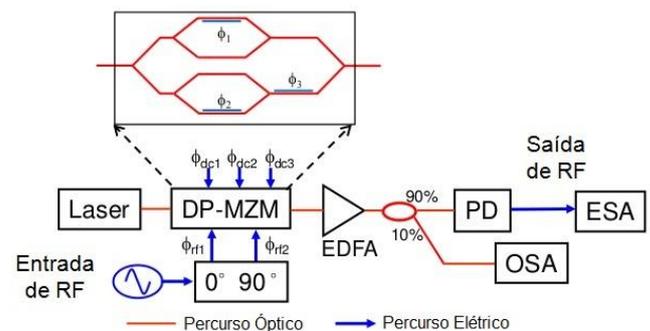


Fig. 7. Diagrama esquemático da configuração *Dual Parallel* MZM – DP-MZM - para a compensação de distorção, adaptado de [9]. EDFA é o amplificador de fibra óptica dopada com érbio, PD é o fotodetector, OSA é o analisador de espectro óptico e ESA é o analisador de espectro elétrico.

Ajustando as tensões de polarização DC de forma que se consiga uma modulação de banda lateral única, é possível

fazer com que o segundo harmônico gerado pelos moduladores na configuração *dual parallel* esteja em oposição de fase com o segundo harmônico gerado pelo fotodetector. Consegue-se comprovar matematicamente o cancelamento utilizando a expansão em séries de Taylor da corrente fotodetectada, onde a busca pela fase DC adequada garante a diferença de fase de 180° entre o termo da expansão correspondente ao segundo harmônico e o mesmo termo referente à modulação [9].

Atingiu-se, com essa técnica, um aumento de mais de 32 dB na SFDR, quando comparado o enlace com o cancelamento dos segundos harmônicos a um enlace na mesma configuração sem o uso da técnica. Mesmo que este arranjo experimental também tenha utilizado as características de não linearidade do EAFO, ainda não foi utilizada uma condição que previsse a saturação óptica dos fotodetectores empregados.

Até onde se tem notícia, não foram encontradas referências em que se estuda a compensação para o aumento da faixa dinâmica usando não-linearidades de conversão do espectro elétrico para o óptico, ou vice-versa, associadas à saturação do fotodetector.

Dado o exposto, pode-se propor uma técnica semelhante, que se valha das não-linearidades do fotodetector e da modulação de intensidade do modulador interferométrico Mach-Zehnder. Pode-se utilizar, por exemplo, um processo de *fitting* para deduzir a equação da curva de resposta em corrente de um fotodetector em função da intensidade óptica nele incidente, conforme procedimento apresentado na Fig.8 [15].

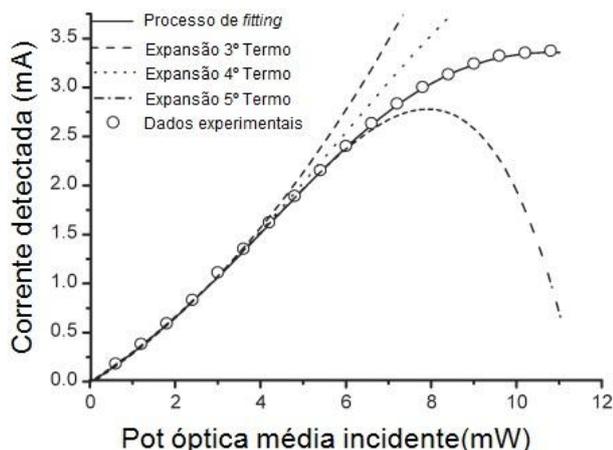


Fig.8. Procedimento de *fitting* adaptado de [15] para aproximação dos resultados obtidos de forma experimental.

A expansão em séries de Taylor da equação apresentada pelo processo de *fitting* traduz-se em uma boa aproximação do comportamento não-linear do fotodetector, podendo então ser utilizada para compensar o comportamento não linear da operação de um MZM fora de seu ponto de quadratura. Isto possibilita a operação no EAFO com níveis mais elevados de potência e em posição fora do ponto de operação linear do modulador, aumentando o ganho do enlace e reduzindo sua figura de ruído (limite inferior da SFDR).

Espera-se, com este procedimento que está em estudo pelos autores, compensar a não linearidade do fotodetector com a do modulador, evitando o surgimento de componentes espúrias na faixa de passagem do enlace (limite superior da SFDR). Como consequência, a técnica citada possibilita o aumento da SFDR do enlace analógico a fibra óptica.

IV. CONCLUSÃO

Foram apresentadas algumas das mais recentes técnicas propostas na literatura, visando o aumento na faixa dinâmica livre de espúrios. Apresentou-se, ainda, a proposta de uma metodologia mais simples no que diz respeito à incorporação de novos dispositivos ao enlace, que promove a compensação mútua das não-linearidades características do modulador de intensidade e do fotodetector. Essas técnicas atuam em uma figura-de-mérito de interesse, que é a SFDR, que reflete o desempenho desejável de um enlace analógico a fibra óptica destinado à aplicação em sistemas de defesa modernos.

Considerando o emprego de sensores de guerra eletrônica em cenários de combate modernos, a busca por sistemas de RF com SFDR elevada é uma realidade. Tendo em vista as inovações na área de RF em fotônica, é imperativo prosseguir no estudo dessas tecnologias, pois o conhecimento desta área traz como benefício a possibilidade de elaborar sistemas mais eficientes para a detecção de ameaças.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Iezekiel, *Microwave Photonics: Devices and Applications*. 2009.
- [2] C. H. Cox, G. E. Betts, and L. M. Johnson, "Analytic and experimental comparison of direct and external modulation in analog fiber-optic links," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 501–509, 1990.
- [3] C. H. Cox, *Analog Optical Links: Theory and Practice*, vol. 2006. 2006.
- [4] C. Cox, "Techniques and performance of intensity-modulation direct-detection analog optical links," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 8 PART 2, pp. 1375–1383, 1997.
- [5] R. W. Ridgway, J. a. Conway, and C. L. Dohrman, "Microwave photonics: Recent programs at DARPA," *2013 IEEE Int. Top. Meet. Microw. Photonics, MWP 2013*, vol. 32, no. 20, pp. 286–289, 2013.
- [6] O. L. Coutinho, V. R. Almeida, and J. E. B. Oliveira, "Uso de Redes de Comunicações Ópticas para Transmissão e Distribuição de Emissores Radar," 2011.
- [7] A. Karim and J. Devenport, "Noise figure reduction in externally modulated analog fiber-optic links," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 312–314, 2007.
- [8] Y. Cui, Y. Dai, F. Yin, Q. Lv, J. Li, K. Xu, and J. Lin, "Enhanced Spurious-Free Dynamic Range in Intensity-Modulated Analog Photonic Link Using Digital Postprocessing," *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–8, 2014.
- [9] P. S. Devgan, A. S. Hastings, V. J. Urlick, and K. J. Williams, "Cancellation of photodiode-induced second harmonic distortion using single side band modulation from a dual parallel Mach-Zehnder," *Opt. Express*, vol. 20, no. 24, pp. 27163–73, 2012.
- [10] W. Li and J. Yao, "Dynamic range improvement of a microwave photonic link based on bi-directional use of a polarization modulator in a Sagnac loop," *Opt. Express*, vol. 21, no. 13, p. 15692, 2013.

- [11] A. Karim and J. Devenport, "High dynamic range microwave photonic links for RF signal transport and RF-IF conversion," *J. Light. Technol.*, vol. 26, no. 15, pp. 2718–2724, 2008.
- [12] X. Chen, W. Li, and J. Yao, "Microwave Photonic Link With Improved Dynamic Range Using a Polarization Modulator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 14, pp. 1373 – 1376, 2013.
- [13] J. Li, Y.-C. Zhang, S. Yu, T. Jiang, Q. Xie, and W. Gu, "Third-order intermodulation distortion elimination of microwave photonics link based on integrated dual-drive dual-parallel Mach-Zehnder modulator.," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 21, pp. 4285–7, 2013.
- [14] V. J. Urick, M. N. Hutchinson, J. M. Singley, J. D. Mckinney, and K. J. Williams, "Suppression of even-order photodiode distortions via predistortion linearization with a bias-shifted Mach-Zehnder modulator," *Opt. Express*, vol. 21, no. 12, pp. 14368–14376, 2013.
- [15] J. Hong, C. Yang, X.-H. Li, Y.-H. Chong, and H.-D. Xu, "The impact of the photodiode on the nonlinearity of microwave photonic links," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, no. 10, pp. 2325–2327, 2011.