

Análise numérica de um Oscilador Optoeletrônico baseado em LED e Fibra Óptica Polimérica

Vítor T. Ferreira¹, Vanessa P.R. Magri¹, Alex B.N. Pefireko¹, Maria C.R. Frauche¹, José R.M. Andrade¹, Alexandre C.T. Santos², Cláudia B. Marcondes³ and Ricardo M. Ribeiro¹

Resumo— Osciladores Optoeletrônicos (OEOs) são capazes de gerar portadoras de RF de grande pureza espectral numa ampla faixa de frequências. São adequados para diversas aplicações. Este artigo apresenta o circuito e simulações numéricas de um OEO baseado em LED visível e fibra óptica polimérica de PMMA, utilizando a plataforma VPIphotonics. As simulações numéricas são comparadas com medições experimentais obtendo-se uma concordância satisfatória. O objetivo é investigar OEOs em fibras multimodo, simples e de baixo custo para fins educacionais, como uma plataforma escalável para testes e configurações complexas.

Palavras-Chave— Oscilador optoeletrônico (OEO), LED, RF, simulação, VPIphotonics, fibra óptica polimérica.

Abstract— Optoelectronic oscillators (OEOs) can generate RF carriers with high spectral purity over a wide frequency range, making them suitable for several applications. This work presents the circuit design and numerical simulations of an OEO based on visible LED and PMMA polymer optical fiber, using the VPIphotonics platform. The numerical simulations are compared with experimental measurements, showing satisfactory agreement. The aim is to investigate simple, low-cost multimode-fiber-based OEOs for educational purposes, to provide a scalable platform for testing and more complex implementations.

Keywords— Optoelectronic oscillator (OEO), LED, RF, VPIphotonics, simulation, polymer optical fiber.

I. INTRODUÇÃO

Osciladores Optoeletrônicos (OEOs) constituem uma importante classe de dispositivos de RF-fotônica, com crescente relevância em telecomunicações, sistemas de radar, sensoriamento e plataformas emergentes de computação fotônica [1]. Os OEOs utilizam um laço de realimentação no qual, em parte da trajetória, o sinal se propaga no domínio de RF, enquanto no restante percorre o domínio óptico, geralmente guiado por fibras ópticas [1]. Essa estrutura híbrida permite que OEOs produzam, simultaneamente, um sinal elétrico em RF e uma saída óptica transportando a mesma modulação em RF [1]. Entre suas características, destaca-se a capacidade de gerar opticamente portadoras de RF com ruído de fase extremamente baixo e praticamente independente da frequência de oscilação [1]. A geração de um sinal de RF em um OEO é feita por meio da realimentação positiva da malha, isto permite que certas componentes de frequência, que obedeçam às condições de ganho e de fase de um oscilador, possuam ganhos de potência. A frequência RF de saída, pode ser determinada ou alterada por meio do atraso total do enlace de realimentação, juntamente com

as características dos componentes presentes no aparato do OEO.

A saída de RF de um OEO é particularmente útil na geração de portadoras espectralmente puras requeridas em estações rádio-base (ERBs) de sistemas 5G e as futuras redes 6G [2]. Paralelamente, a saída óptica de um OEO pode ser empregada para distribuir portadoras de RF ao longo de enlaces em fibra óptica na forma de subportadoras ópticas moduladas, constituindo a base dos sistemas Radio-over-Fiber (RoF), cada vez mais importantes nas infraestruturas de comunicação da próxima geração [2,3].

Uma arquitetura não-convencional de OEO operando no espectro visível e na faixa de dezenas de MHz, foi recentemente demonstrada utilizando componentes de baixo custo, como LEDs, fibras ópticas poliméricas (POFs) de polimetilmetacrilato (PMMA) e fotodetectores Si-PIN integrando amplificadores de transimpedância (TIAs) [4]. Esse sistema relativamente simples, foi desenvolvido inicialmente para fins educacionais, embora preserve os princípios físicos fundamentais de operação de um OEO [4].

O presente artigo concentra-se no desenvolvimento de um modelo numérico do referido OEO, implementado no ambiente de simulação VPIphotonics. O objetivo é simular numericamente a saída em RF do OEO a partir de seus parâmetros físicos e comparar com resultados experimentais obtidos [4]. Adicionalmente à reprodução de um resultado experimental já obtido, a simulação é uma ferramenta de alta eficiência para o projeto e modificações para minimizar o custo e o esforço no desenvolvimento de um circuito experimental.

Este artigo está assim organizado: na seção 2 há uma descrição do OEO experimental e numérico; a seção 3 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos e, por fim, a seção 4 traz as considerações finais.

II. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DO OEO

A. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Um OEO não-convencional foi experimentalmente reportado em [4], cujo circuito é mostrado no esquema da Fig. 1. Uma fonte DC alimentou um LED hyper-red (Diemount, Alemanha) com emissão de luz em 650 nm que foi acoplado a um certo comprimento de PMMA-SI-POF [5]. Após percorrer a POF, a luz incidiu em um fotodetector de Si-PIN, com um amplificador de transimpedância integrado (TIA). Dois modelos de

Vítor Ferreira, Vanessa Magri, Alex Pefireko, Maria Frauche, José Andrade and Ricardo Ribeiro, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, mfrauche@id.uff.br; Alexandre Santos, Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ, e-mail: alexandre.toledo@aluno.cefet-rj.br, and Claudia Marcondes, Coordenação de Telecomunicações, Cefet-RJ, Rio de Janeiro, RJ, claudia.marcondes@cefet-rj.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (403784/2023-9), FAPERJ (E-26/210.307/2024) e CAPES.

fotodetector, o PDA10A (ThorLabs, EUA) e o HFBR-2526z, (Broadcom Inc., EUA), foram usados para realizar a conversão do sinal óptico para sinal elétrico [6].

Um bias-T atuou como bloqueador-DC, deixando que apenas o sinal de RF pudesse prosseguir. O equipamento de análise era um osciloscópio ou um analisador de espectro elétrico. Porém, com o uso de um divisor (conector-T), foi possível realimentar com RF o circuito fechado do OEO. Um bias-T (ZX85-12G-S+, Mini-Circuits, EUA) possuiu a finalidade de superpor o sinal de RF gerado com a tensão DC fornecida pela fonte, então o sinal composto acionava o LED. O fotodetector, o qual possui um TIA integrado, realizou a conversão do sinal óptico para elétrico.

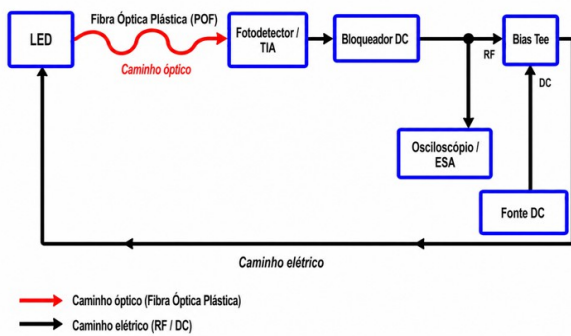


Fig. 1: Esquema do circuito experimental do OEO [4].

B. SIMULAÇÃO DO OEO NO VPIphotonics

O VPIphotonics é uma plataforma comercial capaz de simular numericamente diversos tipos de circuitos fotônicos. A Fig. 2 mostra o circuito de um OEO projetado na plataforma. Pode-se notar que o circuito é baseado na interconexão de blocos, sendo similar ao esquema experimental da Fig. 1.

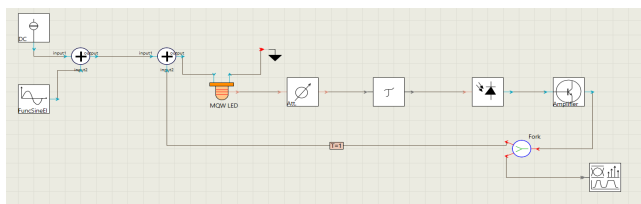


Fig. 2: Projeto de circuito em diagrama de blocos do OEO no VPIphotonics.

A fonte de alimentação do LED é representada pelo bloco *DC Source*, o qual injeta corrente de 3 mA no LED. Um gerador de sinal senoidal elétrico (*FuncSinEL*) de amplitude 0,5 a.u. (unidade arbitrária) e com frequência de 14 MHz foi utilizado para simular uma fonte de excitação inicial controlada para a malha optoeletrônica. O objetivo deste bloco é permitir o estabelecimento da oscilação, assim como o de facilitar a identificação dos picos espectrais, uma vez que, dentro das condições utilizadas, a simulação não apresentou as componentes no espectro da frequência somente com a polarização contínua. Como o LED não possui uma fonte interna de ruído configurável, foi utilizado o *FuncSinEL* para excitar a

malha. Isto permite analisar a resposta espectral do OEO e a formação da componente em 28 MHz associada ao modo superior e não-linearidades presentes na malha. O primeiro símbolo de soma (+) no esquema realiza a soma da componente DC com a componente senoidal, gerando um sinal composto que aciona inicialmente o MQW (Multi Quantum Well) LED emitindo em 650 nm. O segundo símbolo de soma (+), superpõe o sinal DC + ruído com o sinal de RF que retorna pelo OEO, de forma a realizar modulação direta no LED. Neste contexto, foi selecionado o modelo MQW LED onde um conjunto de equações diferenciais de taxas podem ser integradas. Como consequência, será possível modelar de forma mais realista a modulação direta da potência óptica no OEO. Para a modelagem da POF (multimodo), foram utilizados 2 blocos em série: um atenuador para simular a queda da amplitude do sinal óptico ao se propagar, e um bloco de atraso, o qual indiretamente representa o comprimento da POF. Logo após a POF, aparece o bloco do fotodetector. Em seguida, há o bloco do amplificador elétrico, responsável por simular o TIA do circuito experimental. Conforme o 1º critério de Barkhausen [1,4], o amplificador tem a função de sustentar um ganho total > 1 da malha do OEO, permitindo então a sua oscilação. O sinal de saída do amplificador entra no bloco de um FORK. A função dele é apenas a de replicar o sinal recebido, de forma a produzir duas saídas digitais idênticas. Uma das saídas é conectada a um bloco de analisador de espectro elétrico, enquanto a outra estabelece a realimentação do OEO. No esquema do circuito da Fig.2, a realimentação do OEO é implementada através da ligação por uma linha do FORK até o segundo símbolo somador (+). O atraso imposto pelos cabos elétricos é modelado pelo bloco T.

C. PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

A atenuação total da POF é dada por meio de (1),

$$A = \alpha \cdot L \quad (1)$$

onde α é o coeficiente de atenuação (dB/m) e L é o comprimento da fibra (m). O comprimento da POF no OEO experimental é de 0,59 m, então, a atenuação resultante é de 0,885 dB [4].

O atraso imposto pela POF, com unidade de medida em segundos, foi obtido através de (2),

$$\tau = nL/c \quad (2)$$

onde L é o comprimento da POF (0,59 m), c é a velocidade da luz (m/s) e n é o índice de refração. Para uma POF PMMA, $n = 1,49$. A partir da expressão matemática (2), o atraso encontrado é de aproximadamente 2,93 ns. Adicionalmente, utilizou-se na simulação um amplificador elétrico de 20 dB para aumentar o ganho do anel.

III. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS SIMULADOS

A. RESULTADO EXPERIMENTAL DO OEO COM LED DIEMOUNT E FOTODETECTOR HFBR

A Fig. 3 apresenta o espectro elétrico do OEO, medido por um osciloscópio através do uso da FFT (Transformada Rápida de Fourier), na qual realiza a conversão do sinal elétrico no domínio do tempo para o domínio da frequência. Levando em conta o uso do LED Diemount 650 nm, do fotodetector HFBR2526z e um comprimento de POF igual a 0,59 m no circuito da Fig. 1, a frequência fundamental foi medida como sendo $f_1 = (14 \pm 0,5)$ MHz. Também pode ser visto que o segundo modo de oscilação em $f_2 = (28 \pm 0,5)$ MHz está aproximadamente 18 dB abaixo do fundamental. A terceira e a quarta harmônicas também aparecem na imagem FFT da Fig. 3 com $f_3 = (42,0 \pm 0,5)$ MHz e $f_4 = (56,0 \pm 0,5)$ MHz. A incerteza de 0,5 MHz é decorrente da imprecisão do osciloscópio utilizado. É mostrado amplitudes progressivamente menores conforme o afastamento da frequência fundamental, devido à limitação de banda imposta pelo LED como um filtro passa-baixa. Fica então evidente, a natureza de oscilação do sistema da Fig.1, que corresponde a um FSR (espaçamento de frequências) de 14 MHz. A resposta em frequência evidenciada foi encontrada por meio do ajuste empírico da corrente de polarização em um intervalo de 3 mA a 5 mA.

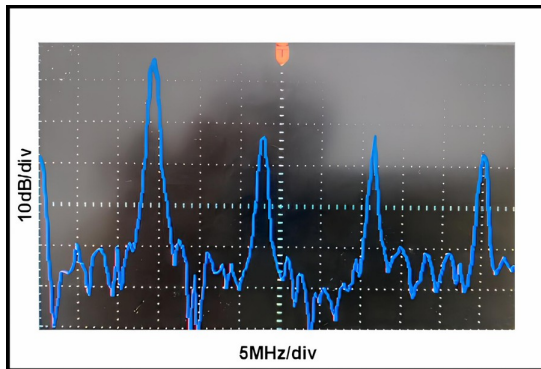


Fig.3: Traço do espectro elétrico FFT na saída do OEO ($L = 0,59$ m) com uma frequência fundamental $f_1 = (14,0 \pm 0,5)$ MHz.

B. RESULTADO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A Fig. 4 revela o espectro de RF de saída para o OEO simulado no VPI, conforme a Fig. 2. Realizando uma comparação do resultado experimental com o resultado numérico, é possível verificar que a frequência fundamental de ambos, para um comprimento de POF equivalente a 0,59 m, possui o valor de $f_1 = 14$ MHz. Além disso, foi comprovado que o espaçamento de frequências (FSR) também é mesmo, pois a segunda harmônica da resposta espectral obtida no VPI está em 28 MHz, valor que condiz com a frequência visualizada na segunda harmônica do resultado experimental. Adicionalmente, a diferença teórica de potência espectral entre a frequência fundamental e a segunda harmônica é de 25 dB, mas no experimento obteve-se 18 dB. Esta diferença de 7 dB pode indicar uma ocorrência real de não-linearidades no LED, não

capturada pelo VPI. Entretanto, não foi possível simular as harmônicas seguintes porque apresentam picos de oscilação abaixo do ruído. Nos experimentos, os picos de ordens mais altas podem ser vistos devido provavelmente às contribuições não-lineares. Os ruídos do OEO numérico são dados por meio dos parâmetros, como o “Thermal Noise” (Ruído Térmico), “Dark Current” (Corrente de Escuro) e o “Shot Noise” (Ruído de Disparo) presentes no fotodiodo. O Thermal Noise é usado para especificar o ruído proveniente da temperatura do fotodiodo. O chamado “Dark Current” é a corrente gerada pelo fotodiodo quando ele não está recebendo o sinal, por conta das transições térmicas induzidas. Por fim, o Shot Noise é o ruído proporcional à corrente de escuro e à corrente de sinal incidente.

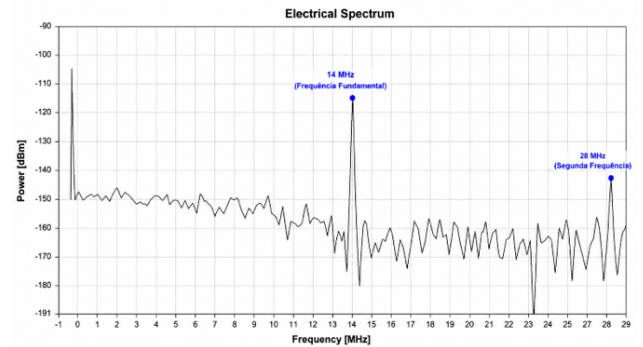


Fig.4: Resposta espectral elétrica do OEO simulado mostrando oscilação na frequência fundamental em $f_1 = (14,0 \pm 0,5)$ MHz.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o modelo físico de operação de um OEO baseado em LED visível (650 nm), um segmento de PMMA-POF e um fotodiodo com TIA. Experimentalmente, o OEO apresentou um comportamento de oscilação explícito, com picos espectrais mensuráveis. A simulação feita no VPI reproduziu de maneira satisfatória os traços espectrais da oscilação experimental, a frequência fundamental e a FSR. O efeito das não-linearidades do LED está em investigação e será reportada futuramente.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Ming Li, Tengfei, Wei Li e Yitang Dai, Tutorial on Optoelectronic Oscillators, APL Photonics, 6, 061101, 2021.
- [2] Vincent Crozatier *et al.*, *Experimental demonstration of a 25 GHz Optoelectronic Oscillator using an integrated resonant photoreceiver consisting of a GeSi photodiode and a codesigned III-V low noise amplifier*, 2024 International Topical Meeting Microwave Photonics (MWP), Pisa, Itália, 17–20 de Setembro 2024.
- [3] Kojiro Nishimura *et al.*, *Analog radio-over-fiber-based 5G smart mobile fronthaul networking tested with an open-source software base-station system*, Journal of Optical Communications and Networking, 17(11), E144–E154, 2025.
- [4] Vitor T. Ferreira, Vanessa P. R. Magri, Alexandre C. T. Santos e Ricardo M. Ribeiro, *Optoelectronic oscillator using visible LEDs and plastic optical fibers*, Applied Optics, 63(34), 8796–8801, 2024.
- [5] <https://diemount.com> GmbH, Germany.
- [6] Broadcom, Datasheet HFBR-2526z, AV02-1502EN, 2023.