

Modelagem tensorial aplicada a acopladores ópticos triple-core planar e triangular

Emily Lima Ferreira, Danilo Sousa Rocha e Glendo de Freitas Guimarães

Resumo— Os dispositivos ópticos vêm sendo cada vez mais utilizados em sistemas de telecomunicações, transmissão de informações e sensoriamento. Dentre esses dispositivos, temos o acoplador, responsável pela divisão, combinação e comutação dos sinais ópticos. O presente trabalho visa propor uma nova modelagem de sinais ópticos para acopladores *triple-core*, a partir da definição de um tensor de transferência, que pode ser visto como uma generalização da matriz de transferência comumente definida para acopladores de dois núcleos. Simulações numéricas são realizadas para analisar a performance do dispositivo e ilustrar a efetividade do modelo proposto.

Palavras-Chave— Modelos tensoriais, Modelagem de dispositivos ópticos, Acoplador óptico triplo.

Abstract— Optical devices have been widely used in telecommunication, information transmission and sensing systems. Among these devices, we have the optical coupler, responsible for dividing, combining and switching the optical signals. The present work aims to propose a new modeling of optical signals for triple-core couplers, by introducing a transfer tensor, which can be seen as a generalization of the transfer matrix commonly defined for dual-core couplers. Numerical simulations are provided to analyze the device performance and to illustrate the effectiveness of the proposed model.

Keywords— Tensor models, Optical device modeling, Triple-core optical coupler.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de comunicação óptica vêm sendo cada vez mais utilizados em novas tecnologias devido à sua alta taxa de transmissão de dados a longas distâncias, além de baixas interferências eletromagnéticas. Estes sistemas são compostos de alguns dispositivos ópticos, dentre eles o acoplador, que atua como um divisor do feixe luminoso, permitindo a comutação de sinais ópticos.

Atualmente, simular tais dispositivos consiste em solucionar a equação não-linear de Schrödinger (ENLS) [1] através de métodos que calculam a propagação de um feixe luminoso ao longo da fibra óptica. Comumente, métodos como Runge-Kutta [2], [3] e *split-step* Fourier (SSF) [4], [5] são utilizados para solução deste tipo de problema.

A proposta desse trabalho é apresentar uma nova modelagem para sinais em dispositivos ópticos, em particular acopladores ópticos *triple-core* (ou simplesmente acoplador triplo) nas configurações planar e triangular, através de arranjos multidimensionais (tensores). Tensores [6], [7], [8] podem ser

Emily Lima Ferreira, Física, Instituto Federal do Ceará, Horizonte-CE, e-mail: emily.lima.ferreira62@aluno.ifce.edu.br; Danilo Sousa Rocha, Física, Instituto Federal do Ceará, Horizonte-CE, e-mail: danilo.rocha@ifce.edu.br; Glendo de Freitas Guimarães, Física, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza-CE, e-mail: glendo@ifce.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo PIBIC/IFCE (10976).

vistos como generalizações de matrizes para o caso de arranjos de ordem superior a 2 e vêm sendo amplamente utilizado na representação de sinais multidimensionais. Modelos tensoriais têm como vantagem a representação de múltiplas variações sistemáticas do sinal, além de permitir uma visualização mais compacta de estruturas complexas. Este estudo inicial visa a modelagem de dispositivos ópticos, almejando aplicações futuras em sistemas de comunicação com problemas envolvendo processamento de sinais e estimação de parâmetros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Acopladores ópticos são formados por fibras ópticas paralelas entre si, de tal forma que seus núcleos são aproximados o suficiente para que ocorra uma sobreposição dos sinais ópticos na região de acoplamento de seus núcleos. A sua configuração mais básica é dada por duas fibras em paralelo e é chamado de acoplador duplo, onde o feixe de luz vindo de uma das portas de entrada é dividido coerentemente e guiado para as portas de saídas. Os sinais de saída obtidos em um acoplador duplo podem ser calculados através da ENLS que, em geral, não possui solução analítica. Contudo, em diversas situações práticas, os efeitos dispersivos e não-lineares sobre a propagação do sinal óptico na fibra são desprezíveis, e então os sinais em um acoplador são calculados da seguinte forma [1]

$$\begin{bmatrix} A_1(L) \\ A_2(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa L) & i\operatorname{sen}(\kappa L) \\ i\operatorname{sen}(\kappa L) & \cos(\kappa L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde $A_1(0)$ e $A_2(0)$ são as amplitudes na entrada do acoplador, injetadas nas portas 1 e 2, respectivamente, e $A_1(L)$ e $A_2(L)$ são as amplitudes na saída do acoplador. A matriz 2×2 na Eq. (1) determina a razão de divisão da potência inserida entre os núcleos do acoplador e é denominada matriz de transferência. Os parâmetros κ e L representam o coeficiente de acoplamento e o comprimento do acoplador, respectivamente.

Acopladores triplos possuem dois tipos de configuração, a depender da estrutura de acoplamento das fibras, considerando as possibilidades de interação entre os três núcleos, conforme ilustrado na Fig. 1. A primeira configuração é a planar, onde os núcleos são dispostos em paralelo, havendo a comutação óptica dos sinais entre as fibras 1 e 2 e as fibras 2 e 3. A segunda configuração é a triangular, onde os núcleos das fibras estão organizados de maneira a haver a comutação mútua entre os três núcleos.

A modelagem da propagação da luz em acopladores triplos se dá pela solução de um sistema de $N = 3$ equações

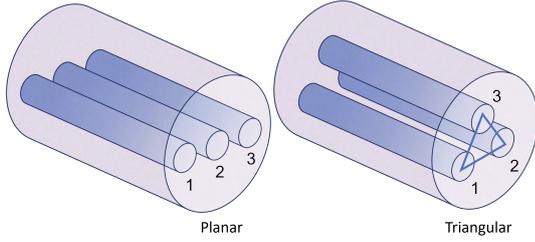


Fig. 1. Acoplador triplo planar e triangular.

acopladas baseadas na ENLS, conforme a seguir [1]

$$i \frac{dA_n}{dz} + \gamma |A_n|^2 A_n + \sum_m \kappa_{n,m} A_m = 0, \quad (2)$$

onde z é o eixo de propagação ao longo do acoplador, γ é o coeficiente não-linear e $\kappa_{n,m}$ é o coeficiente de acoplamento entre os núcleos n e m , com $n, m = 1, 2, 3$ e $n \neq m$. Note que os índices n e m , bem como o somatório na equação acima, devem ser adaptados a cada caso do acoplador triplo, de acordo com as interações entre os núcleos adjacentes. Nessa abordagem, é considerado somente a presença de efeitos não-lineares de auto-modulação de fase (*self-phase modulation* – SPM) e acoplamento linear.

Devido às múltiplas interações entre núcleos adjacentes, uma expressão tal como a apresentada na Eq. (1) geralmente não é utilizada para solução de acopladores triplas, mesmo em regime linear. Na seção a seguir, apresentaremos uma modelagem tensorial para acopladores triplas que permite a representação das múltiplas interações entre núcleos de maneira simples e compacta. A ideia por trás do método SSF é considerada como base para a resolução do problema, a fim de que sejam representados os efeitos de propagação relacionados na abordagem acima.

III. MODELO TENSORIAL PROPOSTO

Nos últimos anos, a utilização de técnicas baseadas em tensores tem sido bastante aplicada na área de telecomunicações, visando a modelagem e o processamento de sinais. Modelos tensoriais permitem representar dados ou sinais multidimensionais de forma compacta. Quando se trata do processamento de sinais e/ou estimação de parâmetros, modelos baseados em decomposição (fatoração) de tensores possuem propriedades de unicidade que possibilitam a resolução de problemas de soluções indeterminadas sob condições mais leves que as abordagens matriciais convencionais [6], [8].

A seguir, apresentamos uma breve revisão sobre o produto envolvendo tensores e a notação utilizada ao longo do manuscrito. Na sequência, introduziremos o modelo tensorial proposto para os acopladores triplas planar e triangular.

A. Operações com tensores e notação

Para melhor entendimento das operações demonstradas a seguir, se faz necessário definirmos algumas notações. Vetores serão representados por letras minúsculas e em negrito (\mathbf{a} , \mathbf{b} , ...), matrizes serão representadas por letras maiúsculas e em negrito (\mathbf{A} , \mathbf{B} , ...) e os tensores serão representados por letras

caligráficas (\mathcal{A} , \mathcal{B} , ...). Os elementos escalares que compõem um dado arranjo de N -ésima ordem $\mathcal{A} \in \mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ são denotados por a_{i_1, i_2, \dots, i_N} , com os índices $i_n = 1, \dots, I_n$ e $n = 1, \dots, N$.

Um tensor é um arranjo multidimensional que muitas vezes não possui uma representação gráfica de todos os seus modos. Desta forma, representações matriciais desse tensor são comumente definidas através do desdobramento (concatenação) de seus elementos ao longo de uma dada dimensão ou da representação em fatias (*slices*). Estas são definidas a partir da fixação de alguns dos índices do tensor, com a exceção de dois deles. Por exemplo, considerando um tensor $\mathcal{X} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}$ de terceira ordem, podemos obter três fatias fixando um dos índices, sendo elas: fatias frontais ($\mathbf{X}_{\cdot, \cdot, k} \in \mathbb{C}^{I \times J}$); fatias verticais ($\mathbf{X}_{\cdot, j, \cdot} \in \mathbb{C}^{I \times K}$); fatias horizontais ($\mathbf{X}_{i, \cdot, \cdot} \in \mathbb{C}^{J \times K}$).

Para a realização dos cálculos envolvendo sinais ópticos em acopladores triplas, iremos usar a definição do produto entre uma matriz e um tensor, chamado de produto modo- n . Para a realização deste produto, devemos obedecer a seguinte característica: o número de colunas da matriz deve ser igual ao n -ésimo modo do tensor, sobre o qual será realizado o produto. A título de exemplo, vamos considerar uma matriz $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times P}$ e um tensor $\mathcal{T} \in \mathbb{C}^{M \times N \times P}$, o produto modo-3 entre eles é dado por

$$\mathcal{C} = \mathcal{T} \times_3 \mathbf{S} \in \mathbb{C}^{M \times N \times K}, \quad (3)$$

ou em notação escalar

$$c_{m,n,k} = \sum_{p=1}^P t_{m,n,p} s_{k,p}, \quad (4)$$

onde $c_{m,n,k}$, $t_{m,n,p}$ e $s_{k,p}$ são elementos dos respectivos tensores. A operação acima é uma extensão da definição de produto matricial para arranjos de ordem superior.

B. Acoplador triplo em regime linear

Como forma de representar os sinais na saída de um acoplador triplo, propomos uma estrutura multidimensional, baseada na introdução de um tensor de transferência, o qual pode ser entendido como uma generalização da matriz de transferência da Eq. (1) para o caso de acopladores triplas. Por questões de simplicidade, adotaremos aqui um regime linear, negligenciando os efeitos SPM sobre a propagação, ou seja, $\gamma = 0$.

O tensor de transferência deve representar todas as interações entre os núcleos das fibras adjacentes. Independente da configuração, as múltiplas interações contínuas entre os diferentes pares de núcleos ocorrem simultaneamente ao longo de toda a região de acoplamento, o que impede uma análise global do chaveamento óptico ao longo do comprimento L do acoplador. Deste modo, faz-se necessária uma aproximação numérica, onde assumiremos que, em um dado comprimento infinitesimal, as interações de cada par de núcleos podem ser analisadas de maneira isolada. Isto é, para a propagação em uma distância dz ao longo do eixo do acoplador, cada par de núcleos adjacentes é analisado de forma equivalente a um acoplador duplo. O sinal resultante é lançado como entrada no passo seguinte, e assim por diante até que se percorra todo o

comprimento do acoplador. Essa forma recursiva é inspirada no método SSF, onde os efeitos de propagação são analisados de maneira independente em cada passo infinitesimal.

Para um acoplador triplo, adotamos um sinal de entrada dada pelo vetor $\mathbf{x}(0) = [A_1(0) \ A_2(0) \ A_3(0)]^T$. Após uma distância dz , o sinal de saída $\mathbf{y}(dz)$ é então direcionado como entrada no passo seguinte, isto é, $\mathbf{x}(dz) = \mathbf{y}(dz)$. Assim, de uma forma geral, podemos definir o sinal em um dado ponto do acoplador após uma distância de propagação z como

$$\mathbf{x}(z + dz) \stackrel{\mathcal{K}}{\leftarrow} \mathbf{x}(z), \quad (5)$$

onde \mathcal{K} denota o tensor de transferência do acoplador, o qual representa toda a transformação sofrida pelo sinal de entrada. O tensor $\mathcal{K} \in \mathbb{C}^{P \times Q \times R}$ é um arranjo de terceira ordem, cujas dimensões são respectivamente definidas pelo número de saídas do acoplador, número de entradas do acoplador e número de pares de núcleos adjacentes. Em um acoplador triplo, a quantidade de fibras define os valores $P = Q = 3$, enquanto o valor de R é determinado pela configuração (planar ou triangular), podendo assumir valor igual a 2 ou 3, respectivamente. Assim, para cada valor de $r = 1, \dots, R$, a fatia $\mathbf{K}_{\cdot, \cdot, r}$ representa uma matriz 3×3 cujos elementos $k_{p,q,r}$, com $p = 1, \dots, P$ e $q = 1, \dots, Q$, denotam as interações entre um dado par de núcleos adjacentes (n, m) . Em outras palavras, os elementos de $\mathbf{K}_{\cdot, \cdot, r}$ mapeiam os elementos da matriz 2×2 definida na Eq. (1) em posições com índices correspondentes ao par de núcleos adjacentes considerados na interação r .

Seguindo o raciocínio exposto acima, assumimos que a configuração planar resulta em um número de interações $R = 2$, envolvendo os pares de núcleos $(n, m) = (1, 2), (2, 3)$. Já a configuração triangular nos leva a $R = 3$, com o envolvimento dos pares $(n, m) = (1, 2), (2, 3), (1, 3)$. Cada par (n, m) é representado por um valor de $r \in [1, R]$. O tensor de transferência proposto para o acoplador planar é apresentado a seguir através de suas fatias

$$\mathbf{K}_{\cdot, \cdot, 1} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_{1,2}dz) & \text{isen}(\kappa_{1,2}dz) & 0 \\ \text{isen}(\kappa_{1,2}dz) & \cos(\kappa_{1,2}dz) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{\cdot, \cdot, 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\kappa_{2,3}dz) & \text{isen}(\kappa_{2,3}dz) \\ 0 & \text{isen}(\kappa_{2,3}dz) & \cos(\kappa_{2,3}dz) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Para a configuração triangular, além das fatias apresentadas acima, o tensor de transferência possui uma terceira fatia dada a seguir

$$\mathbf{K}_{\cdot, \cdot, 3} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_{1,3}dz) & 0 & \text{isen}(\kappa_{1,3}dz) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{isen}(\kappa_{1,3}dz) & 0 & \cos(\kappa_{1,3}dz) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

A partir da definição da estrutura tensorial \mathcal{K} de transferência do acoplador triplo, os sinais dados na Eq. (5) podem ser reescritos através de um produto modo-2 da seguinte forma

$$\mathcal{X}(z + dz) = \mathcal{K} \times_2 \mathbf{x}(z). \quad (9)$$

Note que, pela definição dada na Eq. (3), o produto acima resulta em um tensor $\mathcal{X}(z + dz)$ de dimensões $3 \times 1 \times R$, que contém em cada fatia o resultado isolado da interação

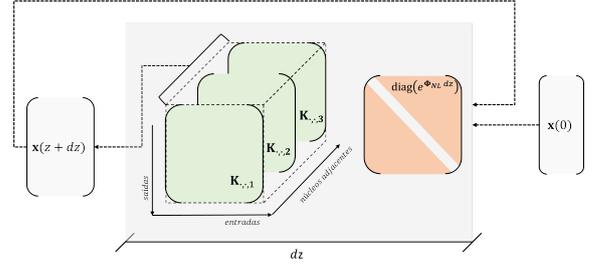


Fig. 2. Diagrama de blocos do modelo tensorial proposto.

entre os respectivos pares de núcleos. Assim, o sinal resultante de cada passo infinitesimal dado por $\mathbf{x}(z + dz) = [A_1(z + dz) \ A_2(z + dz) \ A_3(z + dz)]^T$ deve ser obtido através da média das múltiplas interações, isto é,

$$\mathbf{x}(z + dz) = \overline{[\mathcal{X}(z + dz)]_3}, \quad (10)$$

onde $\overline{[\cdot]_n}$ representa a média dos elementos de um tensor calculada ao longo de seu n -ésimo modo.

C. Acoplador triplo em regime não-linear

Agora, adicionaremos à modelagem proposta na subseção anterior o efeito de propagação não-linear do tipo SPM considerado na abordagem apresentada Seção II. Este efeito não-linear induz diferentes deslocamentos de fase entre os sinais dos núcleos a depender dos níveis de potência em cada um deles. Para tanto, consideraremos um valor de $\gamma \neq 0$ na Eq. (2), o que rende à solução da equação diferencial um fator multiplicador exponencial que depende do quadrado da amplitude do sinal. Assim, considerando o conjunto de três equações acopladas dada em (2), podemos definir de maneira global um vetor Φ_{NL} que contém os termos não-lineares referentes a todos os núcleos, conforme a seguir

$$\Phi_{NL} = i\gamma [|A_1(z)|^2 \ |A_2(z)|^2 \ |A_3(z)|^2]^T. \quad (11)$$

Desta forma, iremos considerar que, em cada passo, o vetor de sinais $\mathbf{x}(z)$ a ser comutado pelo tensor de transferência \mathcal{K} na Eq. (9) passa a ser o sinal $\mathbf{x}'(z)$ já modificado pelo efeito não-linear dado por

$$\mathbf{x}'(z) = \text{diag}(e^{\Phi_{NL} dz}) \mathbf{x}(z), \quad (12)$$

onde o operador $\text{diag}(\cdot)$ mapeia os elementos de um vetor coluna na diagonal principal de uma matriz quadrada. É importante ressaltar que, dependendo dos níveis de potência considerados, a mudança de fase induzida pelo efeito SPM altera a capacidade de chaveamento da potência pelo acoplador, uma vez que proporciona diferentes deslocamentos de fase em cada núcleo, resultando em diferentes modos de interferência entre os sinais.

A partir da Eq. (12), reescrevemos o sinal resultante como

$$\begin{aligned} \mathcal{X}(z + dz) &= \mathcal{K} \times_2 \mathbf{x}'(z) \\ &= \mathcal{K} \times_2 (\text{diag}(e^{\Phi_{NL} dz}) \mathbf{x}(z)) \end{aligned} \quad (13)$$

A Fig. 2 mostra um diagrama de blocos que ilustra de maneira amigável a estrutura tensorial proposta, bem como o método recursivo de simulação do sinal de um acoplador triplo.

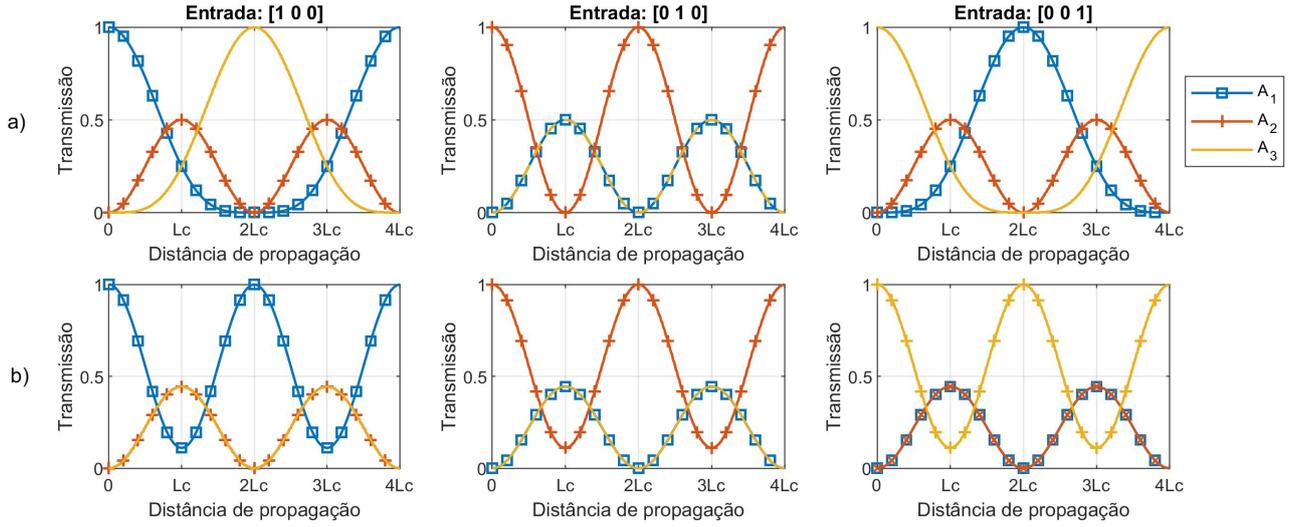


Fig. 3. Potência transmitida no acoplador triplo (a) planar e (b) triangular em função da distância de propagação.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, apresentamos resultados de simulações numéricas para a propagação da luz em acopladores triplos, a fim de se avaliar a efetividade do modelo tensorial proposto. Um experimento para analisar a energia transmitida em cada configuração do acoplador triplo foi realizado, baseado na solução apresentada na Seção III. Para efeitos de simulação, geramos sinais a partir da modulação *on-off keying* (OOK) com potência $P_0 = 1W$ para representação de bits 1. Foram considerados três casos de entrada, avaliando-se a resposta do acoplador para sinais transmitidos a partir de cada uma das portas de entrada, isto é, $\mathbf{x}(0) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$.

Outros parâmetros utilizados neste estudo numérico são apresentados a seguir. Foi adotado um coeficiente não-linear $\gamma = 2 \times 10^{-3}(Wm)^{-1}$. O comprimento do acoplamento foi fixado em $L_C = 2cm$, e os coeficientes de acoplamento $\kappa_{n,m}$ foram escolhidos em cada configuração de forma a se obter o máximo chaveamento da energia óptica entre os núcleos, isto é, $\kappa_{n,m}L_C = \pi/\sqrt{2}$ para a configuração planar e $\kappa_{n,m}L_C = \pi/3$ para a triangular [9]. Assumimos que os acoplamentos lineares entre os núcleos dos acopladores são simétricos (núcleos idênticos) em todos os casos, ou seja, $\kappa_{n,m} = \kappa, \forall n, m$ com $n \neq m$.

Primeiramente avaliamos a exatidão do método proposto através de uma análise da conservação da energia. Uma vez que a atenuação do sinal foi negligenciada nessa abordagem, a soma das energias dos sinais na saída do acoplador deve corresponder à energia inserida em cada caso. Testes foram realizados para diferentes valores do passo infinitesimal dz e a acurácia do modelo foi analisada com base no erro quadrático médio normalizado ($\bar{\epsilon}$) entre as potências de saída e P_0 a cada passo do modelo. A Tabela I mostra os resultados obtidos para os diferentes valores de dz . Através da tabela, é possível observar uma maior precisão na conservação de energia à medida que diminuimos a ordem do passo e, conseqüentemente, melhoramos a aproximação numérica. Uma maior exatidão no experimento gera um aumento do custo computacional,

TABELA I
ANÁLISE DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

	Ordem do passo (dz) [em metros]					
	10^{-4}		10^{-5}		10^{-6}	
	$\bar{\epsilon}$	$T_s(s)$	$\bar{\epsilon}$	$T_s(s)$	$\bar{\epsilon}$	$T_s(s)$
Acoplador planar	10^{-2}	0,45	10^{-3}	5,11	10^{-5}	215,75
Acoplador triangular	10^{-2}	0,42	10^{-3}	5,23	10^{-5}	216,52

evidenciado pelo tempo de simulação (T_s) de cada caso, conforme mostrado na tabela. Para as demais simulações deste trabalho, foi considerado o passo de maior precisão, ou seja $dz = 10^{-6}m$.

Na Fig. 3, apresentamos gráficos da potência transmitida normalizada $|A_n(z)/P_0|^2$ em função da distância de propagação ao longo do acoplador para as configurações planar e triangular. As curvas foram plotadas para uma distância de propagação $4L_C$, a fim de se verificar o chaveamento da potência entre os núcleos a cada comprimento de acoplamento percorrido. Através destes resultados, pode-se avaliar como a configuração do acoplador modifica as curvas de transmissão, enfatizando, em ambos os casos, a dependência periódica do chaveamento óptico com relação à distância de propagação. Conforme esperado, é possível observar uma completa simetria entre os três casos estudados para a configuração triangular, independente da porta em que o sinal é transmitido na entrada do acoplador. A mesma simetria já não é observada para a configuração planar, devido a não existência de interação entre os núcleos localizados na extremidade do arranjo.

Na sequência, uma análise da performance dos acopladores com respeito ao efeito não-linear SPM foi realizada. Para tanto, consideramos uma variação da potência de entrada P_0 num range que vai de $1W$ a 4×10^5W , a fim de se avaliar a dependência dos sinais de saída do acoplador com relação à potência inserida no dispositivo. A capacidade de chaveamento de potência entre os núcleos do acoplador geralmente é redu-

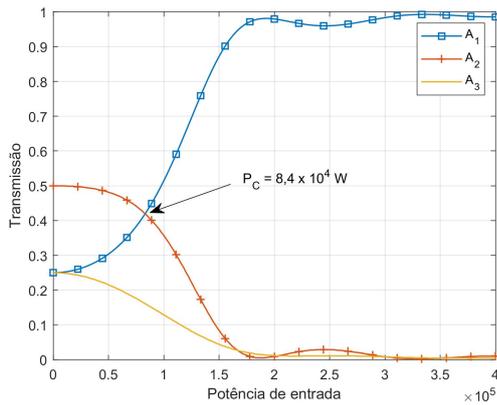


Fig. 4. Potência transmitida vs. potência de entrada para o acoplador triplo planar.

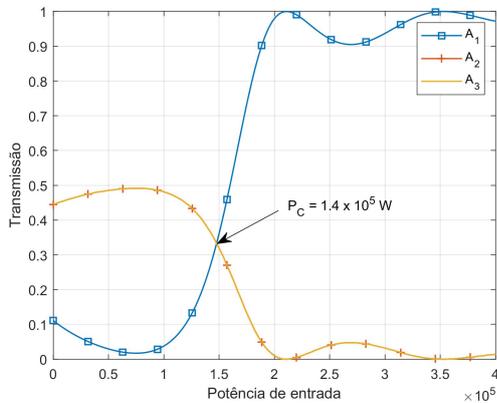


Fig. 5. Potência transmitida vs. potência de entrada para o acoplador triplo triangular.

zida quando P_0 assume valores elevados, acima de um valor crítico [9]. Esta potência crítica (P_C) é um parâmetro relevante no estudo de acopladores ópticos quando efeitos não-lineares são considerados. Quando sinais com potência acima de P_C são inseridos no dispositivo, a consequência do efeito SPM é confinar a luz no mesmo núcleo no qual ela foi inicialmente lançada, causando a perda da capacidade de chaveamento do acoplador, dando a ele um comportamento assimétrico.

As Figuras 4 e 5 mostram a potência transmitida em função da potência de entrada para as configurações planar e triangular, respectivamente. Para estes resultados, a distância de propagação utilizada foi L_C e o sinal de entrada $\mathbf{x}(0) = (1, 0, 0)$. Em ambos os resultados, observamos o fenômeno de confinamento da luz explicado anteriormente. Na Fig. 4, a potência crítica do acoplador triplo planar é identificada pela interseção entre as curvas de transmissão dos núcleos 1 e 2, configurando, a partir desse ponto, uma tendência de concentração da energia no núcleo 1, que corresponde ao núcleo no qual a energia inicial foi inserida. Para o acoplador triplo triangular, é possível identificar na Fig. 5 que a potência crítica ocorre na interseção entre as três curvas de transmissão, caracterizando também uma tendência de confinamento da energia no núcleo 1 a partir deste ponto. A partir da aná-

lise dos resultados é possível estimar valores das potências críticas obtidas para cada caso. Tais valores são indicados nas respectivas figuras.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos uma nova modelagem multidimensional baseada em tensores para a representação de sinais em acopladores ópticos triplos do tipo planar e triangular. No modelo, introduzimos a ideia de um tensor transferência para acopladores de três núcleos, em analogia às matrizes de transferência dos acopladores duplos. A partir da estrutura tensorial proposta, e inspirado no método *split-step*, derivamos um método alternativo para a solução desses dispositivos, visando simplificar soluções numéricas baseadas na ENLS. Simulações computacionais considerando efeitos de acoplamento linear e de auto-modulação de fase foram realizadas a fim de se verificar a efetividade e acurácia do modelo. Os resultados obtidos estão de acordo com performances esperadas para acopladores triplos, mostrando um bom potencial da modelagem proposta em futuros estudos envolvendo estruturas mais complexas, com uma representação compacta e eficaz. Possíveis desdobramentos deste trabalho incluem a extensão do modelo para o caso de acopladores multi-núcleos em arranjos diversos, bem como redes de acopladores para fins de aplicação em sistemas de comunicação óptica, além de uma comparação de performance com métodos numéricos tradicionais. Estudos envolvendo problemas de processamento de sinais com estimação de parâmetros a partir da exploração de modelos tensoriais também estão incluídas como perspectiva desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Fotônica do IFCE – campus Fortaleza pelo apoio e suporte ao desenvolvimento desta pesquisa e ao PIBIC-IFCE pelo financiamento de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- [1] G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics,” 3rd Ed, San Diego, USA, Academic Press, 2001.
- [2] W. B. Fraga e A. G. Coelho Junior, “Fibras de cristais fotônico: Uma análise de operações lógicas em fibras multinúcleo,” *Novas edições acadêmicas*, 2018.
- [3] G. S. Bezerra Filho, D. G. Correia, W. B. Fraga e G. F. Guimarães, “Obtaining optical logic gates – OR, XOR, AND and logic functions using asymmetric Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal fiber,” *Optics & Laser Technology*, vol. 97, pp. 370-378, 2017.
- [4] G. M. Muslu e H. A. Erbay, “Higher-Order Split-Step Schemes for the Generalized Nonlinear Schrödinger Equation,” *Numerical Mathematics and Advanced Applications*, pp. 658-667, 2004.
- [5] A. A. Stamatios, T. T. Zygidis e N. V. Kantartzis, “Combining standard with optimised split-step finite-difference time-domain methods for the study of graphene configurations,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 13 (8), pp. 1150-1157, 2019.
- [6] T. G. Kolda e B. W. Bader, “Tensor Decompositions and applications,” *SIAM Review*, vol. 51 (3), 2008.
- [7] P. Comon, “Tensor Decompositions, State of the Art and Applications,” J. G. McWhirter and I. K. Proudler. *Mathematics in Signal Processing V*, Clarendon Press, Oxford, pp.1-24, 2002.
- [8] D. S. Rocha, “Nested tensor decomposition applied to cooperative MIMO communication systems,” *Tese (doutorado)*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- [9] A. F. Lima, F. L. B. Martins, J. C. Nascimento e A. G. Coelho Junior, “Critical power in three-core photonic crystal fibers,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 54 (2), pp. 1-7, 2018.