

## IX Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa

Universidade Estadual Vale do Acaraú/Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

# Estudo Numérico e Analítico do Interferômetro Óptico Sagnac sob Efeitos de Não Linearidades.

MAGALHÃES, F. T. C. B.<sup>1</sup>; PINTO, P. VICTOR F.<sup>1</sup>; MOURA, L. P.<sup>2</sup>; GUIMARÃES G.F.<sup>3</sup>;  
FRAGA, W. B.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia de Telecomunicações/IFCE; <sup>2</sup>Graduado em Engenharia de Telecomunicações/IFCE;

<sup>3</sup>Professor do Mestrado em Engenharia de Telecomunicações/IFCE; <sup>4</sup>Orientador.

Palavras Chave: Sagnac, Interferômetro, OptiSystem.

## INTRODUÇÃO

Os interferômetros ópticos são dispositivos que fazem com que dois campos eletromagnéticos (feixes de luz) sofram interferência e assim tenham suas amplitudes alteradas [1]. O resultado dessa interferência vai depender das amplitudes dos campos e da diferença de fase entre eles. Um interferômetro óptico do tipo Sagnac pode ser construído ligando-se de uma fibra entre as duas portas de saída um acoplador para formar um *loop* [3]. Por uma das portas de entrada do acoplador se envia um sinal luminoso e pela outra porta de entrada do acoplador tem-se o sinal transmitido. Neste estudo foi comparada a transmissividade de uma simulação computacional de um interferômetro Sagnac com o resultado analítico.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento da parte analítica desse estudo será necessário conhecer o sistema de equações não lineares acopladas [2] que regem a propagação de um sinal luminoso no interior de uma fibra óptica sob a ação de SPM e XPM. Essas equações são conhecidas como equações não lineares de Schroedinger [2] (NLS) onde a variável  $A = A(z, T)$  fornece a forma do pulso que se propaga na fibra:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \frac{\alpha}{2} A_1 = i\gamma(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \frac{\alpha}{2} A_2 = i\gamma(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2 \quad (2)$$

Também é importante conhecer o funcionamento do acoplador [1,4] (um divisor de feixes ópticos) e sua equação (matriz de transferência) que fornece os sinais de saída em função dos sinais de entrada. Um acoplador ( $\rho:1-\rho$ ) indica que uma fração  $\rho$  da energia que entra por uma porta

continua no mesmo núcleo e a fração  $(1 - \rho)$  é transferida para o outro núcleo. Isso permite escrever a matriz de transferência de um acoplador linear que irá fornecer a expressão dos campos de saída nas portas 1' e 2' do acoplador em função dos campos de entrada nas portas 1 e 2.

$$\begin{pmatrix} A'_1 \\ A'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para o desenvolvimento da parte computacional desse estudo será utilizado o OptiSystem (versão 13.0), um programa de simulação de circuitos ópticos da empresa OptiWave. Este programa foi escolhido pois, com ele, é possível simular, analisar e prever o comportamento de vários tipos de circuitos ópticos, além de possuir uma abrangente biblioteca de dispositivos. Ele também permite variar uma vasta gama de parâmetros em cada um desses dispositivos, como o comprimento de uma fibra ou a potência de um laser.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi demonstrada a expressão analítica para a transmissividade de um interferômetro Sagnac alimentado por um sinal CW. Para obter essa expressão deve-se começar pela análise do acoplador. Sabendo que na entrada do acoplador os sinais nas portas de entrada 1 e 2 são:

$$A_1 = A_0 \quad \text{e} \quad A_2 = 0 \quad (4)$$

com  $A_0 = \sqrt{P_0}$ , onde  $A_0$  é a amplitude da onda na entrada 1 do acoplador e  $P_0$  é a respectiva potência do sinal.

Aplicando a matriz de transferência do acoplador tem-se nas saídas feixes luminosos de expressões:  $A_f$  e  $A_b$ . Os índices f e b referem-se aos termos em inglês *forward* (se propaga no sentido horário no loop) e *backward* (se propaga no sentido anti-horário no loop).

$$\begin{pmatrix} A_f \\ A_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$A_f = \sqrt{\rho} A_0 \quad (6)$$

$$A_b = i\sqrt{1-\rho} A_0 \quad (7)$$

Após cada um desses feixes se propagar no *loop*, pode-se calcular a mudança de fase linear e não-linear sofrida por cada onda a partir da solução das equações diferenciais acopladas (NLS). As expressões que fornecem os campos  $A'_f$  (propagante) e  $A'_b$ , (contra-propagante) ao final do *loop* serão:

$$A'_f = A_f \cdot \exp[i\varphi + i\gamma (|A_f|^2 + 2 \cdot |A_b|^2) L] \quad (8)$$

$$A'_b = A_b \cdot \exp[i\varphi + i\gamma (|A_b|^2 + 2 \cdot |A_f|^2) L] \quad (9)$$

Onde  $\varphi = \beta \cdot L$ , ( $\varphi$  representa a mudança de fase linear ao longo do loop e  $\beta$  a constante de propagação da onda na fibra).

Os campos  $A'_f$  e  $A'_b$  passarão pelo acoplador, onde novamente se fará uso da matriz de transferência e serão obtidos os campos  $A_T$  e  $A_R$ , respectivamente denominados como campo transmitido e refletido:

$$\begin{pmatrix} A_T \\ A_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A'_f \\ A'_b \end{pmatrix} \quad (10)$$

Após manipulação obtém-se:

$$|A_T|^2 = \left[ 1 - 2\rho(1-\rho) \left[ 1 + \cos[(1-2\rho) \cdot \gamma P_0 L] \right] \right] |A_0|^2 \quad (11)$$

Assim pode-se calcular a transmissividade  $T_R$  :

$$T_R = \frac{|A_T|^2}{|A_0|^2} \quad (12)$$

$$T_R = \left[ 1 - 2\rho(1-\rho) \left[ 1 + \cos[(1-2\rho) \cdot \gamma P_0 L] \right] \right] \quad (13)$$

Pode-se calcular a potência transmitida através do produto:

$$P_T = T_R \cdot P_0 \quad (14)$$

O que demonstra o comportamento não linear da Transmissividade é o fato de ela depender da potencia de entrada  $P_0$ . Mesmo assim, quando  $\rho=0,5$  o valor de  $T_R$  é nulo para qualquer potencia de entrada, ou seja, nada é transmitido e todo o feixe é refletido. Por essa razão o interferômetro Sagnac é conhecido como espelho de fibra não-linear.

Para o desenvolvimento da simulação computacional foi implementado um interferômetro Sagnac no OptiSystem. Para montá-lo, foi necessário escolher na biblioteca do software os dispositivos: laser CW; acoplador bidirecional; fibra bidirecional; fonte óptica nula e medidor de potência óptica. Os parâmetros de cada dispositivo foram configurados de acordo com a simulação. Neste caso, o valor do comprimento da fibra foi ajustado para 100m, os parâmetros de dispersão foram desabilitados, foram habilitados os efeitos não-lineares SPM e XPM e o coeficiente de não

linearidade  $\gamma$  foi ajustado para  $10(\text{W.km})^{-1}$ . O laser foi configurado para emitir um feixe CW com comprimento de onda de 1550nm e ter sua potência variando linearmente deste 1W até 100W.

A partir disso, o OptiSystem fornece os valores da potência transmitida para cada valor da potência de entrada. Esses dados foram comparados com os resultados analíticos, obtidos a partir da equação (14), no gráfico da figura 1.

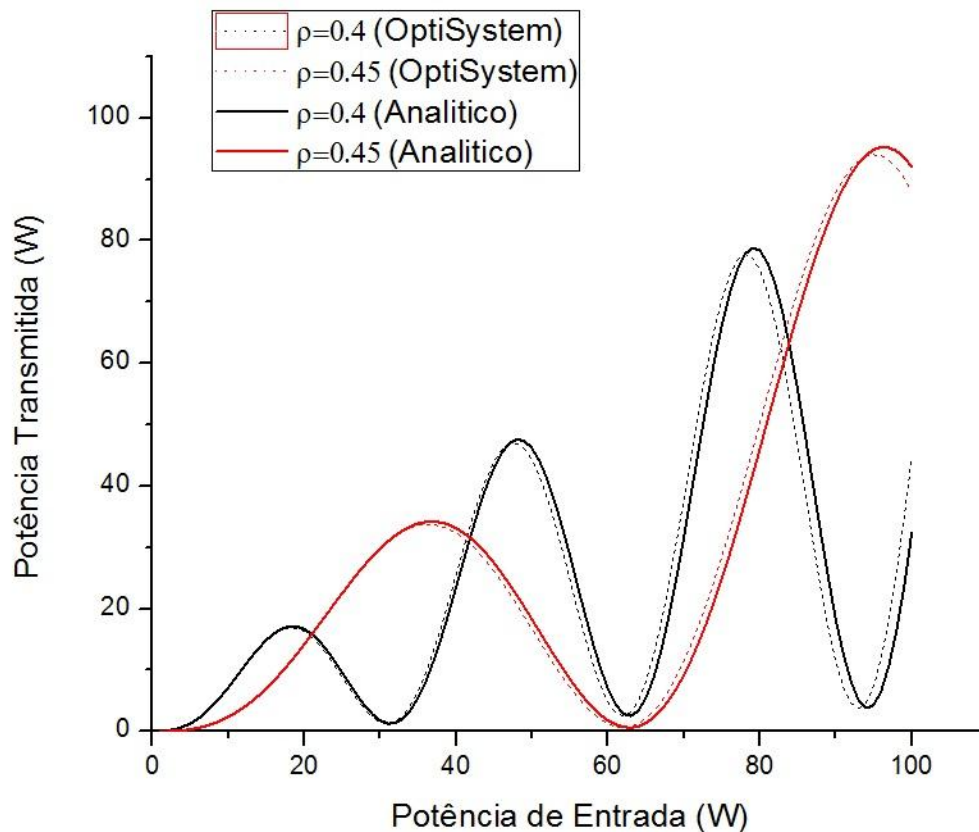


Fig1: Gráfico comparativo entre as potências transmitidas (analítica x numérica).

## CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi possível constatar que o interferômetro Sagnac sob a ação de efeitos não lineares de SPM (Auto modulação de fase) e XPM (Modulação de fase cruzada) simulado no software OptiSystem fornece resultados muito próximos dos que são obtidos analiticamente. Isso encoraja o estudo numérico de outros efeitos não-lineares no interferômetro Sagnac implementado pelo mesmo software, tais como: Self-steepening, espalhamentos Raman e Brillouin para a obtenção de outras aplicações para o Interferômetro Sagnac.

## AGRADECIMENTOS

A CAPES, ao CNPq, a FUNCAP e ao IFCE pelo financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGRAWAL, Govind. **Applications of nonlinear fiber optics**. Academic press, 2001.
- [2] AGRAWAL, Govind P. **Nonlinear fiber optics**. Academic press, 2007.
- [3] DORAN, N. J.; WOOD, David. Nonlinear-optical loop mirror. **Optics Letters**, v. 13, n. 1, p. 56-58, 1988.
- [4] FERREIRA, A. C. et al. Analysis of the nonlinear optical switching in a Sagnac interferometer with non-instantaneous Kerr effect. **Optics Communications**, v. 285, n. 6, p. 1408-1417, 2012.