



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus Experimental de São João da Boa Vista

PEDRO FERREIRA PINTO NETO

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PRÉ-ÊNFASE NO DESEMPENHO SISTÊMICO DE
UM AMPLIFICADOR ÓPTICO PARAMÉTRICO PROJETADO PARA UM GUIA DE
ONDA INTEGRADO DE TELURITO**

São João da Boa Vista - SP
2018

PEDRO FERREIRA PINTO NETO

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PRÉ-ÊNFASE NO DESEMPENHO SISTÊMICO DE
UM AMPLIFICADOR ÓPTICO PARAMÉTRICO PROJETADO PARA UM GUIA DE
ONDA INTEGRADO DE TELURITO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Campus Experimental de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

São João da Boa Vista - SP
2018

Pinto Neto, Pedro Ferreira

Impacto da utilização de pré-ênfase no desempenho sistêmico de um amplificador óptico paramétrico projetado para um guia de onda integrado de telurito / Pedro Ferreira Pinto Neto. -- São João da Boa Vista, 2018.

36 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

Bibliografia

1. Amplificadores óticos 2. Comunicações óticas 3. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PRÉ-ÊNFASE NO DESEMPENHO SISTÊMICO DE
UM AMPLIFICADOR ÓPTICO PARAMÉTRICO PROJETADO PARA UM GUIA DE
ONDA INTEGRADO DE TELURITO**

Aluno: Pedro Ferreira Pinto Neto

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

Banca Examinadora:

- Marcelo Luís Francisco Abbade (Orientador)
- Gilliard Nardel Malheiros Silveira (Examinador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 34/2018)

São João da Boa Vista, 19 de dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

PEDRO FERREIRA PINTO NETO

NASCIMENTO	23.03.1991 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Alcides Ferreira Pinto Roseti Moretti
2013/2018	Curso de Graduação – Engenharia de Telecomunicações Campus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"

Dedico este trabalho aos meus pais Alcides e Roseti, que sempre fizeram seu melhor para me garantir uma boa educação e uma boa formação e ao meu irmão Felipe, que sempre me aconselhou positivamente nas questões profissionais e pessoais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais Alcides e Roseti pelo apoio e incentivo que sempre me foi dado.

Ao meu irmão Felipe, que me acompanhou desde o dia da matrícula na universidade até este momento.

Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade que sempre me incentivou e aconselhou dando todo o suporte para a minha formação e a realização deste trabalho.

Ao meu professor, Prof. Dr. André Alves Ferreira que sempre me aconselhou e me fez acreditar no meu potencial.

À minha cunhada Lívia, que sempre me aconselhou com suas palavras e seu carinho.

À minha irmã Sandra, que me proporcionou o suporte para que fosse possível alcançar meu objetivo.

Ao meu cunhado Maurício, por ter me colocado em contato com a área de telecomunicações e pelas cervejas compartilhadas.

Aos meus irmãos Edison e Alcides, pelo carinho e atenção que sempre tiveram comigo desde a infância.

Às minhas cunhadas Luciana e Fátima, pelo cuidado e carinho que sempre tiveram comigo.

Aos meus sobrinhos Marlene, Daniel e Raphael, pelo carinho, atenção e infância compartilhada.

Aos meus irmãos da República Rancho 13, pelo acolhimento, carinho e vivências proporcionadas.

Aos meus amigos do MGL pelas madrugadas de estudo, pelos memes e pelo desespero compartilhado.

Ao meu grande amigo Toddy, pela amizade, atenção e carinho que sempre me deu.

Ao meu grande amigo Sou dado, pelas conversas produtivas da madrugada e pela ajuda que me deu neste trabalho.

As minhas amigas Leticia, Melissa e Jéssica, pelo carinho e ajuda que sempre me deram.

“A única certeza é que duvido, e se duvido eu penso, e se penso logo existo.”

René Descartes

RESUMO

Neste trabalho é avaliado, com o uso de simulações, o desempenho de um amplificador óptico paramétrico de duplo bombeio (*two pump optical parametric amplifier*, 2P-OPA) projetado utilizando um guia de onda de telurito e usando pré-ênfase de potência. O objetivo do trabalho é avaliar a aplicação de pré-ênfase de potência visando reduzir as variações das potências de saída do amplificador. As figuras de mérito utilizadas para comparar os desempenhos do 2P-OPA com e sem o uso de pré-ênfase são: a maior taxa de erro de bit (*bit error rate*, BER) atingida após cada passagem pelo amplificador e o máximo comprimento de um enlace óptico que utiliza este amplificador. A montagem dos arranjos de simulação é feita utilizando o software VPItransmissionMaker™. O primeiro arranjo é montado para reproduzir os resultados encontrados na literatura para 243 canais usando multiplexação em comprimento de onda (*wavelength division multiplexing*, WDM) modulados em chaveamento por deslocamento de fase e quadratura (*quadrature phase shift keying*, QPSK) em polarização única com taxa de 56 Gb/s para uma potência de entrada próxima de -29 dBm por canal. Para a aplicação de pré-ênfase é adicionado um bloco a esse arranjo que será responsável por aplicar a desqualização de potência. A pré-ênfase é feita para que os canais na saída do 2P-OPA tenham a potência próxima ao valor médio de potência de saída (-10,47 dBm) obtido para o caso sem o uso da técnica estudada. A BER de 13 canais, entre os 243 canais transmitidos, é estimada e comparada ao caso em que não se utiliza a pré-ênfase. É verificada uma redução da variação de potência de aproximadamente 2,8 dB. Apesar da redução alcançada, as curvas de BER para ambos os casos mantêm um comportamento semelhante. Pequenas variações na BER são obtidas devido à desqualização de 3,5 dB aplicada para tornar a potência de saída dos canais razoavelmente plana. As variações causam um aumento na maior BER atingida no décimo segundo amplificador. Esse aumento resulta em uma redução no comprimento máximo do enlace óptico de 1040 km para 960 km. Essa redução não permite o uso do perfil de pré-ênfase proposto.

PALAVRAS-CHAVE: 2P-OPA. Pré-ênfase. BER. Comunicações ópticas.

ABSTRACT

This work describes, by the use of simulations, the evaluation of performance of a two pump optical parametric amplifier (2P-OPA) designed on a tellurite waveguide using pre-emphasis power technique. The objective is to evaluate the application of the pre-emphasis power technique to minimize the power ripple at the output of the amplifier. The figures of merit used to compare the 2P-OPA performance without and with pre-emphasis are: the maximum bit error ratio (BER) achieved after each pass through the amplifier and the maximum optical span length that can be achieved when using this amplifier. The simulation software utilized is the VPItransmissionMaker™. The first setup analyzed is built to reproduce the results reported for 243 wavelength division multiplexing (WDM) signals quadrature phase shift keying (QPSK) modulated in single polarization with a 56 Gb/s bit rate for a -29 dBm input power per channel. The second setup includes the pre-emphasis onto the first setup with the addition of a block to unbalance the power signal. The pre-emphasis is made so the maximum power output per channel on the 2P-OPA is close to the average power output per channel (-10,47 dBm) when using the first setup. The BER of 13 channels, from the 243 transmitted channels, is estimated and compared to the case of the first setup. It's verified a decrease in the power variation of approximately 2,8 dB. Even with this decrease, the BER curves still have a similar behavior on both cases. Small BER variation is achieved because of the unbalancing of 3,5 dB used to make the power output per channel reasonably plane. The variation causes an increase of the maximum BER after the 12th amplifier. Consequently, this increase results in the reduction of the maximum optical span length from 1040 km to about 960 km. Unfortunately, this result do not support the use of pre-emphasis profile proposed.

KEYWORDS: 2P-OPA. Pre-emphasis. BER. Optical communications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dimensões (fora de escala) e geometria do guia de onda de telurito	23
Figura 2 – Curva de dispersão cromática do guia de onda para o modo TE fundamental.....	25
Figura 3 – Diagrama de blocos do arranjo de simulação sem o uso de pré-ênfase.....	28
Figura 4 – Diagrama de blocos do arranjo de simulação com o uso de pré-ênfase	29
Figura 5 – Espectro do sinal na saída do bloco Tx	30
Figura 6 – Espectro do sinal na saída do atenuador	31
Figura 7 – Espectro dos sinais na entrada e saída do amplificador.....	31
Figura 8 – Espectro dos sinais na entrada e saída do amplificador com pré-ênfase	32
Figura 9 – BER dos canais após cada passagem pelo 2P-OPA sem o uso de pré-ênfase	33
Figura 10 – BER dos canais após cada passagem pelo 2P-OPA com o uso de pré-ênfase	34
Figura 11 – Maior BER de cada passagem pelo 2P-OPA com e sem o uso de pré-ênfase	35
Figura 12 – Potências de pico dos 13 canais na entrada do 2P-OPA sem pré-ênfase.....	35
Figura 13 – Potências de ruído entre os 13 canais na entrada do 2P-OPA sem pré-ênfase	36

LISTA DE SÍMBOLOS

P_1	Potência de bombeio 1
P_2	Potência de bombeio 2
L	Comprimento do guia de onda
κ	Constante de propagação
$\Delta\beta$	Variação da constante de propagação
β_2	Dispersão de segunda ordem
β_4	Dispersão de quarta ordem
β_6	Dispersão de sexta ordem
ω_c	Média aritmética das frequências angulares dos bombeios
ω_1	Frequência angular do bombeio 1
ω_2	Frequência angular do bombeio 2
ω_s	Frequência angular do sinal
G_{max}	Ganho máximo teórico para um amplificador com baixas perdas
R	Raio interno do guia de onda
μm	Micrometros
c	Velocidade da luz no vácuo
λ	Comprimento de onda do sinal
D	Dispersão cromática
n_{eff}	Índice de refração efetivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
1.2	MOTIVAÇÃO.....	18
1.3	OBJETIVO	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARAMÉTRICOS DE DUPLO BOMBEIO.	
		20
3	GUIA DE ONDA DE TELURITO	23
4	ARRANJO DE SIMULAÇÃO	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao advento de novas aplicações da Internet, Internet das coisas (IoT) e vídeos em alta definição, alguns autores indicam que nos próximos dez anos haverá um aumento de 10 vezes na demanda do tráfego de dados que circulam nas redes de telecomunicações, tornando necessário aumentar a largura de banda disponível para estas redes (WINZER; NEILSON, 2017). As redes ópticas, inseridas no conjunto das redes de telecomunicações, são responsáveis por transportar os sinais ópticos que representam os dados anteriormente citados.

Neste contexto, existe a necessidade de aplicar soluções que possibilitem alcançar o aumento necessário da largura de banda nas redes ópticas. Para atingir esse aumento, algumas técnicas são propostas: i) o uso de redes elásticas (*elastic optical network*, EON) ii) a utilização de fibras ópticas com múltiplos núcleos ou múltiplos modos para multiplexação espacial (*space division multiplexing*, SDM) e iii) a utilização conjunta de EONs e SDM (WINZER; NEILSON, 2017). Entretanto o uso de EONs apresentaria a necessidade de substituição de alguns elementos das redes para a operação em uma grade flexível (WALDMAN, 2018). Para o uso de SDM haveria a necessidade da substituição das fibras de transmissão monomodo com núcleo único por fibras de transmissão com múltiplos núcleos (WINZER, 2016). As estratégias citadas implicariam em um alto custo para a implementação (WINZER; NEILSON, 2017) e atingiriam aproximadamente 30% do aumento requerido (JAIN et al., 2017 apud MARCONI et al., 2017b). Como opção para alcançar o aumento da largura de banda requerida pelas aplicações futuras e não necessitar de substituição da infraestrutura legada existe a alternativa de aumentar a largura de banda dos amplificadores ópticos (MARCONI et al., 2017b) para cobrir todo o espectro operacional da fibra óptica padrão limitado pelos valores altos de atenuação 1300-1650 nm (AGRAWAL, 2002). O desenvolvimento de um amplificador capaz de amplificar todo o espectro operacional da fibra óptica padrão seria um objetivo muito ousado, então a ideia é desenvolver amplificadores com a banda de amplificação ajustável e projetar cada um desses amplificadores para prover ganho em uma determinada região da banda e utilizar esses elementos em conjunto (MARCONI et al., 2017a).

Atualmente dois tipos de amplificadores são os mais utilizados em redes WDM: amplificadores a fibra dopada com érbio (*erbium doped fiber amplifiers*, EDFAs) e amplificadores Raman distribuídos (*distributed Raman amplifiers*, DRAs) (AGRAWAL,

2002). Os EDFAs são amplificadores que utilizam a fibra dopada com érbio como meio de ganho e têm como princípio de funcionamento o fenômeno de emissão estimulada (GILES; DESURVIRE, 1991). Estes amplificadores apresentam um bom ganho (10 – 30 dB), boa figura de ruído (4 – 6 dB) e podem ser usados em diferentes pontos de um enlace óptico seja como *booster*, amplificador de linha e pré-amplificador, mas amplificam, convencionalmente, apenas sinais na banda C (1530 – 1565 nm) o que equivale a uma largura de banda de aproximadamente 35 nm (DESURVIRE, 1994). Os DRAs utilizam a fibra de transmissão como meio de ganho e têm como princípio de funcionamento o espalhamento Raman estimulado (*stimulated Raman scattering*, SRS). Por se tratar de um dispositivo de amplificação distribuída, este tipo de amplificador apresenta menores ganho e figura de ruído em comparação com os EDFAs (HEADLEY; AGRAWAL, 2005). Os DRAs apresentam uma largura de banda de amplificação menor que 40 nm para cada bombeio e possibilitam a sintonização desta largura de banda em diversos comprimentos de onda (PELOUCH, 2015). Apesar das características positivas, anteriormente citadas, estes amplificadores possuem uma baixa conversão de potência de bombeio em ganho para os sinais e uma forte dependência entre o ganho e as propriedades da fibra de transmissão utilizada, podendo causar variações na eficiência de ganho (HEADLEY; AGRAWAL, 2005).

Para isso atingir o aumento de banda requerido é necessário que os amplificadores possibilitem o ajuste de suas bandas de amplificação (MARCONI et al., 2017a). Além dos amplificadores Raman outro tipo de amplificador óptico apresenta esta característica: os amplificadores ópticos paramétricos (*optical parametric amplifiers*, OPAs) (LIMPERT et al., 2005). Os OPAs são amplificadores que utilizam um meio não-linear de ganho e têm como princípio de funcionamento a mistura de quatro ondas (*four wave mixing*, FWM) (CALLEGARI; BOGGIO; FRAGNITO, 2004). Este tipo de amplificador apresenta um ganho razoável (16 dB) e pode ser projetado para trabalhar em várias larguras de banda (BOGGIO et al., 2007). Existem amplificadores ópticos paramétricos a fibra (*fiber optical parametric amplifiers*, FOPAs) que utilizam as fibras ópticas como meio de ganho. Os FOPAs podem utilizar uma (*one pump*, 1P-FOPA) ou duas (*two pump*, 2P-FOPA) fontes de bombeio. Entretanto os 1P-FOPAs comprometem a uniformidade do ganho ao longo da banda o que não ocorre com os 2P-FOPAs (BOGGIO et al., 2007). Apesar de apresentar uma maior uniformidade de ganho os 2P-FOPAs têm uma forte dependência com o comprimento de onda de dispersão nula da fibra utilizada (YAMAN et al., 2004) e apresentam efeitos deletérios causados pelo espalhamento Brillouin estimulado (*stimulated Brillouin scattering*, SBS) (CALLEGARI; BOGGIO; FRAGNITO, 2004) excitado pelas altas potências dos

bombeios injetados na fibra óptica (AGRAWAL, 2002), necessitando de outros dispositivos para mitigar este fenômeno indesejável (CALLEGARI; BOGGIO; FRAGNITO, 2004). Uma solução encontrada para diminuir a influência do SBS, sem a necessidade de dispositivos adicionais, é a utilização de guias de onda como meio de ganho para os OPAs (FOSTER et al., 2006).

Um 2P-OPA que utiliza um guia de onda de telurito em sua construção foi proposto em (MARCONI et al., 2017b) e é interessante devido à sua largura de banda de amplificação (aproximadamente 102 nm), ao seu bom ganho (18 dB), à sua baixa variação de ganho (3,5 dB) e às suas dimensões (2,5 mm² de área ocupada). Alguns trabalhos já foram realizados avaliando o desempenho sistêmico do 2P-OPA (MARCONI et al., 2017a) e (MARCONI et al., 2017b). Em uma primeira abordagem utilizou-se um valor de potência fixa (-19 dBm) para 243 canais WDM modulados em QPSK na entrada do amplificador. Entre esses canais analisou-se o número de passagens a que 13 canais, poderiam ser submetidos sem ultrapassar o limite da BER antes da aplicação de correção antecipada de erros (*forward error correction*, FEC) (NELSON et al., 2012 apud MARCONI et al., 2017a). Após a análise da BER, estimou-se o comprimento de um enlace óptico que utilizasse este amplificador (MARCONI et al., 2017b). Em uma segunda abordagem variaram-se as potências de 243 canais WDM modulados em QPSK na entrada do amplificador mantendo-se, todos os canais equalizados. A finalidade da variação de potência foi encontrar um nível ótimo de potência que proporcionasse um aumento no número de passagens destes canais pelo amplificador, sem ultrapassar o limite da BER Pre-FEC (1×10^{-2}) (NELSON et al., 2012 apud MARCONI et al., 2017a). Posteriormente estimou-se o comprimento de um enlace óptico que utilizasse este amplificador com o nível ótimo de potência de entrada (-29 dBm) e com os demais níveis (MARCONI et al., 2017a).

Neste trabalho de conclusão de curso é estudada, por meio de simulações, a equalização das potências de saída do amplificador com a utilização de pré-ênfase nas potências de entrada visando reduzir o *ripple* encontrado nos trabalhos realizados anteriormente. Para analisar o impacto e a possibilidade de aplicação desta técnica, as figuras de mérito utilizadas são a maior BER após cada passagem pelo amplificador e o máximo alcance atingindo.

1.2. MOTIVAÇÃO

Em sistemas de telecomunicações, uma estratégia utilizada para tornar o perfil espectral de potência plano na saída de um sistema que causa uma desigualização, é a utilização de pré-ênfase. A pré-ênfase consiste em aplicar algum elemento que cause, intencionalmente, uma desigualização espectral nos sinais que irão se propagar pelo sistema, para que após a aplicação da desigualização do sistema, o perfil espectral de potência na saída seja plano (LATHI; DING, 2009). Como o 2P-OPA construído utilizando guia de onda de telurito apresenta uma variação nas potências de saída (MARCONI et al., 2017a) e (MARCONI et al., 2017b), propõe-se avaliar a possibilidade de reduzir esta variação com a utilização de pré-ênfase de potência na entrada do amplificador.

1.3. OBJETIVO

Neste trabalho o objetivo é analisar, por meio de simulações, a utilização de pré-ênfase no 2P-OPA proposto em (MARCONI et al., 2017b). As figuras de mérito utilizadas para quantificar o impacto da utilização de pré-ênfase são o máximo alcance atingido e a maior BER atingida após cada passagem pelo 2P-OPA em comparação com os resultados encontrados em (MARCONI et al., 2017b) e (MARCONI et al., 2017a).

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso é apresentado em cinco capítulos. O primeiro capítulo descreve de maneira simplificada o equacionamento matemático do ganho dos amplificadores ópticos de duplo bombeio.

O segundo capítulo explica o projeto das dimensões, geometria e propriedades físicas do guia de onda desenvolvido para a construção do amplificador óptico paramétrico de duplo bombeio estudado neste trabalho.

No terceiro capítulo são mostrados os arranjos de simulação montados no *software* VPItransmissionMakerTM para simular o comportamento e desempenho do amplificador óptico paramétrico de duplo bombeio para os casos com e sem o uso de pré-ênfase nas potências de entrada do amplificador.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com os arranjos explicados no terceiro capítulo. Além disso, são discutidas as diferenças entre os valores de BER atingidos para os casos com e sem a pré-ênfase.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais. Neste capítulo são explicitados os resultados positivos e negativos obtidos no trabalho e são feitas propostas para trabalhos futuros.

2 AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARAMÉTRICOS DE DUPLO BOMBEIO

Neste capítulo é mostrado o equacionamento matemático simplificado do ganho dos amplificadores ópticos paramétricos de duplo bombeio. Primeiramente apresentam-se as equações relacionadas ao ganho dos 2P-OPAs. Posteriormente considera-se uma condição de ganho máximo para os amplificadores deste tipo. Por último calcula-se uma equação do ganho máximo teórico para os 2P-OPAs com baixas perdas.

A partir das equações de propagação de ondas eletromagnéticas é possível definir o ganho aproximado dos 2P-OPAs com baixas perdas (MARCONI et al., 2017b) pela equação:

$$G = 1 + \left(\frac{x_0 \sinh x}{x} \right)^2 \quad (1)$$

com

$$x = x_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa}{4\gamma\sqrt{P_1 P_2}} \right)^2} \quad (2)$$

Em (2) γ é o coeficiente não linear do guia de onda utilizado e x_0 :

$$x_0 = 2\gamma\sqrt{P_1 P_2}L \quad (2a)$$

Em que P_1 e P_2 são as potências dos bombeios e L é o comprimento do guia de onda. Além de γ , x_0 , P_1 e P_2 tem-se a constante de propagação κ :

$$\kappa = \Delta\beta + \gamma(P_1 + P_2), \quad (2b)$$

A variação $\Delta\beta$ é aproximada em torno de ω_c por:

$$\Delta\beta = \beta_2(\omega_c)[\Delta\omega_s^2 - \Delta\omega_p^2] + \frac{\beta_4}{12}(\omega_c)[\Delta\omega_s^4 - \Delta\omega_p^4] + \frac{\beta_6}{360}(\omega_c)[\Delta\omega_s^6 - \Delta\omega_p^6] + \dots, \quad (2c)$$

em que β_2 , β_4 e β_6 são os coeficientes das dispersões de segunda, quarta e sexta, respectivamente, ordem na frequência ω_c igual a:

$$\omega_c = \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2}, \quad \omega_2 > \omega_1 \quad (2d)$$

Em (2c) $\Delta\omega_s$ é calculado por:

$$\Delta\omega_s = \omega_s - \omega_c \quad (2e)$$

sendo ω_s a frequência angular do sinal. Ainda em (2c), $\Delta\omega_p$ é calculado por:

$$\Delta\omega_p = \omega_1 - \omega_c \quad (2f)$$

com ω_1 igual à frequência angular do bombeio.

A partir de (1) e (2) observa-se que o ganho será maximizado para o caso em que o valor de κ aproxima-se de zero (MARCONI et al., 2017b). A observação desta condição evidencia o casamento de fase, condição necessária para que ocorra a amplificação paramétrica (HANSRYD et al., 2002). Com a redução do valor de κ o termo que se encontra dentro da raiz quadrada de (1), que expressa a redução de ganho devida ao descasamento de fase entre os sinais e o bombeio, diminui e consequentemente o ganho é maximizado. Supondo-se κ igual a zero tem-se:

$$x = x_0 \quad (3)$$

e

$$x_0 = \gamma \sqrt{P_1 P_2} L, \quad (4)$$

Substituindo-se x_0 em (1) obtém-se o ganho máximo teórico para um 2P-OPA com baixas perdas dado por:

$$G_{max} = 1 + [\sinh(\gamma \sqrt{P_1 P_2} L)]^2 \quad (5)$$

O ganho dos amplificadores ópticos paramétricos é gerado pelo FWM . Por isso no comprimento de onda de dispersão nula do guia de onda utilizado o ganho será maximizado (YAMAN et al., 2004). Além da forte dependência entre o ganho e o comprimento de onda de dispersão nula, os 2P-OPAs replicam os sinais amplificados em outros comprimentos de onda. Estes sinais replicados são chamados de *idlers* (BAUMGARTNER ; BYER, 1979). Por este motivo para amplificar uma banda larga, é aconselhável posicionar os bombeios nos extremos de uma banda maior que contenha a banda dos sinais a serem amplificados e a banda dos *idlers* gerados após a amplificação (MARCONI et al., 2017b).

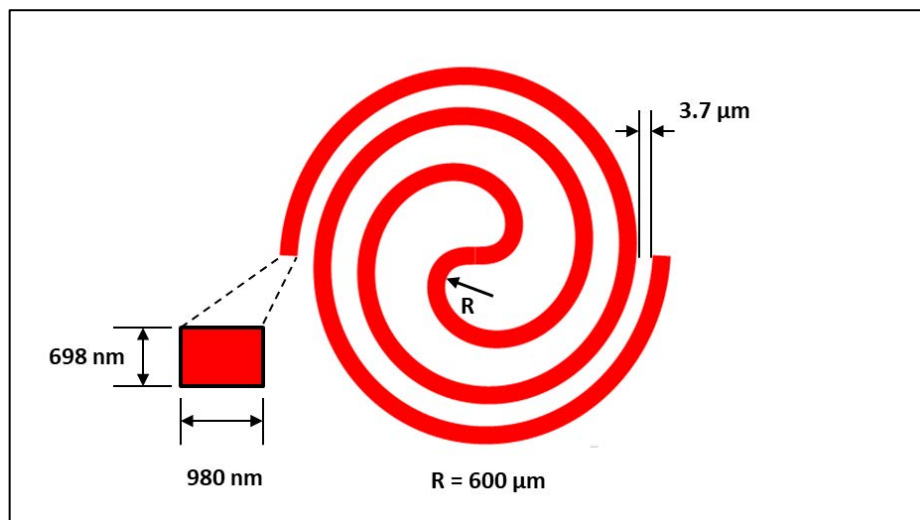
3 GUIA DE ONDA DE TELURITO

Neste capítulo é, brevemente, explicado o projeto do guia de onda proposto em (MARCONI et al., 2017b) e utilizado como meio de ganho para o 2P-OPA estudado neste trabalho. Inicialmente são descritas as dimensões da seção transversal e a geometria escolhida para o guia de onda. Posteriormente é discutido o projeto das características de dispersão cromática e perda de confinamento. Por último são feitas considerações para garantir apenas a excitação do modo de propagação que atende aos requisitos de dispersão cromática.

As dimensões e geometria do guia de onda são mostradas na Figura 1. A largura (980 nm) e a altura (698 nm) da seção transversal do guia de onda foram projetadas para permitir um comprimento de onda de dispersão nula próximo a 1550 nm. Para reduzir a área ocupada pelo guia de onda utilizou-se a geometria de uma espiral de Arquimedes. Além das características citadas anteriormente, algumas observações e estudos foram necessários para que outras propriedades físicas do guia de onda possibilitassem atingir ganho em uma banda larga de operação.

O ganho dos 2P-OPAs tem uma forte dependência com o comprimento de onda de dispersão nula do guia de onda utilizado como meio de ganho. Para que o amplificador tivesse sua banda de amplificação na região de 1550 nm projetaram-se as características físicas do guia de onda que possibilitou atingir tal requisito.

Figura 1 – Dimensões (fora de escala) e geometria do guia de onda de telurito



Fonte: Autor

Para o cálculo do parâmetro de dispersão cromática, analisou-se o índice de refração de uma amostra de telurito (com concentração de 71% TeO_2 - 22,5% WO_3 - 5% NaO - 1,5% Nb_2O_5 em mol). Com o uso de métodos numéricos, realizou-se um ajuste nos dados do índice de refração medidos com a equação de Sellmeier usando o método dos mínimos quadrados e posteriormente estimaram-se as equações para o índice de refração do núcleo de telurito e da casca de sílica do guia de onda. Com a utilização do *software* COMSOL Multiphysics, calculou-se o índice de refração efetivo do guia de onda. Para o levantamento da curva de dispersão cromática (D) do guia de onda, utilizaram-se as relações entre o índice de refração efetivo (n_{eff}) e a dispersão cromática (AGRAWAL G. P., 2002). As relações são:

$$D = \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) \beta_2 \quad (6)$$

em que

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (7)$$

e

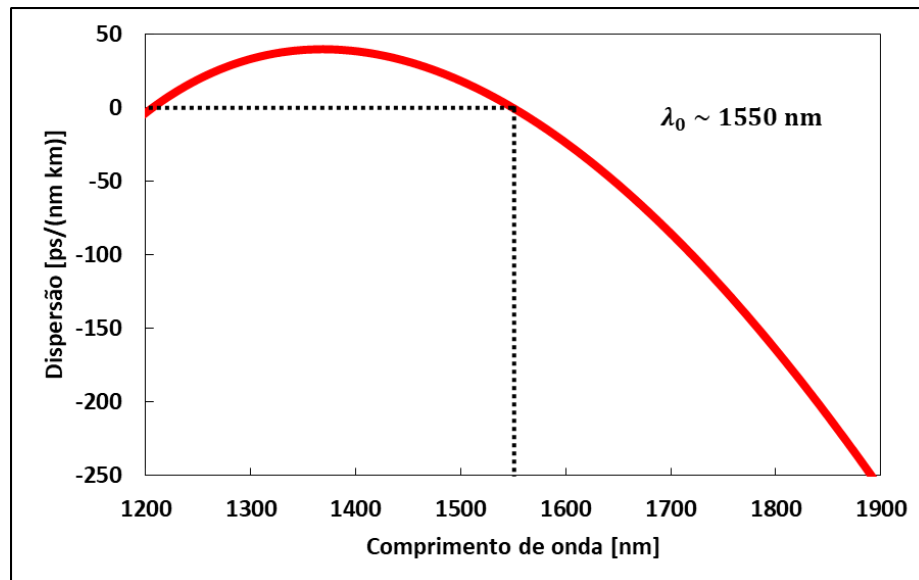
$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) n_{\text{eff}} \quad (8)$$

Para o cálculo das perdas relativas ao confinamento deste guia de onda utilizaram-se técnicas semelhantes às empregadas para a estimativa do índice de refração efetivo. Para a banda considerada obtiveram-se perdas de confinamento menores que 0.6 dB/m. Durante o cálculo das perdas de confinamento, notou-se que a luz não se mantinha confinada no núcleo do guia de onda para valores de raios interno (R) menores que 70 μm , tornando-se necessário limitar este parâmetro. Após o cálculo das curvas de dispersão e perda de confinamento, realizou-se uma variação no valor do raio interno. A variação foi realizada para encontrar um valor de raio interno que possibilitasse, conjuntamente, a aproximação do comprimento de onda de dispersão nula a 1550 nm e permitisse o confinamento da luz no núcleo do guia de onda. Para um $R \geq 500 \mu\text{m}$ atingiram-se as duas condições necessárias encontradas anteriormente.

O guia de onda estudado permite a propagação do modo transversal elétrico (TE) fundamental, modo transversal magnético (TM) fundamental e a excitação de modos TE de ordem mais alta ordem. Apesar de possibilitar a propagação destes modos, apenas o modo TE fundamental atende às necessidades de um comprimento de onda de dispersão nula próximo a 1550 nm. Por isto, nos trabalhos citados e neste trabalho de conclusão de curso, utiliza-se apenas o modo TE fundamental. Para isso considera-se que o sinal que se propaga no guia passou por uma máscara de fase que seleciona apenas o modo TE fundamental. A curva de dispersão cromática para o modo TE fundamental e $R = 600$ é mostrada na Figura 2.

Outra característica do guia de onda é o acoplamento de energia entre voltas adjacentes da espiral. Para mitigar este acoplamento, dimensionou-se o espaçamento entre estas voltas em função do comprimento total. Posteriormente analisou-se o espaçamento entre voltas adjacentes do guia de onda em função do nível de acoplamento. Utilizou-se de algumas considerações e extrapolações reduzindo-se o nível de acoplamento entre voltas adjacentes para -35 dB. Para atingir o nível de acoplamento citado, utilizou-se um espaçamento entre voltas adjacentes de 3,7 μm . Com isso garantiu-se apenas a propagação do modo TE fundamental com um baixo acoplamento de energia entre voltas adjacentes do guia de onda.

Figura 2 – Curva de dispersão cromática do guia de onda para o modo TE fundamental



Fonte: Autor

Com as etapas do projeto explicadas neste capítulo, propôs-se um guia de onda com um alto índice de refração não linear igual a $5 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ e um alto coeficiente não linear igual a $3000 (\text{W.km})^{-1}$. Para atingir os valores citados necessitou-se de 25 cm do guia de onda, com o objetivo de reduzir a área ocupada distribui-se o comprimento total de 25 cm em 55 voltas, ocupando uma área de $2,5 \text{ mm}^2$. Além da pequena área ocupada pelo guia de onda atingiu-se uma pequena seção transversal igual a $0,7 \text{ } \mu\text{m}^2$.

4 ARRANJO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo são explicados os arranjos montados no *software* de simulação VPItransmissionMaker com o intuito de analisar o impacto do uso de pré-ênfase no desempenho do 2P-OPA citado anteriormente. Primeiramente é apresentado e explicado o diagrama de blocos do sistema sem o uso de pré-ênfase de potência na entrada do amplificador. Posteriormente é mostrado e explicado o diagrama de blocos do sistema com o uso de pré-ênfase de potência na entrada do amplificador.

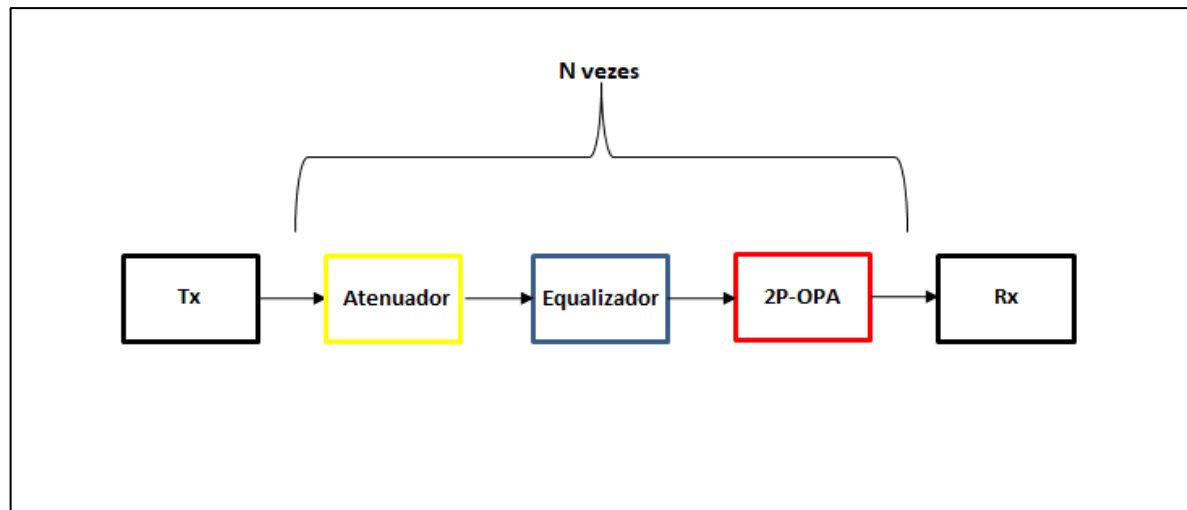
Para facilitar a explicação dividiram-se os arranjos em alguns blocos. Na Figura 3 é mostrado o diagrama de blocos do arranjo sem o uso de pré-ênfase. Para simular a propagação do sinal pelos N amplificadores, a saída da primeira passagem é inserida na entrada da segunda e segue-se o mesmo procedimento para as passagens posteriores.

Na primeira passagem utiliza-se o bloco Tx para a geração de 243 canais WDM modulados em QPSK com taxa de 56 Gb/s em polarização única. As frequências das respectivas portadoras são espaçadas em 50 GHz em um intervalo que vai de 182,00 até 194,05 THz. Cada canal transmite uma sequência de bits pseudoaleatória (*pseudo-random bit sequence*, PRBS) com comprimento de $2^{12} - 1$ bits. Para as passagens posteriores utiliza-se a saída da passagem anterior como entrada.

O segundo bloco mostrado na figura 3 é o atenuador. Este bloco representa a atenuação referente aos 80 km de fibra óptica entre os 2P-OPAs. Como o foco dos trabalhos realizados anteriormente e deste trabalho de conclusão de é a análise do desempenho do 2P-OPA, não são consideradas as não linearidades da fibra óptica entre os amplificadores. Considera-se uma atenuação de 0.18 dB/km para todos os canais.

O terceiro bloco é o equalizador. Neste bloco realiza-se a equalização dos canais entre as passagens pelo amplificador. Como o sinal que sai do amplificador possui uma desequalização seria conveniente garantir que na próxima passagem o sinal que entra no próximo amplificador tenha um perfil espectral razoavelmente plano com as potências de pico próximas ao valor de potência considerado (-29 dBm).

Figura 3 – Diagrama de blocos do arranjo de simulação sem o uso de pré-ênfase



Fonte: Autor

O quarto bloco é o 2P-OPA. Neste bloco consideram-se as características físicas do guia de onda explicadas no Capítulo 2, como a curva de dispersão cromática, o comprimento (25 cm), as perdas de confinamento (0,6 dB/m) e o índice de refração não linear ($5 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$). Além dos parâmetros relacionados ao guia de onda, inserem-se as fontes de bombeio do amplificador. Para este trabalho de conclusão de curso e os trabalhos citados anteriormente, consideram-se duas fontes com aproximadamente 33 dBm de potência de pico com os comprimentos de onda localizados em 1411,65 e 1687,7 nm.

Tabela 1 – Numeração dos canais com suas respectivas portadoras

Frequência (THz)	Número do canal
182,40	1
183,40	2
184,40	3
185,40	4
186,40	5
187,40	6
188,40	7
189,40	8
190,45	9
191,40	10
192,40	11
193,05	12
194,05	13

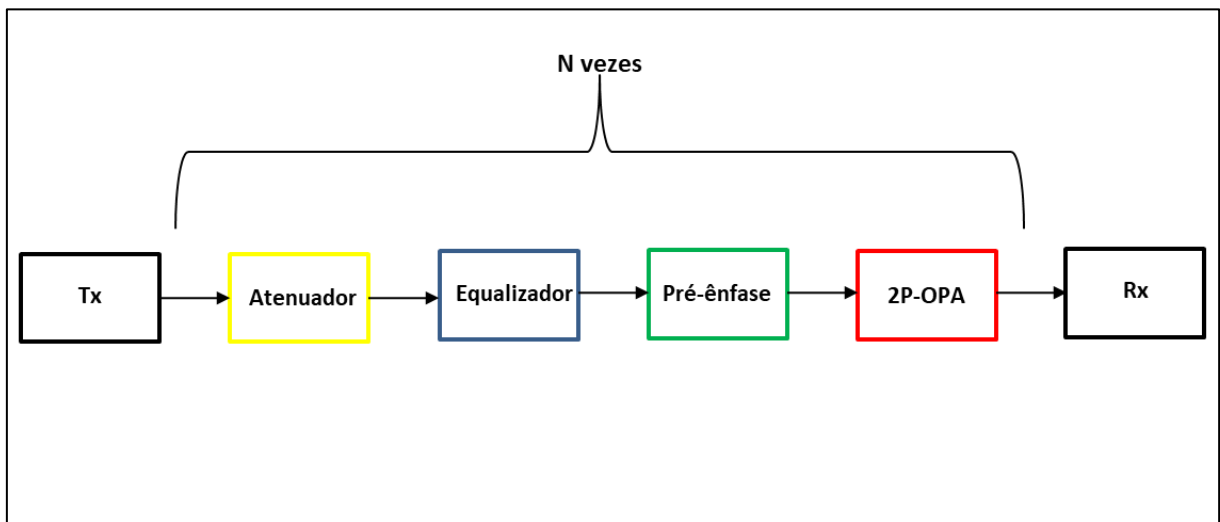
Fonte: Autor

Para medir a BER após cada passagem pelo amplificador, utiliza-se o bloco Rx que faz a detecção coerente de 13 canais entre os 243 canais transmitidos e faz a comparação entre a taxa de erro de símbolo (*symbol error rate*, SER) dos sinais de entrada e saída do amplificador. Como a modulação utilizada foi QPSK cada símbolo possui dois bits e por isso para encontrar a BER é necessário dividir a SER por dois. Para facilitar a comparação dos resultados, associou-se a frequência de cada um dos 13 canais analisados a um número. A Tabela 1 mostra a numeração dos canais.

Para analisar o impacto da pré-ênfase no desempenho do 2P-OPA, utilizou-se um segundo arranjo. O segundo arranjo é idêntico ao primeiro com a exceção de bloco de pré-ênfase que aplica a desqualização teórica, necessária para tornar o perfil espectral da potência de saída plano. O segundo arranjo é apresentado na Figura 4.

Para o cálculo dos coeficientes do bloco de pré-ênfase encontrou-se a potência média de saída do amplificador (-10,47 dBm). Posteriormente subtraíram-se os valores de potência de saída de cada canal do valor de potência média de saída do amplificador e utilizaram-se os valores originados pela subtração como os coeficientes do bloco de pré-ênfase.

Figura 4 – Diagrama de blocos do arranjo de simulação com o uso de pré-ênfase



Fonte: Autor

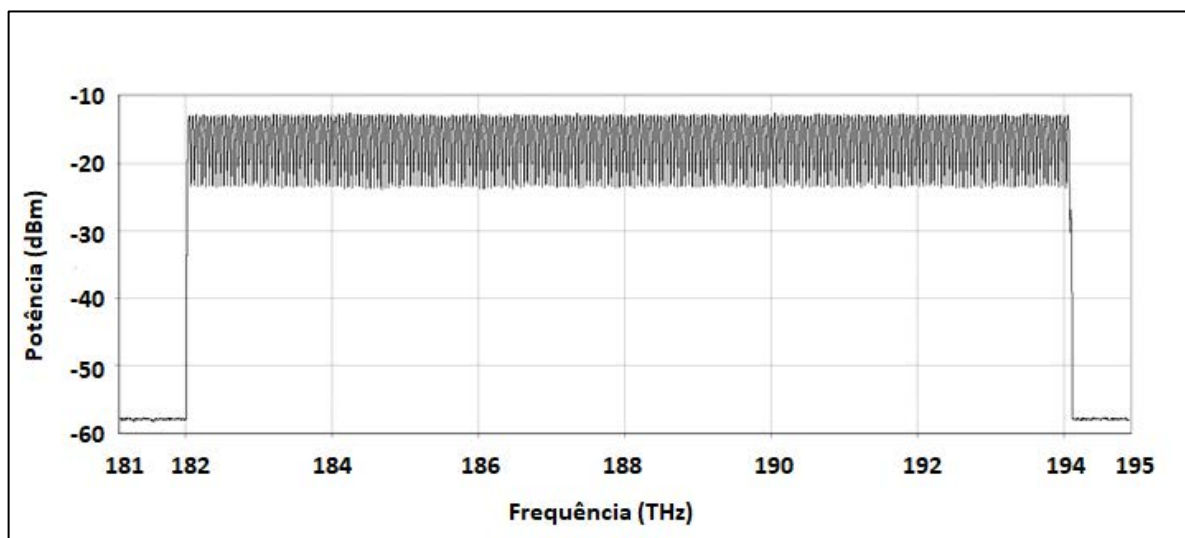
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e discutidos os resultados obtidos com a utilização dos arranjos explicados no Capítulo 4. Inicialmente são apresentados os espectros de cada bloco dos arranjos com e sem o uso de pré-ênfase de potência. Posteriormente são exibidos e analisados os gráficos com os valores de BER dos 13 canais analisados para os casos com e sem o uso de pré-ênfase. Com o objetivo de compilar os resultados mais relevantes é exposto o gráfico comparativo do maior valor de BER atingido entre os 13 canais em função do número de passagens pelo 2P-OPA. Por último estima-se o comprimento de um enlace óptico que poderia usar o amplificador com o uso de pré-ênfase e compara-se o resultado obtido com os resultados sem pré-ênfase encontrados na literatura.

O espectro do sinal na saída do bloco Tx é mostrado na Figura 5. Na Figura 6 é mostrado o espectro do sinal de saída do bloco atenuador para o segundo amplificador ($N = 2$).

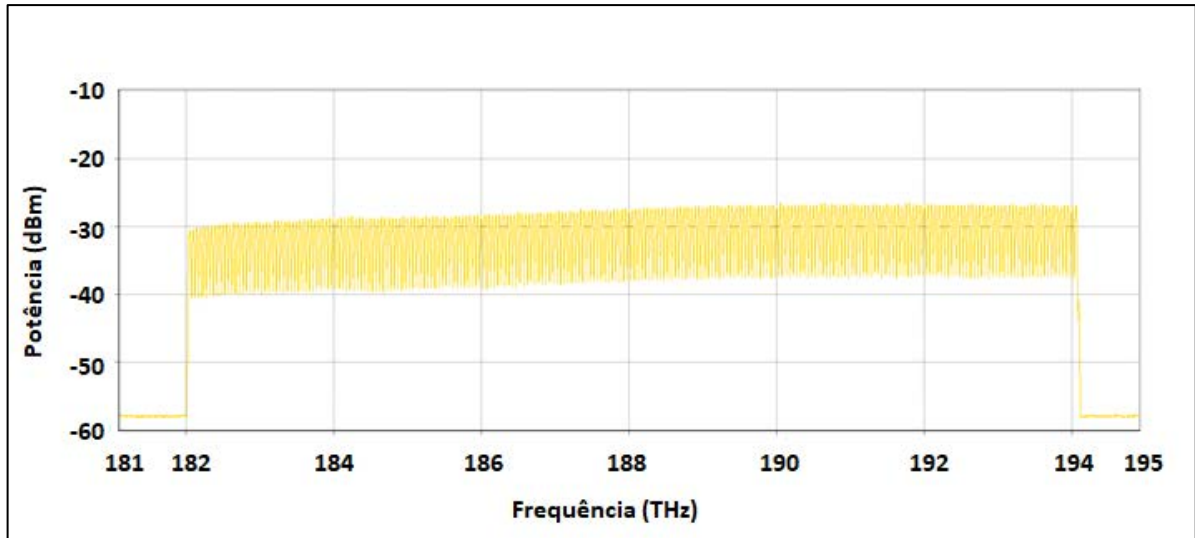
Após a aplicação da atenuação o sinal passa pelo bloco equalizador e têm suas potências de pico equalizadas para valores próximos de -29 dBm por canal. O sinal razoavelmente equalizado propaga-se pelo amplificador e recebe um ganho de aproximadamente 19 dB com um *ripple* das potências de saída de aproximadamente 3,5 dB. Na Figura 7 são apresentados os espectros dos sinais de entrada (saída do equalizador) e de saída do segundo ($N = 2$) 2P-OPA.

Figura 5 – Espectro do sinal na saída do bloco Tx



Fonte: Autor

Figura 6 – Espectro do sinal na saída do atenuador

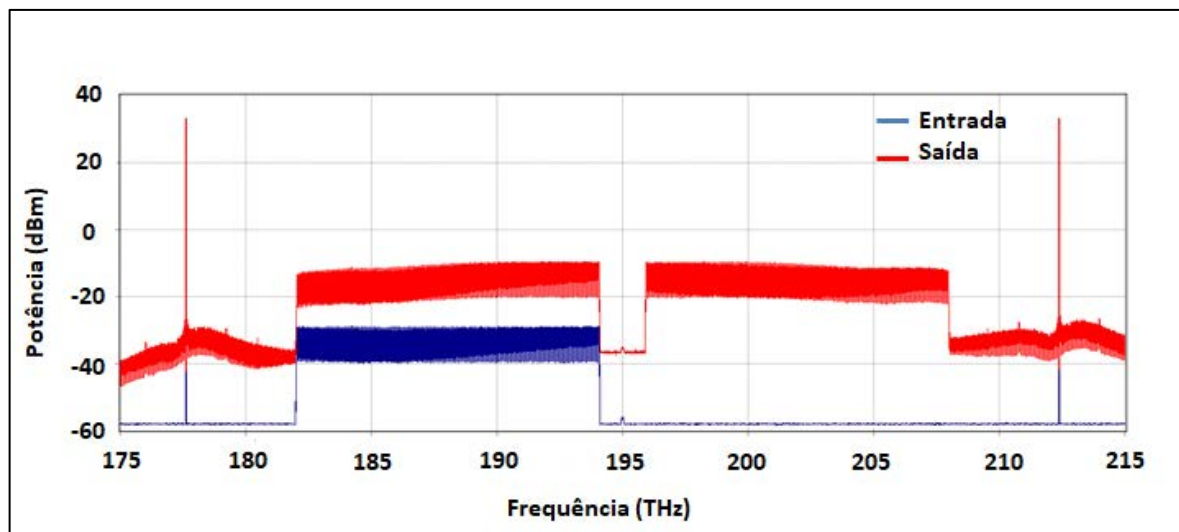


Fonte: Autor

Para a aplicação da pré-ênfase inseriu-se no arranjo de simulação um bloco entre o equalizador e o 2P-OPA. O sinal recebeu intencionalmente uma desqualificação de aproximadamente 3,5 dB. O ganho do amplificador manteve-se próximo aos 19 dB anteriormente obtidos e reduziu-se a variação de potência de saída para 0,7 dB. Os espectros dos sinais de entrada (saída do bloco de pré-ênfase) e de saída do segundo ($N = 2$) 2P-OPA são expostos na Figura 8.

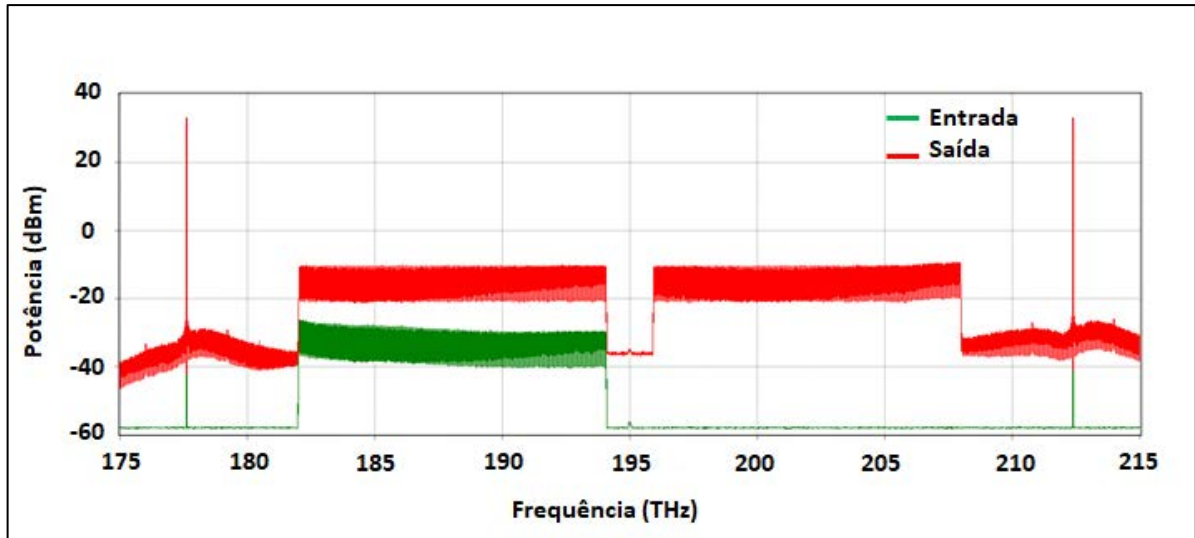
Após cada passagem pelo amplificador, utilizou-se o bloco Rx para estimar a BER de cada um dos 13 canais escolhidos entre os 243 canais. Para as situações com e sem o uso de pré-ênfase, seguiu-se o mesmo procedimento.

Figura 7 – Espectro dos sinais na entrada e saída do amplificador sem pré-ênfase



Fonte: Autor

Figura 8 – Espectro dos sinais na entrada e saída do amplificador com pré-ênfase

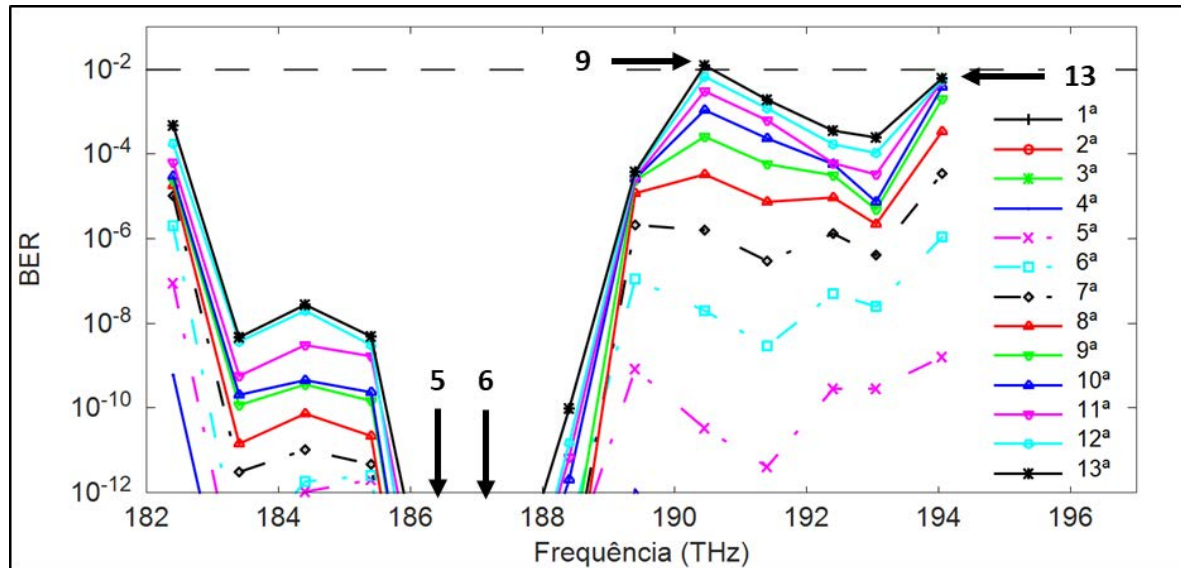


Fonte: Autor

Para comparar o desempenho do 2P-OPA com e sem o uso de pré-ênfase reproduziram-se, utilizando o arranjo explicado no Capítulo 4 e ilustrado na Figura 3, as curvas relativas às treze passagens para a potência de entrada igual a - 29 dBm, citadas em (MARCONI et al., 2017a). As curvas são mostradas na Figura 9.

Uma diferença de três ordens de grandeza entre os valores de BER para a potência de entrada igual a -24 dBm é relatada em (MARCONI et al., 2017a). Nas curvas da Figura 9 nota-se uma diferença entre os valores de BER dos canais 5 e 6 e os valores da BER dos canais 9 e 13. Uma possível explicação para as diferenças obtidas entre os valores de BER do começo e final da banda é a equalização realizada antes da entrada de cada amplificador. O objetivo da equalização é tornar os canais razoavelmente planos na entrada do 2P-OPA. Como os canais na saída do amplificador possuem uma desequalização existe uma degradação imposta pelo equalizador aos canais com potências de saída mais distantes do valor médio de potência de saída. Os canais 5 e 6 e as três primeiras passagens obtiveram valores ainda menores de BER. Mas estes valores são menores que a mínima BER confiável (10^{-12}) que pode ser estimada para o número de bits ($2^{12}-1$ bits) simulados e por isso não são apresentados no gráfico. Além dos valores baixos de BER, os canais 5 e 6 obtiveram valores de BER que diminuíram entre passagens posteriores.

Figura 9 – BER dos canais após cada passagem pelo 2P-OPA sem o uso de pré-ênfase



Fonte: Autor

Para simular o 2P-OPA com o uso de pré-ênfase utilizou-se o arranjo explicado no Capítulo 4 e exposto na Figura 4. As curvas de BER obtidas para o caso com o uso de pré-ênfase são apresentadas na Figura 10.

As curvas da Figura 10 têm um comportamento semelhante ao encontrado nas curvas da Figura 9. Os canais 5 e 6 e as duas primeiras passagens apresentaram valores ainda menores de BER que não são mostrados devido aos motivos discutidos anteriormente. Os valores de BER dos canais de 1 a 4 apresentam uma redução marginal em detrimento do aumento marginal dos valores de BER dos canais 8 a 11. Como a desigualização aplicada no sinal de entrada do amplificador elevou as potências dos primeiros canais e reduziu a potência dos últimos é coerente que os valores de BER apresentem o comportamento citado. No estudo realizado em (MARCONI et al., 2017a) notou-se que as variações de potência próximas a 5 dB na região de -29 dBm, causavam uma variação nos valores de BER. Como a pré-ênfase aplicada apresenta uma variação de aproximadamente 3,5 dB em torno de -29 dBm é plausível que a variação das potências cause esta variação marginal entre os valores de BER.

Para reunir os dados mais relevantes da análise realizada neste trabalho de conclusão de curso, os valores da maior BER atingida em função do número da passagem pelo amplificador foram organizados em um gráfico. O gráfico é ilustrado na Figura 11.

A partir do gráfico da Figura 11, observa-se um comportamento similar entre as duas curvas. As diferenças entre os valores de BER mantiveram-se marginais na maior parte das passagens. Apesar do comportamento equivalente para o caso com aplicação de pré-ênfase

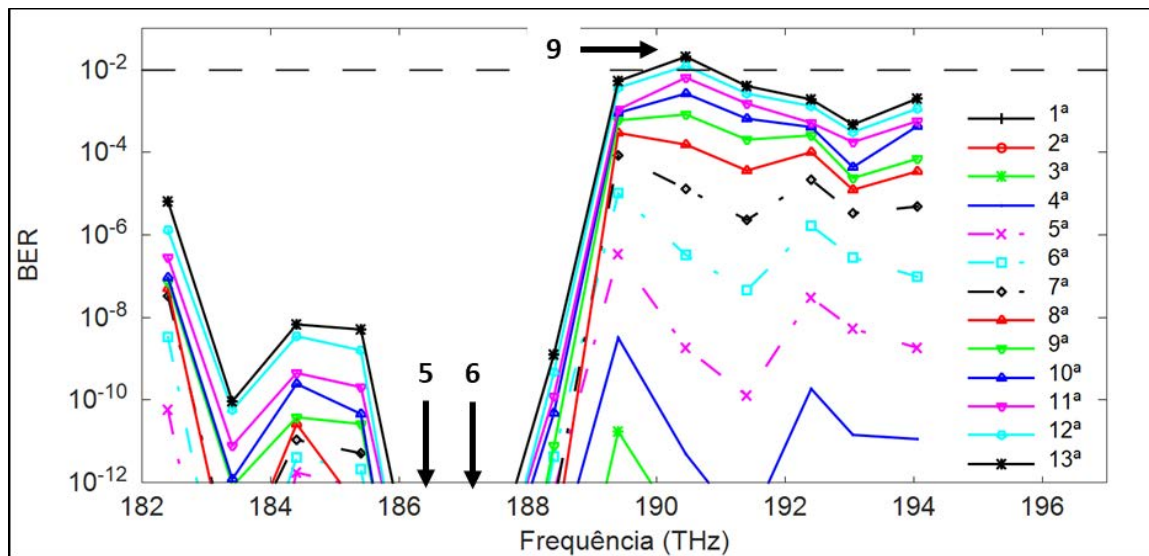
obteve-se um valor de maior BER próximo a BER Pre-FEC com uma passagem a menos em comparação com o caso sem a aplicação de pré-ênfase.

Para reunir os dados mais relevantes da análise realizada neste trabalho de conclusão de curso, os valores da maior BER atingida em função do número da passagem pelo amplificador foram organizados em um gráfico. O gráfico é ilustrado na Figura 11.

Para reunir os dados mais relevantes da análise realizada neste trabalho de conclusão de curso, os valores da maior BER atingida em função do número da passagem pelo amplificador foram organizados em um gráfico. O gráfico é ilustrado na Figura 11.

A partir do gráfico da Figura 11, observa-se um comportamento similar entre as duas curvas. As diferenças entre os valores de BER mantiveram-se marginais na maior parte das passagens. Apesar do comportamento equivalente para o caso com aplicação de pré-ênfase obteve-se um valor de maior BER próximo a BER Pre-FEC com uma passagem a menos em comparação com o caso sem a aplicação de pré-ênfase.

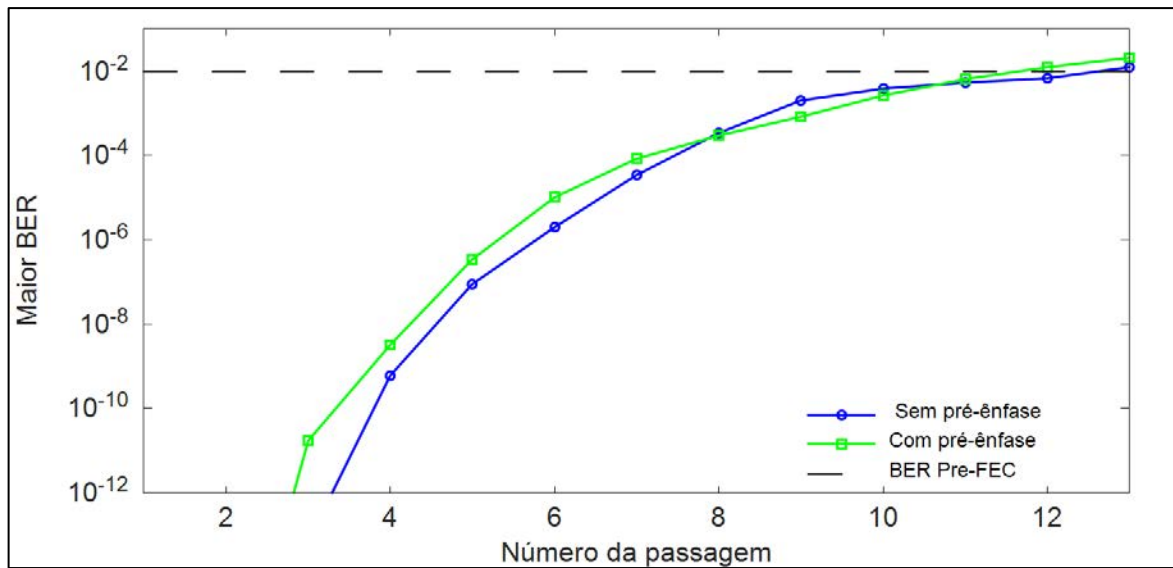
Figura 10 – BER dos canais após cada passagem pelo 2P-OPA com o uso de pré-ênfase



Fonte: Autor

Para estimar o comprimento do enlace que poderia utilizar este amplificador considera-se que são compensadas as atenuações relativas aos 80 km de fibra óptica. No caso em que utilizou-se a pré-ênfase na entrada do amplificador obteve-se um comprimento total igual 12 x 80 km, totalizando 960 km. Em comparação ao caso em que não se utiliza a pré-ênfase obteve-se um comprimento total igual a 1040 km. O aumento da BER para o caso com a utilização de pré-ênfase corresponde à penalidade de 7.69 % em termos de máximo comprimento atingido.

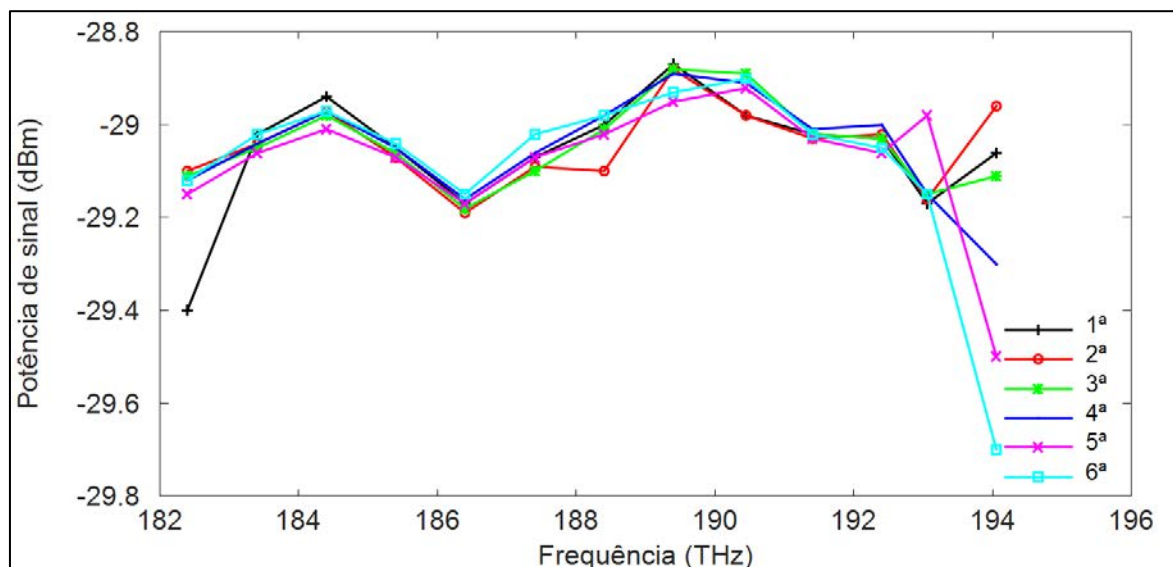
Figura 11 – Maior BER de cada passagem pelo 2P-OPA com e sem o uso de pré-ênfase



Fonte: Autor

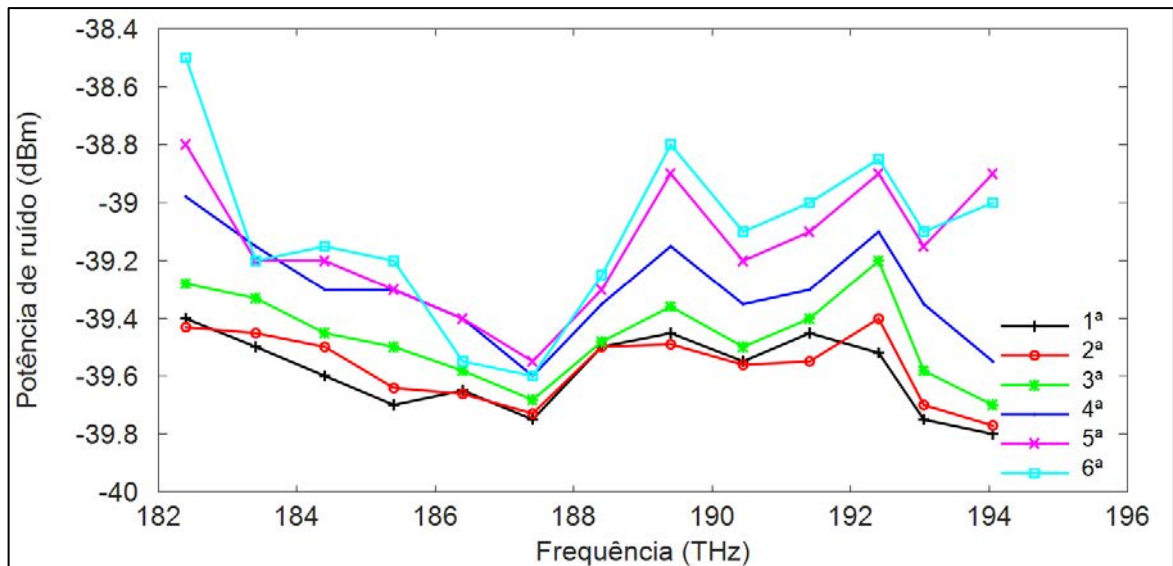
Para investigar as diferenças entre os valores de BER obtidos tanto para o caso sem aplicação de pré-ênfase quanto para o caso com a aplicação de pré-ênfase mediram-se as potências de pico dos 13 canais na entrada do 2P-OPA sem a aplicação de pré-ênfase para as 6 primeiras passagens. A Figura 12 mostra as curvas de potência encontradas. As diferenças entre os valores de potência de pico dos canais não justificam a diferença encontrada nos valores de BER.

Figura 12 – Potências de pico dos 13 canais na entrada do 2P-OPA sem pré-ênfase



Fonte: Autor

Figura 13 – Potências de ruído entre os 13 canais na entrada do 2P-OPA sem pré-ênfase



Fonte: Autor

Como a análise dos valores de potência de pico dos 13 canais na entrada do amplificador foi inconclusiva partiu-se para a análise das potências de ruído entre os 13 canais na entrada do 2P-OPA sem aplicação de pré-ênfase para as 6 primeiras passagens. As curvas com os valores das potências de ruído entre os canais são ilustradas na Figura 13. Nas curvas de potência do ruído observa-se um formato similar ao encontrado nas curvas da Figura 9. O comportamento citado pode ser uma explicação para as diferenças encontradas para os valores de BER dos canais 5 e 6 e os demais canais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso realizou-se um estudo, utilizando o *software* VPItransmissionMakerTM, do impacto da utilização de pré-ênfase em um 2P-OPA construído com guia de onda de telurito. O estudo teve como objetivo investigar se a utilização de pré-ênfase seria uma solução possível para reduzir as variações nas potências de saída do amplificador. Com a utilização de pré-ênfase de potência na entrada do amplificador reduziu-se a variação das potências de saída em 2,8 dB. Apesar de uma redução significativa na diferença entre os valores de potência de saída do 2P-OPA, os valores de BER obtidos para o caso com a utilização de pré-ênfase demonstraram uma baixa variação em relação aos valores de BER obtidos sem a utilização da técnica proposta. O comportamento que não possibilita a aplicação do perfil de pré-ênfase, proposto neste trabalho, está relacionado ao aumento marginal da BER na décima segunda passagem pelo amplificador implicando em uma redução de 80 km do máximo alcance atingido (1040 km) para o caso sem aplicação de pré-ênfase.

Como uma sugestão para trabalhos futuros propõe-se a avaliação de uma pré-ênfase com menor desqualização de entrada que a empregada neste trabalho de conclusão de curso (3,5 dB) o a aplicação de de-ênfase que pudessem garantir, simultaneamente, um comportamento similar ao sem aplicação das técnicas e uma menor variação entre as potências na saída do 2P-OPA. Outra sugestão é pesquisar métodos computacionais, como algoritmos genéticos ou inteligência artificial que possam ser aplicados para reduzir as variações nas potências de saída e, pelo menos, manter o alcance máximo obtido para o caso sem a aplicação de pré-ênfase.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL G. P. **Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition**. 3^a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. v. 6
- BAUMGARTNER, RICHARD A. ; BYER, R. L. Optical Parametric Amplification. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, [s. l.], v. QE-15, n. 6, p. 432–444, 1979.
- BOGGIO, J. M. C.; MARCONI, J. D.; BICKHAM, S. R.; FRAGNITO, H. L. Spectrally flat and broadband double- pumped fiber optical parametric amplifiers. **Opt. Express**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 1532–1539, 2007.
- CALLEGARI, F. A.; BOGGIO, J. M. C.; FRAGNITO, H. L. Spurious Four-Wave Mixing in Two-Pump Fiber-Optic Parametric Amplifiers. **IEEE Photonics Technology Letters**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 434–436, 2004.
- CLIFFORD HEADLEY; G. P. AGRAWAL. **Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems**. [s.l.] : Elsevier Inc, 2005.
- DESURVIRE, E. **Erbium – doped fiber amplifiers: principles and applications**. Canada.
- FOSTER, M. A.; TURNER, A. C.; SHARPING, J. E.; SCHMIDT, B. S.; LIPSON, M.; GAETA, A. L. Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip. **Nature**, [s. l.], v. 441, n. June, p. 10–13, 2006.
- GILES, C. R.; DESURVIRE, E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. **Journal of Lightwave Technology**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 271–283, 1991.
- HANSRYD, J.; ANDREKSON, P. A. P. A.; WESTLUND, M.; JIE LI; HEDEKVIST, P.-O. P. O.; LI, J.; HEDEKVIST, P.-O. P. O. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 506–520, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1016354/>>
- JAIN, S.; CASTRO, C.; JUNG, Y.; HAYES, J.; SANDOGHCHI, R.; MIZUNO, T.; SASAKI, Y.; AMMA, Y.; MIYAMOTO, Y.; BOHN, M.; PULVERER, K.; NOORUZZAMAN, M.; MORIOKA, T.; ALAM, S.; RICHARDSON, D. J. 32-Core Erbium/Ytterbium-Doped Multicore Fiber Amplifier for Next Generation Space-Division Multiplexed Transmission System. **Optics Express**, [s. l.], v. 25, n. 26, p. 32887, 2017. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-25-26-32887>>
- LATHI, B P; DING, Z. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. New York: Oxford University Press, 2009.
- LIMPERT, J.; AGUERGARAY, C.; MONTANT, S.; PETIT, S.; DESCAMPS, D.; CORMIER, E.; SALIN, F. Ultra-broad bandwidth parametric amplification at degeneracy. **Opt. Express**, [s. l.], v. 13, n. 19, p. 2423–2428, 2005.

MARCONI, J. D.; ABBADE, M. L. F.; FAGOTTO, E. A. D. M.; SERPA-IMBETT, C. M.; NETO, P. F. P.; ALDAYA, I. Network performance of optical parametric amplifiers based on tellurite waveguides. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS 2017a, **Anais...** [s.l: s.n.]

MARCONI, J. D.; ABBADE, M. L. F.; SERPA-IMBETT, C. M.; FAGOTTO, E. A. M. Ultra-broadband two-pump optical parametric amplifier in tellurite waveguides with engineered dispersion. **Opt. Express**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 4268–4283, 2017. b. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-25-4-4268>>

NELSON, L. E.; ZHANG, G.; BIRK, M.; SKOLNICK, C.; ISAAC, R.; PAN, Y.; RASMUSSEN, C.; PENDOCK, G.; MIKKELSEN, B. A Robust Real-Time 100G Transceiver With Soft-Decision Forward Error Correction [Invited]. **Journal of Optical Communications and Networking**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. B131, 2012. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-4-11-B131>>

PELOUCH, W. Raman Amplification: an Enabling Technology for High-Capacity, Long-Haul Transmission [Tutorial]. **Ofc**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 6–19, 2015.

WALDMAN, H. The Impending Optical Network Capacity Crunch. In: SBFOTON CONFERENCE 2018, **Anais...** [s.l: s.n.]

WINZER, P. J. From first fibers to mode-division multiplexing. **CHINESE OPTICS LETTERS**, [s. l.], v. 14, n. 12, p. 10–14, 2016.

WINZER, P. J.; NEILSON, D. T. From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade. **Journal of Lightwave Technology**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1099–1115, 2017.

YAMAN, F.; LIN, Q.; RADIC, S.; AGRAWAL, G. P. Impact of Dispersion Fluctuations on Dual-Pump Fiber-Optic Parametric Amplifiers. **IEEE Photonics Technology Letters**, [s. l.], v. 16, n. June, p. 1292–1294, 2004.