



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Felipe Caio Nunes de Oliveira Lima

**ACOP-MB: UMA ABORDAGEM PARA MAXIMIZAR A QUALIDADE DE
TRANSMISSÃO ÓPTICA EM CENÁRIO MULTIBANDA S + C + L USANDO
ALGORITMO BIOINSPIRADO**

Recife

2025

Felipe Caio Nunes de Oliveira Lima

**ACOP-MB: UMA ABORDAGEM PARA MAXIMIZAR A QUALIDADE DE
TRANSMISSÃO ÓPTICA EM CENÁRIO MULTIBANDA S + C + L USANDO
ALGORITMO BIOINSPIRADO**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Erick de Andrade Barboza.

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Lima, Felipe Caio Nunes de Oliveira.

ACOP-MB: uma abordagem para maximizar a qualidade de transmissão óptica em cenário multibanda S + C + L usando algoritmo bioinspirado / Felipe Caio Nunes de Oliveira Lima. - Recife, 2025.

111 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação: Joaquim Ferreira Martins Filho.

Coorientação: Erick de Andrade Barboza.

Inclui referências.

1. Amplificadores ópticos; 2. ACOP; 3. Otimização multibanda. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira. II. Barboza, Erick de Andrade. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Felipe Caio Nunes de Oliveira Lima

**ACOP-MB: UMA ABORDAGEM PARA MAXIMIZAR A QUALIDADE DE
TRANSMISSÃO ÓPTICA EM CENÁRIO MULTIBANDA S + C + L USANDO
ALGORITMO BIOINSPIRADO**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Aprovada em: 25/06/2025

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho. (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Darli Augusto de Arruda Mello (Examinador Externo)
Universidade de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco - UPE

Dr. Rafael Carvalho Figueiredo (Examinador Externo)
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações - CPQD

Dedico este trabalho a José Aloísio Nunes de Lima, meu amado e saudoso pai, cuja memória e ensinamentos sempre me inspiram, e à minha filha, Ayla Beatriz, que trouxe ainda mais luz e alegria para nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Início expressando minha profunda gratidão aos meus pais, cujo apoio incondicional e dedicação foram fundamentais para minha trajetória acadêmica. À minha mãe, que sempre torceu pelo meu êxito e me apoiou em todos os instantes dessa jornada. Em especial, ao meu pai, que, mesmo não estando mais presente, sempre cultivou em nosso cotidiano o valor da pesquisa e do conhecimento. Tenho a certeza de que, onde quer que esteja, compartilha da minha alegria e realização neste momento.

Expresso minha sincera gratidão aos meus professores orientadores, cujo apoio foi essencial para a realização desta pesquisa. Em especial, ao meu orientador, Professor Joaquim Ferreira Martins Filho, maior referência em comunicações ópticas em Pernambuco, cuja vasta experiência de mais de 30 anos foi fundamental para nortear este trabalho e impulsionar seu desenvolvimento. Agradeço também ao meu coorientador, Professor Erick de Andrade Barboza, pelo acompanhamento próximo, inúmeros suportes, reuniões e pelas contribuições valiosas que fortaleceram o progresso da pesquisa. Minha gratidão se estende aos professores do grupo de pesquisa, Professores Carmelo Bastos Filho, Leonardo Didier e Raul Camelo, cujas aulas, correções e sugestões foram indispensáveis ao longo do doutorado.

Expresso minha gratidão aos meus irmãos, Bernardo e Anastássia, companheiros de jornada acadêmica, pelo apoio mútuo ao longo desse percurso. E, com especial carinho, agradeço à minha esposa, Dhaffny, por seu apoio incondicional e pelas inúmeras renúncias feitas para que eu pudesse concluir este trabalho. Seu suporte foi essencial em cada etapa dessa trajetória.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro e por ter sido a agência de fomento responsável pelo custeio do meu doutorado. Expresso também minha gratidão ao CPQD e à PADTEC pelo fornecimento das máscaras de potência dos amplificadores EDFA da banda C, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

As redes ópticas são, atualmente, a única tecnologia capaz de suportar o crescimento exponencial da demanda por tráfego de dados no cenário global. Diante desse desafio, diversas pesquisas têm sido conduzidas para aprimorar a eficiência da transmissão e explorar alternativas que possibilitem o aumento da capacidade de tráfego sem a necessidade de expansão da infraestrutura física. A expansão do uso de bandas adjacentes à banda C, como as bandas L e S, surge como uma estratégia viável para aumentar a capacidade da rede sem a necessidade de novos investimentos em infraestrutura. No entanto, a aplicação dessas bandas exige um controle refinado da amplificação óptica para garantir um desempenho eficiente. Uma abordagem promissora nesse contexto é o Adaptive Control of Operating Point (ACOP), um conjunto de técnicas que visa ajustar dinamicamente o ponto de operação dos amplificadores ópticos presentes na rede. Essas técnicas têm como objetivo melhorar o desempenho da transmissão, o que pode ser alcançado por meio da otimização de métricas essenciais, como o GSNR (Generalized Signal-to-Noise Ratio), a taxa de transmissão, o tilt e o ripple. Nesta tese, é proposta uma técnica de otimização baseada em algoritmo genético para aprimorar o uso do ACOP nas bandas C, L e S do espectro óptico. Em um dos cenários de simulações apresentados, a abordagem proposta atingiu um GSNR de 14,55 dB em uma distância de 360 km, o que representa um ganho de aproximadamente 7 dB em relação à abordagem tradicional de compensação de perdas. Além disso, o ACOP-MB apresentou uma taxa de transmissão cerca de 32 Tb/s maior em comparação com a abordagem de compensação de perdas, no cenário estudado, demonstrando seu potencial para otimizar o desempenho de sistemas multibanda em redes ópticas avançadas. Adicionalmente, foram realizadas modificações significativas no GNPY, a fim de adaptá-lo a cenários de transmissão multibanda e incorporar o uso de máscaras de potência no processo de modelagem dos amplificadores. As contribuições desta pesquisa para a ciência e engenharia incluem o desenvolvimento de uma técnica inovadora de otimização, aplicada ao aprimoramento do desempenho do ACOP em sistemas ópticos multibanda. Esses avanços contribuem para a evolução das comunicações ópticas ao possibilitar a melhor utilização do espectro nas bandas C, L e S, promovendo maior capacidade e resiliência das infraestruturas de telecomunicações frente ao crescimento exponencial da demanda por dados.

Palavras-chave: Amplificadores Ópticos, ACOP, Otimização, Multibanda.

ABSTRACT

Optical networks are currently the only technology capable of supporting the exponential growth in demand for data traffic on the global stage. Faced with this challenge, several studies have been conducted to improve transmission efficiency and explore alternatives that enable increased traffic capacity without the need for physical infrastructure expansion. The expansion of the use of bands adjacent to the C band, such as the L and S bands, emerges as a viable strategy to increase network capacity without the need for new investments in infrastructure. However, the application of these bands requires refined control of optical amplification to ensure efficient performance. A promising approach in this context is Adaptive Control of Operating Point (ACOP), a set of techniques that aims to dynamically adjust the operating point of optical amplifiers in the network. These techniques aim to improve transmission performance, which can be achieved by optimizing essential metrics such as GSNR (Generalized Signal-to-Noise Ratio), transmission rate, tilt, and ripple. In this thesis, a genetic algorithm-based optimization technique is proposed to improve the use of ACOP in the C, L, and S bands of the optical spectrum. In one of the simulation scenarios presented, the proposed approach achieved a GSNR of 14.55 dB over a distance of 360 km, representing a gain of approximately 7 dB over the traditional loss compensation approach. In addition, ACOP-MB presented a transmission rate approximately 32 Tb/s higher compared to the loss compensation approach in the scenario studied, demonstrating its potential to optimize the performance of multiband systems in advanced optical networks. Significant modifications were also made to GNPpy in order to adapt it to multiband transmission scenarios and incorporate the use of power masks in the amplifier modeling process. The contributions of this research to science and engineering include the development of an innovative optimization technique applied to improving the performance of ACOP in multiband optical systems. These advances contribute to the evolution of optical communications by enabling better use of the spectrum in the C, L, and S bands, promoting greater capacity and resilience of telecommunications infrastructures in the face of exponential growth in data demand.

Keywords: Optical Networks, ACOP, Optimization, Multiband.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cenário com uma cascata de 4 amplificadores.	24
Figura 2 – Gráfico utilizado para representar a Máscara de Potência de um amplificador. Apresentado em (MOURA et al., 2012)	25
Figura 3 – Máscara de potência representando <i>ripple</i> de potência do EDFA comercial utilizado nas simulações da banda C (LIMA, 2021).	26
Figura 4 – Atenuação da Fibra e Bandas WDM. Apresentado em (GEOFF, 2021)	26
Figura 5 – Máscaras de potência apresentando <i>Ripple</i> (a) e figura de Ruído (c) de um amplificador comercial. Em (b) é mostrado o espaço de objetivos contendo os pontos referentes ao R_p e NF de acordo com o ganho selecionado. Em (d) o ganho de -19dBm apresentou o melhor valor <i>fitness</i> . Apresentado em (Barboza, 2017)	31
Figura 6 – Fluxograma apresentando o funcionamento da técnica AcCBR. Apresentado em (Barboza, 2017)	33
Figura 7 – <i>Backpropagation</i> no sentido direto e inverso. Adaptado de (Barboza, 2017).	34
Figura 8 – Configuração de enlace utilizado na técnica MOO com os VOAs após os amplificadores. Apresentado em (LIMA, 2021)	35
Figura 9 – Partícula representando a estrutura de um link com 4 amplificadores em cascata. Apresentado em (LIMA et al., 2020).	36
Figura 10 – Fluxograma apresentando o funcionamento do algoritmo de otimização PSO. Apresentado em (LIMA et al., 2020).	37
Figura 11 – Média da taxa de transmissão total obtida pelas técnicas ACOP anteriores e pela técnica proposta (PSO) após 20 execuções independentes, considerando enlaces ópticos com 5, 6, 7 e 8 amplificadores. Apresentado em (LIMA et al., 2020).	38
Figura 12 – Fluxograma de simulação de transmissão do GNPY após a inserção do modelo de máscara de potência.	40
Figura 13 – Curva DGT do EDFA da banda C utilizado nas simulações do GNPY.	42
Figura 14 – Curva representando a figura de ruído do EDFA da banda C utilizado nas simulações do GNPY.	42
Figura 15 – Máscara de potência representando <i>ripple</i> de potência e figura de ruído do EDFA comercial utilizado nas simulações da banda C.	43
Figura 16 – Comparação do espectro de potência do sinal obtido pelos métodos <i>Advanced Model</i> e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico	44
Figura 17 – Comparação da GSNR obtida pelos métodos <i>Advanced Model</i> e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico	44

Figura 18 – Comparação do espectro de potência do sinal obtido pelos métodos <i>Advanced Model</i> e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico .	45
Figura 19 – Comparação da GSNR obtida pelos métodos <i>Advanced Model</i> e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico	46
Figura 20 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador EDFA-L, modelo AMP-FL5001-LB-19, conforme especificado no datasheet do equipamento. Estas curvas delineiam os limites de operação do amplificador.	47
Figura 21 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador EDFA-L, modelo AMP-FL5001-LB-19, conforme as especificações do datasheet do equipamento. Essas curvas ilustram o desempenho do amplificador em relação ao ganho e à figura de ruído ao longo do espectro óptico em que o amplificador opera. .	48
Figura 22 – Curvas obtidas a partir da figura 21, que representam o comportamento do amplificador EDFA-L ao longo do espectro óptico em que ele opera. Com base nessas curvas, será realizado o processo de interpolação para determinar as curvas de operação do amplificador.	49
Figura 23 – Curvas de operação do EDFA-L obtidas por meio de interpolação linear a partir dos dados fornecidos no datasheet do fabricante (Figura 21).	50
Figura 24 – Máscaras de Potência do EDFA L.	50
Figura 25 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador TDFA, modelo AMP-FL8211-SB-20, conforme especificado no datasheet do equipamento. Estas curvas delineiam os limites de operação do amplificador.	51
Figura 26 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador TDFA, modelo AMP-FL8211-SB-20, conforme as especificações do datasheet do equipamento. Essas curvas ilustram o desempenho do amplificador em relação ao ganho e à figura de ruído ao longo do espectro óptico em que o amplificador opera. .	51
Figura 27 – Curvas de operação do TDFA obtidas por meio de interpolação linear a partir dos dados fornecidos no datasheet do fabricante (Figura 25)	52
Figura 28 – Máscaras de Potência do TDFA.	52
Figura 29 – Espalhamento da luz em um meio material. Adaptado de (LU et al., 2019). .	55
Figura 30 – Tipos de espalhamento da luz em um meio material. Adaptado de (LU et al., 2019).	55
Figura 31 – Processo de absorção e emissão de energia em um meio material submetido à incidência de um feixe eletromagnético. Adaptado de (LIMA, 2012). . . .	57
Figura 32 – Ganho Raman Normalizado para as Fibras SMF, DSF e DCF. Apresentado em (LIMA, 2012).	60
Figura 33 – Ganho Raman em 100nm. Adaptada de (PROCOPIO, 2007).	60
Figura 34 – Transferência de potência entre canais causada pelo efeito raman considerando transmissões em cenários multibanda. Adaptado de (HOSHIDA et al., 2022).	61

Figura 35 – Cenário utilizado para as simulações dos parâmetros utilizando a multibanda C + L + S: 396 canais lançados com potência de 0 dBm em um trecho de 90 km de fibra.	62
Figura 36 – Impacto do efeito Raman após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm	62
Figura 37 – Atenuação por comprimento de onda. Apresentado em (D’AMICO et al., 2022).	63
Figura 38 – Impacto da atenuação após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm. Curva azul apresenta um coeficiente de atenuação constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente de atenuação dependente do comprimento de onda.	64
Figura 39 – Dispersão Modal: Diferentes feixes percorrem trajetórias de comprimentos diferentes. Apresentado em (ABRAMCZYK, 2008).	65
Figura 40 – Contribuição da dispersão de guia de onda e dispersão do material em uma fibra monomodo padrão. Adaptada de(GOVIND, 2010).	66
Figura 41 – Impacto da dispersão após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm. Curva azul apresenta um coeficiente de dispersão constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente de dispersão dependente do comprimento de onda.	68
Figura 42 – Valores da área efetiva da fibra SMF utilizada na simulação. Curva azul apresenta um coeficiente não linear constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente não linear dependente do comprimento de onda.	70
Figura 43 – Valor de NLI considerando o valor de dispersão constante (curva azul) e o valor de dispersão variando por comprimento de onda (curva vermelha) . . .	73
Figura 44 – Valor de NLI considerando o valor de área efetiva constante (curva azul) e o valor de área efetiva variando por comprimento de onda (curva vermelha) . .	74
Figura 45 – Valor de NLI considerando o valor de área efetiva e dispersão constantes (curva azul) e o valor de área efetiva e dispersão variando por comprimento de onda (curva vermelha)	75
Figura 46 – Valores de NLI obtidos pelas técnicas GN Model e GGN Model, considerando um cenário com 8 canais lançados com uma potência de 0 dBm em um trecho de 110 km de fibra.	76
Figura 47 – Valores de NLI obtidos pelas técnicas GN Model e GGN Model, considerando um cenário com 396 canais lançados em um trecho de 50 km de fibra. Os canais da banda S foram lançados com -20 dBm e os canais das bandas C e L foram lançados com -16 dBm.	77

Figura 48 – Valores de NLI obtidos pelo GGN Model em dois cenários: a curva azul representa a abordagem com interpolação (9 canais), enquanto a curva laranja corresponde ao cálculo completo (160 canais).	78
Figura 49 – Setup experimental realizado para a transmissão de 396 canais nas bandas S, C e L. Apresentado em (ZHANG et al., 2023).	79
Figura 50 – Potência do sinal medida antes e após a transmissão multibanda no trecho de 50.3 km. Apresentado em (ZHANG et al., 2023).	79
Figura 51 – Resultado dos valores de potência obtidos através da simulação antes e após a transmissão no cenário multibanda.	80
Figura 52 – Fluxograma simplificado do processo de otimização ACOP-MB.	83
Figura 53 – Indivíduo utilizado no algoritmo genético. "n" representa o número de spans.	84
Figura 54 – Configuração dos amplificadores na transmissão multibanda.	85
Figura 55 – Análise de convergência para otimização com potência de lançamento de -10dBm por canal.	87
Figura 56 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	88
Figura 57 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	88
Figura 58 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	89
Figura 59 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	90
Figura 60 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	91
Figura 61 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 110 km.	91
Figura 62 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento = -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.	92
Figura 63 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento = -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.	92
Figura 64 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.	93
Figura 65 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.	93
Figura 66 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal e 4 spans de 90 km. A curva verde mostra um cenário sem interferência não linear (NLI).	95

Figura 67 – Espectro GSNR no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda S e uma potência de lançamento = -5 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda S otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda S quando a otimização é realizada em um contexto multibanda.	96
Figura 68 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda C e uma potência de lançamento = -2 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda C otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda C quando a otimização é realizada em um contexto multibanda.	97
Figura 69 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda L e uma potência de lançamento = -6 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda L otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda L quando a otimização é realizada em um contexto de várias bandas.	98
Figura 70 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, e considerando as bandas otimizadas individualmente e em multibanda. A curva azul representa as bandas S, C e L otimizadas individualmente e transmitidas simultaneamente. A curva laranja representa as bandas S, C e L otimizadas e transmitidas simultaneamente.	98
Figura 71 – Taxa de transmissão por canal considerando as técnicas ACOP-MB e LOSS COMP, e uma potência de lançamento de -10 dBm.	99
Figura 72 – Taxa de transmissão por canal considerando as técnicas ACOP-MB (GSNR) e ACOP-MB (Tx) e uma potência de lançamento de -10 dBm.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre Taxa de transmissão X OSNR. Adaptado de (Smith; Zhou, 2017).	36
Tabela 2 – Dados operacionais do EDFA-L	47
Tabela 3 – Dados operacionais do TDFA	49
Tabela 4 – Parâmetros do algoritmo genético utilizados no processo de otimização. . .	85
Tabela 5 – GSNR Mínimo obtido após a otimização, considerando diferentes potências de lançamento.	86
Tabela 6 – Resumo dos cenários apresentados. Valores de GNSR e ripple de potência obtidos no final do enlace dos cenários simulados para as potências de lançamento de 0 dBm e -10 dBm	90
Tabela 7 – Taxa de Transmissão x GSNR. Adaptado de (Smith; Zhou, 2017).	97
Tabela 8 – Taxa de transmissão por banda e total em Tb/s considerando as técnicas ACOP-MB, LOSS COMP e um cenário hipotético sem os efeitos não lineares.	99
Tabela 9 – Taxa de transmissão por banda e total em Tb/s, considerando as otimizações por banda e a otimização global.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACOP	<i>Adaptive Control of Operating Point</i>
ACOP-MB	<i>Adaptive Control of Operating Point - Multiband</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexer</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
GSNR	<i>Generalized Signal-to-Noise Ratio</i>
ISRS	<i>Inter-channel Stimulated Raman Scattering</i>
MCF	<i>Multi Core Fiber</i>
MMF	<i>Multi Mode Fiber</i>
NF	<i>Noise Figure</i>
NLI	<i>Non-Linear Impairments</i>
RCF	<i>Ring Core Fiber</i>
SDM	<i>Spatial Division Multiplexer</i>
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
TDFA	<i>Thulium-Doped Fiber Amplifier</i>
UWB	<i>Ultra Wide-Band</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexer</i>
RCF	<i>Ring Core Fiber</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Motivação e Objetivo Geral da Tese de Doutorado	27
1.3	Objetivos Específicos da Tese de Doutorado	28
1.4	Estrutura da Tese de Doutorado	29
2	CONTROLE ADAPTATIVO DO PONTO DE OPERAÇÃO - ACOP	30
2.1	AdGC - <i>Adaptive Gain Control</i>	30
2.2	AcCBR - Amplifier Cognitive Case-Based Reasoning	32
2.3	AsHB - Annealing Search Heuristic with Backpropagation	33
2.4	Multi-Objective Optimization ACOP	34
2.5	Particle Swarm Optimization ACOP	35
2.6	Considerações Finais - Capítulo 2	37
3	MODELAGEM DO AMPLIFICADOR POR MÁSCARAS DE POTÊNCIA NO GNPY	39
3.1	Modelagem dos amplificadores e Customização do GNPY	39
3.1.1	Comparação entre as abordagens <i>Advanced Model</i> e Máscaras de Potência.	43
3.2	Máscaras de Potência - Banda S e Banda L.	45
3.2.1	Modelagem Amplificador Banda L : EDFA-L	46
3.2.2	Modelagem Amplificador Banda S : TDFA	49
3.3	Considerações Finais - Capítulo 3	51
4	AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS RELEVANTES NA TRANSMISSÃO MULTIBANDA	54
4.1	O Efeito Raman e seu Impacto na Propagação Multibanda	54
4.1.1	Simulação do efeito Raman no GNPY	61
4.2	Atenuação na Fibra Óptica	63
4.2.1	Simulação da Atenuação no GNPY	64
4.3	Dispersão	65
4.3.1	Simulação da Dispersão no GNPY	67
4.4	Coeficiente Não Linear	68
4.4.1	Simulação da Área Efetiva no GNPY	69
4.5	NLI (Non-Linear Impairments) NA APLICAÇÃO MULTIBANDA	69
4.5.1	Simulação do NLI no GNPY	71

4.5.2	NLI GN x NLI GGN	74
4.5.3	Validação do Simulador	78
4.6	Considerações Finais - Capítulo 4	79
5	SIMULAÇÃO DE TRANSMISSÃO ÓPTICA NA MULTIBANDA S + C + L	82
5.1	ACOP-MB	82
5.2	Cenários de Simulação	84
5.3	Resultados	85
5.3.1	Quatro Spans com 110 km e Potência de Lançamento de 0 dBm por Canal	87
5.3.2	Quatro Spans com 110 km - Potência de Lançamento: -10 dBm por Canal	89
5.3.3	Quatro Spans com 90 km - Potência de Lançamento: -10 dBm por canal	89
5.3.4	O Impacto dos Efeitos Não Lineares	94
5.3.5	Otimização de Bandas Individuais e Otimização Multibanda	94
5.3.6	Otimização da Taxa de Transmissão	96
5.4	Considerações Finais - Capítulo 5	101
6	CONCLUSÕES	103
7	PUBLICAÇÕES	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O tráfego de dados no cenário global de comunicação cresceu de forma exponencial na última década, segundo um relatório publicado pela Cisco em (Cisco, 2018). O aumento do volume desses dados foi impulsionado pela integração de agentes inteligentes, que utilizam aprendizado de máquina e outras técnicas de inteligência artificial para processar e analisar a crescente quantidade de informações geradas por dispositivos digitais em nosso cotidiano. Um estudo conduzido pela IDC (*International Data Corporation*) revelou que o volume de dados digitais gerados globalmente, denominado *Datasphere*, apresentou um crescimento expressivo, passando de 33 zettabytes (ZB) em 2018 para uma projeção de 175 ZB em 2025 (Reinsel, David and Gantz John and John, Rydning , 2017).

A crescente demanda por tráfego de dados exige redes de comunicação mais eficientes e adaptáveis às constantes evoluções tecnológicas que impulsionam o aumento da capacidade de transmissão. As redes ópticas tradicionais, operando na banda C e utilizando multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) com modulação e detecção direta, alcançavam taxas de transmissão de até 10 Gb/s por canal. No entanto, com o advento das tecnologias coerentes e formatos de modulação avançados, as taxas de transmissão evoluíram significativamente, podendo atingir aproximadamente 1 Tb/s por canal. A introdução das tecnologias ópticas coerentes transformou radicalmente o cenário das comunicações ópticas, permitindo um aumento exponencial na capacidade de transmissão sem necessidade de mudanças estruturais na infraestrutura existente. Atualmente, transponders comerciais são capazes de transmitir até 38,4 Tb/s por fibra em sistemas WDM operando na banda C, representando um incremento de 38 vezes na capacidade de transmissão em relação às tecnologias anteriores (FERRARI et al., 2020b).

Os avanços recentes na capacidade de transmissão da fibra óptica monomodo estão se aproximando do limite teórico dos sistemas de transmissão óptica. Esse cenário levanta um desafio crítico para o setor: o conflito entre a limitação da capacidade da fibra e a crescente demanda por largura de banda, impulsionada pelo aumento exponencial do tráfego gerado pelos serviços de internet. Essa situação pode levar a uma crise de capacidade, exigindo novas estratégias para expandir a transmissão de dados. Duas abordagens vêm sendo amplamente estudadas na literatura para superar essa limitação: a multiplexação por divisão espacial (SDM – *Spatial Division Multiplexing*) e a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) em banda ultralarga (UWB – *Ultra Wide Band*). No caso da SDM, as soluções podem envolver a utilização de múltiplas fibras (MF – *Multi Fiber*) ou a implementação de fibras especiais, como fibra multicore (MCF – *Multi Core Fiber*), fibra de

poucos modos (FMF – *Few Mode Fiber*) e fibra de núcleo anelar (RCF – *Ring Core Fiber*). Essas tecnologias exploram diferentes graus de liberdade espacial e modal para viabilizar a multiplexação e aumentar a capacidade de transmissão. Por outro lado, a UWB WDM busca expandir a capacidade do sistema óptico ao utilizar um espectro mais amplo dentro da janela de baixa perda da fibra monomodo, abrangendo as bandas O, E, S, C, L e U. Essa abordagem permite um aproveitamento mais eficiente do espectro disponível, possibilitando um aumento significativo da taxa de transmissão sem a necessidade de mudanças estruturais na infraestrutura de fibra existente (WU et al., 2023). Cabe destacar que as abordagens baseadas em multiplexação espacial (SDM) e em banda ultralarga (UWB) não são excludentes, podendo ser combinadas de forma complementar. A utilização conjunta dessas estratégias pode ser considerada uma alternativa promissora para superar os limites de capacidade dos sistemas ópticos convencionais, ampliando significativamente a escalabilidade das redes ópticas do futuro.

Para compreender como alcançamos o estágio atual de utilização da multibanda em transmissões ópticas, é fundamental revisitar a trajetória evolutiva dessa linha de pesquisa.

Os Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFAs) surgiram no final da década de 1980 e se destacaram, ao longo dos anos 1990, como uma das principais inovações para a amplificação de sinais em sistemas de comunicações ópticas (GILES; GIOANNI, 1990), (GILES; DESURVIRE, 1991), (CHRAPLYVY; NAGEL; TKACH, 1992). Seu diferencial mais relevante foi a capacidade de operar diretamente no domínio óptico, dispensando a conversão eletro-óptica e possibilitando maior eficiência, menor complexidade e redução de perdas nos sistemas de transmissão. Um dos fatores determinantes para seu sucesso foi o excelente desempenho na banda C (1530–1565 nm), que corresponde à região de menor atenuação nas fibras ópticas monomodo padrão. Essa compatibilidade tornou os EDFAs ideais para aplicações em redes WDM, permitindo a amplificação simultânea de múltiplos canais e viabilizando transmissões em longas distâncias com alta capacidade, características fundamentais para a evolução das redes ópticas modernas. Posteriormente, visando expandir ainda mais a capacidade dos sistemas WDM, os EDFAs também passaram a ser empregados na banda L (1565–1625 nm), com adaptações no projeto das fibras dopadas e no bombeamento óptico para atender a essa nova faixa espectral.

Os estudos sobre a utilização da bandas L em aplicações ópticas tiveram início no final da década de 1990 e início dos anos 2000, representando um marco fundamental nesse campo de pesquisa. Durante esse período, diversos trabalhos, como os citados em (ALI et al., 1998), (SRIVASTAVA et al., 1998) e (SUN et al., 1999), investigaram a viabilidade e o potencial dessa banda para impulsionar avanços significativos nas tecnologias ópticas. Essas pesquisas não apenas demonstraram a capacidade de expandir a capacidade de transmissão e a eficiência dos sistemas de comunicação, mas também estabeleceram as bases para o desenvolvimento de novas soluções em redes ópticas. A relevância desses estudos reside em sua contribuição para o progresso técnico e científico, influenciando diretamente o direcionamento de pesquisas futuras e consolidando as bandas L como elemento-chave para a evolução contínua das comunicações

ópticas.

A utilização de amplificadores de fibra dopados com túlio (TDFAs) e a exploração da banda S (1460-1530 nm) no contexto de transmissões ópticas ganharam destaque no final da década de 1990 e início dos anos 2000. Nesse período, artigos como (AOZASA et al., 2000), (SAKAMOTO, 2001) e (COLE; DENNIS, 2001) já discutiam o tema. Os TDFAs emergiram como uma tecnologia crucial para a banda S, uma vez que fornecem amplificação eficiente nessa faixa espectral, que não é adequadamente coberta pelos amplificadores de fibra dopados com érbio (EDFAs). Essa característica tornou os TDFAs essenciais para a expansão do espectro utilizável em sistemas ópticos, contribuindo para o aumento da capacidade e da flexibilidade das redes de comunicação. A exploração da banda S e o desenvolvimento dos TDFAs representaram, assim, um avanço significativo no campo das telecomunicações ópticas.

Os amplificadores ópticos dopados com bismuto (BDFAs) para aplicação na banda O representam uma inovação mais recente no campo das comunicações ópticas, com os primeiros estudos significativos surgindo na década de 2000 (MASHINSKY et al., 2006), (JIANG, 2009) e (SEO; FUJIMOTO; NAKATSUKA, 2005). Esses trabalhos pioneiros estabeleceram as bases para o desenvolvimento e a implementação dos BDFAs em redes ópticas, demonstrando a viabilidade de explorar faixas espectrais alternativas, como a banda O, para superar as limitações dos sistemas tradicionais baseados em amplificadores de fibra dopados com érbio (EDFAs). Estudos subsequentes expandiram e aperfeiçoaram esses conceitos, destacando a eficiência e a versatilidade dos BDFAs em operações de amplificação em comprimentos de onda mais longos. Essa evolução reforçou a importância dos BDFAs como uma tecnologia promissora para a expansão da capacidade e da flexibilidade em sistemas de transmissão de banda ultralarga, contribuindo para o avanço contínuo das redes ópticas modernas.

Diferentemente dos amplificadores de fibras dopadas, a amplificação Raman emerge como uma técnica alternativa e complementar para o reforço de sinais ópticos. Baseada no efeito Raman, esse método utiliza a interação não linear entre fótons e a estrutura da fibra óptica para transferir energia de um feixe de bombeamento para o sinal óptico, amplificando-o. Os primeiros estudos sobre os efeitos da amplificação Raman em fibras ópticas remontam à década de 1970 (STOLEN; IPPEN, 1973), (AGRAWAL, 1989), quando suas propriedades únicas começaram a ser exploradas. No entanto, foi na década de 2000 que essa técnica ganhou destaque, especialmente no contexto de bandas estendidas ou ultralargas, permitindo a amplificação de sinais em faixas espectrais mais amplas e contribuindo para o aumento da capacidade de transmissão em sistemas de comunicação óptica. Essa evolução consolidou a amplificação Raman como uma solução versátil e eficiente para redes de alta capacidade e longa distância (CHBAT; FEVRIER, 2002), (GROSZ et al., 2001), (NAMIKI; EMORI, 2000) e (BROMAGE, 2004).

Nos últimos anos, a utilização de transmissão em banda ultralarga ou multibanda tem sido revisitada com maior intensidade no contexto das comunicações, impulsionada pela necessidade

de expandir a capacidade das redes. Esse interesse renovado surge em resposta ao crescimento exponencial da demanda por conectividade, que exige soluções mais eficientes e robustas para suportar o volume crescente de dados transmitidos. A exploração dessas tecnologias promete não apenas otimizar a performance das redes, mas também abrir caminho para inovações em aplicações que dependem de alta velocidade e baixa latência. Em 2019, ([HAMAOKA et al., 2019](#)) basearam-se em experimentos anteriores de transmissão WDM de banda ultralarga, que alcançaram capacidades próximas a 100 Tb/s, para investigar o impacto da dispersão Raman estimulada (SRS) na qualidade e capacidade da transmissão. Em seu trabalho, os autores atingiram uma taxa de transmissão de 150,3 Tb/s ao longo de 40 km, utilizando um esquema de banda ultralarga (UWB) de 13,6 THz nas bandas S, C e L. O método proposto envolve o ajuste iterativo da potência média de entrada da fibra para otimizar o desempenho, considerando as transições de potência induzidas pela SRS entre as bandas. O processo de otimização inclui o ajuste da potência de entrada da banda S, o ajuste fino da banda C e, finalmente, a otimização da potência de entrada da banda L, com iterações até que os níveis ideais de potência convirjam. Embora os sinais da banda S tenham sofrido penalidades de OSNR (relação sinal/ruído óptico), o desempenho geral do sistema manteve-se excelente, demonstrando a eficácia da abordagem proposta.

Em 2021, ([BUGLIA et al., 2021](#)) alcançaram uma taxa de transferência recorde de 178,08 Tbit/s ao longo de 40 km, utilizando uma combinação de amplificadores Raman e fibra dopada com terras raras. A transmissão foi realizada em uma largura de banda de 16,83 THz nas bandas S, C e L, com o auxílio de formatos de modulação adaptáveis e modelagem geométrica. Um dos principais desafios foi a otimização da potência de lançamento por canal, especialmente devido ao ISRS (*Inter-Channel Stimulated Raman Scattering*), que exige uma abordagem multidimensional e não convexa, resultando em múltiplas soluções locais. Para resolver esse problema, os autores empregaram uma combinação de otimização por enxame de partículas (PSO) e algoritmo de gradiente descendente, identificando potências de lançamento específicas em cada banda. O estudo demonstrou que o ruído do transceptor é a principal fonte de ruído dominante, impactando significativamente o desempenho do sistema. Além disso, o trabalho destacou a importância de desenvolver ferramentas eficientes de planejamento de rede para sistemas WDM de banda ultralarga, permitindo avaliações em tempo real de taxas de dados, formatos de modulação e perfis de potência de lançamento.

Em 2022, ([RENAUDIER et al., 2022](#)) apresentam uma revisão abrangente dos avanços recentes no design e na fabricação de dispositivos essenciais para sistemas de comunicações ópticas de banda ultralarga (UWB). Eles destacam como inovações em lasers, amplificadores, chaves ópticas e moduladores têm aprimorado o desempenho desses sistemas, facilitando a transição de demonstrações experimentais para produtos comerciais. Além disso, o artigo aborda o desenvolvimento de novas fibras ópticas como as NANFs (*Nested Antiresonant Nodeless Fibers*) projetadas para suportar a transmissão em UWB e que em futuras implementações podem oferecer até 300 nm de largura de banda com perda inferior a 0.2 dB/km, enfatizando

a importância de uma abordagem integrada que considere tanto os dispositivos quanto as fibras para otimizar a eficiência e a capacidade das comunicações ópticas de banda ultralarga. (DENG et al., 2022) discutem os desafios e as tecnologias capacitadoras para redes ópticas WDM em cenários multibanda. Eles destacam a necessidade de expandir a capacidade das redes ópticas além da banda C tradicional, explorando bandas adicionais como L, S, E e O. O artigo compara duas arquiteturas principais: a de banda separada, que permite operação independente dos amplificadores, mas com maior complexidade de manutenção, e a de várias bandas, que simplifica a implantação ao utilizar componentes compatíveis com múltiplas bandas. O estudo propõe um novo amplificador óptico C+L baseado na combinação de EDF (*Erbium Doped Fiber*) e BDF (*Bismuth Doped Fiber*), destacando seu potencial comercial. Entre os principais desafios abordados estão o projeto de amplificadores ópticos capazes de operar eficientemente em múltiplas bandas, a desigualdade de potência entre canais WDM induzida pelo espalhamento Raman estimulado (SRS) e a complexidade do controle de linha óptica multibanda devido aos efeitos interbanda. Para mitigar esses desafios, os autores propõem soluções como o uso de amplificadores ópticos com processadores de espectro óptico (OSP) inovadores e a implementação de aproximações analíticas para otimizar o ganho e a inclinação dos amplificadores de forma separada por banda. Os resultados indicaram que é possível alcançar um desempenho satisfatório utilizando estratégias de otimização subótimas pragmáticas, facilitando a implementação em sistemas reais.

Ainda em 2022, (SHEVCHENKO; NALLAPERUMA; SAVORY, 2022) investigam estratégias para otimizar as taxas de informação em sistemas de comunicação óptica de banda ultralarga, considerando as dependências espectrais dos parâmetros da fibra e o impacto do espalhamento Raman estimulado (SRS). Eles propõem três abordagens para maximizar a capacidade de enlaces ponto a ponto: 1 - Otimização da potência de lançamento não uniforme por canal: ajustando individualmente a potência de cada canal para compensar as variações introduzidas pelo SRS. 2 - Otimização da potência de lançamento uniforme por canal: aplicando a mesma potência a todos os canais, simplificando a implementação prática. 3 - Ajuste da relação de 3 dB entre o ruído linear de emissão espontânea amplificada (ASE) e o ruído de interferência não linear, balanceando os efeitos de ruído linear e não linear para otimizar o desempenho do sistema. (HOSHIDA et al., 2022).

Em 2023, (WU et al., 2023) investigam o desempenho de um sistema de transmissão WDM de banda ultralarga que abrange as bandas C+L tradicionais, bem como as bandas adicionais O, E e S. Eles estabelecem um sistema de transmissão para UWB e discutem os efeitos do canal, incluindo a não linearidade de Kerr e a interferência intercanal causada pelo espalhamento Raman estimulado (ISRS) entre as bandas O, E, S, C e L. Além disso, os autores demonstram um esquema de otimização para compensar a inclinação espectral de potência causada pelo SRS no sistema de bandas S+C+L, utilizando um amplificador Raman e o algoritmo de otimização por enxame de partículas particionado (PPSO). Os resultados mostram que o valor da inclinação de potência foi reduzido de 18 para 2,93 dB, e a velocidade de iteração foi

aprimorada em 10% em comparação com o algoritmo de enxame de partículas convencional.

Em 2024 (YANG et al., 2024) demonstram experimentalmente uma transmissão óptica de banda ultralarga em uma fibra metropolitana instalada em campo, alcançando uma taxa recorde de 202,3 Tb/s baseada em GMI (*Generalized Mutual Information*) e 189,5 Tb/s após decodificação. A transmissão foi realizada em uma largura de banda óptica de 15,6 THz, abrangendo as bandas S, C e L, utilizando apenas amplificação agrupada e uma potência de lançamento de 20,9 dBm. Para mitigar os efeitos do espalhamento Raman estimulado (ISRS), foi aplicada uma pré-inclinação experimentalmente otimizada de 5 dB ao longo da largura de banda. A pesquisa demonstra a viabilidade de aumentar drasticamente a capacidade de transmissão em infraestruturas existentes, sem a necessidade de substituição das fibras, o que é crucial para atender à crescente demanda por largura de banda em redes de comunicação. O estudo também destaca avanços em técnicas de modulação e processamento de sinais, que permitiram superar desafios como a dispersão e a não linearidade da fibra, estabelecendo um novo patamar para comunicações ópticas de alta velocidade.

Ainda em 2024, (PUTTNAM et al., 2024) apresentam uma demonstração pioneira de transmissão óptica cobrindo todas as bandas de transmissão de baixa perda (O, E, S, C, L e U) em fibras ópticas de sílica padrão. Utilizando uma combinação de seis variantes de amplificadores de fibra dopada e amplificação Raman, tanto distribuída quanto concentrada, eles alcançaram uma taxa de dados recorde de 402,2 Tb/s (GMI) e 378,9 Tb/s (decodificada) em uma largura de banda de transmissão de 37,6 THz após 50 km de fibra monomodo. Esta realização representa um aumento de mais de 25% na taxa de dados em comparação com registros anteriores em fibras monomodo e uma expansão de 35% na largura de banda de transmissão agregada. Os resultados demonstram o potencial da transmissão de banda ultralarga para aumentar significativamente a capacidade de informação de fibras ópticas novas e já implantadas, atendendo à crescente demanda por serviços de comunicação de alta velocidade.

As técnicas de transmissão UWB (*Ultra Wide Band*) e SDM (*Spatial Division Multiplexing*) não são excludentes e podem ser utilizadas de forma complementar. Como a UWB é uma abordagem que maximiza a capacidade de transmissão em uma única fibra, ela pode ser combinada com a técnica SDM, ativando múltiplos núcleos dentro de uma mesma fibra ou utilizando fibras adicionais, conforme a necessidade. Atualmente, soluções baseadas em MF (*Multi Fiber*) e UWB já estão disponíveis comercialmente e são amplamente empregadas em aplicações práticas. No entanto, quando se trata de implementações SDM mais avançadas, como MCF (*Multi Core Fiber*) e MMF (*Multi Mode Fiber*), o cenário é diferente. Essas tecnologias demandam transceptores complexos com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO – *Multiple Input Multiple Output*), que ainda não estão disponíveis comercialmente. Além disso, um dos principais desafios para a adoção em larga escala da SDM é a necessidade de implantação de uma nova infraestrutura de fibra óptica, bem como a adaptação de todo o ecossistema de transmissão. Outro fator limitante é o tempo necessário para a padronização e viabilização comercial dessas

tecnologias, o que torna sua aplicação viável apenas no médio ou longo prazo (FERRARI et al., 2020b).

Diante desse cenário, esta pesquisa concentra-se na transmissão multibanda, explorando estratégias de otimização para sistemas UWB, os quais se apresentam como uma alternativa viável e de curto prazo para a expansão da capacidade das redes ópticas. Para estabelecer as bases conceituais necessárias à compreensão do trabalho desenvolvido, a seguir são apresentados tópicos e tecnologias fundamentais, com ênfase nos princípios da transmissão óptica multibanda, técnicas de multiplexação e mecanismos de amplificação óptica.

O método mais tradicional e amplamente utilizado no projeto de enlaces e redes ópticas é a compensação de perdas, em que o ganho dos amplificadores é ajustado para neutralizar as perdas acumuladas pelo sinal durante a propagação. Essas perdas podem ter diferentes origens. Algumas são inerentes à própria fibra óptica, como a atenuação por quilômetro, dispersão cromática e efeitos não lineares. Outras perdas decorrem da inserção de dispositivos na rede, como acopladores, multiplexadores e ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*), que impactam a qualidade do sinal ao longo do percurso (LIMA et al., 2022).

A GSNR (*Generalized Signal-to-Noise Ratio*) é uma métrica utilizada para quantificar a qualidade do sinal em sistemas de comunicação óptica. Ele representa a relação entre a potência do sinal recebido e a soma das contribuições de ruído ao longo da transmissão, incluindo ruído térmico, ruído de amplificação óptica (ASE) e interferência não linear (NLI) (FILER et al., 2018).

O GSNR é geralmente expresso em termos da potência total do sinal (P_{sig}) e das contribuições de ruído no sistema, conforme a equação 1.1.

$$GSNR = \frac{P_{SIG}}{P_{ASE} + P_{NLI}} \quad (1.1)$$

P_{SIG} é a potência do sinal transmitido, P_{ASE} é a potência de ruído proveniente dos amplificadores, P_{NLI} é a potência do ruído devido aos efeitos não lineares na fibra óptica.

Diversas abordagens são discutidas na literatura com o intuito de otimizar o desempenho de redes e enlaces ópticos que utilizam amplificadores dopados com terras raras. Uma dessas abordagens, proposta por (Barboza, 2017), é conhecida como ACOP (*Adaptive Control of Operating Point*). O método ACOP visa fornecer soluções para a seleção automática dos pontos de operação dos amplificadores na rede, com o objetivo de aprimorar a qualidade da transmissão do sinal, maximizando parâmetros essenciais, como a taxa de transmissão e a GSNR.

Pesquisas anteriores (BARBOZA et al., 2018) demonstraram que, embora o método de compensação de perdas assegure a restauração total do sinal em termos de potência, ele não representa a solução mais eficaz para otimizar a qualidade do serviço em enlaces ópticos, especialmente quando se considera parâmetros como figura de ruído (NF - *Noise Figure*), *ripple* e *Tilt*. Nesse contexto, a aplicação de técnicas ACOP em processos de otimização tem mostrado

resultados superiores em comparação com o ajuste simples de ganho para compensar as perdas. O uso dessas técnicas permite um controle mais preciso e eficiente dos amplificadores ópticos, resultando em melhorias significativas na qualidade do sinal transmitido, ao reduzir distúrbios e maximizar a performance do sistema.

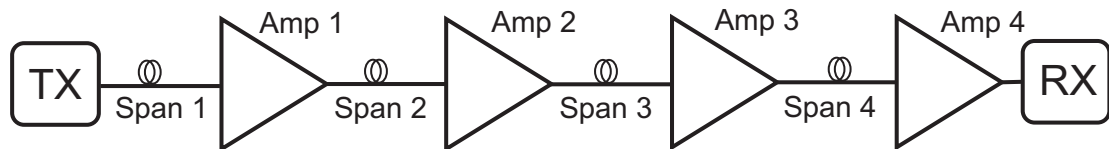


Figura 1 – Cenário com uma cascata de 4 amplificadores.

A Figura 1 ilustra um cenário composto por quatro amplificadores em cascata, formando um enlace óptico. De maneira simplificada, as técnicas ACOP selecionam os ganhos dos amplificadores por meio de um processo de otimização, até que a melhor configuração de ganhos para o enlace seja determinada. Existem duas abordagens principais para implementar o controle adaptativo do ponto de operação dos amplificadores: o controle global e o controle local. No controle global, as informações de todos os amplificadores são centralizadas em um controlador externo, que decide como cada amplificador deve operar. Em contraste, no controle local, cada amplificador ajusta seu ponto de operação com base nas informações que recebe dos amplificadores vizinhos (BARBOZA et al., 2018). Essa diferenciação entre controle global e local permite flexibilidade na gestão da rede óptica, dependendo dos requisitos de desempenho e das condições específicas de operação do sistema.

Em um processo de otimização da escolha dos pontos de operação dos amplificadores, tanto a abordagem de controle local quanto a de controle global exigem informações detalhadas sobre o funcionamento dos amplificadores, as quais refletem o desempenho de acordo com o ponto de operação selecionado. A metodologia utilizada para obter essas informações é baseada nas máscaras de potência. A Figura 2 ilustra uma máscara de potência na forma de gráfico, que representa toda a região de operação do amplificador, abrangendo desde a mínima até a máxima potência de entrada e saída, o que, por sua vez, está relacionado ao ganho do amplificador. O parâmetro medido é representado por uma barra de cores ao lado do gráfico, permitindo visualizar as variações de desempenho. Parâmetros como figura de Ruído, *Tilt*, *ripple*, Potência de saída, entre outros, podem ser expressos por meio dessa barra de cores, proporcionando uma forma visual e intuitiva de monitorar e ajustar o funcionamento dos amplificadores durante o processo de otimização.

O processo de caracterização completa do amplificador é detalhado em (MOURA et al., 2012), e o resultado é apresentado por meio de uma tabela ou gráfico, conhecido como máscara de potência dos amplificadores. Durante esse processo, um sinal de entrada específico é aplicado ao amplificador, e seu ganho é ajustado de forma a permitir a medição do parâmetro desejado. Esse procedimento é repetido até que toda a região de operação do amplificador seja percorrida,

resultando em uma varredura completa de seu comportamento. Assim, a máscara de potência reflete as características operacionais do amplificador para qualquer ponto dentro de seu intervalo de operação. Por exemplo, se um amplificador possui um intervalo de operação com ganho variando entre 15dB e 25dB, a máscara de potência exibirá o valor do parâmetro medido para todos os ganhos dentro desse intervalo (15dB, 16dB, 17dB, até 25dB). Esse método permite uma análise detalhada e precisa do desempenho do amplificador em diversas condições de operação.

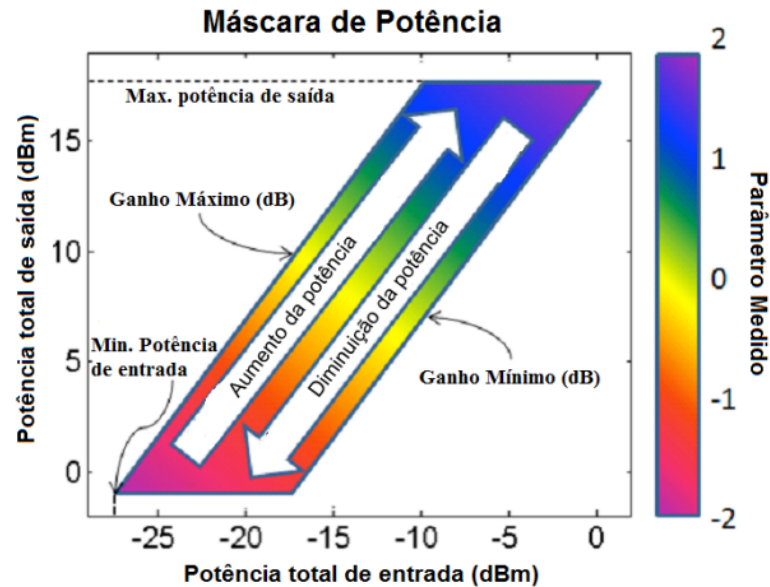


Figura 2 – Gráfico utilizado para representar a Máscara de Potência de um amplificador. Apresentado em (MOURA et al., 2012)

A Figura 3 apresenta a máscara de potência de *ripple* e figura de ruído de um amplificador comercial utilizado em nossas simulações. O gráfico mostra diversos pontos de operação, cada um acompanhado de seus respectivos valores de parâmetros, que são medidos por meio de uma barra de cor. Durante o processo de otimização, esses pontos de operação são testados sucessivamente até que a configuração ideal seja encontrada. Um aspecto importante a ser destacado é que, em muitos casos, um ponto de operação pode apresentar uma boa figura de ruído, mas um desempenho insatisfatório em termos de *ripple* de potência, ou vice-versa. Esse comportamento destaca a necessidade de uma abordagem de otimização multiobjetiva, que permita equilibrar diferentes parâmetros e alcançar os melhores resultados em termos de qualidade de transmissão ao longo do enlace.

A ITU (*International Telecommunication Union*) é uma agência especializada da Organização das Nações Unidas, responsável por estabelecer padrões internacionais na área de telecomunicações, assegurando que equipamentos de diferentes fabricantes sigam critérios e normas que garantam a interoperabilidade e comunicação eficiente entre eles. No campo das comunicações por fibra óptica, a norma ITU-T G.694.1 define a grade de frequências para aplicações WDM. A Figura 4 ilustra as bandas de frequências estabelecidas pela ITU para essas aplicações. Trabalhos anteriores investigaram a aplicação das técnicas ACOP na otimização

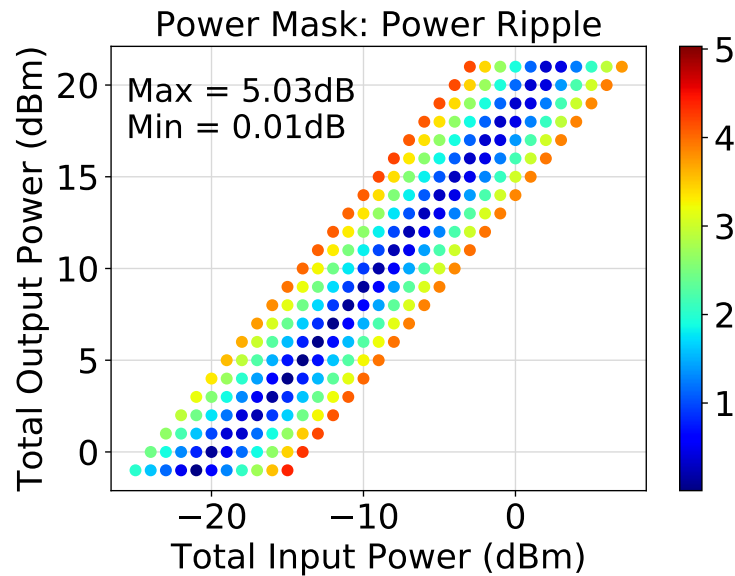


Figura 3 – Máscara de potência representando *ripple* de potência do EDFA comercial utilizado nas simulações da banda C (LIMA, 2021).

de enlaces ópticos, considerando exclusivamente a utilização da banda C (1530-1565 nm). No entanto, este estudo expande essas aplicações para um cenário multibanda, abrangendo as bandas S, C e L, proporcionando uma análise mais ampla e detalhada do desempenho dos enlaces ópticos em diferentes faixas espectrais.

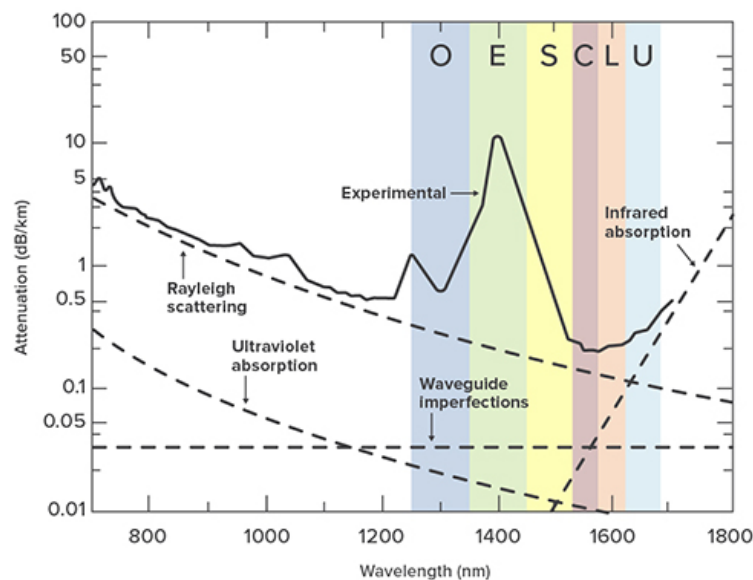


Figura 4 – Atenuação da Fibra e Bandas WDM. Apresentado em (GEOFF, 2021)

Os sistemas de comunicações ópticas empregados na maioria das aplicações práticas atuais utilizam a banda C como a faixa padrão de transmissão devido à sua janela de menor atenuação nas fibras ópticas SSMF (*Standard Single Mode Fiber*). Contudo, ao expandir o cenário para aplicações multibanda, diversos outros fatores precisam ser considerados, uma vez que a dependência do comprimento de onda impõe limitações de capacidade e operação que não

são relevantes quando se utiliza apenas a banda C. Um dos efeitos críticos a ser considerado é o ISRS (*Inter-channel Stimulated Raman Scattering*), ou Espalhamento Raman Estimulada entre canais. Com o aumento da largura de banda, o impacto desse efeito se torna mais evidente, resultando em uma transferência de potência dos canais de maior frequência para os de menor frequência. Além disso, é necessário levar em conta a dependência do comprimento de onda em parâmetros como dispersão, atenuação e coeficiente não linear. A dispersão nas fibras pode variar entre -5 ps/nm/km e 22 ps/nm/km, a atenuação oscila entre $0,18$ dB/km e $0,38$ dB/km, e o coeficiente não linear varia de $1,28$ 1/W/km a $1,6$ 1/W/km (WU et al., 2023). Esses fatores exigem uma análise cuidadosa para otimizar o desempenho dos sistemas em cenários multibanda, garantindo eficiência e qualidade na transmissão.

Todo o desenvolvimento deste trabalho foi realizado em ambiente simulado computacionalmente, no qual foram investigados diversos aspectos da transmissão multibanda em sistemas ópticos. Para isso, utilizou-se o software GNPpy, uma ferramenta de código aberto desenvolvida especificamente para analisar os impactos da propagação do sinal em redes ópticas. O GNPpy oferece uma base robusta para o planejamento e a otimização de rotas em redes ópticas multi-vendor, permitindo simulações realistas e alinhadas com cenários do mundo real (FERRARI et al., 2020a). No entanto, um aspecto importante é que, por padrão, o software não utiliza o método das máscaras de potência para calcular a propagação do sinal nos enlaces ópticos. Assim, um dos desafios desta pesquisa foi adaptar a biblioteca do GNPpy para incorporar as máscaras de potência como parâmetros de entrada dos amplificadores, viabilizando a realização dos cálculos de forma mais precisa e compatível com os objetivos do estudo.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO GERAL DA TESE DE DOUTORADO

O crescimento exponencial do tráfego global exige redes de comunicação com maior capacidade, além de serem cada vez mais eficientes e adaptáveis a mudanças em cenários dinâmicos. O aumento da capacidade de uma única fibra é crucial para evitar a necessidade de implantar uma nova infraestrutura de rede, o que implicaria em altos custos. Os amplificadores ópticos disponíveis comercialmente para as bandas C, L e S tornam viável a proposta de melhorar a eficiência da capacidade sem a exigência de investimentos substanciais em nova infraestrutura. Na banda C e L, os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFAs) são os que apresentam melhor desempenho, enquanto na banda S, os amplificadores de fibra dopada com túlio (TDFAs) se destacam como a opção mais eficiente. Essa disponibilidade de amplificadores comerciais para diferentes bandas permite uma abordagem mais acessível e eficaz para otimizar o uso das redes ópticas existentes.

A motivação central deste trabalho é investigar a aplicação da técnica ACOP (Amplifier Control and Optimization Process) em cenários de transmissão multibanda, abrangendo simultaneamente as bandas S, C e L. Embora estudos recentes (HAMAOKA et al., 2019), (BUGLIA et al., 2021), (SHEVCHENKO; NALLAPERUMA; SAVORY, 2022), (WU et al., 2023), (YANG

et al., 2024) tenham se concentrado no aumento da capacidade de transmissão por meio de estratégias como o ajuste da potência óptica e a mitigação dos efeitos do espalhamento Raman estimulado, nenhum deles abordou o uso do ACOP como ferramenta de otimização nesse contexto. A utilização simultânea das três bandas impõe desafios significativos, como a escolha ideal da potência de lançamento e a escolha dos ganhos de amplificadores com características distintas. Neste trabalho, pretende-se demonstrar que a aplicação do ACOP pode superar esses obstáculos, permitindo o gerenciamento eficiente dos conflitos inerentes à operação multibanda, ao mesmo tempo em que promove o aumento da capacidade de tráfego por fibra e melhora a eficiência na transmissão óptica, mesmo em cenários dinâmicos e realistas.

O objetivo geral desta tese é estender a aplicação das técnicas ACOP para cenários em que as bandas S, C e L estão ativas de forma simultânea. A crescente demanda por redes ópticas mais flexíveis e com maior capacidade torna essencial o desenvolvimento de soluções que permitam a adaptação dinâmica das redes frente a variações no tráfego e nas exigências operacionais.

As técnicas ACOP foram inicialmente desenvolvidas para otimização em uma única banda, a banda C. O desafio deste trabalho é investigar como essas técnicas podem ser adaptadas para um cenário multibanda, além de examinar como será o processo de otimização dos enlaces ópticos, levando em consideração as três bandas e os três modelos diferentes de amplificadores. Questões importantes que surgem incluem: será necessário introduzir restrições no processo de otimização? As técnicas ACOP precisarão ser adaptadas para esse novo contexto? Como a potência transmitida afetará a qualidade do sinal? Qual é a melhor estratégia para otimizar o sinal em cenários multibanda? Estas são algumas das questões que serão abordadas e respondidas ao longo desta pesquisa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DA TESE DE DOUTORADO

Para atingir o objetivo geral estabelecido, os seguintes objetivos específicos são almeados:

- Obter as máscaras de potência para os amplificadores ópticos nas bandas S e L, com o intuito de viabilizar as técnicas ACOP em sistemas multibanda.
- Desenvolver e adaptar funcionalidades no software GNPpy que permitam a simulação de cenários de transmissão óptica em ambiente multibanda S + C + L..
- Avaliar o desempenho da transmissão multibanda por meio de simulações computacionais, considerando diferentes configurações de rede e parâmetros operacionais.
- Analisar os impactos dos efeitos não lineares sobre a qualidade do sinal transmitido em cenários multibanda, especialmente aqueles decorrentes do espalhamento Raman e da interação entre canais..

- Investigar e propor estratégias para mitigar a degradação causada pelos efeitos não lineares, visando aumentar a eficiência e a robustez da transmissão óptica multibanda.
- Desenvolver algoritmos de otimização baseados em técnicas bioinspiradas com o objetivo de maximizar a qualidade de transmissão e otimizar o desempenho global da rede em contextos multibanda.

1.4 ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO

O presente trabalho está dividido da seguinte maneira:

- Capítulo 2 - É feita uma breve revisão sobre as técnicas ACOP encontradas na literatura. As técnicas são a base para o desenvolvimento desta pesquisa.
- Capítulo 3 - Neste capítulo, é apresentado o modelo da Máscara de Potência e sua caracterização. Também são descritos os processos utilizados para obter as máscaras de potência das bandas L e S, além dos resultados parciais obtidos por meio de simulações realizadas no software GNPY.
- Capítulo 4 - São apresentados os resultados das simulações realizadas utilizando o simulador GNPY, considerando parâmetros individuais como o efeito de espalhamento Raman estimulado (SRS), além da variação da atenuação, área efetiva e dispersão em função do comprimento de onda no cenário multibanda envolvendo as bandas S, C e L..
- Capítulo 5 - São apresentados a técnica ACOP e os resultados da simulação em multibanda S + C + L.
- Capítulo 6 - São apresentadas as conclusões gerais da pesquisa.

2 CONTROLE ADAPTATIVO DO PONTO DE OPERAÇÃO - ACOP

Nas redes ópticas convencionais, o conceito de "compensação de perdas" ou "*LossComp*", como denominado nesta pesquisa, é comumente utilizado no processo de design dessas redes. Esse método envolve a seleção dos ganhos dos amplificadores com base nas perdas do sinal, causadas pela distância do enlace óptico, bem como pelos ruídos linear e não linear que ocorrem na fibra óptica. No entanto, pesquisas anteriores (LIMA et al., 2020), (Barboza, 2017) sugerem que essa abordagem pode não ser a mais eficaz para garantir uma qualidade de transmissão de sinal ideal. Outros estudos indicam que métodos alternativos podem resultar em um desempenho superior na configuração dos amplificadores.

O cenário em um ambiente dinâmico difere do tráfego estático comumente considerado, uma vez que a rede sofre alterações constantes, exigindo a reconfiguração dos amplificadores sempre que ocorre uma mudança. Estudos anteriores apontam as técnicas de Controle Adaptativo do Ponto de Operação (ACOP) como uma solução para permitir que os amplificadores ópticos se ajustem de forma autônoma quando necessário. O processo de reconfiguração envolve a escolha de um novo ponto de operação para o amplificador, levando em consideração o nível de potência de cada um. Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura sobre as principais técnicas de ACOP propostas até o momento.

2.1 ADGC - ADAPTIVE GAIN CONTROL

A técnica ACOP conhecida como AdGC (*Adaptive Gain Control*) é a primeira mencionada na literatura (OLIVEIRA et al., 2013). Essa abordagem tem como objetivo selecionar o melhor ponto de operação para o amplificador, levando em consideração tanto a ondulação (R_p - *Ripple*) quanto a figura de ruído (NF - *Noise Figure*) como parâmetros principais para a escolha do ponto de operação. Esses dois fatores formam o chamado espaço de objetivos, que representa o conjunto de soluções possíveis para o problema em questão. A máscara de potência já é incorporada a esse método. Na técnica AdGC, o espaço de objetivos busca minimizar simultaneamente a ondulação e a figura de ruído. O ponto de operação ideal é determinado pela menor distância euclidiana em relação à origem do espaço de objetivos, conforme descrito pela equação 2.1.

$$di = \sqrt{(NF^2 + Rp^2)}; \quad (2.1)$$

Assim, cada ponto de operação do amplificador é associado a um valor di , que representa o seu valor de aptidão. Para ilustrar o funcionamento dessa técnica, consideremos o exemplo a seguir. A Figura 5 apresenta uma máscara de potência que mostra a figura de ruído (NF) e a ondulação de potência (Rp) de um amplificador comercial.

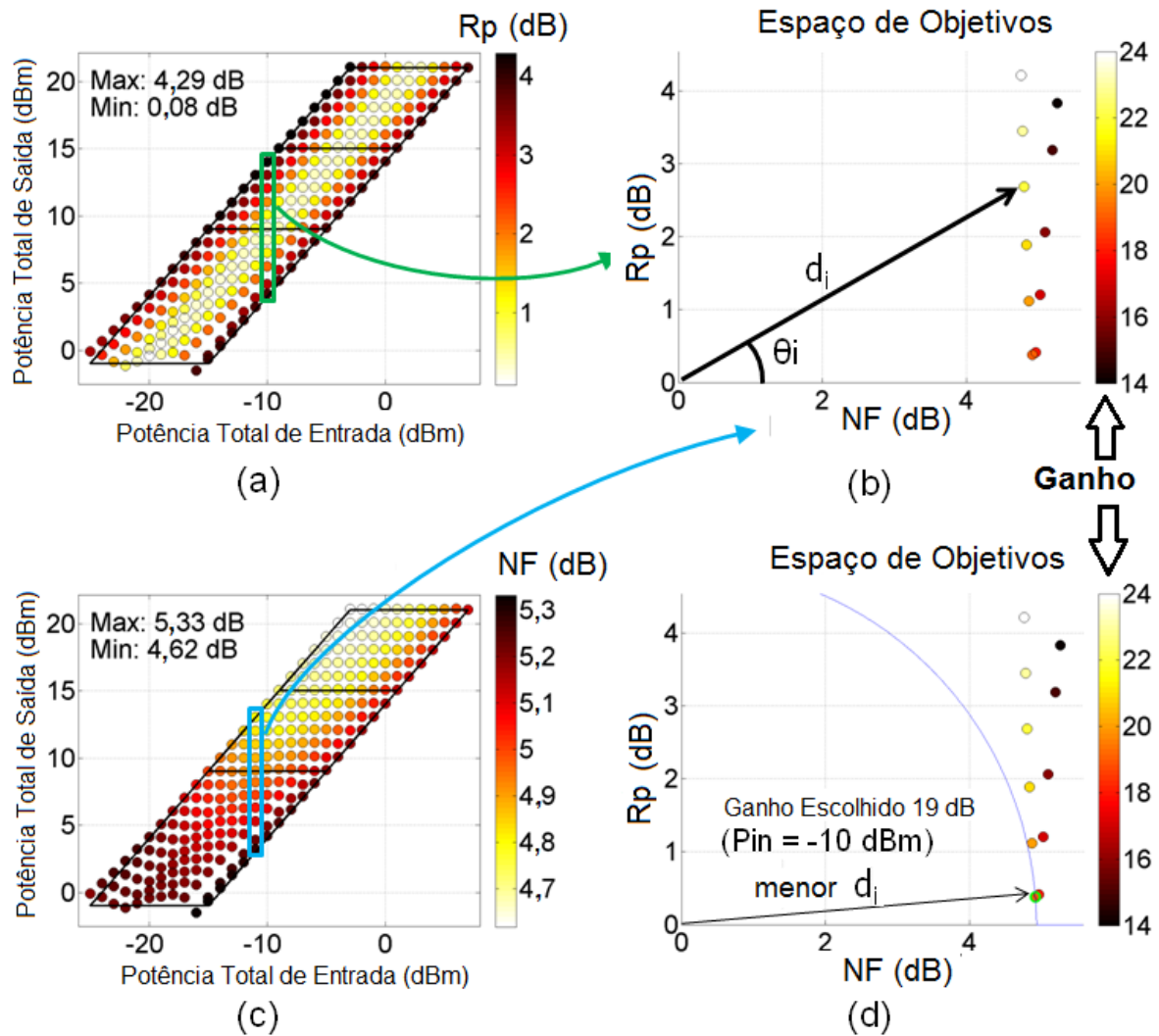


Figura 5 – Máscaras de potência apresentando *Ripple* (a) e figura de Ruído (c) de um amplificador comercial. Em (b) é mostrado o espaço de objetivos contendo os pontos referentes ao R_p e NF de acordo com o ganho selecionado. Em (d) o ganho de -19dBm apresentou o melhor valor *fitness*. Apresentado em (Barboza, 2017)

Para o exemplo, foi selecionada uma potência total de entrada de -10 dBm para o amplificador. Conforme ilustrado na legenda da Figura 5(a), observa-se que a ondulação varia entre 0,08 dB e 4,29 dB. Isso significa que, dependendo do ganho escolhido para o amplificador dentro do seu intervalo de operação, o valor da ondulação estará entre esses limites. O valor da figura de ruído (NF) também segue essa mesma lógica, variando entre 4,62 dB e 5,33 dB. Assim, dependendo do ganho selecionado, o valor do ruído estará dentro desse intervalo. Os pontos no espaço de objetivos são obtidos com base no ganho escolhido. Para a potência de entrada de -10 dBm mencionada neste exemplo, os pontos de ondulação e figura de ruído são apresentados em função do ganho.

Para um ganho de 20 dB, com a potência de entrada igual a -10 dBm e a potência de saída igual a 10 dBm, a ondulação é aproximadamente 1 dB e o valor do ruído é cerca de 5 dB. Utilizando a equação 2.1, obtém-se o valor de aptidão d_i . Assim, para cada ganho selecionado, é

atribuído um valor de aptidão que relaciona a ondulação (ripple) e a figura de ruído. No exemplo apresentado, observa-se que o ganho de 19 dB foi considerado o melhor neste cenário, pois resultou no menor valor de di .

Podemos observar que esta é uma técnica local, na qual o ponto de operação de cada amplificador é ajustado de forma independente. Em um exemplo prático com amplificadores em cascata, o ponto de operação é selecionado para o primeiro amplificador e, a partir daí, segue-se para o último amplificador. Dessa forma, o ponto de operação de cada amplificador na cascata depende do ganho atribuído ao amplificador anterior no enlace, o que limita a capacidade da heurística de explorar todo o espaço de possibilidades disponíveis para a configuração ideal da cadeia de amplificadores.

2.2 ACCBR - AMPLIFIER COGNITIVE CASE-BASED REASONING

A segunda técnica voltada para o ajuste dos pontos de operação dos amplificadores em um enlace foi proposta por (MOURA et al., 2016). Trata-se de uma abordagem global que visa melhorar o OSNR da transmissão utilizando técnicas cognitivas para selecionar o ponto ótimo de operação dos amplificadores ópticos no link. Sempre que um novo caminho óptico é estabelecido na rede, esse método tenta escolher a melhor opção para otimizar a qualidade de transmissão da nova conexão. Essa técnica é chamada de Amplificador Cognitivo CBR (AcCBR) e é baseada em técnicas cognitivas de Raciocínio Baseado em Casos (CBR). A Figura 6 ilustra um diagrama de fluxo básico que demonstra o funcionamento do método.

O AcCBR é composto por quatro etapas principais: retorno, reuso, revisão e retenção. Outro aspecto fundamental dessa técnica é a dependência de um banco de dados, que armazena rotas já criadas e aquelas recém-descobertas.

Na etapa de retorno, o algoritmo pesquisa no banco de dados um caminho óptico que seja similar ao novo caminho a ser criado, levando em consideração vários parâmetros, como o número de amplificadores no enlace, o ganho e as perdas dos amplificadores. Esse processo considera uma margem de 1 dB ao procurar caminhos ópticos semelhantes. O banco de dados é continuamente atualizado conforme novas rotas são geradas.

Na fase de reuso, o algoritmo faz alterações no caminho óptico retornado pelo banco de dados, explorando novas opções. Essas modificações são aplicadas ao ganho dos amplificadores, dentro de uma tolerância de ± 1 dB. Na terceira etapa, de revisão, o algoritmo avalia o caminho óptico obtido na etapa anterior e atribui um valor de OSNR a ele.

Por fim, na etapa de retenção, o algoritmo armazena no banco de dados a nova solução proposta. Em seguida, verifica no banco de dados qual opção possui o melhor valor de OSNR e seleciona o caminho óptico correspondente. O processo CBR é ativado sempre que surge um novo caminho, embora a solução ótima nem sempre seja gerada inicialmente pelo algoritmo. Caso existam alternativas no banco de dados que ofereçam melhores resultados, estas são

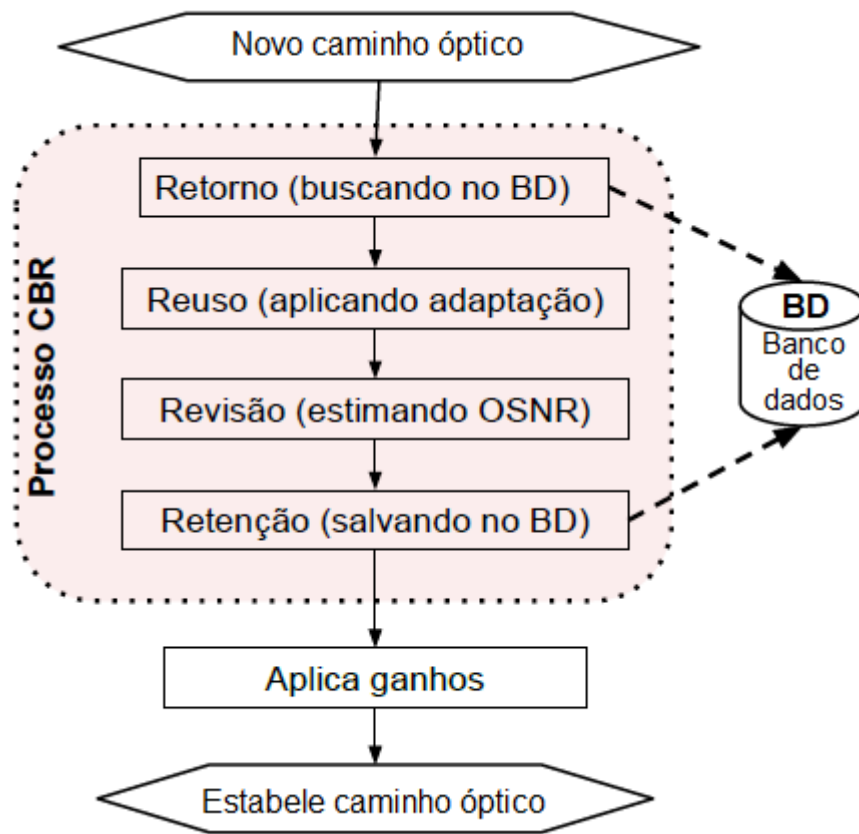


Figura 6 – Fluxograma apresentando o funcionamento da técnica AcCBR. Apresentado em (Barboza, 2017)

preferencialmente escolhidas.

2.3 ASHB - ANNEALING SEARCH HEURISTIC WITH BACKPROPAGATION

A técnica AdGC obteve bons resultados, mas há áreas que podem ser aprimoradas. Uma questão importante é o controle da potência de saída, que deve ser mantida dentro de limites razoáveis, especialmente em cenários de rede ou sequências de link. Outro ponto a ser melhorado é o fato de que o ganho do amplificador é selecionado em "um único passo", ou seja, em uma única iteração, sem uma busca mais profunda por soluções que possam ser mais eficientes.

Para lidar com essas limitações do AdGC, foi proposta por (BARBOZA et al., 2017) uma técnica baseada em aprendizado de máquina. Essa abordagem, chamada AsHB (*Annealing Search Heuristic with Backpropagation*), utiliza o conceito de MLP (*MultiLayer Perceptron*) para selecionar o ganho do amplificador. O termo “*Backpropagation*” está relacionado ao treinamento de redes neurais artificiais, e o AsHB adota esse conceito para treinar a rede e determinar o melhor ponto de operação para cada amplificador, realizando uma análise global do enlace. Um aspecto importante dessa técnica é que os processos de otimização são executados tanto no sentido direto quanto no inverso, como ilustrado na Figura 7.

A principal diferença deste método em relação a outras técnicas propostas é que o

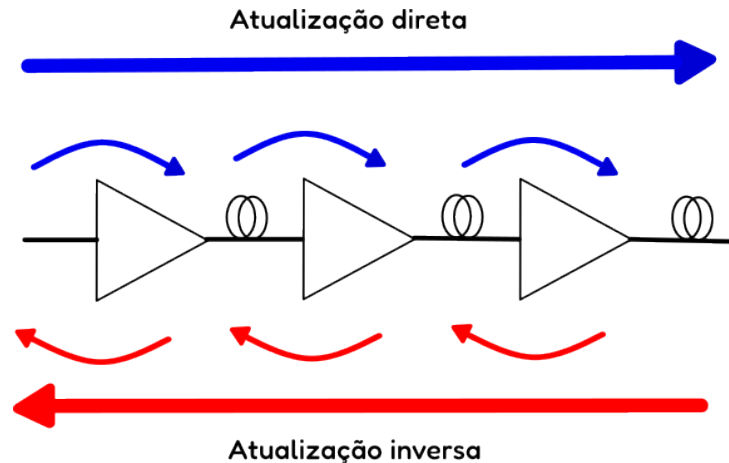


Figura 7 – *Backpropagation* no sentido direto e inverso. Adaptado de (Barboza, 2017).

algoritmo não seleciona imediatamente uma configuração de link. Em vez disso, ele testa diversas opções até encontrar a melhor configuração possível. Outro aspecto importante é que o ponto de operação ideal para um amplificador específico do enlace pode não ser o ponto de operação mais eficiente para o enlace como um todo. O termo "*Annealing*" refere-se a um processo inspirado na técnica de otimização de recozimento simulado (*Simulated Annealing*). No contexto do algoritmo, esse processo se concentra nas etapas de redução do passo, ou seja, na magnitude da alteração do ponto de operação de cada amplificador. À medida que as iterações avançam, o passo é gradualmente reduzido, e o algoritmo converge de forma mais precisa para o ponto de operação desejado.

2.4 MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION ACOP

A técnica denominada MOO ACOP (*Multi-Objective Optimization*) foi proposta em (BARBOZA; BASTOS-FILHO; FILHO, 2019) e introduziu a consideração dos efeitos não lineares na propagação do sinal, algo que não era abordado nas técnicas anteriores. Outro aspecto significativo dessa abordagem é a inclusão de um VOA (*Variable Optical Attenuator*), que tem a função de atenuar o sinal em um nível predeterminado após cada amplificador da cascata, conforme ilustrado na Figura 8. Com a introdução do VOA, observa-se um aumento no número de variáveis do problema em relação às técnicas anteriores, uma vez que o algoritmo deve selecionar não apenas os ganhos dos amplificadores, mas também as atenuações dos VOAs. O papel do VOA é crucial para proporcionar maior flexibilidade no processo de otimização, permitindo que pontos de operação com ganhos elevados sejam escolhidos sem comprometer a qualidade do sinal ao longo de todo o enlace.

Os efeitos não lineares em redes ópticas ocorrem devido a alterações nas propriedades do meio material em função da interação do sinal que se propaga nesse meio. O principal fator que contribui para esses efeitos é a potência do sinal transmitido pela fibra. Quando a potência de entrada é excessiva, pode comprometer a qualidade da transmissão do sinal, uma

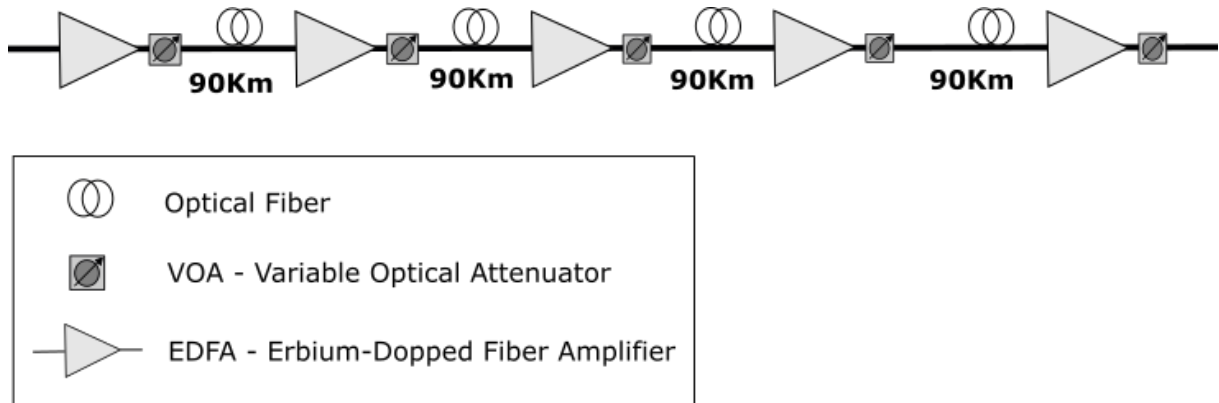


Figura 8 – Configuração de enlace utilizado na técnica MOO com os VOAs após os amplificadores. Apresentado em (LIMA, 2021)

vez que os impactos não lineares prejudicam a relação sinal-ruído no final do enlace. Uma solução possível para mitigar esse problema é estabelecer um limite para a potência de entrada nos amplificadores, com o objetivo de evitar que a potência de saída atinja níveis excessivos e prejudique a integridade da transmissão.

A principal desvantagem de limitar a potência de entrada nos amplificadores é a redução do espaço de soluções, o que pode impedir que as técnicas de Controle Adaptativo de Ponto de Operação (ACOP) encontrem a melhor solução para o enlace. Um exemplo disso é que, geralmente, pontos de operação com maiores ganhos apresentam uma menor figura de ruído. Quando o ganho é limitado, os pontos de operação com maior figura de ruído podem ser selecionados durante o processo de otimização, o que não é ideal, pois a figura de ruído deve ser minimizada.

Para contornar essa limitação, a técnica de Otimização Multiobjetiva (MOO) passou a incluir um Atenuador Óptico Variável (VOA) na saída de cada amplificador. Isso permite que a técnica ACOP selecione o melhor ponto de operação para o amplificador sem a necessidade de restringir as potências de entrada. Quando a potência de saída de um amplificador for elevada, o VOA atenuará essa potência, evitando que o próximo amplificador na cascata sofra com um nível de sinal excessivo.

A abordagem multiobjetiva da técnica MOO permite otimizar dois objetivos de forma concorrente. O primeiro objetivo é a Relação Sinal a Ruído Óptico (OSNR), considerando os efeitos não lineares, que é posteriormente denominado como GSNR (*Generalized Signal-to-Noise Ratio*). O segundo objetivo é a minimização do ripple de potência, buscando uma solução que balanceie esses dois aspectos para melhorar a qualidade da transmissão no enlace óptico.

2.5 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ACOP

A proposta mais recente das técnicas ACOP foi apresentada em (LIMA et al., 2020). Trata-se de uma abordagem global de otimização bioinspirada, desenvolvida com o objetivo de

maximizar a taxa de transmissão em um enlace óptico. A função objetivo dessa técnica é a taxa de transmissão total, que é calculada como a soma das taxas de transmissão dos canais utilizados na simulação. De maneira semelhante à técnica MOO, esta abordagem também inclui o uso de um Atenuador Óptico Variável (VOA) após os amplificadores do enlace.

A taxa de transmissão é avaliada com base na Relação Sinal-Ruído Óptico (OSNR), considerando tanto o ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) quanto o impacto dos efeitos não-lineares (NLI). Para isso, foi estabelecida uma relação entre o OSNR e a taxa de transmissão possível, conforme apresentado em (Smith; Zhou, 2017). Embora a pesquisa não especifique o tipo de modulação a ser utilizado, ela fornece uma tabela 1 que ilustra os valores de OSNR necessários para alcançar diferentes taxas de transmissão.

O que realmente importa no processo de otimização é o valor mínimo de OSNR, pois ele determina a máxima taxa de transmissão possível. A pesquisa visa, portanto, otimizar os parâmetros do enlace para garantir que a taxa de transmissão seja a mais alta possível, dadas as limitações impostas pelo OSNR.

Tabela 1 – Relação entre Taxa de transmissão X OSNR. Adaptado de (Smith; Zhou, 2017).

Gb/s	Formato de Modulação	OSNR mínimo requerido (dB)
40	DP-BPSK	9
100	DP-QPSK	12,5
200	DP-QPSK	16
200	DP-16QAM	19
400	DP-64QAM	24

O espaço de busca do algoritmo possui uma dimensão de $2N$, onde N representa o número de amplificadores no enlace. Por exemplo, para uma configuração com quatro amplificadores, o espaço de decisão será composto por 8 variáveis, conforme ilustrado na Figura 9. No diagrama, "AMP1" refere-se ao ganho do primeiro amplificador do enlace, enquanto "VOA1" corresponde à perda do Atenuador Óptico Variável (VOA) associado ao primeiro amplificador. As variáveis para os amplificadores subsequentes e seus respectivos VOAs seguem a mesma estrutura, com cada amplificador e VOA sendo representados por um par de variáveis no espaço de busca. O fluxograma com o funcionamento do algoritmo de otimização é apresentado na Figura 10.

AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	VOA 1	VOA 2	VOA 3	VOA 4
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Figura 9 – Partícula representando a estrutura de um link com 4 amplificadores em cascata. Apresentado em (LIMA et al., 2020).

Utilizando o mesmo amplificador de modelo comercial e o mesmo cenário, esta técnica foi comparada com as outras técnicas ACOP. Os resultados obtidos são apresentados na Figura

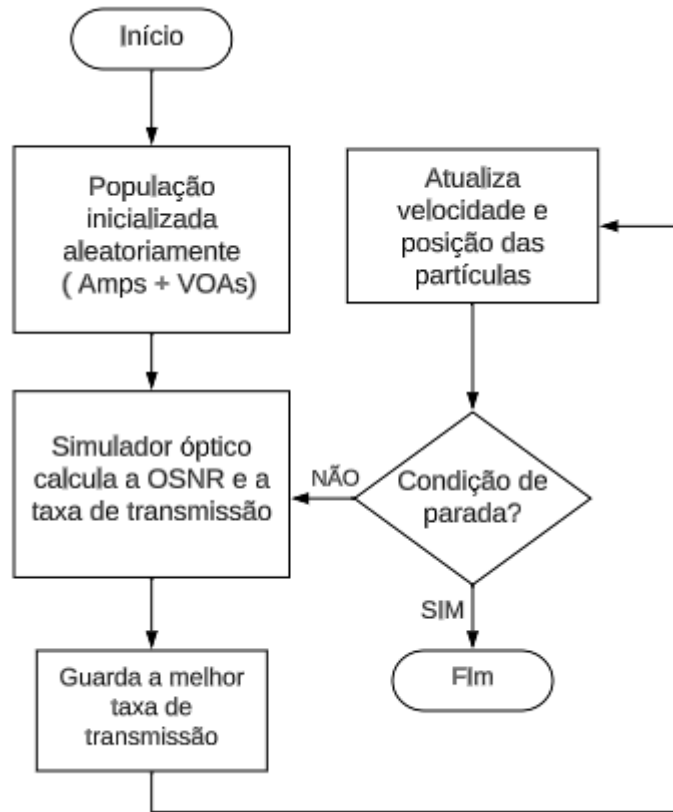


Figura 10 – Fluxograma apresentando o funcionamento do algoritmo de otimização PSO. Apresentado em (LIMA et al., 2020).

11 e mostram que a técnica PSO-ACOP obteve o melhor desempenho em todos os cenários simulados.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 2

A partir da revisão da literatura apresentada neste capítulo, observa-se que as técnicas previamente abordadas concentram-se exclusivamente na otimização da transmissão óptica dentro da banda C, tradicionalmente utilizada nos sistemas WDM devido à sua eficiência e disponibilidade de componentes. No entanto, com o aumento da demanda por capacidade e a saturação do espectro útil na banda C, torna-se imperativo explorar novas estratégias que permitam a utilização eficiente de um espectro mais amplo. O principal desafio desta pesquisa, portanto, é expandir essas abordagens para um cenário multibanda, contemplando simultaneamente as bandas S, C e L.

A introdução de amplificadores com características e comportamentos distintos para cada uma dessas bandas impõe um aumento considerável na complexidade do processo de otimização, exigindo novas modelagens e estratégias mais robustas de controle. Além disso, parâmetros físicos que dependem do comprimento de onda — como atenuação, dispersão e área efetiva — e que foram em grande parte desconsiderados em trabalhos anteriores, passam a ter um papel central em um contexto multibanda, impactando diretamente o desempenho da transmissão.

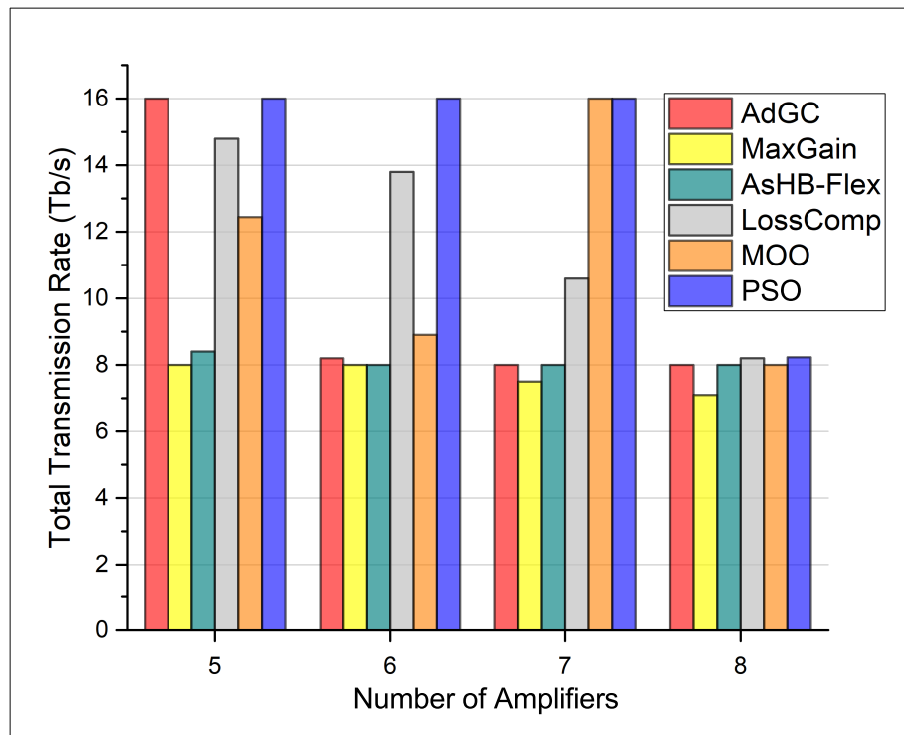


Figura 11 – Média da taxa de transmissão total obtida pelas técnicas ACOP anteriores e pela técnica proposta (PSO) após 20 execuções independentes, considerando enlaces ópticos com 5, 6, 7 e 8 amplificadores. Apresentado em (LIMA et al., 2020).

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe o método ACOP-MB, uma extensão multi-banda da técnica ACOP, projetada para lidar com as especificidades da operação simultânea nas bandas S, C e L. Essa abordagem incorpora, de maneira explícita, a modelagem de parâmetros espectralmente dependentes, bem como a consideração de diferentes amplificadores ópticos para cada banda de transmissão. O objetivo central é otimizar de forma integrada a utilização das três bandas, promovendo um aumento significativo da capacidade total das redes ópticas e contribuindo para a melhoria da qualidade do sinal transmitido em ambientes de alta densidade de tráfego.

3 MODELAGEM DO AMPLIFICADOR POR MÁSCARAS DE POTÊNCIA NO GNPY

Os amplificadores ópticos de fibras dopadas como os EDFAs e TDFAs desempenham um papel fundamental nas redes ópticas, permitindo a transmissão de sinais a longas distâncias por meio da compensação das perdas acumuladas ao longo do enlace. Essas perdas ocorrem devido às características intrínsecas da fibra óptica, como a atenuação do sinal, além da introdução de perdas adicionais por componentes da rede, como acopladores, multiplexadores e conectores. Para obter uma estimativa precisa da Qualidade de Transmissão (QoT), é essencial representar com fidelidade as características físicas dos elementos presentes no enlace óptico.

O GNPY é um software de código aberto desenvolvido para modelar a propagação do sinal em redes ópticas, permitindo o planejamento e a otimização de rotas em ambientes multi-vendor. Essa ferramenta abstrai a camada física da rede e realiza cálculos considerando os impactos de diversos componentes, como amplificadores, fibras e multiplexadores. Devido à sua acessibilidade e flexibilidade, pesquisadores têm utilizado o GNPY para estimar a QoT em diferentes cenários ([FERRARI et al., 2020a](#)).

Originalmente, o GNPY foi projetado para operar na banda C, onde parâmetros críticos de transmissão, como atenuação e área efetiva da fibra, podem ser tratados como constantes devido à sua variação insignificante nessa faixa. No entanto, em cenários de transmissão multibanda (S + C + L), esses parâmetros apresentam variações significativas ao longo do espectro de comprimentos de onda. Assim, foi necessário modificar o código-fonte do GNPY para incorporar essas dependências espectrais e garantir uma modelagem mais precisa da propagação do sinal em redes multibanda.

3.1 MODELAGEM DOS AMPLIFICADORES E CUSTOMIZAÇÃO DO GNPY

Entre os componentes avaliados pelo GNPY em enlaces ópticos, os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFAs) desempenham um papel central. Atualmente, o GNPY utiliza diferentes modelos para representar o comportamento desses amplificadores, sendo o mais completo denominado *Advanced Model*. Esse modelo descreve a figura de ruído (NF) por meio de um polinômio de terceiro grau e estima o ganho do amplificador com base na curva DGT (*Dynamic Gain Tilt*). A curva DGT é obtida a partir de uma metodologia que mede a variação dinâmica do ganho do amplificador, representando sua resposta espectral em função do comprimento de onda, independentemente do ganho configurado ([LIMA et al., 2022](#)).

Outra abordagem para estimar o desempenho do EDFA é o uso da máscara de potência, que descreve as características do amplificador por meio de um conjunto de pontos dentro de sua região operacional. Esse método permite mapear parâmetros essenciais, como o espectro de potência, a figura de ruído e o consumo de energia em diferentes condições de operação.

Uma das modificações fundamentais implementadas no código-fonte do GNPpy no desenvolvimento desta pesquisa foi a inserção do método da máscara de potência (*Power Mask Model* – PMM). A figura 12 ilustra o fluxo de simulação do GNPpy adaptado para incluir essa abordagem. O processo tem início com a definição da topologia da rede óptica a ser simulada, especificada pelo usuário em um arquivo JSON. Esse arquivo deve conter uma descrição detalhada da rede, incluindo os nós, os enlaces, o comprimento de cada enlace e o modelo de amplificador aplicado em cada seção. Além disso, o usuário deve definir os nós de origem e destino para a simulação. Após a configuração desses parâmetros, o GNPpy processa as informações e inicia a simulação, incorporando as novas funcionalidades para análise do desempenho óptico.

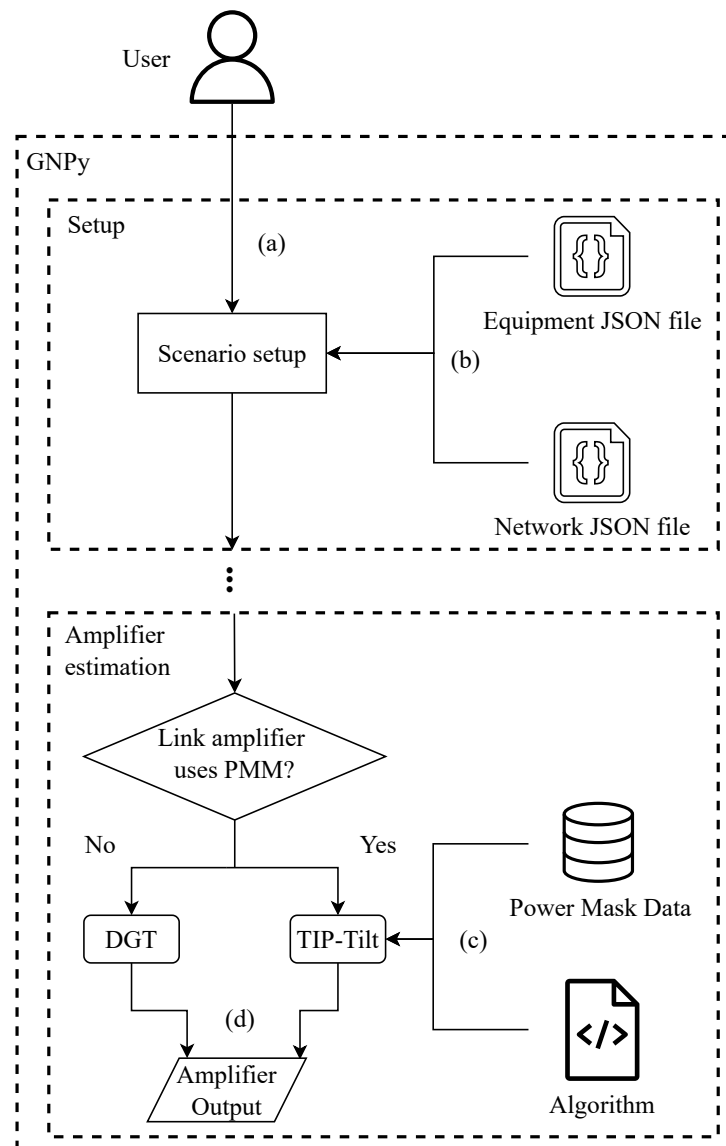


Figura 12 – Fluxograma de simulação de transmissão do GNPpy após a inserção do modelo de máscara de potência.

Durante a simulação, a cada estágio de amplificação, o GNPpy verifica o modelo de amplificador associado ao enlace. Caso o modelo utilizado seja o *Power Mask Model*, o algoritmo TIP-Tilt (SILVA et al., 2021) é aplicado para estimar a potência do sinal transmitido e o nível de

ruído. No estágio final, o GNPY ajusta o sinal propagado de acordo com os perfis de ganho e ruído obtidos, calculando os parâmetros de saída, como a potência por canal e o GSNR.

O modelo de máscara de potência utiliza o algoritmo TIP-Tilt para estimar a resposta espectral do amplificador a partir dos dados fornecidos pela máscara de potência. Esse algoritmo, conforme descrito em (SILVA et al., 2021), tem como objetivo calcular o espectro de potência de saída dos amplificadores EDFA considerando o espectro de potência de entrada, sua inclinação e o ganho de amplificação desejado. Utilizando interpolação linear, o modelo acessa uma base de máscaras de potência para determinar a saída do amplificador. Se houver um sinal de entrada com características similares armazenadas na base, esse valor é utilizado diretamente; caso contrário, o algoritmo interpola entre sinais semelhantes para estimar a resposta espectral do amplificador.

Para validar a implementação, realizamos simulações no GNPY utilizando um modelo de amplificador óptico comercial. O amplificador analisado foi um EDFA de estágio único, com *ripple* de potência variando entre 0,01 e 5,03 dB e figura de ruído entre 4,62 e 5,34 dB. Esse amplificador opera em uma faixa de ganho de 14 a 24 dB, enquanto sua potência de entrada varia entre -25 e 7 dBm.

Para realizar as simulações, foi necessário modelar esse amplificador tanto no formato do *Advanced Model* quanto pelo método da máscara de potência no GNPY. No *Advanced Model*, a modelagem exige a obtenção da curva DGT e de uma curva representando a figura de ruído do amplificador. A curva DGT é determinada a partir da relação entre os ganhos medidos para duas configurações distintas do amplificador, mantendo a mesma potência de entrada. A equação que define essa relação é apresentada na equação 3.1.

$$DGT(\lambda) = \frac{\Delta g(\lambda)}{\Delta g(\lambda_0)}, \quad (3.1)$$

em que $\Delta g = g_2(\lambda) - g_1(\lambda)$. Δg representa a diferença de ganho no mesmo comprimento de onda e λ_0 representa um comprimento de onda de referência. Em resumo, o DGT é definido como a razão entre a variação de ganho num determinado comprimento de onda λ e a variação de ganho num comprimento de onda de referência λ_0 (MURO, 2000). A figura 13 mostra as curvas DGT para ambos o EDFA utilizado na simulação.

A figura 14 apresenta a curva representando a figura de ruído do amplificador. A obtenção dessa curva foi através dos piores valores de figura de ruído em cada ganho (14 a 24 dB) do amplificador.

A máscara de potência é obtida por meio da caracterização experimental do amplificador em laboratório, utilizando um dispositivo real. Durante esse processo, um sinal de entrada é aplicado ao amplificador, e seu ganho é ajustado para medir os parâmetros desejados. Esse procedimento é repetido até que toda a região de operação do amplificador seja varrida, garantindo uma caracterização completa de seu desempenho.

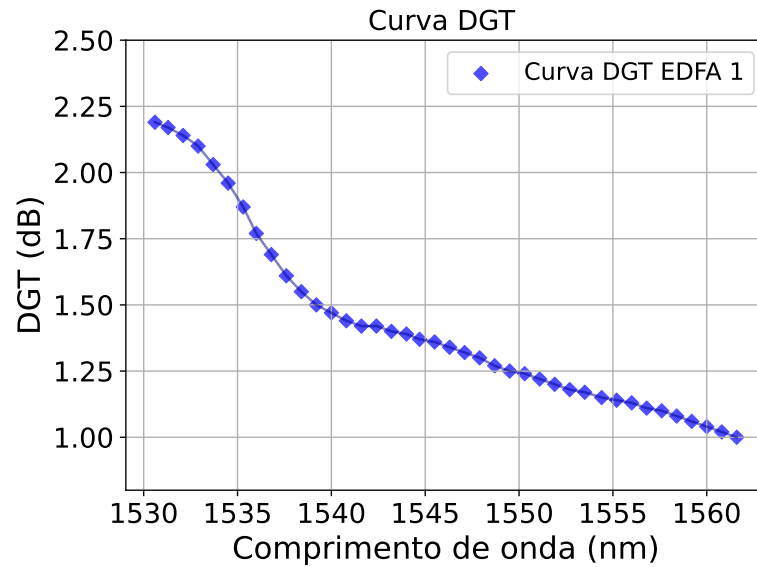


Figura 13 – Curva DGT do EDFA da banda C utilizado nas simulações do GNPpy.

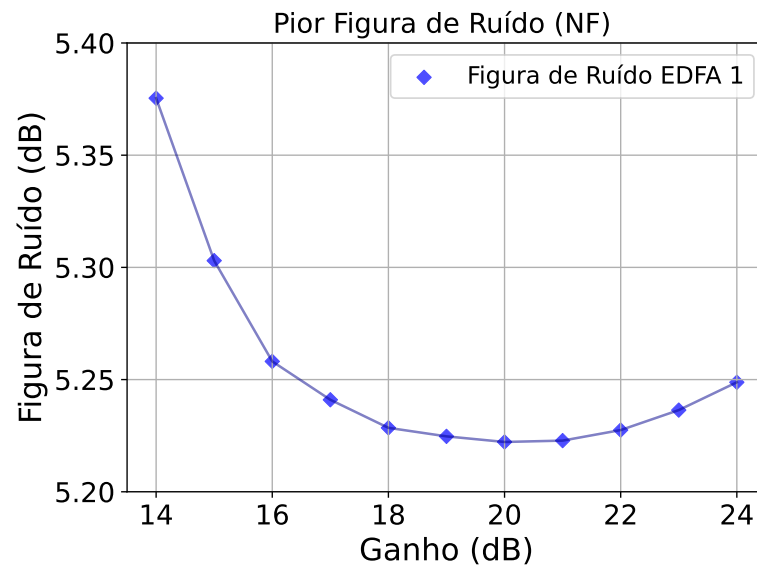


Figura 14 – Curva representando a figura de ruído do EDFA da banda C utilizado nas simulações do GNPpy.

No GNPpy atualizado, a máscara de potência é representada como uma tabela CSV que contém três conjuntos de dados: o espectro de ganho do amplificador, o espectro da figura de ruído e o espectro da potência de saída. Esses parâmetros são registrados para diferentes combinações de potência total de entrada e ganho alvo dentro da faixa operacional do EDFA.

A figura 15 ilustra a máscara de potência obtida para o amplificador utilizado nas simulações, apresentando tanto a ondulação de potência (*ripple*) quanto a variação da figura de ruído ao longo do espectro.

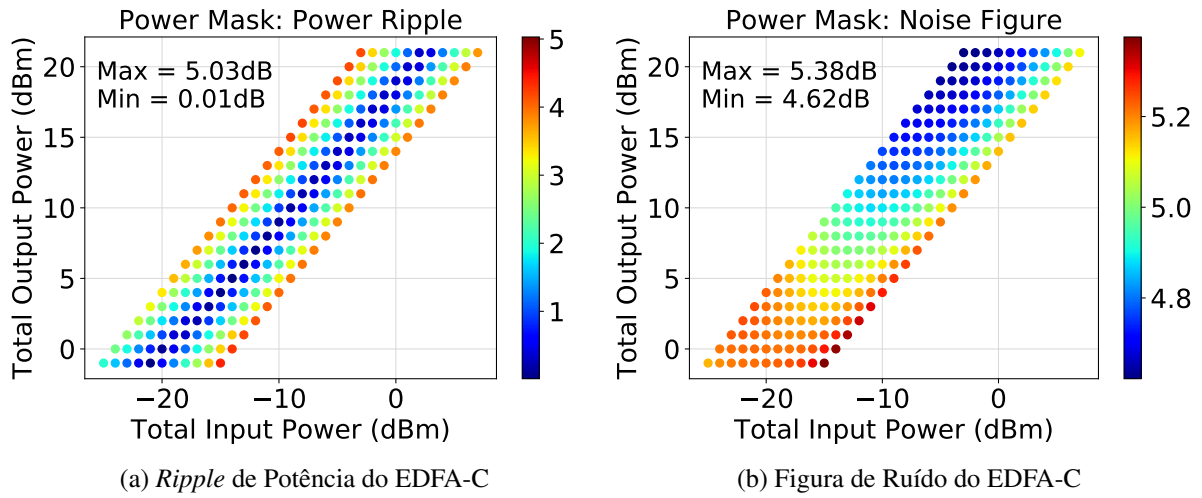


Figura 15 – Máscara de potência representando *ripple* de potência e figura de ruído do EDFA comercial utilizado nas simulações da banda C.

3.1.1 Comparação entre as abordagens *Advanced Model* e Máscaras de Potência.

Foram consideradas duas configurações distintas nas simulações. O primeiro cenário envolve uma cascata de quatro EDFAs, com cada span (trecho de fibra seguido por um amplificador) medindo 90 km. No segundo cenário, a distância de cada span foi ampliada para 110 km. Em ambos os casos, avaliamos o desempenho do amplificador utilizando dois modelos: o Modelo de Máscara de Potência e o *Advanced Model*.

As simulações foram realizadas considerando 40 canais ativos operando na banda C, com uma potência de lançamento de 0 dBm por canal. O ganho dos amplificadores foi configurado para compensar exatamente as perdas acumuladas ao longo do percurso. Assim, em todas as simulações, os enlaces consistem em quatro spans e quatro EDFAs posicionados entre o transmissor e o receptor.

A figura 16 apresenta a potência do sinal após o último amplificador da cascata no primeiro cenário, em que cada span tem 90 km. Os amplificadores operaram com uma potência total de entrada de -3 dBm e um ganho de 19 dB. A curva azul representa os resultados obtidos com o Modelo de Máscara de Potência, enquanto a curva cinza corresponde aos valores calculados pelo *Advanced Model*. Observa-se que ambas as abordagens fornecem resultados próximos, com uma diferença máxima de 1 dB nos casos mais extremos, indicando que, nessa configuração específica, os dois modelos conseguem representar com precisão a potência de saída do amplificador.

A figura 17 apresenta os valores de GSNR ao final do enlace para as duas abordagens analisadas. Observa-se que os resultados são semelhantes, com uma diferença máxima de 0,2 dB, o que confirma que, assim como na estimativa da potência de saída, a propagação do sinal nesse cenário é adequadamente representada tanto pelo Modelo de Máscara de Potência quanto pelo *Advanced Model*.

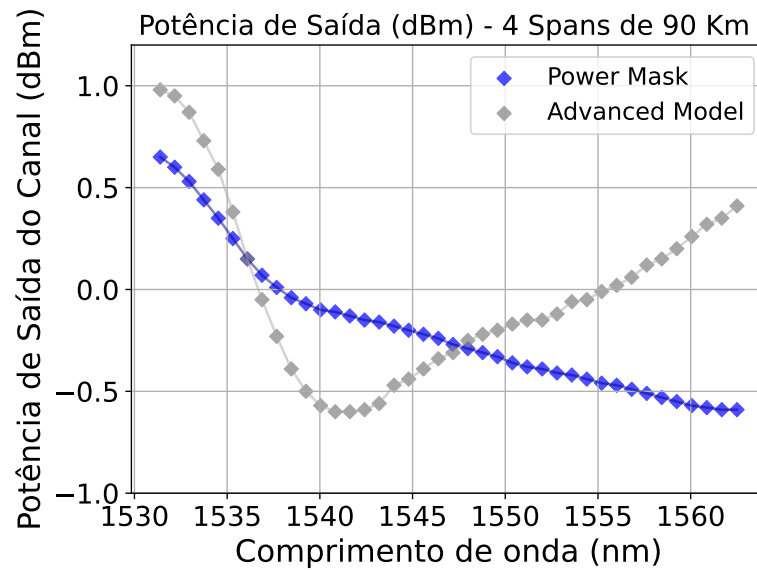


Figura 16 – Comparação do espectro de potência do sinal obtido pelos métodos *Advanced Model* e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico

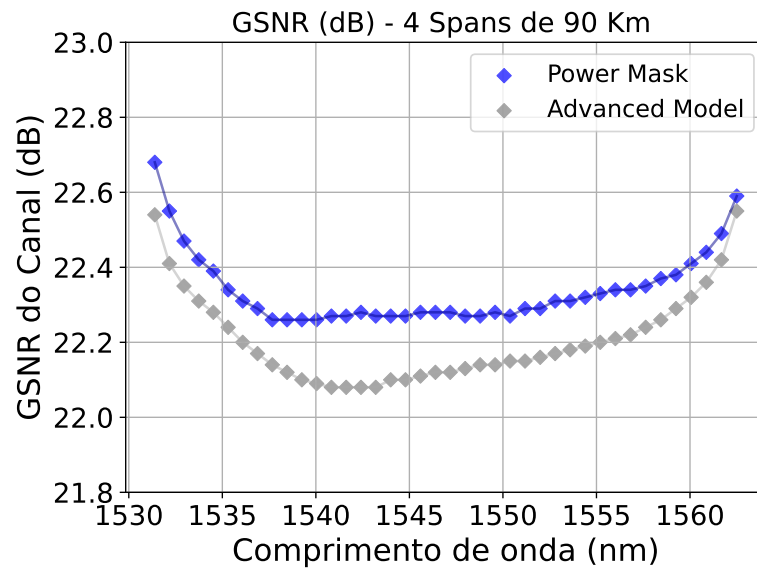


Figura 17 – Comparação da GSNR obtida pelos métodos *Advanced Model* e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico

No cenário com spans de 110 km, observamos um comportamento distinto entre os métodos comparados nesta pesquisa. A figura 18 apresenta os resultados da potência de saída obtidos pelas duas abordagens após o último amplificador. Nesse caso, o ponto de operação de cada amplificador foi definido com uma potência total de entrada de -7 dBm e um ganho de 23 dB.

Os resultados revelam uma diferença significativa na potência de saída. A curva em azul representa os valores obtidos pelo Modelo de Máscara de Potência, enquanto a curva em cinza corresponde ao *Advanced Model*. O Modelo de Máscara de Potência resultou em um tilt de

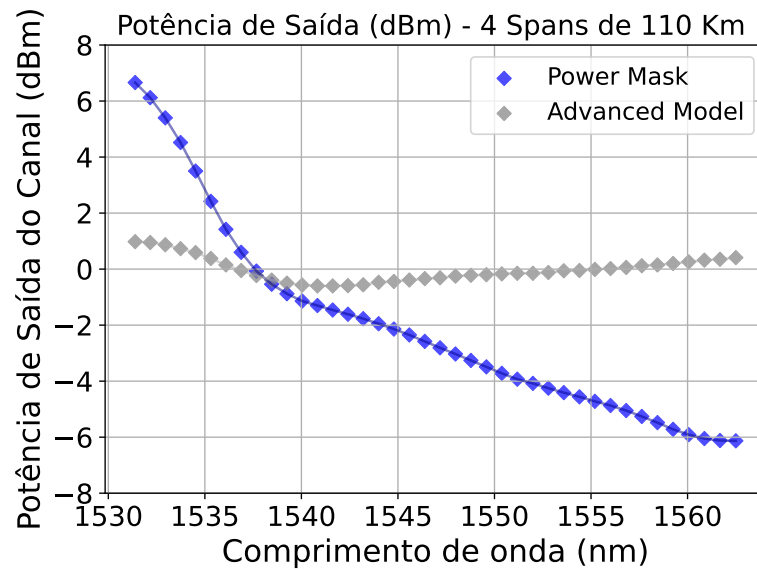


Figura 18 – Comparação do espectro de potência do sinal obtido pelos métodos *Advanced Model* e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico

potência de aproximadamente 13 dB ao final do enlace, enquanto o *Advanced Model*, devido à generalização da resposta do amplificador por meio da curva DGT, manteve uma potência de saída praticamente plana, com um tilt inferior a 1 dB.

No cenário com spans de 110 km, a análise do GSNR revelou uma diferença de aproximadamente 2 dB nos canais de menor frequência. O Modelo de Máscara de Potência retornou um GSNR de 17,5 dB para essas frequências, enquanto o *Advanced Model* obteve um valor superior, de 19,5 dB. Esses resultados foram detalhados no estudo apresentado em (LIMA et al., 2023) e (SILVA et al., 2025).

Ao comparar as duas abordagens utilizadas para a modelagem do amplificador — *Advanced Model* e *Power Mask* — os resultados indicam que o método baseado em máscaras de potência apresenta uma representação mais fiel do comportamento real dos amplificadores ópticos. Por outro lado, o *Advanced Model* tende a fornecer uma modelagem mais genérica, que, embora útil em alguns contextos, pode não capturar com precisão as variações específicas de desempenho observadas na prática. Essa constatação destaca a importância de se adotar modelos mais aderentes ao comportamento físico real, especialmente em cenários de otimização multibanda.

3.2 MÁSCARAS DE POTÊNCIA - BANDA S E BANDA L.

As máscaras de potência são tradicionalmente obtidas em laboratório por meio de medições diretas dos parâmetros desejados, conforme discutido no Capítulo 2. No entanto, para os experimentos envolvendo a operação em multibanda, foi necessário caracterizar os amplificadores ópticos das bandas L (EDFA) e S (TDFA), que não estavam fisicamente disponíveis em nosso

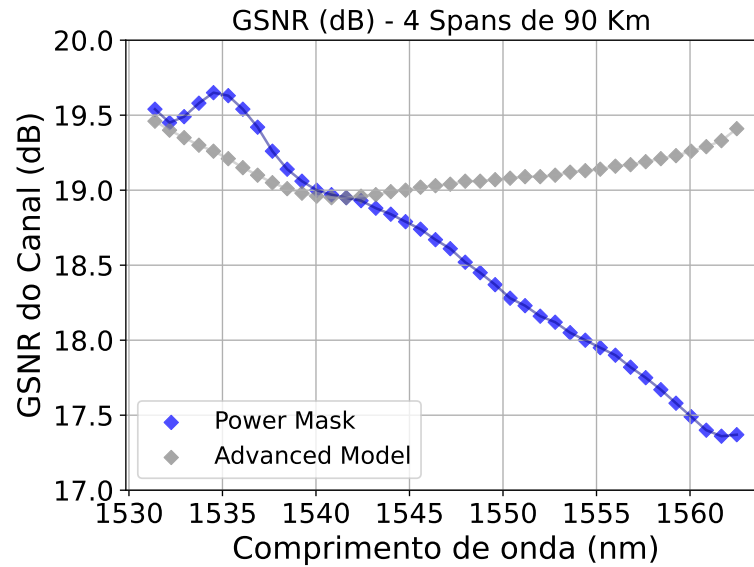


Figura 19 – Comparação da GSNR obtida pelos métodos *Advanced Model* e máscaras de potência após o último amplificador do enlace óptico

laboratório.

Para contornar essa limitação, adotamos uma abordagem alternativa baseada nas folhas de dados fornecidas pelos fabricantes. Essas especificações incluíam pontos operacionais específicos, que foram interpolados para gerar as curvas de desempenho operacional dos amplificadores. A partir dessas curvas, extraímos informações essenciais, como a potência de saída e a figura de ruído em cada canal, permitindo a construção de um banco de dados abrangente sobre o comportamento desses dispositivos.

Com esse banco de dados, foi possível gerar as máscaras de potência dos amplificadores TDFA (banda S) e EDFA (banda L). Já para a banda C, contamos com um protótipo disponível em laboratório, o que possibilitou a medição direta dos parâmetros necessários para a construção da máscara de potência.

3.2.1 Modelagem Amplificador Banda L : EDFA-L

O amplificador utilizado para as simulações na banda L foi o AMP-FL5001-LB-19 da empresa Fiber Labs. As principais características do amplificador são apresentadas na tabela 2 e são divulgadas na página oficial da empresa. A potência de saída com valor ≥ 19 dBm considera uma potência de entrada de 0 dBm, o que representa a potência nominal de operação na condição típica de saturação. O ganho de valor ≥ 35 dB considera uma potência de entrada de -30 dBm. Os gráficos apresentados nas figura 20 e 21 apresentam alguns pontos de operação do amplificador.

O processo de obtenção das curvas de operação do EDFA-L é inicialmente ilustrado na figura 22. Baseando-se nas curvas apresentadas na figura 21, foram traçadas 4 retas representando

Tabela 2 – Dados operacionais do EDFA-L

Product Number	Operating WL (nm)	Nominal WL (nm)	Output Power (dBm)	Gain (dB)	NF (dB)
AMP-FL8001-LB-19	1560 to 1610	1580	$\geq +19$	≥ 35	≤ 6

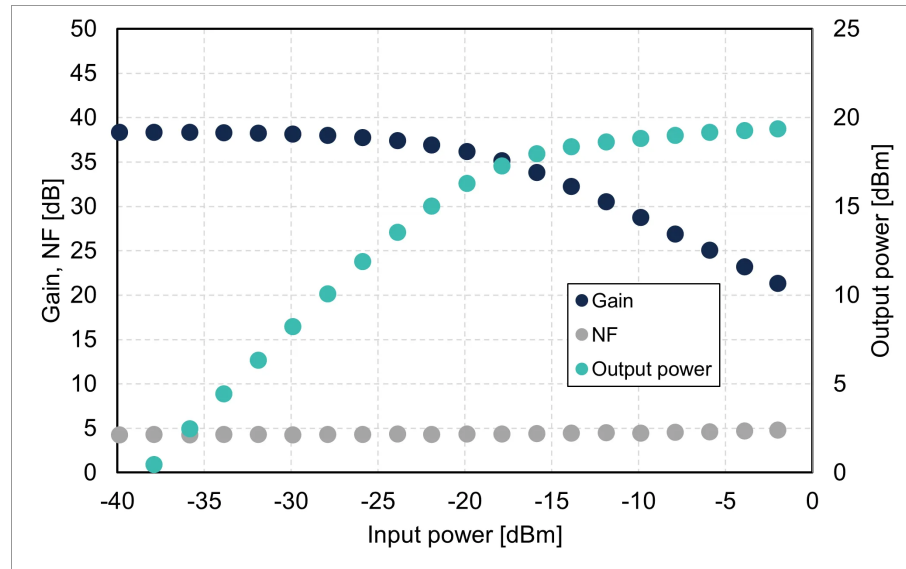


Figura 20 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador EDFA-L, modelo AMP-FL5001-LB-19, conforme especificado no datasheet do equipamento. Estas curvas delineiam os limites de operação do amplificador.

a resposta do amplificador em 4 regiões distintas. Conforme pode ser visto na figura 22, a região de operação foi reduzida para atuar entre 1565 nm e 1610 nm. Esta ação foi tomada pelo fato do EDFA-C utilizado nas simulações operar até 1565 nm. A curva cinza ilustra a resposta do amplificador para uma potência de entrada com valores acima de -5 dBm. A curva vermelha ilustra a resposta para potências de entrada compreendidas entre -10 e -5 dBm. A curva azul claro ilustra a resposta para potências de entrada com valores entre -15 e -10 dBm. E a curva azul escuro apresenta a resposta para potências de entrada com valor abaixo de -15 dBm.

A partir das quatro curvas apresentadas, foi realizada uma interpolação para determinar os pontos correspondentes às possíveis potências de entrada do amplificador. Na figura 22, o retângulo preto destacado representa o canal correspondente ao comprimento de onda de 1565 nm, que será utilizado como exemplo para a explicação do processo.

Com base nos valores de potência de entrada definidos na figura 20 (de -40 dBm a 0 dBm), foram obtidos 40 valores distintos por meio da interpolação. Cada valor resultante indica o ganho do amplificador para o comprimento de onda de 1565 nm em uma potência de entrada específica.

Na figura 22, o ponto azul escuro representa o ganho do amplificador para uma potência de entrada de -40 dBm, enquanto o ponto cinza indica o ganho correspondente a uma potência de entrada de 0 dBm. Os pontos intermediários obtidos através da interpolação representam

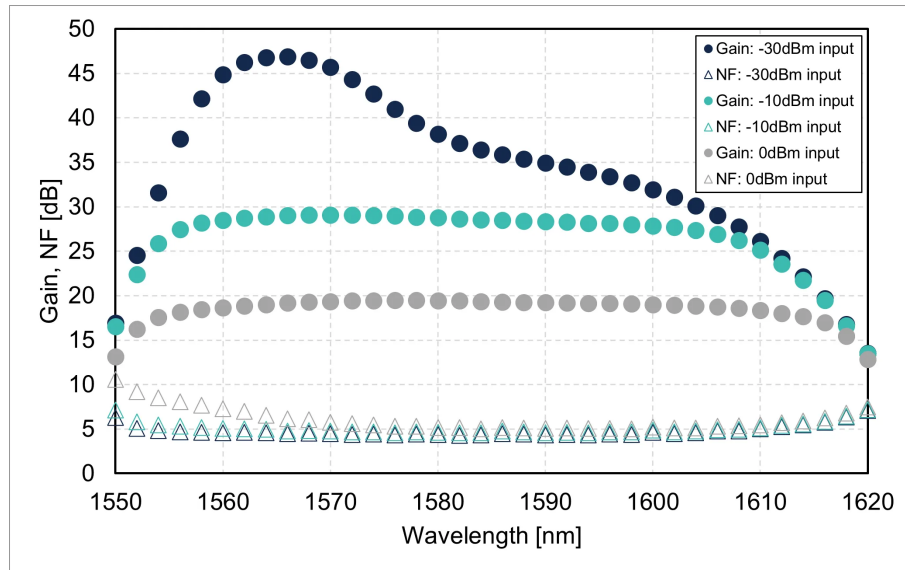


Figura 21 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador EDFA-L, modelo AMP-FL5001-LB-19, conforme as especificações do datasheet do equipamento. Essas curvas ilustram o desempenho do amplificador em relação ao ganho e à figura de ruído ao longo do espectro óptico em que o amplificador opera.

valores de ganho para potências de entrada compreendidas entre -40 dBm e 0 dBm. Esse mesmo procedimento foi aplicado a todos os outros canais, com comprimentos de onda variando de 1566 nm a 1610 nm, resultando em 40 curvas que descrevem o espectro de ganho do amplificador para as diferentes potências de entrada. O resultado com todas as 40 curvas são apresentados na figura 23.

As figuras 20 e 21 mostram o comportamento característico da resposta do amplificador em diferentes condições de potência de entrada. Para potências elevadas, acima de -10 dBm, a resposta do amplificador mantém-se praticamente plana ao longo de grande parte do espectro. Em contrapartida, para potências de entrada mais baixas, inferiores a -20 dBm, observa-se a formação de um *ripple* de potência, sendo os canais com comprimento de onda até 1570 nm os que apresentam os maiores valores.

Esse comportamento se repete ao longo de toda a região de operação do amplificador durante o processo de definição da máscara de potência. Para completar a obtenção dessa máscara, é necessário então realizar uma varredura abrangendo toda a faixa operacional de ganho (20 a 35 dB). Desta forma, para qualquer potência de entrada escolhida (-40 dBm a 0 dBm) e para qualquer ganho escolhido (20 dB a 35 dB), haverá uma curva representando a resposta do amplificador. Essas informações são então inseridas em uma tabela CSV e temos então a máscara de potência do amplificador. As máscaras de potência de *ripple* e figura de Ruído do EDFA-L são apresentadas nas figuras 24a e 24b.

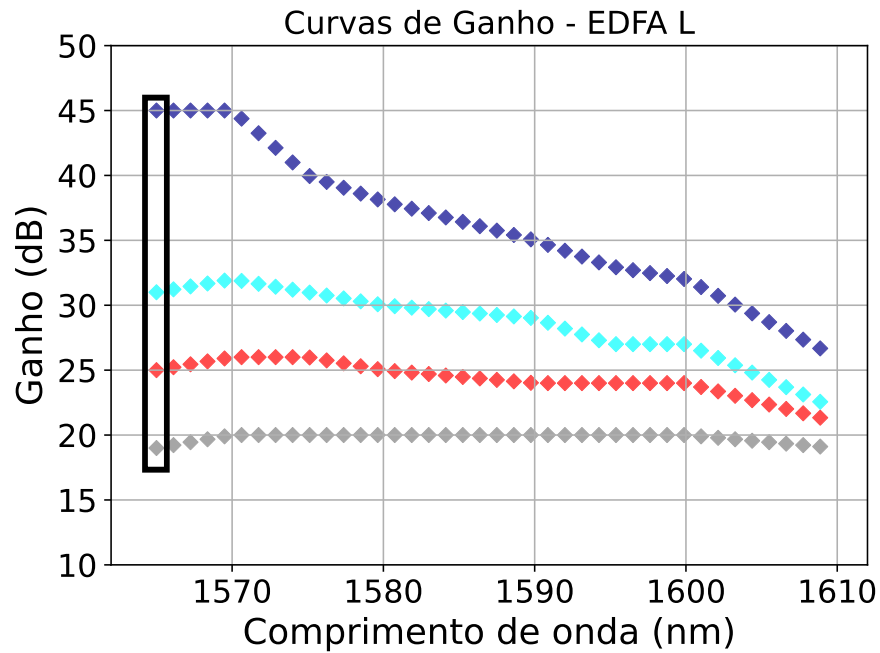


Figura 22 – Curvas obtidas a partir da figura 21, que representam o comportamento do amplificador EDFA-L ao longo do espectro óptico em que ele opera. Com base nessas curvas, será realizado o processo de interpolação para determinar as curvas de operação do amplificador.

3.2.2 Modelagem Amplificador Banda S : TDFA

O procedimento para a obtenção da máscara de potência do TDFA foi o mesmo realizado para o EDFA-L. O amplificador utilizado para as simulações na banda S foi o AMP-FL8211-SB-20 da empresa Fiber Labs. As principais características do amplificador são apresentadas na tabela 3 e são divulgadas na página oficial da empresa. A potência de saída com valor ≥ 20 dBm considera uma potência de entrada de 0 dBm, o que representa a potência nominal de operação na condição típica de saturação. O ganho de valor ≥ 25 dB considera uma potência de entrada de -30 dBm. Os gráficos apresentados nas figuras 25 e 26 apresentam alguns pontos de operação do amplificador.

Tabela 3 – Dados operacionais do TDFA

Product Number	Operating WL (nm)	Nominal WL (nm)	Output Power (dBm)	Gain (dB)	NF (dB)
AMP-FL8211-SB-20	1460 to 1500	1480	$\geq +20$	≥ 25	≤ 6

O processo de obtenção das curvas de operação do TDFA seguiu a mesma abordagem utilizada para o EDFA-L. A partir das curvas apresentadas na figura 26, um processo de interpolação foi realizado em cada comprimento de onda para obter as curvas de ganho referente a cada potência de entrada possível (-40 dBm a 0 dBm). A figura 27 apresenta o resultado após a geração das curvas de ganho para o TDFA. Conforme é possível observar, de forma semelhante ao EDFA-L, para potências de entrada elevada, valores maior que -5 dBm, o amplificador apresenta

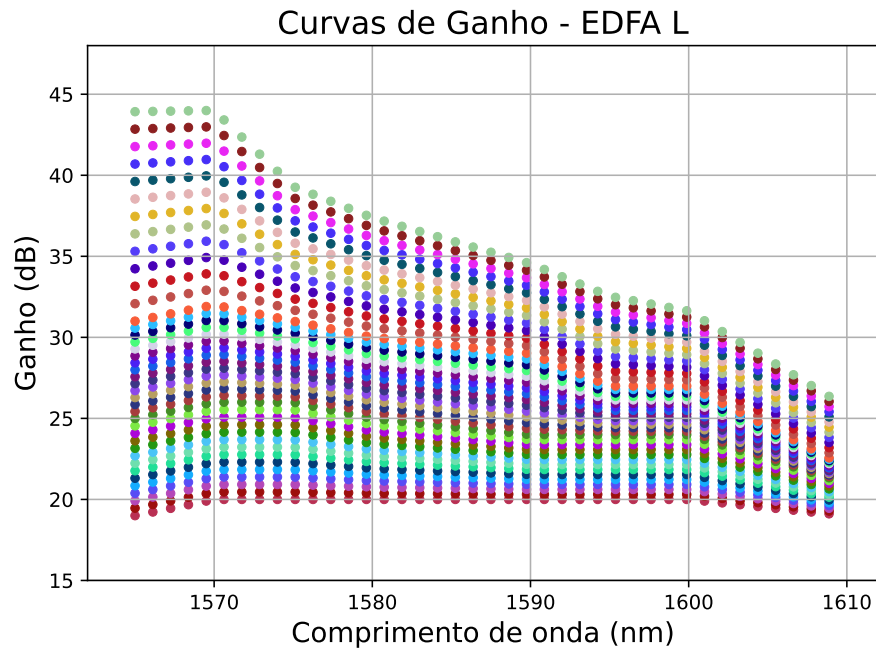


Figura 23 – Curvas de operação do EDFA-L obtidas por meio de interpolação linear a partir dos dados fornecidos no datasheet do fabricante (Figura 21).

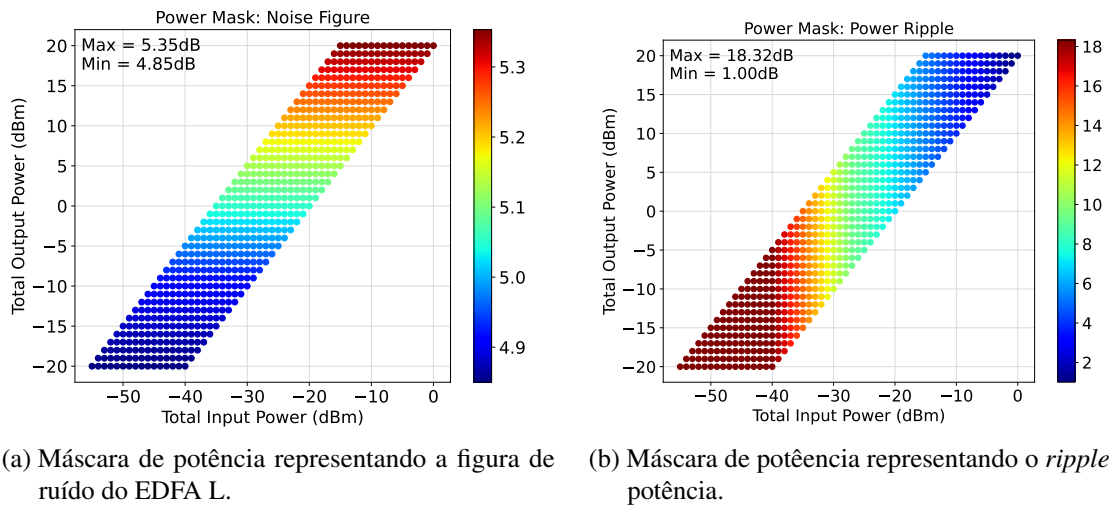


Figura 24 – Máscaras de Potência do EDFA L.

uma resposta plana em seu espectro. Em contrapartida, para potências de entrada baixas, valores menor que -20 dBm, o amplificador apresenta um *ripple* de potência, com os comprimentos de onda próximo a 1480 nm apresentando os maiores valores.

A máscara de potência, que reúne todas as informações sobre a resposta do amplificador, é determinada por meio de uma varredura abrangente em toda a faixa operacional de ganho, que varia de 20 a 30 dB. Desta forma, para qualquer potência de entrada escolhida (-40 dBm a 0 dBm) e para qualquer ganho escolhido (20 dB a 35 dB), haverá uma curva representando a resposta do amplificador. Essas informações são então inseridas em uma tabela CSV e temos

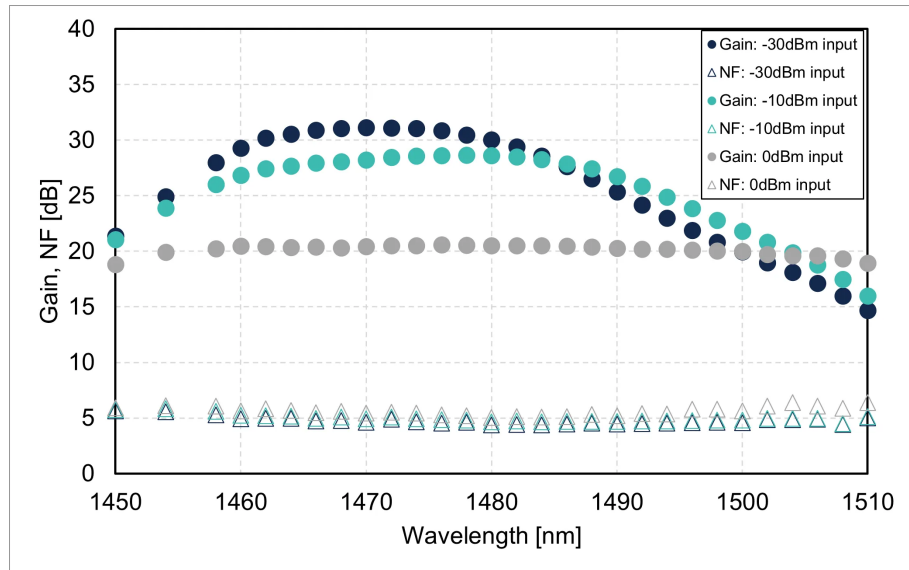


Figura 25 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador TDFA, modelo AMP-FL8211-SB-20, conforme especificado no datasheet do equipamento. Estas curvas delineiam os limites de operação do amplificador.

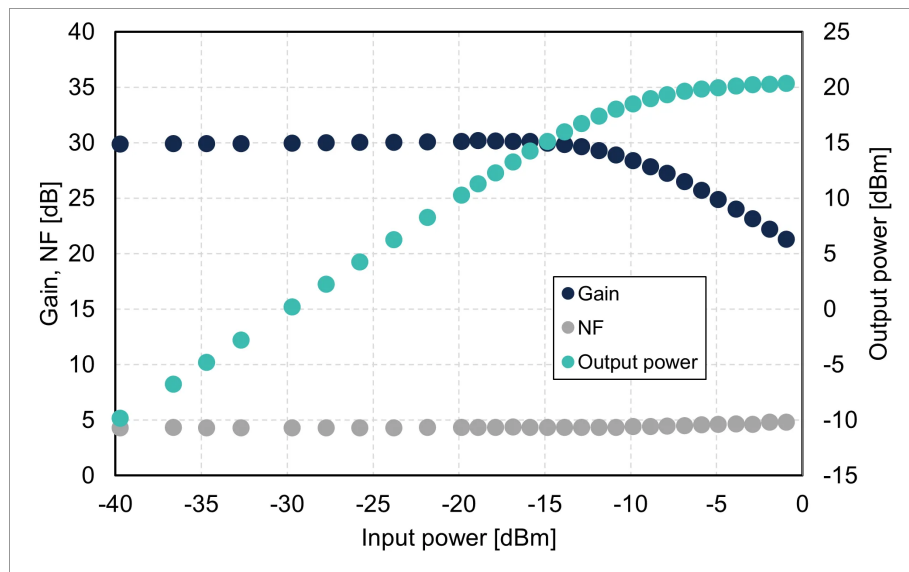


Figura 26 – Curvas de ganho e figura de ruído do amplificador TDFA, modelo AMP-FL8211-SB-20, conforme as especificações do datasheet do equipamento. Essas curvas ilustram o desempenho do amplificador em relação ao ganho e à figura de ruído ao longo do espectro óptico em que o amplificador opera.

então a máscara de potência do amplificador. As máscaras de potência de figura de Ruído e *ripple* do TDFA são apresentadas nas figuras 28a e 28b.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 3

A modelagem precisa de amplificadores ópticos é essencial para garantir simulações coerentes, especialmente em cenários que envolvem cascatas de amplificadores, nos quais as

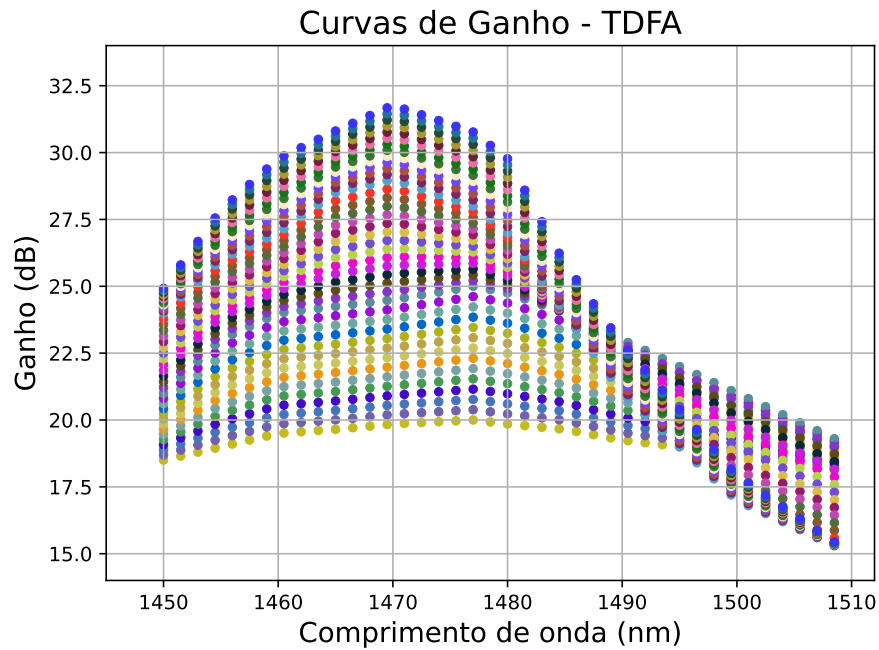
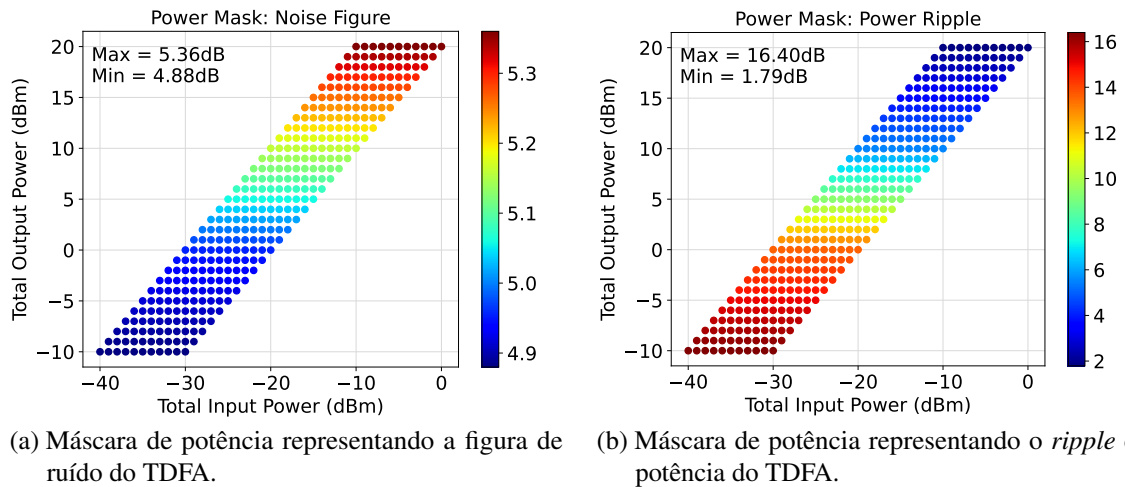


Figura 27 – Curvas de operação do TDFA obtidas por meio de interpolação linear a partir dos dados fornecidos no datasheet do fabricante (Figura 25)



(a) Máscara de potência representando a figura de ruído do TDFA. (b) Máscara de potência representando o *ripple* de potência do TDFA.

Figura 28 – Máscaras de Potência do TDFA.

penalidades se acumulam ao longo do enlace. Modelos tradicionais, como os apresentados em (ZHANG; MITCHELL, 2000) e (MURO, 2000), utilizam equações baseadas em alguns pontos de operação do amplificador para realizar aproximações do restante do seu comportamento. No entanto, estudos conduzidos por nosso grupo de pesquisa (Barboza, 2017), (LIMA et al., 2023) e (SILVA et al., 2025) demonstraram que a abordagem baseada em máscara de potência, que considera a modelagem completa do comportamento do amplificador em todos os seus pontos de operação, proporciona maior fidelidade na representação da resposta do dispositivo. Quanto à estratégia adotada para a obtenção das máscaras de potência das bandas S e L, optou-se por uma abordagem intencionalmente conservadora. As máscaras geradas refletem as características

descritas nas especificações dos fabricantes, além de representarem pontos de operação intermediários no espaço das variáveis operacionais, situados entre os pontos explicitamente fornecidos. Considerando que as variações entre esses pontos tendem a ocorrer de forma contínua e suave, é razoável esperar que as máscaras obtidas se aproximem daquelas que seriam determinadas experimentalmente. Ainda assim, eventuais discrepâncias em relação à máscara exata de um amplificador específico não comprometem a validade da proposta desta tese, uma vez que o método considera, de forma geral, amplificadores distintos com diferentes máscaras de potência.

A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas no GNPY, é possível tirar as seguintes conclusões:

1. O *Advanced Model*, utilizando o modelo DGT, generaliza a curva de ganho do amplificador de forma que não reflete com precisão o comportamento do amplificador em todo o seu intervalo de operação.
2. O método da máscara de potência, por se basear em dados reais obtidos em laboratório, representa com maior fidelidade o comportamento do amplificador, independentemente do ponto de operação selecionado.
3. Dependendo do cenário e do ponto de operação escolhido, o *Advanced Model* pode ser útil, atendendo aos critérios de simulação e fornecendo resultados próximos da realidade.
4. Em um cenário dinâmico, onde os pontos de operação dos amplificadores podem variar com frequência, o método da máscara de potência é o mais indicado, pois traduz com maior precisão os resultados ao final do enlace, independentemente das configurações adotadas.
5. O ideal seria dispor dos amplificadores das bandas S e L em laboratório para realizar medições diretas dos dispositivos. No entanto, diante da impossibilidade dessa abordagem, adotamos a estratégia mais conservadora disponível para gerar as máscaras de potência para as simulações.

4 AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS RELEVANTES NA TRANSMISSÃO MULTI-BANDA

Os sistemas de comunicações ópticas operando via transmissão multibanda são uma solução atraente para fornecer o aumento de capacidade necessário para um futuro próximo. Podem oferecer até 10x de capacidade em comparação com infraestrutura existente de fibras SSMF operando apenas na banda C (MOURA et al., 2021). O desenvolvimento de um sistema multibanda prático enfrenta uma série de desafios inter-relacionados. Um dos mais imediatos é a variação dos parâmetros físicos da fibra óptica como atenuação, dispersão cromática e área efetiva ao longo do comprimento de onda, o que contrasta com a prática comum de tratá-los como constantes em sistemas convencionais. Além disso, o aumento da largura de banda leva a interações não lineares mais intensas entre canais WDM, especialmente aquelas causadas por espalhamento Raman estimulado, mistura de quatro ondas e modulação de fase cruzada (HOSHIDA et al., 2022). É bem definido na literatura que os efeitos ópticos não lineares de terceira ordem limitam severamente o desempenho de sistemas de transmissão WDM baseados em fibra de sílica, onde o espalhamento Raman estimulado (SRS) é uma das principais limitações de desempenho do sistema. Em resumo, o efeito SRS causa uma transferência unidirecional de energia de canais de comprimento de onda mais curtos para canais de comprimento de onda mais longos (KARFAA et al., 2007). Neste capítulo, são apresentadas e discutidas simulações destinadas a avaliar o impacto desses efeitos físicos sobre a transmissão multibanda. Para cada experimento, é explicitado o objetivo da análise, o cenário simulado, os principais parâmetros e os resultados obtidos, com o intuito de validar hipóteses técnicas e quantificar a influência desses fenômenos.

4.1 O EFEITO RAMAN E SEU IMPACTO NA PROPAGAÇÃO MULTIBANDA

Uma das propriedades dos dielétricos, incluindo a sílica, é a resposta não linear quando submetidos a campos eletromagnéticos intensos (BOYD, 2020). Devido à geometria da fibra óptica, esses efeitos não lineares tornam-se particularmente relevantes no projeto de sistemas de comunicação óptica, uma vez que o feixe de luz é confinado a uma pequena seção transversal ao longo de extensos comprimentos de fibra. O espalhamento óptico ocorre quando um feixe de luz sofre alteração em sua direção e/ou frequência ao interagir com um meio material, fenômeno que pode ser causado por flutuações nas propriedades ópticas do material. Como resultado, um feixe incidente pode se dividir em múltiplos feixes com diferentes direções e frequências, conforme ilustrado na Figura 29 (LIMA, 2012). A Figura 30 ilustra a dispersão espectral da luz em um meio onde ocorrem os fenômenos de espalhamento Raman, Brillouin, Rayleigh e Rayleigh-wing. Por definição, os componentes da luz espalhada que sofrem deslocamento para frequências mais baixas são denominados componentes de Stokes, enquanto aqueles deslocados para frequências mais altas são conhecidos como componentes anti-Stokes.

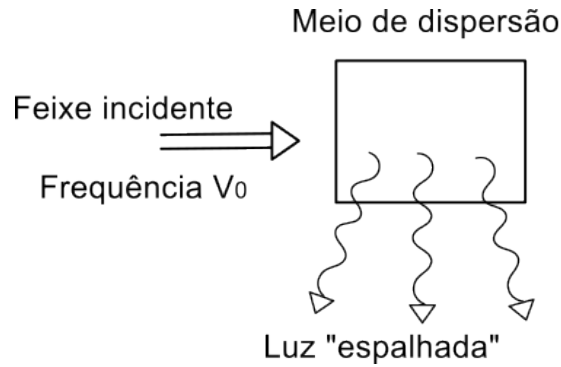


Figura 29 – Espalhamento da luz em um meio material. Adaptado de (LU et al., 2019).

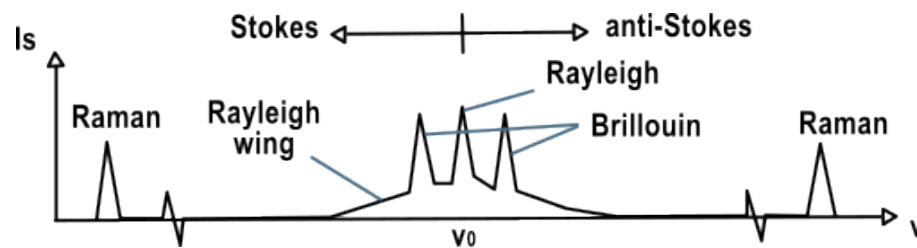


Figura 30 – Tipos de espalhamento da luz em um meio material. Adaptado de (LU et al., 2019).

O espalhamento óptico pode ser classificado em duas categorias principais: elástico e inelástico. O espalhamento óptico elástico é caracterizado pela conservação da energia das ondas envolvidas no processo, ou seja, o fóton incidente mantém seu comprimento de onda original e apenas sofre uma mudança em sua direção de propagação. Esse fenômeno é considerado um efeito linear, pois não há alteração na frequência da luz espalhada. Um exemplo clássico desse tipo de espalhamento é o espalhamento Rayleigh, que ocorre em meios homogêneos e é responsável pela coloração azul do céu devido à dispersão preferencial da luz em comprimentos de onda mais curtos.

Por outro lado, o espalhamento óptico inelástico ocorre quando há transferência permanente de energia entre as ondas envolvidas, resultando em um deslocamento de frequência no fóton espalhado. Esse tipo de espalhamento é classificado como um efeito óptico não linear e está diretamente relacionado a modos vibracionais do meio de propagação. Dois exemplos bem conhecidos de espalhamento inelástico são o espalhamento Raman, que envolve a interação com fônons ópticos e resulta em deslocamentos de frequência característicos dos modos vibracionais das moléculas do material, e o espalhamento de Brillouin, que ocorre devido à interação com fônons acústicos e é influenciado pelas variações de densidade do meio. Ambos os fenômenos são amplamente estudados e aplicados em espectroscopia, telecomunicações e caracterização de materiais (LIMA, 2012).

O conceito de fônon está relacionado à propagação de energia dentro da rede cristalina de um material sólido. No contexto da física clássica, esse fenômeno pode ser descrito como a propagação de uma onda elástica, que se manifesta através da vibração coletiva dos átomos na rede. No entanto, devido à escala microscópica em que ocorre, a física quântica deve ser

empregada para sua compreensão. Nesse sentido, o fônon é tratado como uma quase-partícula, representando um quantum de energia associado a essas vibrações na estrutura cristalina. Além disso, a interação entre a luz e os elétrons dos átomos constituintes de um material pode resultar em efeitos de polarização, modificando o estado vibracional da rede cristalina. Esse fenômeno leva ao surgimento de oscilações nas cargas atômicas, caracterizando a propagação de uma forma de onda específica. Quando essa vibração ocorre devido à interação com um campo eletromagnético, ela é denominada fônon óptico. Os fônons ópticos estão diretamente associados a modos vibracionais do material que correspondem à polarização elétrica local, sendo fundamentais para a compreensão de diversos fenômenos ópticos e eletrônicos, incluindo o espalhamento Raman e a condução térmica em materiais dielétricos (LIMA, 2012).

O espalhamento Raman pode ser classificado em duas categorias principais: espalhamento Raman espontâneo (*Spontaneous Raman Scattering*) e espalhamento Raman estimulado (*Stimulated Raman Scattering*). O espalhamento espontâneo ocorre quando a interação entre a luz e o meio material acontece de forma natural, sem que a presença do feixe incidente modifique significativamente as propriedades ópticas do material. Esse processo resulta no espalhamento de fótons em diferentes direções, com frequências deslocadas devido à interação com os modos vibracionais da estrutura cristalina ou molecular do material. Por outro lado, o espalhamento Raman estimulado ocorre quando o campo eletromagnético incidente interage de maneira mais intensa com os modos vibracionais do meio, gerando um processo amplificado de conversão de energia óptica. Nesse caso, parte da potência óptica do feixe incidente é transferida para um sinal óptico co-propagante ou contra-propagante, resultando em um ganho significativo na intensidade da luz espalhada. Esse efeito é amplamente utilizado em diversas aplicações tecnológicas, como amplificadores Raman em sistemas de comunicações ópticas, espectroscopia avançada e sensores de fibra óptica (PROCOPIO, 2007).

A Figura 31 apresenta, de maneira simplificada, o mecanismo de absorção e emissão de energia em um meio material submetido à incidência de um feixe eletromagnético. Nesse contexto, define-se E_0 como o nível de energia fundamental de uma molécula do meio, enquanto E_1 corresponde ao nível de energia associado à vibração da molécula em um de seus modos normais. A energia do fóton incidente é representada por E_f , e E_v denota o nível máximo de energia que a molécula pode alcançar quando excitada pelo fóton. Quando uma molécula se encontra em seu estado fundamental E_0 , a interação com um fóton incidente pode promovê-la a um estado virtual de energia E_v , o qual se situa significativamente acima do nível de energia vibracional normal E_1 . Esse estado virtual não é estável, levando a processos subsequentes de relaxação, como a emissão de um fóton espalhado. O entendimento dessas transições energéticas é essencial para a caracterização de fenômenos ópticos, como o espalhamento Raman, e tem aplicações diretas em espectroscopia, amplificação óptica e tecnologias de sensoriamento baseado em fibras ópticas.

Após a interação da molécula com o fóton incidente e sua consequente excitação para

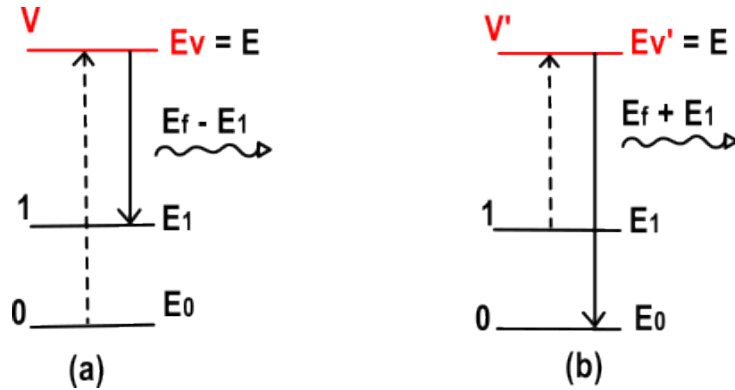


Figura 31 – Processo de absorção e emissão de energia em um meio material submetido à incidência de um feixe eletromagnético. Adaptado de (LIMA, 2012).

um estado de energia E_v , dois fenômenos distintos podem ocorrer:

1 - A molécula retorna ao seu estado fundamental de energia E_0 , liberando a energia adquirida na forma de um fóton emitido em uma direção aleatória. Esse processo mantém o comprimento de onda do fóton inalterado e caracteriza o espalhamento elástico.

2 - Alternativamente, a molécula pode não retornar ao estado fundamental imediatamente, permanecendo em um estado vibracional intermediário de energia E_1 . Nesse caso, ocorre a emissão de um fóton cuja energia é reduzida para $E_f - E_1$, resultando em um comprimento de onda maior. Esse fenômeno é conhecido como espalhamento Raman no regime de Stokes, sendo representado na Figura 31(a).

O primeiro caso, correspondente ao espalhamento elástico, é o processo predominante na propagação de sinais ópticos em fibras, uma vez que não há alteração na frequência do fóton espalhado. Já o segundo caso, característico do espalhamento inelástico, é um efeito não linear relevante em aplicações de espectroscopia e amplificação óptica. Para que o espalhamento Raman no regime de Stokes ocorra de maneira significativa, a energia do fóton incidente (E_f) deve ser consideravelmente superior à energia vibracional normal do meio (E_1), ou seja, $E_f \geq E_1$.

Outra possibilidade de interação entre o fóton incidente e a molécula do meio é apresentada na Figura 31(b). Nesse caso, a molécula não se encontra inicialmente em seu estado fundamental de energia E_0 , mas sim em um estado vibracional excitado de energia E_1 . Quando um fóton com energia E_f interage com essa molécula previamente excitada, esta é levada a um estado de energia ainda mais elevado, denominado $E_{v'}$. Após um curto intervalo de tempo, a molécula retorna ao seu estado fundamental E_0 , liberando a energia excedente por meio da emissão de um fóton com energia $E_f + E_1$. Esse processo dá origem ao espalhamento Raman no regime anti-Stokes, caracterizado pela emissão de fótons com frequência superior à do fóton incidente. Assim, o espalhamento Raman pode ocorrer por meio de dois processos distintos: o processo de Stokes, no qual há uma redução na frequência do fóton espalhado, e o processo de anti-Stokes, onde ocorre um aumento na frequência. Além disso, o espalhamento pode se tornar estimulado caso a potência do feixe incidente ultrapasse um valor limite conhecido como limiar

de estimulação (threshold). Nessas condições, a interação entre a luz e os fônons ópticos do meio se intensifica, resultando em um processo coerente e amplificado, fundamental para aplicações em amplificadores Raman e espectroscopia óptica.

O espalhamento Raman espontâneo é um fenômeno que ocorre quando os elétrons excitados em um material retornam a estados de menor energia, liberando fótons de forma espontânea e aleatória. Esse processo ocorre geralmente em um intervalo de tempo que varia de 10 ns a 1 ms após a excitação inicial dos elétrons. Durante essa interação, os elétrons excitados emitem fótons que apresentam energias correspondentes à diferença de energia entre os níveis de transição eletrônica, resultando em fótons com comprimentos de onda que podem coincidir com os fótons do sinal óptico. Contudo, devido às flutuações causadas pela temperatura e pelos estados vibracionais das moléculas do meio, os fótons emitidos no espalhamento Raman espontâneo não são coerentes com o fóton original. Eles possuem direções e fases aleatórias, o que implica em uma emissão incoerente. Além disso, essa emissão aleatória pode se propagar ao longo do sistema óptico, contribuindo para a amplificação do ruído, o chamado ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Esse tipo de ruído é uma das principais fontes de interferência em sistemas ópticos, especialmente em sistemas de comunicação e amplificação óptica, limitando o desempenho e a qualidade do sinal transmitido.

O efeito Raman (SRS) crescerá exponencialmente de acordo com o aumento da potência do feixe de luz incidente, após superar o limiar de excitação (P_{thR}) deste efeito. Este limiar é representado pela equação 4.1 e aproximado pela equação 4.2:

$$P_{thR} \approx \frac{K_R \Gamma A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (4.1)$$

no qual

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (4.2)$$

onde A_{eff} é a área efetiva, g_R é o ganho de Raman, L é o comprimento da fibra, α é o coeficiente de atenuação medido em Neper/km, λ é o comprimento de onda de operação, e L_{eff} é o comprimento não-linear efetivo, Γ é a constante de polarização, onde $\Gamma=1$ (campos polarizados), $\Gamma=2$ (campos despolarizados), e K_R é a constante de direcional entre os campos, co-propagantes ($K_R=16$), ou contra-propagantes ($K_R=20$) (PROCOPIO, 2007).

A interação de materiais com campos eletromagnéticos é fortemente influenciada pela composição atômica do material, que determina a forma como ele reage a esses campos. Diversos fatores contribuem para a transferência de energia entre os fótons e outros modos de onda em uma ampla faixa espectral. Entre esses fatores, destaca-se a estrutura amorfa das fibras ópticas, que pode alterar a propagação da luz dentro da fibra, e as propriedades eletromecânicas do dióxido de silício, o material mais comum em fibras ópticas, que desempenham um papel crucial na

interação com os campos eletromagnéticos. Além disso, a combinação e a intensidade dos modos vibracionais que o material pode suportar são essenciais para a forma como a energia é transferida. No caso do espalhamento Raman, a extensão do deslocamento de frequência, conhecido como deslocamento de Stokes, é determinada pelas frequências associadas aos modos vibracionais da rede atômica do material, conhecidos como fônons ópticos. Esses modos vibracionais do material influenciam diretamente a magnitude do deslocamento de frequência do fóton incidente. A presença de diferentes modos de fônons no material estabelece uma faixa de frequências de deslocamento dentro da qual o espalhamento Raman ocorre. Esse fenômeno desempenha um papel importante em várias aplicações, como a amplificação de sinais em sistemas ópticos, onde a variação de frequência, ou deslocamento de Stokes, é um fator crítico para a manipulação da frequência do sinal propagado.

A descrição do fenômeno de SRS (*Stimulated Raman Scattering*) está intrinsecamente ligada ao espectro de ganho Raman, denotado por $gR(\Omega)$, o qual é fundamental para determinar a eficiência do processo de espalhamento Raman. Este espectro de ganho é predominantemente influenciado pela composição do núcleo da fibra, sendo altamente dependente do tipo de dopante utilizado, podendo, portanto, apresentar variações consideráveis dependendo do material específico. Na Figura 32, é ilustrado o espectro de ganho Raman para a sílica, com um feixe incidente de comprimento de onda $\lambda_p = \mu\text{m}$. Para a sílica, o ganho Raman atinge um pico no deslocamento Stokes de aproximadamente 13 THz e se estende por uma faixa que pode atingir até 40 THz. Este comportamento difere substancialmente do observado na maioria dos materiais moleculares, onde o ganho Raman é restrito a frequências específicas.

A principal razão para essa discrepância está na natureza amorfa da sílica. Em materiais amorfos, como o vidro de sílica, as frequências vibracionais das moléculas não são discretas, mas sim distribuídas em bandas contínuas e sobrepostas. Essa distribuição de frequências vibracionais resulta em uma faixa mais ampla de ganho Raman, ao contrário dos materiais cristalinos, onde os picos de ganho são mais restritos a frequências específicas. Como consequência, os níveis de energia vibracional das moléculas na sílica se combinam para formar uma banda larga, permitindo que a fibra óptica atue como um amplificador de banda larga durante os eventos de espalhamento Raman estimulado, ampliando significativamente a gama de frequências afetadas por esse fenômeno.

O fenômeno conhecido como ISRS (*Inter-Channel Stimulated Raman Scattering*) ocorre quando os efeitos do espalhamento Raman começam a interferir com os sinais transmitidos em sistemas de comunicação óptica. Este tipo de interferência se torna mais relevante em sistemas de múltiplos canais, como aqueles baseados em multiplexação por divisão de comprimento de onda, onde vários canais de diferentes frequências são transmitidos simultaneamente por uma única fibra óptica. Em cenários nos quais há apenas um canal sendo transmitido, o efeito do espalhamento Raman é geralmente insignificante, resultando em perdas de potência mínimas para o sinal transmitido. No entanto, o cenário muda quando múltiplos canais coexistem na

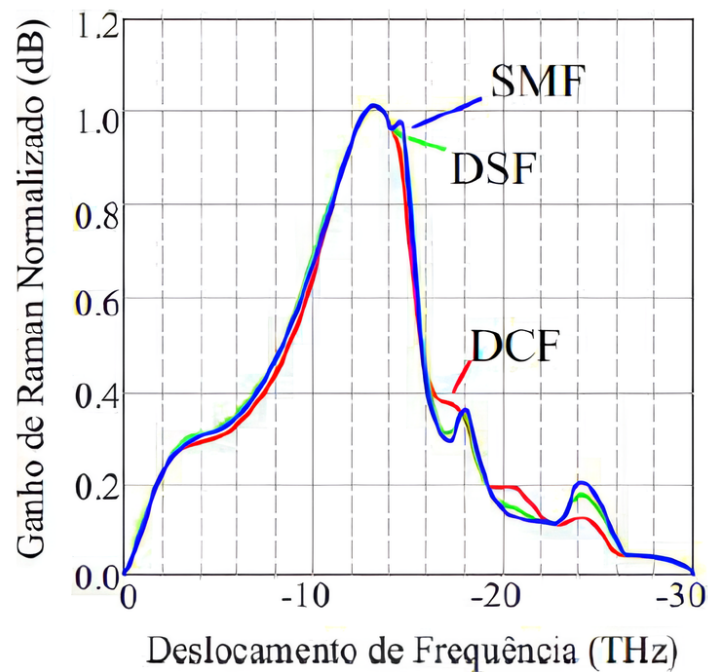


Figura 32 – Ganho Raman Normalizado para as Fibras SMF, DSF e DCF. Apresentado em (LIMA, 2012).

mesma fibra óptica. Nesse caso, os sinais com frequências mais altas podem atuar como um sinal de bombeamento para os outros sinais dentro da banda de ganho Raman. O efeito é mais pronunciado devido à transferência de energia entre os sinais devido à interação com os modos vibracionais do meio. Como já mencionado, o pico de ganho Raman ocorre tipicamente em torno de 13 THz, o que corresponde a uma variação de aproximadamente 100 nm no comprimento de onda. Esse fenômeno resulta em um aumento da potência de sinais adjacentes, criando interferência entre os canais. A Figura 33 ilustra claramente como o espalhamento Raman afeta os sinais transmitidos em um sistema de múltiplos canais, destacando as interações entre as diferentes frequências presentes no espectro de transmissão.

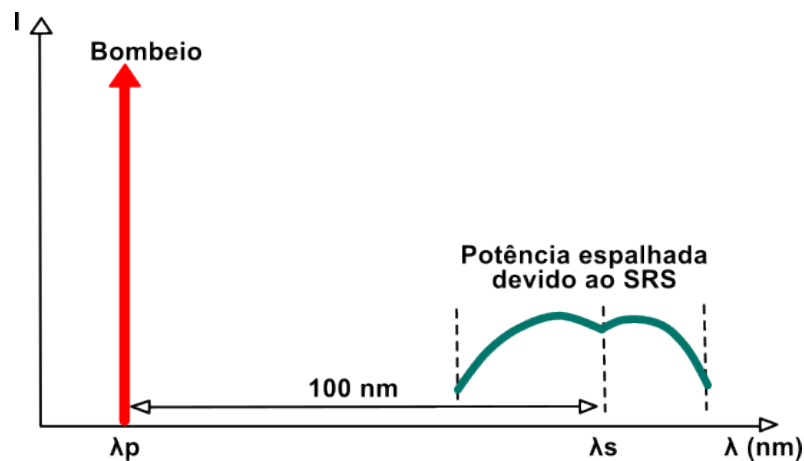


Figura 33 – Ganho Raman em 100nm. Adaptada de (PROCOPIO, 2007).

Quando utilizamos outras bandas além da banda convencional para transmitir um sinal

óptico, alguns fatores devem ser levados em consideração. O principal é o impacto do espalhamento Raman entre os canais transmitidos. Os canais de menor comprimento de onda transferem potência para os canais com maior comprimento de onda. A Figura 34 ilustra o comportamento do efeito raman na aplicação multibanda. As bandas O, E e S são penalizadas pelo efeito raman, e acabam perdendo potência.

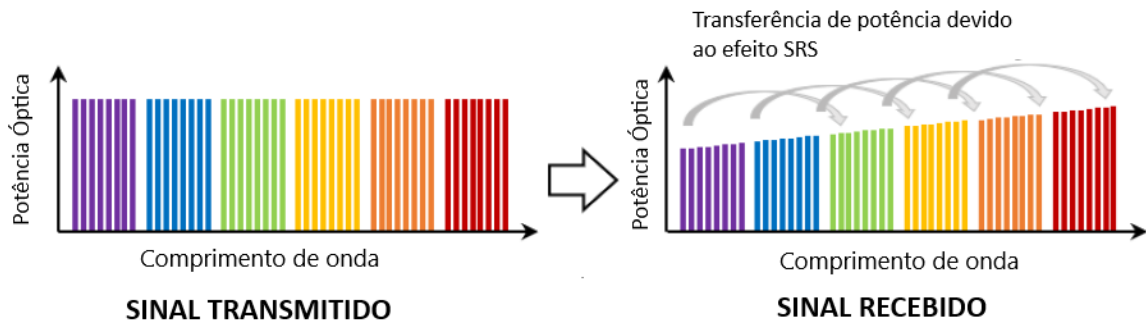


Figura 34 – Transferência de potência entre canais causada pelo efeito raman considerando transmissões em cenários multibanda. Adaptado de (HOSHIDA et al., 2022).

4.1.1 Simulação do efeito Raman no GNPpy

Nesta seção, busca-se avaliar o impacto do efeito *Stimulated Raman Scattering* (SRS) na transmissão óptica em sistemas multibanda que operam simultaneamente nas bandas C, L e S. O objetivo principal do experimento é observar como o SRS afeta a distribuição de potência entre os canais ao longo do espectro, podendo comprometer o desempenho ao longo da transmissão e, consequentemente, o orçamento de potência do sistema. Para isso, foi realizada uma simulação ponto a ponto utilizando a ferramenta GNPpy, configurada com um link óptico composto por 396 canais WDM uniformemente espaçados em 50 GHz, abrangendo a faixa espectral de 186 THz a 205 THz, o que corresponde a aproximadamente 150 nm de largura de banda total. Dois cenários foram comparados: um considerando o efeito SRS na transmissão e outro desconsiderando tal efeito. A inclusão ou exclusão do SRS na simulação é controlada por meio da ativação de uma variável específica no GNPpy, a qual determina se esse fenômeno será computado durante o processo de propagação óptica. A Figura 35 apresenta o layout da simulação, que foi configurada para um link com 396 canais ópticos e a Figura 36 ilustra o impacto do do efeito SRS após 90 km de propagação, utilizando uma fibra monomodo.

As configurações da simulação foram definidas considerando um sinal de 0 dBm por canal, que foi lançado na fibra ao longo de um percurso de 90 km. Para a fibra utilizada, foi adotado um coeficiente de atenuação padrão de 0,2 dB/km, além de uma perda adicional de 1 dB devido aos conectores. Dessa forma, a perda total ao longo do percurso foi de 19 dB. A curva representada em azul mostra o comportamento do sinal sem a influência do efeito Raman, indicando que todos os canais sofrem a mesma atenuação, chegando ao final do link com uma potência de -19 dBm. Por outro lado, a curva em vermelho reflete a situação com

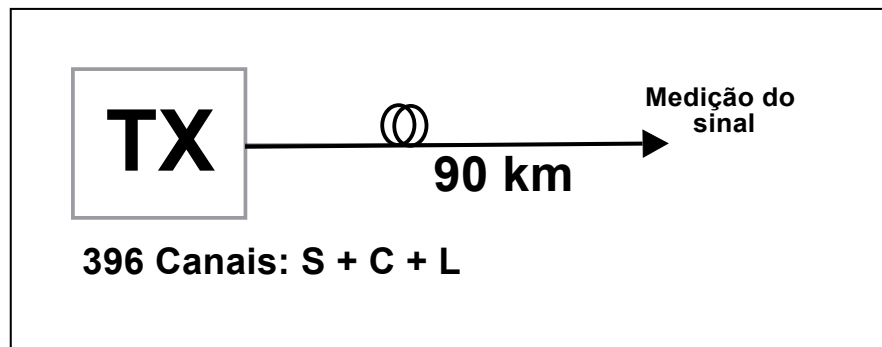


Figura 35 – Cenário utilizado para as simulações dos parâmetros utilizando a multibanda C + L + S: 396 canais lançados com potência de 0 dBm em um trecho de 90 km de fibra.

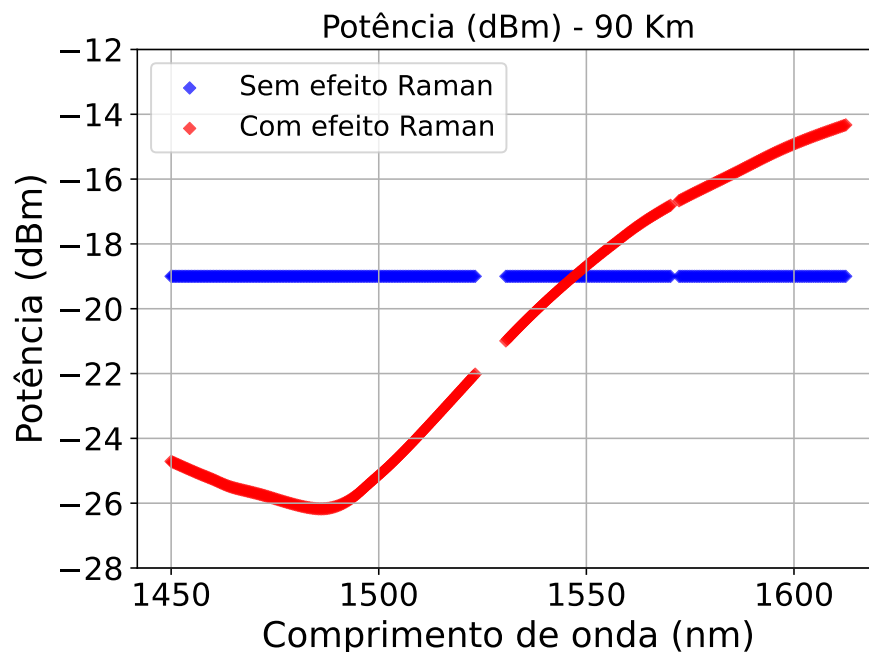


Figura 36 – Impacto do efeito Raman após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm

a presença do impacto causado pelo *Stimulated Raman Scattering*. Nesse caso, observa-se claramente uma transferência de potência entre os canais de maior frequência para os canais de menor frequência. Esse fenômeno resulta em um efeito de *tilt* no espectro, com uma variação de aproximadamente 12 dB, indicando que o espalhamento Raman contribui para um aumento da potência nos canais de maior comprimento de onda, afetando a distribuição de potência ao longo do link e, consequentemente, a qualidade da transmissão.

Esses resultados confirmam que o SRS é um fator crítico em sistemas multibanda, e que a escolha da potência de entrada pode resultar em degradações significativas em determinadas faixas espectrais. Isso evidencia a necessidade de estratégias de escolha da potência ideal para

mitigar os efeitos indesejáveis da redistribuição de potência provocada pelo SRS, principalmente em cenários com cascata de amplificadores.

4.2 ATENUAÇÃO NA FIBRA ÓPTICA

O coeficiente de perda da fibra, conhecido como α , considera a diminuição da potência quando um sinal óptico trafega por uma fibra. A atenuação da fibra depende do comprimento de onda do sinal, que é influenciado pela composição e processo de fabricação da fibra. Os principais fatores que contribuem para a atenuação na faixa de comprimento de onda de 1200 a 1700 nm incluem espalhamento de Rayleigh, absorção infravermelha, picos de absorção de íons OH em torno de 1250 e 1390 nm, bem como a absorção causada pelo fósforo no núcleo da fibra (D'AMICO et al., 2022). A Figura 37 apresenta o impacto desses fatores e sua contribuição na obtenção da atenuação por comprimento de onda numa fibra SMF.

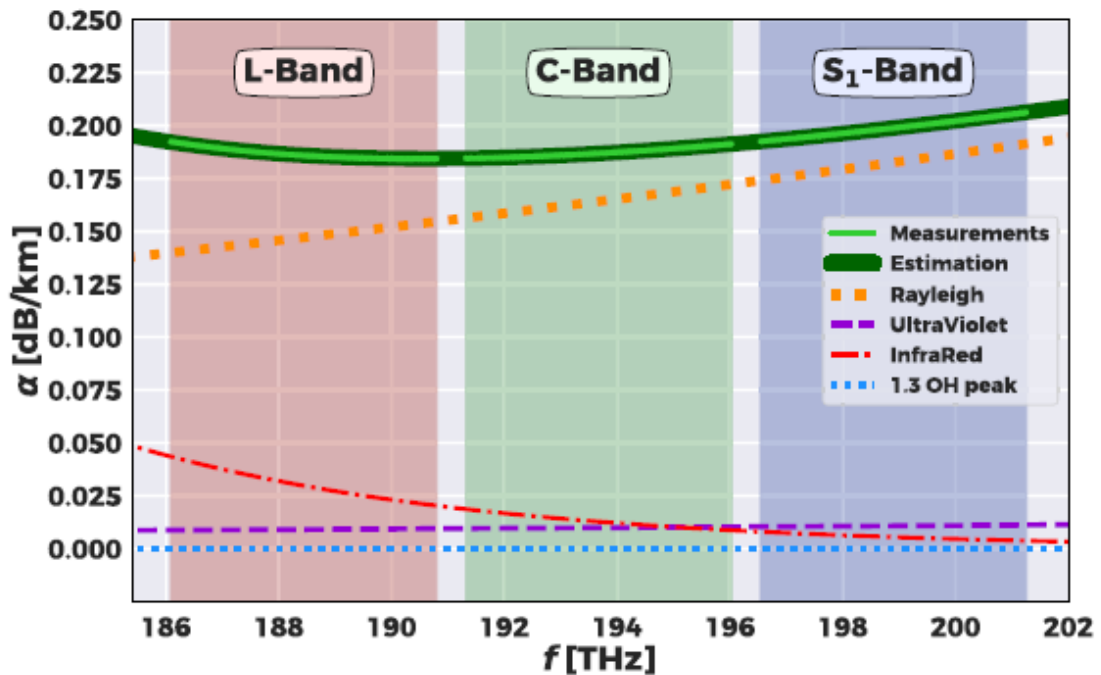


Figura 37 – Atenuação por comprimento de onda. Apresentado em (D'AMICO et al., 2022).

Esta simulação tem como objetivo analisar o impacto da variação espectral do coeficiente de atenuação da fibra óptica na propagação do sinal em sistemas multibanda que operam nas bandas C, L e S. Quando se analisa apenas a banda C, que abrange o intervalo de 1530 a 1565 nm, o coeficiente de atenuação da fibra óptica tende a ser constante, com um valor padrão de 0,2 dB/km. Esse comportamento é observado devido à uniformidade das características ópticas da fibra dentro dessa faixa espectral. No entanto, em cenários de transmissão multibanda, onde múltiplas faixas de comprimento de onda são utilizadas simultaneamente, é necessário considerar a variação do coeficiente de atenuação para diferentes comprimentos de onda. Essa variação pode ter um impacto significativo na potência do sinal ao longo do link, uma vez que diferentes

comprimentos de onda podem ser atenuados de maneiras distintas pela fibra. A Figura 38 ilustra o efeito da atenuação no cenário multibanda, levando em conta a dependência da atenuação em relação ao comprimento de onda, evidenciando seu impacto na transmissão.

4.2.1 Simulação da Atenuação no GNPY

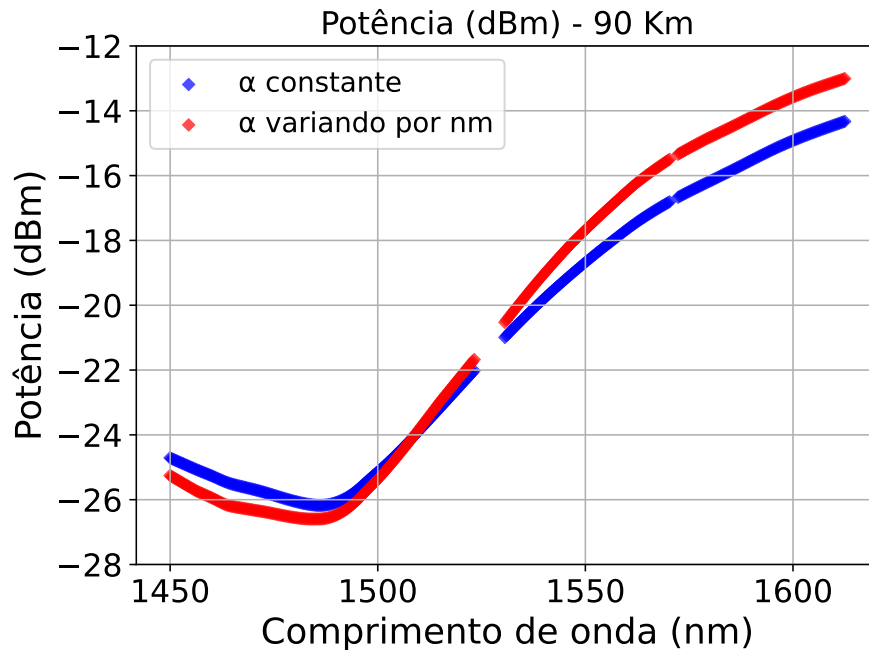


Figura 38 – Impacto da atenuação após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm. Curva azul apresenta um coeficiente de atenuação constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente de atenuação dependente do comprimento de onda.

Para esta análise, foi utilizado o mesmo cenário descrito na simulação do efeito Raman, conforme mostrado na Figura 35. O link óptico é composto por 90 km de fibra G.652, com 396 canais WDM uniformemente espaçados em 50 GHz, cobrindo o espectro de 186 THz a 205 THz, e com potência de lançamento de 0 dBm por canal.

Inicialmente, foi considerada uma situação de referência em que o coeficiente de atenuação é mantido constante em todo o espectro (0,2 dB/km), enquanto o efeito Raman intercanais está ativado. Em seguida, foi realizada uma segunda simulação em que se manteve o mesmo cenário, mas agora considerando a variação real do coeficiente de atenuação em função do comprimento de onda, além do efeito SRS. Dessa forma, foi possível isolar e observar o impacto causado exclusivamente pela dependência espectral da atenuação.

A Figura 38 apresenta os resultados no final do enlace óptico. A comparação entre os dois cenários mostra que a inclusão da atenuação variável provoca uma diferença de aproximadamente 1,5 dB na potência final dos canais de maior comprimento de onda, em relação ao caso em que a atenuação é assumida como constante. Esse desbalanceamento ocorre porque os comprimentos

de onda mais longos sofrem perdas mais elevadas, o que se soma à redistribuição de potência já causada pelo SRS.

Os resultados destacam a importância de considerar a atenuação espectralmente dependente em simulações de sistemas ópticos multibanda. Esse fator se torna especialmente crítico em arquiteturas com cascatas de amplificadores, onde pequenas diferenças de potência podem se acumular e comprometer o desempenho geral. Portanto, a precisão na modelagem da atenuação é essencial para garantir uma avaliação realista da qualidade de sinal e da margem de OSNR ao longo do sistema.

4.3 DISPERSÃO

A dispersão representa uma vasta classe de fenômenos relacionados com a propagação de ondas eletromagnéticas em meios materiais no qual ocorre a degradação do sinal. Em telecomunicações, o termo "dispersão" é usado para descrever um processo no qual um sinal transportado por uma onda eletromagnética em uma fibra óptica sofre uma degradação devido ao fenômeno da dispersão ou alargamento do sinal (ABRAMCZYK, 2008). Em aplicações ópticas, os principais tipos de dispersão são a Dispersão Modal, Dispersão Cromática e Dispersão por Modo de Polarização (PMD).

A dispersão modal, ou multipercurso, é o efeito de dispersão dominante nas fibras multimodo e é ilustrada na Figura 39, no qual diferentes feixes percorrem trajetórias de comprimentos diferentes. A consequência é a dispersão no tempo desses feixes na extremidade de saída da fibra, mesmo que tenham sido coincidentes na extremidade de entrada e viajado à mesma velocidade dentro da fibra. Um pulso se alargaria consideravelmente como resultado dos diferentes comprimentos de percurso. Pode-se estimar a extensão do alargamento do impulso simplesmente considerando os caminhos de raio mais curto e mais longo.

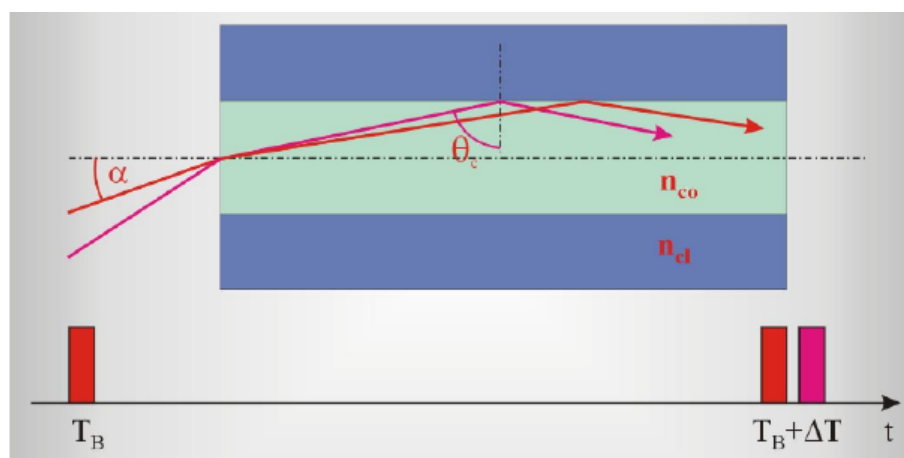


Figura 39 – Dispersão Modal: Diferentes feixes percorrem trajetórias de comprimentos diferentes. Apresentado em (ABRAMCZYK, 2008).

Diferentes componentes espectrais do sinal viajam a velocidades de grupo ligeiramente

diferentes, um fenômeno designado por dispersão de velocidade de grupo (GVD), dispersão cromática ou simplesmente dispersão da fibra. A dispersão cromática tem duas contribuições, a dispersão do material e a dispersão de guia de ondas (GOVIND, 2010).

Por definição, o parâmetro GVD é definido pela equação 4.3:

$$GVD = \beta_2 = d^2\beta/d\omega^2, \quad (4.3)$$

em que β é a constante de propagação e ω é a frequência angular. O parâmetro dispersão, ou coeficiente de dispersão é representado pela letra D e se relaciona com β_2 através da equação 4.4:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2. \quad (4.4)$$

A dispersão cromática é resultado das contribuições da dispersão de guia de onda e dispersão do material. A Figura 40 apresenta a dispersão D para uma fibra monomodo padrão, assim como as contribuições da dispersão de guia de onda (D_w) e dispersão do material (D_m). O valor zero de dispersão nesse tipo de fibra é situado em 1310 nm. Na frequência central da banda C, 1550 nm, o valor de dispersão é compreendido entre 15 e 18 ps/nm·km.

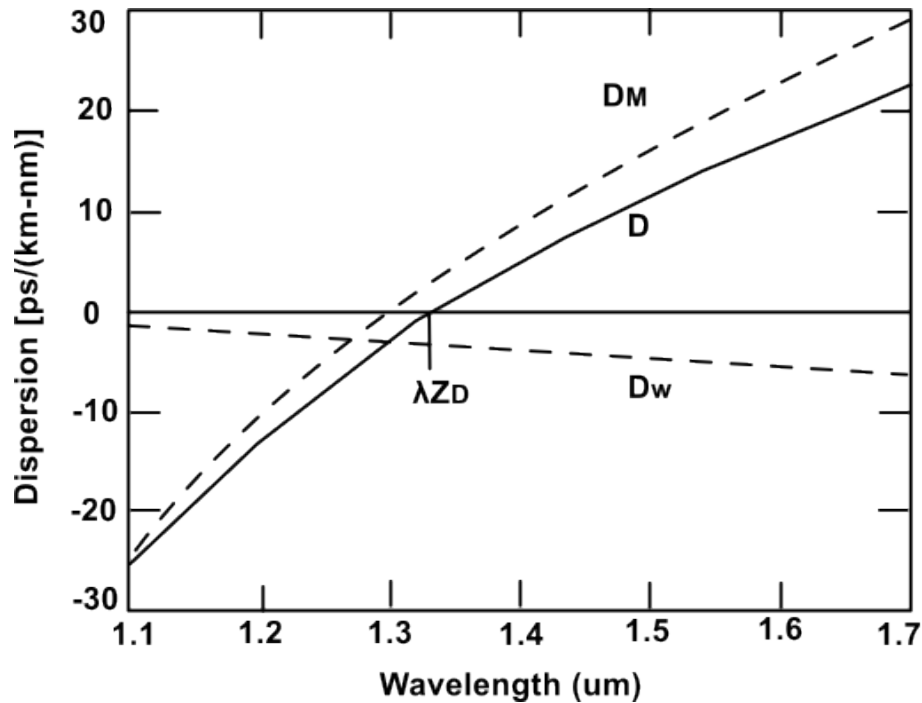


Figura 40 – Contribuição da dispersão de guia de onda e dispersão do material em uma fibra monomodo padrão. Adaptada de(GOVIND, 2010).

Conforme observamos no gráfico, o valor de dispersão é dependente do comprimento de onda. Os efeitos dispersivos de ordem superior são regidos pela inclinação de dispersão

representado pela equação 4.5.

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3}\right) \beta_2. \quad (4.5)$$

4.3.1 Simulação da Dispersão no GNPY

Esta seção tem como objetivo avaliar o impacto da variação da dispersão cromática em sistemas de transmissão óptica multibanda, abrangendo simultaneamente as bandas C, L e S. Embora seja comum adotar um coeficiente de dispersão constante em simulações restritas à banda C, onde a largura espectral é relativamente estreita, essa aproximação pode gerar erros significativos quando estendida a cenários multibanda. Isso ocorre porque, em sistemas amplamente espectrais, a dispersão varia com o comprimento de onda, afetando diretamente o cálculo da interferência não linear (NLI) e, por consequência, a relação sinal-ruído generalizada (GSNR) ao longo do enlace óptico.

Para investigar esse efeito, foi realizada uma simulação utilizando o GNPY com um link de 90 km de fibra monomodo padrão, configurado para a propagação de 396 canais WDM distribuídos uniformemente ao longo das bandas C + L + S, com espaçamento de 50 GHz entre os canais.

Dois cenários foram comparados. No primeiro, foi assumido um coeficiente de dispersão constante de $1,67 \times 10^{-5}$ ps/nm·km, valor tipicamente utilizado em simulações limitadas à banda C. No segundo cenário, a simulação incorporou o *slope* real da dispersão da fibra SMF padrão, permitindo representar a variação contínua da dispersão com o comprimento de onda ao longo de todo o espectro.

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos. A curva azul mostra o comportamento da dispersão com valor constante, enquanto a curva vermelha revela os valores calculados levando em conta a dispersão variável. Nota-se que, à medida que o comprimento de onda se afasta do centro da banda C, a diferença entre os modelos se acentua, evidenciando o erro potencial de se utilizar uma abordagem plana em simulações multibanda.

Os resultados demonstram que a dispersão variável pode impactar significativamente os cálculos de NLI e GSNR, sobretudo em sistemas com grande número de canais e alta taxa de transmissão por canal. Assim, a adoção de um modelo espectralmente dependente para a dispersão torna-se essencial para obter estimativas realistas de desempenho, especialmente quando o sistema depende de compensações de dispersão passiva, gerenciamento de OSNR e otimização de potência por canal.

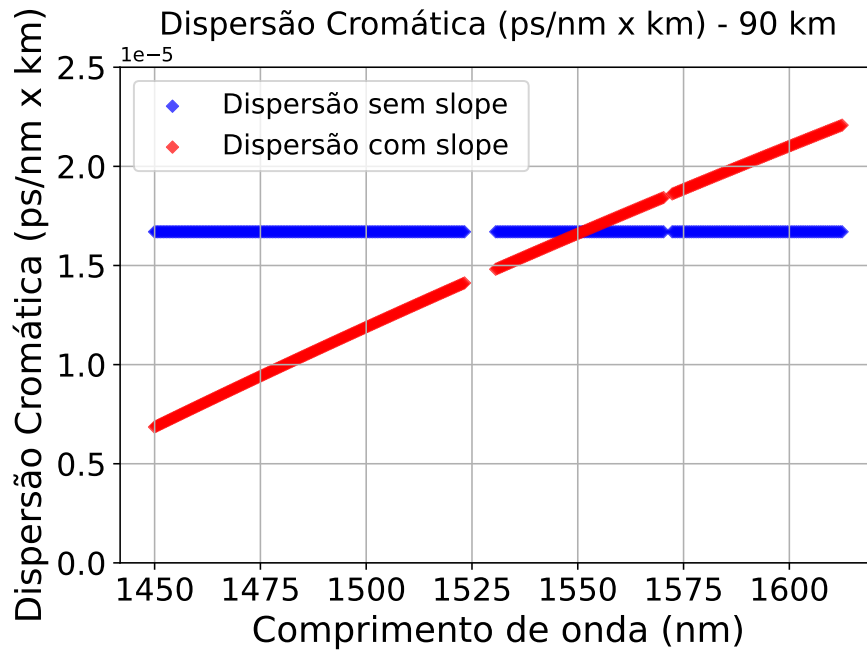


Figura 41 – Impacto da dispersão após a transmissão de 396 canais ao longo de um trecho de 90 km de fibra com todos os canais inicialmente lançados com uma potência de 0 dBm. Curva azul apresenta um coeficiente de dispersão constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente de dispersão dependente do comprimento de onda.

4.4 COEFICIENTE NÃO LINEAR

Todos os materiais se comportam de forma não linear quando são submetidos a campos eletromagnéticos de altas intensidades e o seu índice de refração aumenta com essa intensidade. A origem física deste efeito reside na resposta não harmônica dos elétrons aos campos ópticos, resultando numa susceptibilidade não linear (GOVIND, 2010). O impacto dos efeitos não lineares na fibra é matematicamente ponderado na equação de propagação do impulso pelo coeficiente não linear, γ . Formalmente, é definido em termos de potência ótica pela equação 4.6:

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}, \quad (4.6)$$

no qual n_2 é o coeficiente não linear de Kerr e A_{eff} é a área do modo efetivo da fibra óptica na frequência determinada (D'AMICO et al., 2022). O valor numérico de n_2 é de cerca de $2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ para as fibras de sílica e varia ligeiramente com os dopantes utilizados no interior do núcleo. Devido a este valor relativamente pequeno, a parte não linear do índice de refração é bastante pequena. No entanto, afeta consideravelmente os modernos sistemas de comunicação óptica devido aos longos comprimentos das fibras. Fenômenos de auto modulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM) são afetados pelo coeficiente não linear (GOVIND, 2010).

4.4.1 Simulação da Área Efetiva no GNPY

Esta seção tem como objetivo investigar o impacto da variação espectral do coeficiente não linear γ na geração da interferência não linear (NLI) ao longo da propagação óptica em sistemas multibanda. Esse coeficiente exerce uma influência significativa sobre os efeitos de XPM (*Cross-Phase Modulation*) e SPM (*Self-Phase Modulation*), sendo um parâmetro essencial para a previsão de distorções não lineares decorrentes da interação entre os sinais transmitidos na fibra.

O coeficiente γ está relacionado à área efetiva do modo da fibra (A_{eff}) por meio da equação 4.6. À medida que o comprimento de onda se afasta da banda C, a variação de A_{eff} se torna relevante, impactando diretamente o valor de γ e, por consequência, o cálculo da NLI e da GSNR. Para avaliar esse efeito, foi utilizada a mesma configuração das simulações anteriores, conforme ilustrado na Figura 35. O cenário considera a propagação de 396 canais WDM, espaçados em 50 GHz, com potência de lançamento de 0 dBm por canal, ao longo de 90 km de fibra monomodo padrão.

A Figura 42 apresenta os resultados comparativos entre dois modelos. No primeiro cenário, representado pela curva azul, são assumidos valores constantes para A_{eff} e para γ , abordagem comumente empregada em simulações restritas à banda C, onde a janela espectral estreita torna a variação da área efetiva desprezível. No segundo cenário, ilustrado pela curva vermelha, é considerada a variação de A_{eff} com o comprimento de onda, o que torna a modelagem mais realista para aplicações multibanda.

Os resultados evidenciam que, ao se expandir a operação para além da banda C, a variação de A_{eff} provoca alterações perceptíveis no valor de γ , influenciando diretamente a geração de NLI. Essa diferença tem impacto relevante sobre o cálculo da GSNR, sobretudo em sistemas com alta densidade espectral e múltiplas bandas. Portanto, a incorporação da dependência espectral do coeficiente não linear se mostra essencial para garantir a fidelidade na modelagem do sistema e a precisão nas estimativas de desempenho em redes ópticas multibanda.

4.5 NLI (NON-LINEAR IMPAIRMENTS) NA APLICAÇÃO MULTIBANDA

A resposta de qualquer material dielétrico à luz torna-se não linear para campos eletromagnéticos intensos, e as fibras ópticas fazem parte desta regra. Embora a sílica não seja intrinsecamente um material altamente não linear, a geometria do guia de onda, que confina a luz a uma pequena seção transversal ao longo de grandes comprimentos de fibra, torna os efeitos não lineares bastante importantes nas aplicações ópticas atuais, onde taxas de transmissão são cada vez maiores e uma maior utilização do espectro é considerada (GOVIND, 2010).

Alguns efeitos não lineares já foram citados anteriormente como o espalhamento Raman estimulado (SRS), automodulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM) e Mistura de quatro ondas (FWM). Todos esses fenômenos devem ser considerados nos cálculos do sinal

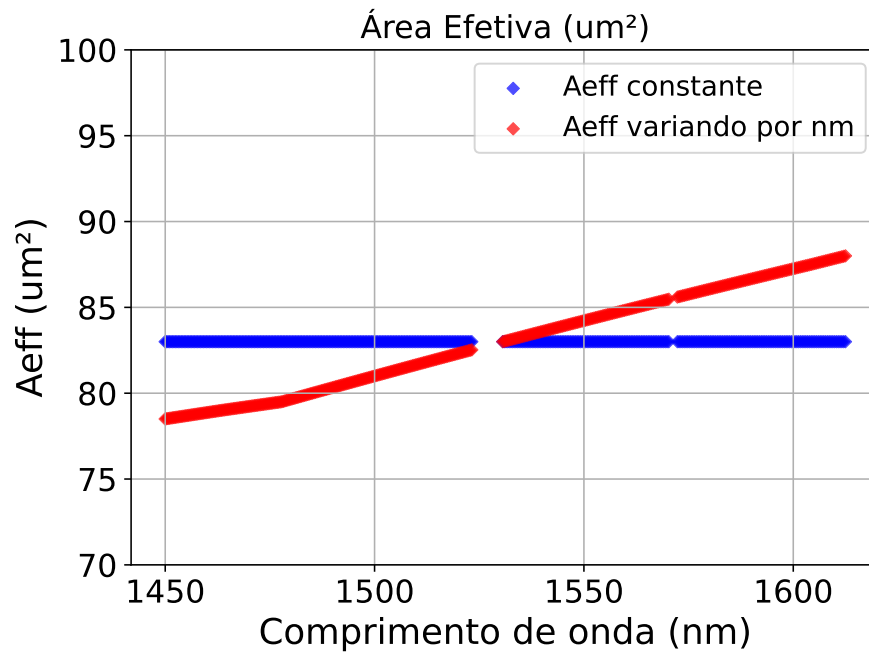


Figura 42 – Valores da área efetiva da fibra SMF utilizada na simulação. Curva azul apresenta um coeficiente não linear constante e a curva vermelha apresenta o coeficiente não linear dependente do comprimento de onda.

transmitido para obter resultados mais realísticos possíveis nos projetos de enlaces ópticos.

Mensurar o ruído causado pelos efeitos não lineares na propagação do sinal não é algo trivial e envolve certa complexidade matemática. Alguns modelos são propostos na literatura, sendo o modelo GN o mais disseminado. O *GN Model* é um modelo analítico amplamente utilizado para estimar a interferência não linear em sistemas ópticos coerentes, especialmente em enlaces WDM não compensados em dispersão. Ele se baseia na suposição de que os efeitos não lineares, como a mistura de quatro ondas, podem ser modelados como um ruído gaussiano aditivo, estatisticamente independente do ruído ASE. A métrica fundamental do modelo é a relação sinal-ruído generalizada, que considera a soma das variâncias do ruído ASE e do ruído NLI, possibilitando a estimativa da BER a partir da SNR efetiva observada na constelação, após o processamento digital de sinal no receptor.

O GN Model permite diferentes níveis de generalização e precisão, a depender das características do sistema. Em sua formulação mais abrangente, ele incorpora canais com diferentes potências, larguras de banda e espaçamentos, como abordado na equação (120) de (POGGIOLINI et al., 2014). Essa equação fornece uma solução analítica aproximada para o cálculo da densidade espectral de potência da NLI em sistemas com canais não idênticos, considerando apenas as componentes XPM e SPM. O GNPy implementa o GN Model com base nessa formulação estendida, utilizando as equações 4.7 e 4.8 como base para estimar o impacto

não linear em cada canal ao longo do enlace:

$$G_{\text{NLI}}(f_{\text{ch},i}) \approx \frac{16}{27} \gamma^2 L_{\text{eff}}^2 \sum_{n=1}^{N_{\text{ch}}} G_{\text{ch},n} G_{\text{ch},n} G_{\text{ch},i} \cdot (2 - \delta_{n,i}) \cdot \psi_{n,i}, \quad (4.7)$$

onde $\psi_{n,i}$:

$$\psi_{n,i} = N_s \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(f_1, f_2, f_{\text{ch},i}) g_{\text{ch},n}(f_1) \cdot g_{\text{ch},i}(f_2) \cdot g_{\text{ch},i}(f_1 + f_2 - f_{\text{ch},i}) \cdot df_1 df_2 \quad (4.8)$$

O *GN Model* apresentado em (POGGIOLINI et al., 2014) é uma boa aproximação dos impactos não lineares, porém um pouco conservadora, da geração de NLI devido ao efeito Kerr quando é considerado um cenário espectral multibanda. A utilização do modelo GN numa largura de banda larga requer a sua generalização, que consiste em considerar a variação em frequência da perda e do ganho, incluindo o cross-talk induzido pela efeito SRS.

Visando ampliar a aplicabilidade do GN Model a cenários com características mais realistas e complexas, foi proposto o Generalized GN-model (GGN). Esse modelo generalizado expande o GN Model tradicional ao considerar variações espectrais e espaciais de ganho e perda, além de interferências induzidas por espalhamento Raman estimulado (SRS) e a possibilidade de amplificação distribuída seletiva no espectro. Enquanto o GN Model assume parâmetros constantes ao longo do enlace, o GGN Model incorpora com maior fidelidade o comportamento físico da propagação óptica em enlaces com ocupações espectrais ultra-largas, tornando-se mais preciso, porém computacionalmente mais custoso, devido ao cálculo completo das integrais envolvidas. Por essa razão, o GGN Model é frequentemente utilizado como referência de benchmark para validar estimativas mais simples. O simulador GNPpy oferece suporte a essa modelagem e utiliza a equação (21) de (CANTONO et al., 2017) para estimar a densidade espectral de potência da interferência não linear (NLI) gerada em um span óptico, conforme apresentado na Equação 4.9:

$$G_{\text{NLI}}(z, f) = \frac{16}{27} \gamma^2 |\rho(z, f)|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{\text{TX}}(f_1) G_{\text{TX}}(f_2) G_{\text{TX}}(f_1 + f_2 - f) \cdot \left| \int_0^z e^{+j[\beta(f_1+f_2-f)-\beta(f_1)+\beta(f)-\beta(f_2)]\zeta} \cdot e^{\int_0^\zeta [g(z_1, f_1) + g(z_1, f_2) + g(z_1, f_1+f_2-f) - g(z_1, f)] dz_1} d\zeta \right|^2 df_1 df_2 \quad (4.9)$$

4.5.1 Simulação do NLI no GNPpy

Nesta seção, busca-se avaliar o impacto dos efeitos não lineares (NLI) em sistemas ópticos multibanda operando simultaneamente nas bandas C, L e S. Os fenômenos não lineares,

como a modulação de fase cruzada (XPM), a auto-modulação de fase (SPM) e a mistura de quatro ondas (FWM), tornam-se mais relevantes à medida que a largura de banda do sistema aumenta e a potência por canal se mantém elevada.

O GNPpy oferece suporte tanto ao modelo GN quanto ao GGN para estimar os impactos dos efeitos não lineares na propagação óptica. Neste trabalho, optou-se pelo modelo GGN por ser mais completo e amplamente utilizado como *benchmark*. Originalmente, o GNPpy considerava valores constantes para os coeficientes de SPM e XPM no cálculo do NLI GGN, uma vez que o coeficiente não linear γ era fixado com base em uma área efetiva constante e em um comprimento de onda de referência (1550 nm). Para contornar essa limitação e aprimorar a modelagem em cenários multibanda, modificou-se o código do GGN de modo que γ passasse a depender do comprimento de onda, atribuindo-se um valor específico para cada canal. Como consequência, os coeficientes de SPM e XPM também passaram a ser calculados individualmente, refletindo de forma mais realista o comportamento não linear da fibra.

Cabe destacar que, embora o modelo tenha sido modificado para considerar a dependência espectral do coeficiente não linear γ , o valor de γ ainda é tratado como constante ao longo da largura espectral de cada canal durante o cálculo do NLI. Ou seja, é atribuído um valor específico de γ para cada canal com base em seu comprimento de onda central, mantendo-se o coeficiente fora da integral da fórmula do modelo GGN (Equação 4.9). Essa aproximação foi adotada para preservar a estrutura computacional original do GNPpy e manter a viabilidade computacional das simulações.

Além da dependência espectral da área efetiva, também foi incorporada ao modelo a variação espectral da dispersão cromática, permitindo uma representação mais realista dos parâmetros físicos da fibra ao longo do espectro. O objetivo dessa extensão é investigar como tais variações impactam a geração de NLI ao longo da propagação óptica. As simulações realizadas com essas modificações mostraram que o cálculo do NLI passa a refletir de maneira mais precisa a influência do comprimento de onda, uma vez que a eficiência da geração de ruído não linear é fortemente afetada pelas características espectralmente dependentes da fibra. Dessa forma, o modelo NLI do GNPpy foi aprimorado para representar com maior fidelidade a realidade física de sistemas multibanda.

A primeira comparação feita foi em relação a dispersão. Como o GNPpy foi desenvolvido inicialmente para utilizar a banda C como padrão, é assumido no código que o valor de dispersão cromática é constante quando se refere ao cálculo de NLI, seja usando o método GN ou GGN. Então o primeiro passo foi adaptar o código para considerar um valor de slope na dispersão, e assim o cálculo do NLI considerar um valor de dispersão por comprimento de onda. A curva vermelha da Figura 41 apresenta o valor de dispersão por comprimento de onda. Vamos observar seu impacto no cálculo do NLI na Figura 43.

A Figura 43 apresenta o valor de NLI levando em conta a dispersão na fibra. A curva em azul é com o valor de dispersão constante, ou seja, com o valor de slope igual a zero. E a curva

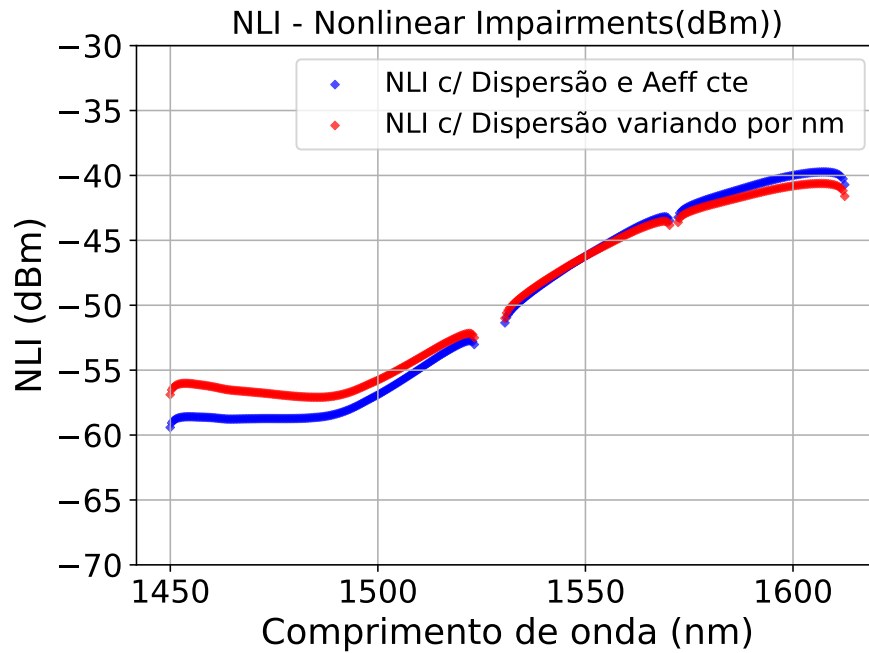


Figura 43 – Valor de NLI considerando o valor de dispersão constante (curva azul) e o valor de dispersão variando por comprimento de onda (curva vermelha)

laranja é o resultado para o valor de dispersão variando com o comprimento de onda. O cenário testado foi o mesmo dos testes anteriores e ilustrado na Figura 35: um trecho de 90 Km de fibra, 396 canais na banda C + L + S e potência de lançamento de 0 dBm por canal. Utilizamos o modelo GGN e é considerado o efeito SRS na propagação.

Analisando o resultado obtido é possível observar o impacto da variação da dispersão por comprimento de onda. A Figura 41 ilustra que o coeficiente de dispersão da fibra aumenta em comprimentos de onda mais elevados. Como consequência, a contribuição da interferência não linear (NLI) é menor nessas faixas espectrais. Por outro lado, em comprimentos de onda menores, a dispersão reduzida resulta em uma maior contribuição do NLI. A ideia é quanto mais disperso for um sinal, menor será o impacto não linear. Como resultado, a interferência não linear (NLI) reduz nos comprimentos de onda mais elevados. Desta forma, em um cenário multibanda C + L + S, é fundamental considerar a dependência do valor de dispersão por comprimento de onda na fibra para se obter resultados mais próximos da realidade.

O segundo parâmetro testado foi o valor de área efetiva da fibra. Vimos através da equação 4.6 que o valor da área efetiva da fibra se relaciona diretamente com o coeficiente não linear γ . A Figura 42 apresenta o valor de área efetiva de uma fibra SMF padrão. A curva azul considera um valor de área efetiva constante enquanto a curva vermelha considera o valor de área efetiva variando por comprimento de onda. A área efetiva tem impacto direto no cálculo de NLI e veremos isso a seguir.

O cenário utilizado para simular o NLI foi o mesmo das análises anteriores apresentados na Figura 35. A Figura 44 apresenta os resultados da simulação utilizando o método GGN,

comparando os cenários com área efetiva constante e dependente da frequência. A análise da figura revela que, à medida que a área efetiva aumenta nos comprimentos de onda mais elevados, o impacto da interferência não linear (NLI) é reduzido. Por outro lado, em comprimentos de onda menores, onde a área efetiva é menor, o impacto da NLI se torna mais significativo. O princípio por trás dessa relação é que uma área efetiva menor na fibra resulta em uma maior densidade de potência, intensificando, consequentemente, os efeitos não lineares. Dessa forma, o parâmetro de área efetiva (A_{eff}) desempenha um papel crucial na análise do sinal em um cenário multibanda, sendo essencial considerar sua dependência da frequência para obter resultados mais realistas.

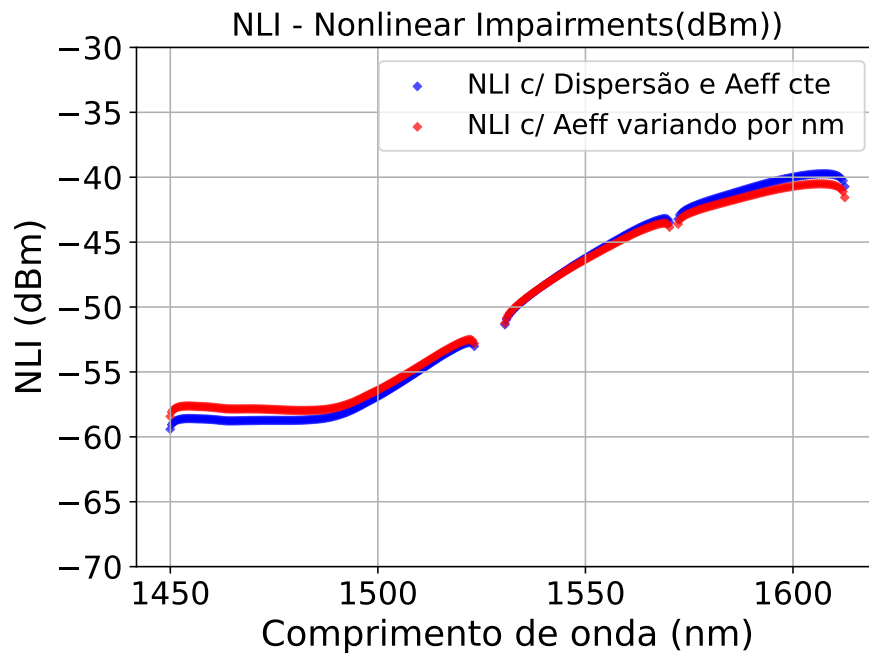


Figura 44 – Valor de NLI considerando o valor de área efetiva constante (curva azul) e o valor de área efetiva variando por comprimento de onda (curva vermelha)

As Figuras 43 e 44 apresentaram os impactos que os parâmetros dispersão e área efetiva têm individualmente no resultado do NLI. A Figura 45 apresenta o resultado do NLI considerando a contribuição dos 2 parâmetros simultaneamente. É possível observar uma "melhora" reduzindo o valor máximo do ruído NLI e deixando-o mais plano, conforme apresentado na curva vermelha.

4.5.2 NLI GN x NLI GGN

Um fator relevante no processo de otimização é o tempo de execução dos algoritmos. O GN Model, conforme apresentado em (POGGIOLINI et al., 2014), simplifica o cálculo dos efeitos não lineares durante a propagação do sinal, reduzindo assim a complexidade computacional e o tempo de processamento. Por outro lado, o GGN Model, descrito em (CANTONO et al., 2017), aprimora essa abordagem ao considerar efeitos adicionais que não são contemplados no GN Model, como a variação das perdas em função do comprimento de onda e o crosstalk induzido pelo espalhamento Raman estimulado. A formulação do GGN Model baseia-se na integração da

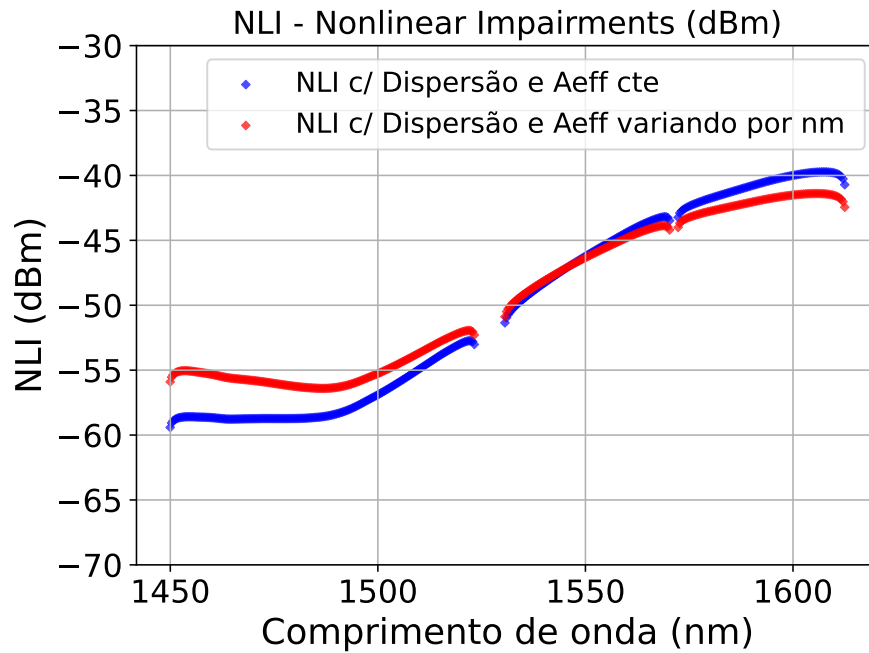


Figura 45 – Valor de NLI considerando o valor de área efetiva e dispersão constantes (curva azul) e o valor de área efetiva e dispersão variando por comprimento de onda (curva vermelha)

potência espectral não linear, que descreve a interferência entre diferentes canais ópticos. Esse cálculo adicional aumenta a complexidade computacional, impactando diretamente o tempo de execução do algoritmo.

Para avaliar o impacto dos dois modelos de cálculo de NLI, bem como a complexidade computacional associada, foram realizadas simulações considerando dois cenários com aplicações em sistemas multibanda. No primeiro cenário, simulou-se a transmissão em um enlace de 110 km de fibra óptica, com 8 canais operando a uma potência de lançamento de 0 dBm por canal. Todos os efeitos dependentes do comprimento de onda, como atenuação, dispersão e variação da área efetiva da fibra, foram incorporados ao modelo.

O principal objetivo desse cenário foi comparar os resultados obtidos pelo GN Model e pelo GGN Model, analisando suas diferenças em termos de precisão e eficiência computacional. O resultado desta comparação é apresentado na Figura 46. Os resultados desse cenário mostram que os valores obtidos por ambas as técnicas foram bastante próximos, com uma diferença máxima de 0.5 dB. No entanto, considerando que o nível de NLI está em torno de -59 dBm, essa variação é irrelevante, pois, em ambos os casos, a interferência não linear é suficientemente baixa para não impactar o GSNR. O cálculo do GSNR é apresentado na Equação 1.1. Nas simulações realizadas, a contribuição do ruído térmico foi desprezada, considerando apenas as componentes de ruído ASE e interferência não linear (NLI) ao longo da propagação do sinal. Um aspecto importante que deve ser observado é o tempo de execução de cada modelo. O GN Model demorou 1 segundo para ser executado, enquanto o GGN Model demorou 130 segundos.

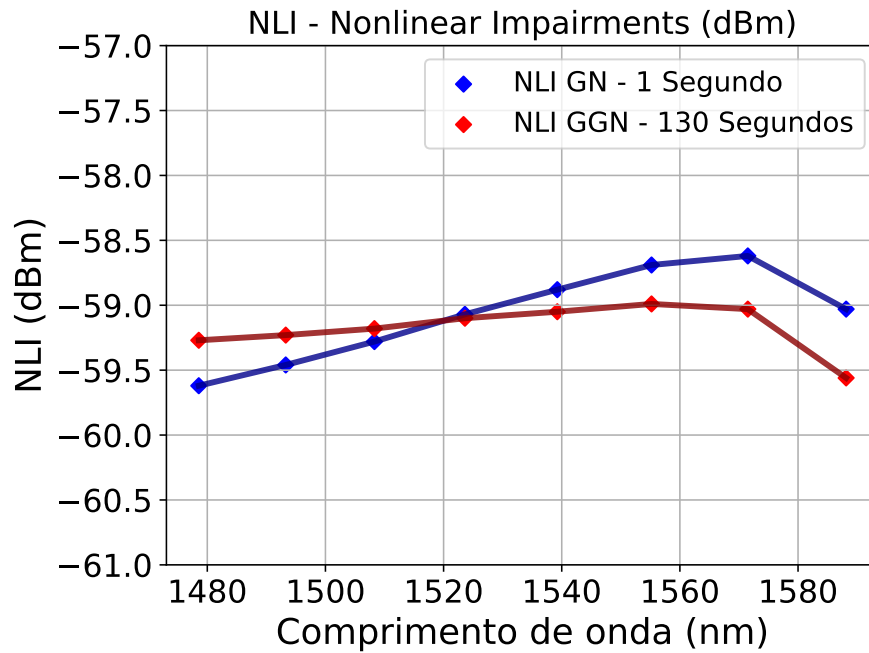


Figura 46 – Valores de NLI obtidos pelas técnicas GN Model e GGN Model, considerando um cenário com 8 canais lançados com uma potência de 0 dBm em um trecho de 110 km de fibra.

Um segundo cenário para comparar o desempenho entre os modelos GN e GGN é apresentado na subseção 4.5.3. Uma transmissão multibanda com 396 canais é realizada em um trecho de 50.3 km. As potências de lançamento são diferentes para cada banda. Na banda S os canais são lançados com -20dBm e na banda C e L os canais são lançados com -16 dBm. O resultado deste cenário é apresentado na Figura 47. De maneira semelhante ao cenário anterior, os resultados obtidos com ambas as técnicas foram próximos, exceto na banda S, onde a potência do NLI apresentou uma diferença de até 3 dB. Nesse caso, o GGN Model resultou em valores de NLI mais elevados em comparação ao GN Model em toda faixa espectral, comportamento diferente do observado no cenário anterior. No entanto, o aspecto mais significativo dessa simulação foi o tempo de execução. Enquanto o GN Model levou apenas 2 segundos para calcular o NLI, o GGN Model exigiu um tempo significativamente maior, chegando a 1 hora e 42 minutos, evidenciando o aumento expressivo na complexidade computacional desse modelo.

No terceiro cenário, a simulação teve como objetivo otimizar o tempo de execução do GGN Model por meio de uma estratégia para reduzir a complexidade do cálculo do NLI. No GGN Model, os efeitos XPM (*Cross-Phase Modulation*) e SPM (*Self-Phase Modulation*) são calculados para todos os canais ativos, utilizando integrais presentes na formulação do modelo. Isso significa que, para cada canal, é determinado o efeito não linear tanto do próprio canal sobre si mesmo quanto das interações com todos os outros canais do sistema. O canal para o qual esses efeitos estão sendo computados é denominado CUT (*Channel Under Test*), e esse processo é repetido para todos os canais da transmissão.

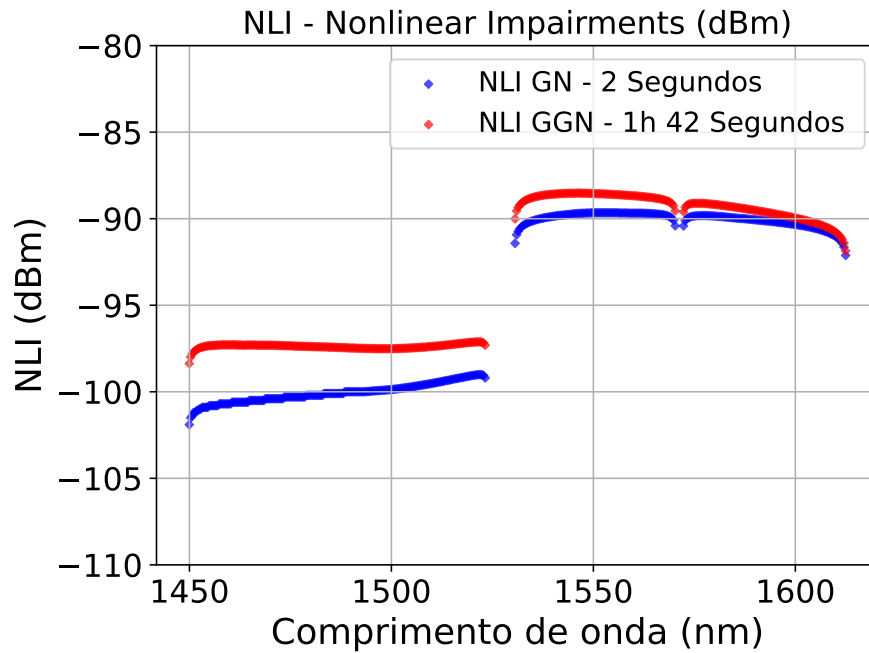


Figura 47 – Valores de NLI obtidos pelas técnicas GN Model e GGN Model, considerando um cenário com 396 canais lançados em um trecho de 50 km de fibra. Os canais da banda S foram lançados com -20 dBm e os canais das bandas C e L foram lançados com -16 dBm.

Para reduzir o tempo de processamento, adotou-se uma abordagem que seleciona um número reduzido de canais de referência, distribuídos ao longo de toda a faixa espectral. Nesse método, os CUTs são escolhidos em três pontos estratégicos: início, meio e fim do espectro. Os valores dos efeitos não lineares nos demais canais são então estimados por meio de interpolação linear, eliminando a necessidade de calcular explicitamente as integrais para cada canal, o que reduz significativamente o tempo de execução do modelo.

Nesse cenário, foi simulada a transmissão de 160 canais distribuídos nas bandas S, C e L, com potência de lançamento de 0 dBm em um enlace de 110 km. Para aplicar a estratégia de otimização baseada em interpolação, foram selecionados 9 canais dentre os 160 transmitidos para o cálculo direto do NLI, enquanto os demais tiveram seus valores estimados.

Os resultados da transmissão são apresentados na Figura 48. Observa-se que os valores de NLI obtidos com a estratégia de interpolação são praticamente idênticos aos do cálculo completo, evidenciando a eficácia do método na redução do tempo de execução sem comprometer a precisão dos resultados. Enquanto o processo completo demorou 2350 segundos (curva vermelha), a versão otimizada, utilizando interpolação, reduziu esse tempo para 155 segundos (curva azul), representando uma melhoria significativa. No entanto, apesar dessa otimização, o tempo de execução do GGN Model ainda representa uma limitação, especialmente em processos de otimização, onde múltiplas iterações são necessárias para avaliar diferentes spans ao longo da transmissão.

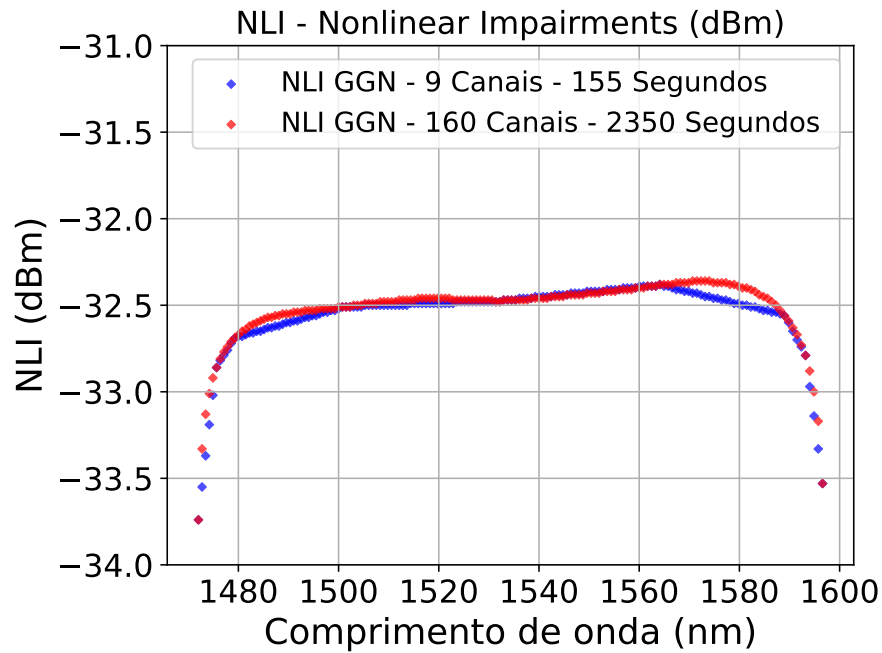


Figura 48 – Valores de NLI obtidos pelo GGN Model em dois cenários: a curva azul representa a abordagem com interpolação (9 canais), enquanto a curva laranja corresponde ao cálculo completo (160 canais).

4.5.3 Validação do Simulador

A validação do simulador foi feita replicando parcialmente um experimento de laboratório na transmissão multibanda publicada em (ZHANG et al., 2023). Um setup experimental foi implementado para realizar uma transmissão multibanda com espaçamento de grade de 50 GHz, abrangendo 396 canais. Amplificadores dopados com terras raras, operando nas bandas S, C e L, possibilitaram uma largura de banda total de 19,8 THz em uma configuração WDM, dispensando o uso de amplificação Raman distribuída. O objetivo principal do estudo foi maximizar a capacidade de transmissão, empregando transceptores fotônicos de última geração e formatos avançados de modulação, como PCS-256QAM e PCS-64QAM. O setup experimental é apresentado na Figura 49 e a parte destacada por um retângulo vermelho foi a parte replicada através de simulação no GNPpy adaptado para a multibanda.

A Figura 50 apresenta o resultado do sinal multibanda antes e após a transmissão no trecho de 50,3 km de fibra. Replicamos o experimento com a mesma quantidade de canais e aproximando a potência de lançamento de cada banda de acordo com a Figura 50. O resultado após a simulação no GNPpy é apresentado na Figura 51. Podemos observar através da comparação das figuras a aproximação entre o resultado experimental e o resultado após simulação no GNPpy multibanda, o que valida as adaptações realizadas no código fonte do GNPpy para permitir a transmissão multibanda. A simulação foi realizada com base apenas nos gráficos apresentados. A ausência de informações detalhadas sobre todos os parâmetros da transmissão como a potência exata em cada canal e atenuação em cada elemento do sistema pode ter impactado nas variações

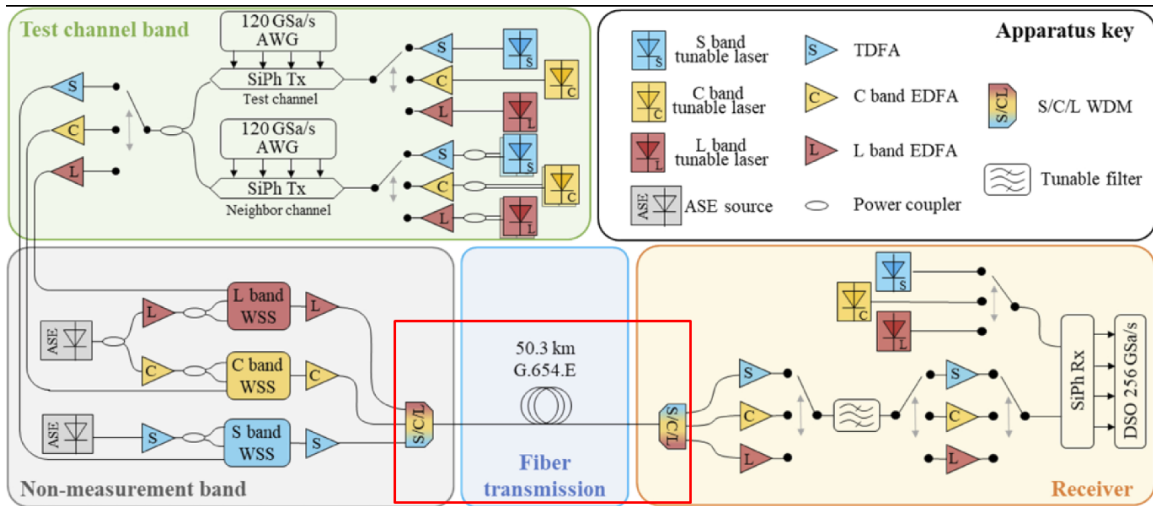


Figura 49 – Setup experimental realizado para a transmissão de 396 canais nas bandas S, C e L. Apresentado em (ZHANG et al., 2023).

na resposta.

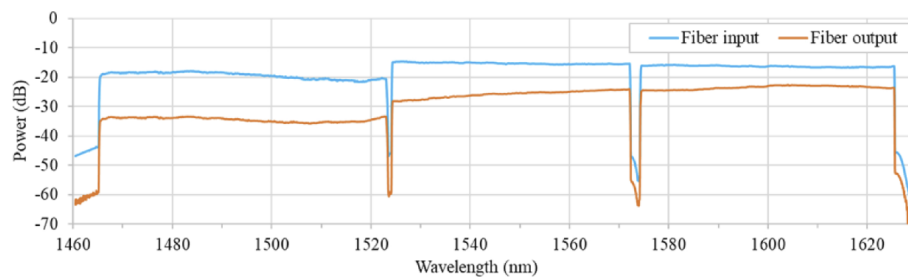


Figura 50 – Potência do sinal medida antes e após a transmissão multibanda no trecho de 50.3 km. Apresentado em (ZHANG et al., 2023).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 4

A transmissão óptica em cenários multibanda é significativamente impactada pelo efeito de espalhamento Raman estimulado, que causa uma redistribuição de potência entre os canais ao longo do espectro, resultando em alterações indesejadas nas características do sinal, como degradação da GSNR e variações na potência dos canais ao longo da fibra. Os estudos recentes sobre transmissão óptica multibanda (HAMAOKA et al., 2019), (BUGLIA et al., 2021), (SHEVCHENKO; NALLAPERUMA; SAVORY, 2022), (WU et al., 2023), (YANG et al., 2024), (CORREIA et al., 2021), propõem estratégias específicas para mitigar esse impacto, seja por meio de técnicas avançadas de gerenciamento de potência, configuração otimizada de amplificadores Raman distribuídos ou algoritmos de pré-compensação baseados em aprendizado de máquina ou otimização bioinspirada. No capítulo 5, exploramos esses aspectos e apresentamos uma técnica inovadora para mitigar esse efeito.

Um aspecto importante que não foi abordado nos trabalhos recentes é a influência dos parâmetros dependentes do comprimento de onda, como área efetiva, atenuação e dispersão,

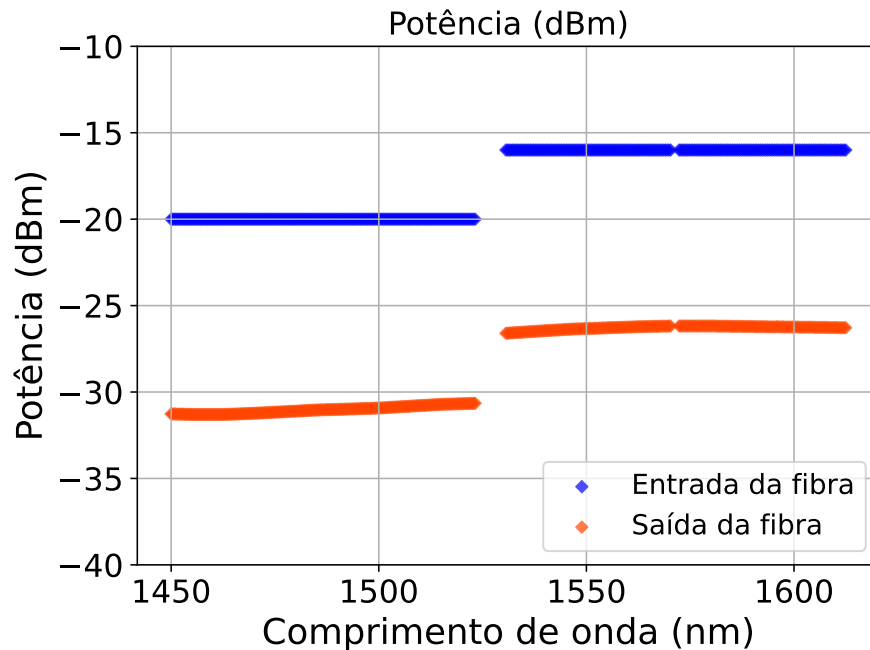


Figura 51 – Resultado dos valores de potência obtidos através da simulação antes e após a transmissão no cenário multibanda.

na transmissão óptica multibanda. Neste estudo, analisamos detalhadamente o impacto dessas variáveis no cálculo dos efeitos não lineares, evidenciando como sua variação afeta a relação sinal-ruído generalizada (GSNR) em sistemas de comunicação óptica. Para isso, comparamos cenários onde esses parâmetros são assumidos como constantes e onde são modelados considerando sua dependência espectral, destacando as diferenças na previsão do desempenho do sistema. Essa abordagem é essencial para garantir a precisão das simulações computacionais, pois permite uma representação mais realista das penalidades e limitações físicas presentes em enlaces ópticos multibanda, contribuindo para um planejamento mais eficiente e otimizado das redes de próxima geração.

Desta forma, concluímos que em um cenário multibanda, alguns critérios devem ser levados em consideração:

- O efeito SRS tem um impacto crucial no sinal transferindo potência dos canais de maior frequência para os canais de menor frequência. Em nosso cenário houve um tilt de aproximadamente 6 dB devido ao SRS. Em outros cenários esse tilt pode ser ainda maior dependendo da quantidade de canais e da potência de lançamento. Portanto é imprescindível considerar este efeito na transmissão multibanda.
- O coeficiente de atenuação da fibra dependente do comprimento de onda deve ser levado em consideração. O valor constante de 0.2 dB/Km não satisfaz a aplicação em um cenário multibanda, onde observamos diferença de até 2dB no valor final da potência ao considerar um coeficiente de atenuação dependente do comprimento de onda.

- Área efetiva e coeficiente de dispersão dependente do comprimento de onda também devem ser considerados. Valores constantes podem ter bons resultados quando consideramos apenas a banda C que apresenta uma janela espectral relativamente pequena (35nm) e a variação desses coeficientes não tem um impacto considerado no valor de NLI. Porém em um cenário multibanda, considerar o valor de dispersão e área efetiva dependente do comprimento de onda é essencial para obter resultados mais próximos da realidade.

5 SIMULAÇÃO DE TRANSMISSÃO ÓPTICA NA MULTIBANDA S + C + L

5.1 ACOP-MB

As técnicas de ACOP consistem em determinar o ponto de operação ideal dos amplificadores em um link óptico, com o objetivo de maximizar a qualidade da transmissão. As abordagens podem ser locais ou globais. A abordagem local concentra-se em dados relacionados ao ganho de um amplificador individual e seu impacto direto sobre a qualidade do sinal nessa região específica. Por outro lado, as técnicas de ACOP que usam uma abordagem global buscam otimizar o desempenho ao longo do link, escolhendo o ponto de operação dos amplificadores para que o sinal no final do link seja o melhor possível. A abordagem global provou ser mais eficaz do que a abordagem local (BARBOZA et al., 2017), pois mostrou que, para otimizar o sistema como um todo, o ponto de operação ideal para cada amplificador individual nem sempre será selecionado.

É importante ressaltar que as abordagens tradicionais de ACOP foram, em sua maioria, desenvolvidas considerando cenários restritos à banda C, com o processo de otimização concentrado principalmente nos ganhos do amplificador, o que implica na adoção de simplificações como coeficientes constantes de atenuação, dispersão e área efetiva. Tais simplificações desconsideram variações espectrais que, conforme discutido no Capítulo 4, podem impactar significativamente o desempenho de sistemas ópticos em arquiteturas multibanda. As abordagens que obtiveram os melhores resultados usaram algoritmos evolutivos como método de otimização.

Neste trabalho, propomos uma nova abordagem de ACOP denominada ACOP-MB, na qual a potência de lançamento é integrada ao processo de otimização, juntamente com a definição dos pontos de operação dos amplificadores ópticos. Estudos anteriores já demonstraram que o ajuste adequado da potência de lançamento pode melhorar significativamente o desempenho de sistemas ópticos ao mitigar efeitos não lineares e melhorar a qualidade de transmissão (BUGLIA et al., 2021), (SHEVCHENKO; NALLAPERUMA; SAVORY, 2022), (HAMAOKA et al., 2019). No entanto, essas abordagens tratam a potência de forma isolada, enquanto a metodologia aqui proposta realiza uma otimização conjunta entre ganho dos amplificadores e potência de entrada, ampliando o grau de liberdade da solução. Essa integração proporciona um controle mais preciso sobre o desempenho global do link óptico, especialmente em cenários multibanda, nos quais as variações espectrais de parâmetros físicos e os efeitos não lineares atuam de forma desigual sobre as diferentes bandas. Ao considerar simultaneamente o ganho do amplificador e a potência de entrada ideal, a abordagem ACOP-MB oferece uma estratégia mais abrangente para minimizar distorções e perdas ao longo do sistema de transmissão.

O ACOP-MB usa o algoritmo genético como uma ferramenta de otimização para determinar o ponto de operação ideal para os amplificadores em cada banda usada (S, C e L). O

algoritmo genético foi escolhido como estratégia de otimização para este problema devido à sua capacidade de explorar grandes espaços de busca de forma eficiente, sendo especialmente útil em problemas com múltiplos parâmetros e soluções não triviais. Embora outras técnicas de otimização e heurísticas como algoritmos evolutivos híbridos, PSO (*Particle Swarm Optimization*), ou métodos baseados em gradiente, também possam ser aplicadas a esse tipo de problema, o objetivo deste trabalho não foi comparar diferentes métodos de otimização, mas sim propor e validar um modelo funcional de otimização conjunta para cenários multibanda. Assim, a escolha do algoritmo genético se deu por seu equilíbrio entre simplicidade de implementação e robustez na obtenção de soluções viáveis para o contexto proposto. A função objetivo do algoritmo é maximizar o valor do GSNR mínimo. Durante cada execução do algoritmo, uma potência de lançamento diferente é avaliada, permitindo que o algoritmo explore várias combinações de parâmetros. O objetivo é identificar a configuração que fornece a melhor qualidade de sinal na extremidade do link óptico, otimizando o desempenho geral em um cenário de várias bandas. Um fluxograma da técnica é mostrado na figura 52.

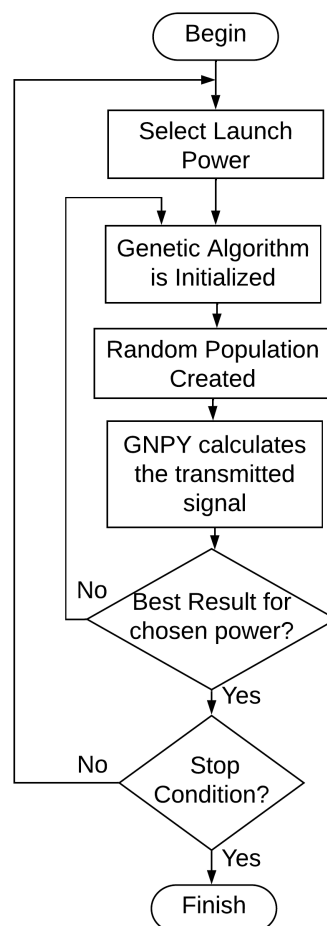


Figura 52 – Fluxograma simplificado do processo de otimização ACOP-MB.

O processo de otimização começa com a escolha da potência de lançamento para cada banda. Em seguida, o algoritmo de otimização é iniciado e gera uma população inicial aleatória,



Figura 53 – Indivíduo utilizado no algoritmo genético. "n" representa o número de spans.

na qual os indivíduos representam os valores de ganho dos amplificadores, conforme ilustrado na figura 53. O tamanho do indivíduo e, consequentemente, a complexidade do problema, varia de acordo com o número de spans no sistema de transmissão. Uma vez que esses ganhos tenham sido estabelecidos, o simulador GNPY é iniciado para calcular o sinal transmitido e retornar o valor GSNR no final do link. Por meio de um processo iterativo, o algoritmo genético continua a avaliar os indivíduos até encontrar o melhor resultado para a potência de lançamento escolhida. Depois de encontrar a melhor configuração de link para a potência de lançamento escolhida, uma nova potência de lançamento é selecionada e todo o processo é repetido. A otimização é concluída quando os ganhos ideais para cada amplificador e a potência de lançamento que proporciona o melhor desempenho são obtidos no final do link óptico.

5.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Foram analisados dois cenários distintos para a propagação do sinal óptico: (1) um enlace composto por quatro spans de 110 km cada e (2) um enlace com quatro spans de 90 km cada. A configuração detalhada desses spans é apresentada na figura 54. Para garantir a amplificação do sinal ao longo do enlace, foram utilizados três tipos de amplificadores comerciais na simulação. Na banda S, um amplificador TDFA foi empregado, com um ganho variável entre 20 e 30 dB. Na banda C, um EDFA foi utilizado, apresentando um ganho na faixa de 14 a 24 dB. Já para a banda L, um segundo EDFA foi aplicado, operando com ganhos entre 20 e 35 dB. Essa configuração permitiu avaliar o desempenho da transmissão óptica em diferentes condições de enlace e amplificação.

As simulações realizadas tiveram como objetivo representar cenários práticos aplicáveis a redes ópticas reais. Duas técnicas foram usadas para configurar o ganho do amplificador nos links: “LossComp” e ACOP-MB. A técnica denominada “LossComp” utiliza a abordagem tradicional em que os amplificadores compensam as perdas na propagação do sinal. No cenário multibanda, consideramos cada amplificador compensando a perda média de sua respectiva banda. A técnica ACOP-MB utiliza algoritmos genéticos para otimizar a configuração dos amplificadores, com a GSNR (Relação Sinal-Ruído Generalizada) mínima como função objetivo, buscando maximizar esse valor em todos os cenários simulados. Os parâmetros usados no algoritmo genético são mostrados na Tabela 4. Os valores atribuídos aos parâmetros do algoritmo genético foram definidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Após a realização de diversas simulações e análises de convergência, constatou-se que a configuração adotada proporcionava resultados satisfatórios, mantendo um equilíbrio adequado entre o tempo de execução e a abrangência na exploração do espaço de busca. Essa escolha foi, portanto, fundamentada empiricamente, com o

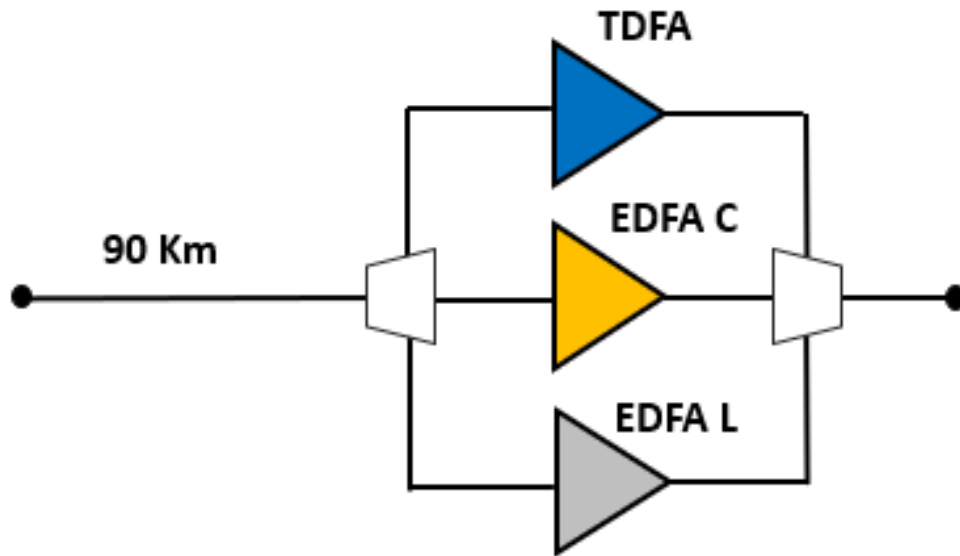


Figura 54 – Configuração dos amplificadores na transmissão multibanda.

objetivo de garantir um desempenho robusto e eficiente do algoritmo nas diferentes instâncias avaliadas.

Tabela 4 – Parâmetros do algoritmo genético utilizados no processo de otimização.

Parâmetros do Algoritmo Genético	
População	50
Gerações	30
Taxa de Cruzamento	0.8
Taxa de Mutação	0.15

Além disso, para avaliar o impacto dos efeitos não lineares durante a propagação do sinal, foi considerado um cenário hipotético no qual esses efeitos são ignorados. Essa abordagem permite comparar a influência desses fenômenos, que normalmente afetam a qualidade do sinal em redes ópticas, com uma situação idealizada, ajudando a entender o impacto real das não linearidades no desempenho do sistema.

Para medir o desempenho do sistema de forma mais objetiva, foi utilizada uma relação com a taxa de transmissão, que serve como uma métrica adicional para avaliar a eficiência e a qualidade da transmissão de dados nos diferentes cenários e configurações de potência. Essa análise permite comparar as soluções otimizadas com as técnicas convencionais e com um cenário idealizado, destacando as vantagens e as limitações de cada abordagem.

5.3 RESULTADOS

Os resultados são apresentados de acordo com a seguinte estrutura: inicialmente, a melhor potência de lançamento foi determinada usando a técnica ACOP-MB. Em seguida, os resultados obtidos com o ACOP-MB foram comparados com os das técnicas tradicionais de

Tabela 5 – GSNR Mínimo obtido após a otimização, considerando diferentes potências de lançamento.

Potência de Lançamento por Canal (dBm)			GSNR Min (dB)
S Band	C Band	L Band	
-6 dBm	-6 dBm	-6 dBm	11,62 dB
-8 dBm	-8 dBm	-8 dBm	13,72 dB
-9 dBm	-9 dBm	-9 dBm	14 dB
-10 dBm	-10 dBm	-10 dBm	14,34 dB
-11 dBm	-11 dBm	-11 dBm	13,7 dB
-12 dBm	-12 dBm	-12 dBm	13,59 dB
-13 dBm	-13 dBm	-13 dBm	13,22 dB
-8 dBm	-10 dBm	-12 dBm	13,70 dB
-10 dBm	-10 dBm	-12 dBm	13,6 dB

compensação de perdas, aplicadas aos cenários 1 e 2, com diferentes potências de lançamento (Subseções 5.3.1 - 5.3.3). A terceira etapa, descrita na Subseção 5.3.4, avaliou o impacto dos efeitos não lineares no cenário com alta potência de lançamento. Posteriormente, na Subseção E, foi feita uma comparação entre a otimização global e individual de cada banda. Por fim, a Subseção F apresenta os resultados em termos de taxa de transmissão.

A primeira etapa da pesquisa consistiu na aplicação da técnica ACOP-MB para a determinação da potência de lançamento ideal e dos ganhos dos amplificadores. A tabela 5 apresenta os valores de GSNR obtidos para diferentes potências de lançamento durante o processo de otimização, considerando exclusivamente o cenário 2 (90 km). A escolha por esse cenário se justifica pelo melhor desempenho observado em termos de GSNR mínima. Observa-se que a potência de lançamento de -10 dBm por canal, aplicada nas três bandas (S, C e L), foi a que resultou no desempenho mais eficiente, levando-se em conta os principais fatores limitantes da transmissão óptica, como efeitos não lineares e perdas acumuladas ao longo da rede. Embora diversos fatores influenciem o processo de otimização, uma possível explicação para o desempenho superior do cenário com enlaces de 90 km é a menor distância entre amplificadores, quando comparado ao cenário 1, que utiliza spans de 110 km.

Além disso, uma análise de convergência foi realizada para verificar a estabilidade do melhor resultado obtido no processo de otimização, conforme ilustrado na Figura 55. O melhor resultado foi obtido utilizando várias combinações de tamanhos de população e número de gerações, com o objetivo de analisar a robustez da solução frente a diferentes configurações do algoritmo. Para isso, foram realizadas 20 execuções independentes do cenário que apresentou o maior valor de GSNR mínimo, com base nas potências de lançamento testadas. Esse resultado reforça que a escolha cuidadosa da potência de lançamento é um fator determinante para maximizar a qualidade do sinal e a eficiência do sistema em transmissões ópticas multibanda.

Levando em conta os resultados apresentados na Tabela 5, consideramos cenários si-

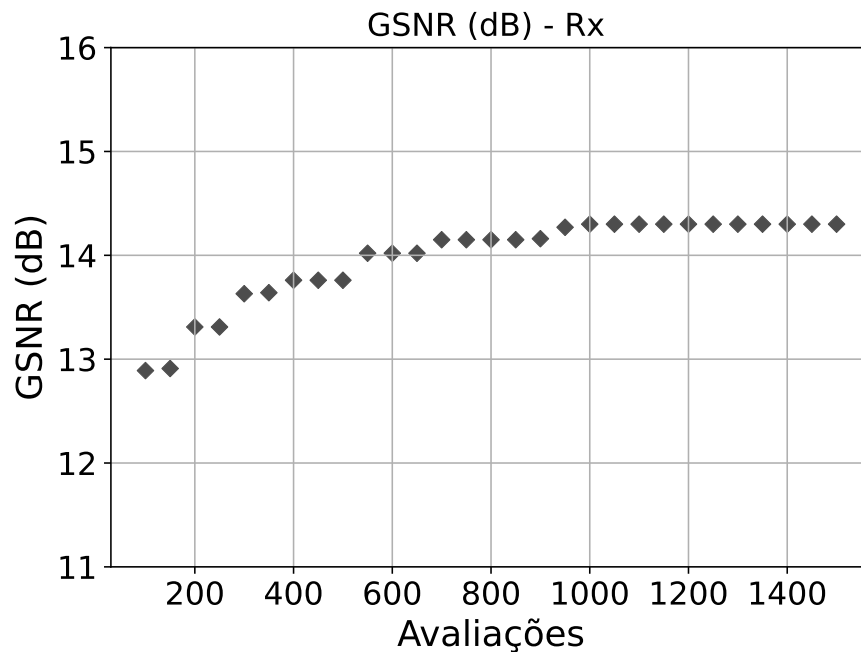


Figura 55 – Análise de convergência para otimização com potência de lançamento de -10dBm por canal.

mulados com potências de lançamento de 0 dBm e -10 dBm por canal. O objetivo é analisar o comportamento do sinal como uma função da distância e da potência escolhidas.

5.3.1 Quatro Spans com 110 km e Potência de Lançamento de 0 dBm por Canal

O primeiro cenário simulado foi um link com 4 spans de 110 km, totalizando 440 km. Usamos duas técnicas para configurar os amplificadores: ACOP-MB e LossComp. Em primeiro lugar, consideramos uma potência de lançamento de 0 dBm por canal.

Podemos ver na figura 56 que a técnica ACOP-MB apresentou um ripple de potência de 15,5 dB, enquanto a LossComp, mostrada na figura 57, apresentou um ripple de potência de 29 dB. O ripple de potência é definido como o valor do canal com a potência mais alta menos o canal com a potência mais baixa. A figura ilustra o impacto no espectro de potência dos canais que foram carregados de forma plana pelo transmissor.

As figuras 58 e 59 mostram os valores de GSNR obtidos no final da propagação. A figura 58 mostra que o valor mínimo de GSNR usando ACOP-MB foi de 4,48 dB, enquanto a figura 59 mostra o valor mínimo de GSNR de -0,77 dB ao usar a técnica LossComp.

Os resultados obtidos por ambas as técnicas mostram que, para 4 spans de 110 km e uma potência de lançamento de 0 dBm, a banda S é extremamente comprometida em termos de GSNR, e a transmissão óptica é impraticável considerando valores tão baixos de GSNR. Nesse caso, o principal fator de impacto é a “alta potência de lançamento”, que intensifica o efeito Raman, resultando na transferência de potência dos canais com comprimentos de onda mais

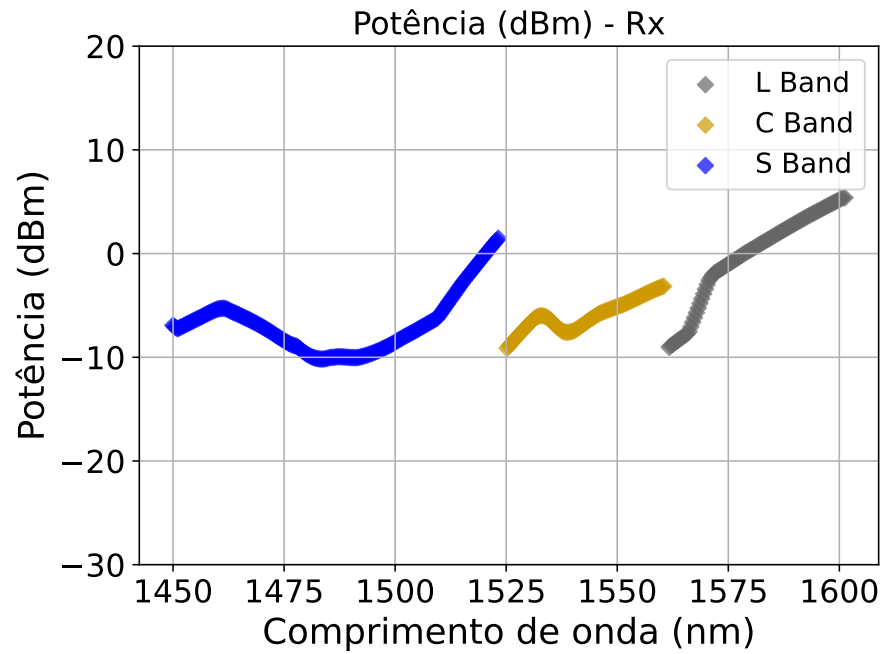


Figura 56 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

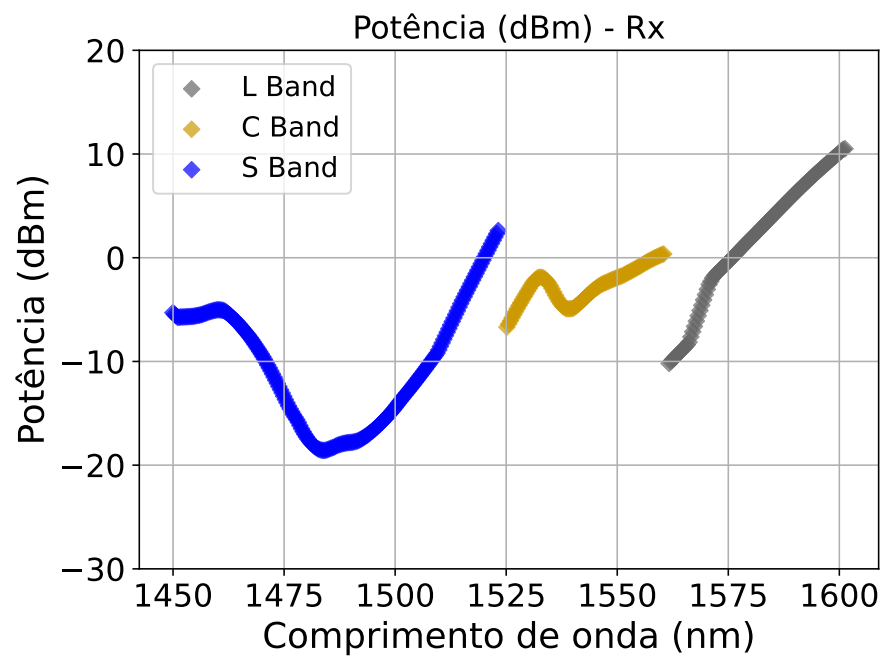


Figura 57 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

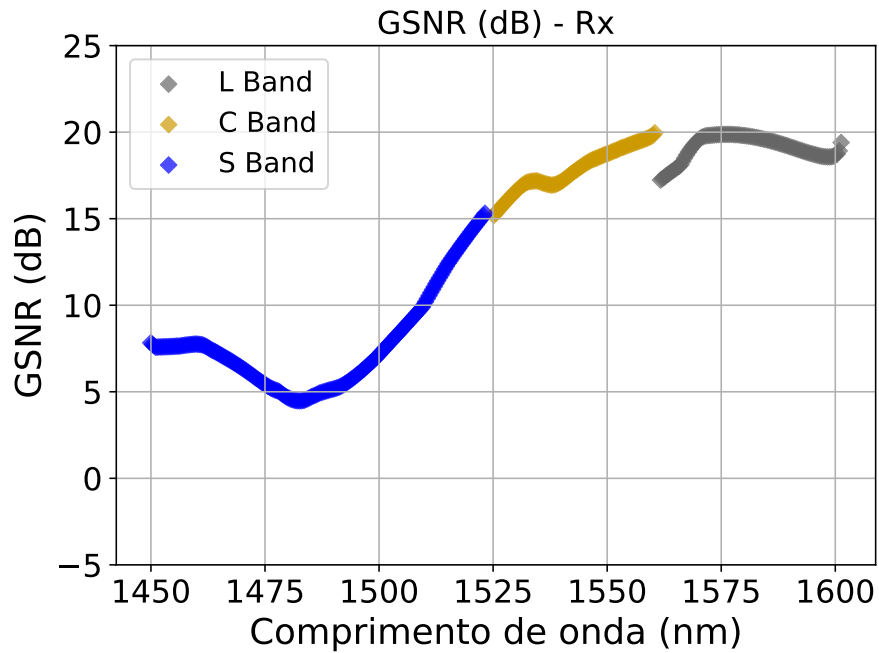


Figura 58 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

curtos para os canais com comprimentos de onda mais longos.

5.3.2 Quatro Spans com 110 km - Potência de Lançamento: -10 dBm por Canal

As figuras 60 e 61 mostram o espectro de potência e a GSNR no final do link, considerando o cenário de 110 km com uma potência de lançamento de -10dBm por canal e o ACOP-MB no processo de otimização. É possível observar que, após o processo de otimização, a GSNR mínima obtida foi de 8,72 dB (Fig. 61). Em comparação com o caso em que a potência de lançamento foi de 0 dBm por canal, houve uma melhoria de 4,24 dB quando a potência de lançamento foi de -10 dBm por canal. No caso do espectro de potência no final do link (Fig. 60), a ondulação de potência foi igual a 21,08 dB, enquanto no cenário com potência de lançamento de 0 dBm a ondulação no final do link foi de 15,5 dB. Essa diferença se deve ao fato de que a função objetivo no processo de otimização era maximizar o GSNR mínimo, o que pode resultar em uma configuração de link que tem um espectro de saída com alta ondulação de potência.

5.3.3 Quatro Spans com 90 km - Potência de Lançamento: -10 dBm por canal

O cenário agora envolve quatro spans, cada um com 90 km de extensão, culminando em uma distância total de transmissão de 360 km. Conforme mostrado na figura 62, a GSNR mínima obtida após a otimização com o ACOP-MB foi de 14,34 dB, enquanto a figura 63 exibe um valor de 6,8 dB obtido com o uso do LossComp. Esse valor marcou o GSNR mínimo mais alto encontrado em todas as simulações. Além disso, o emprego da compensação de perda reafirmou

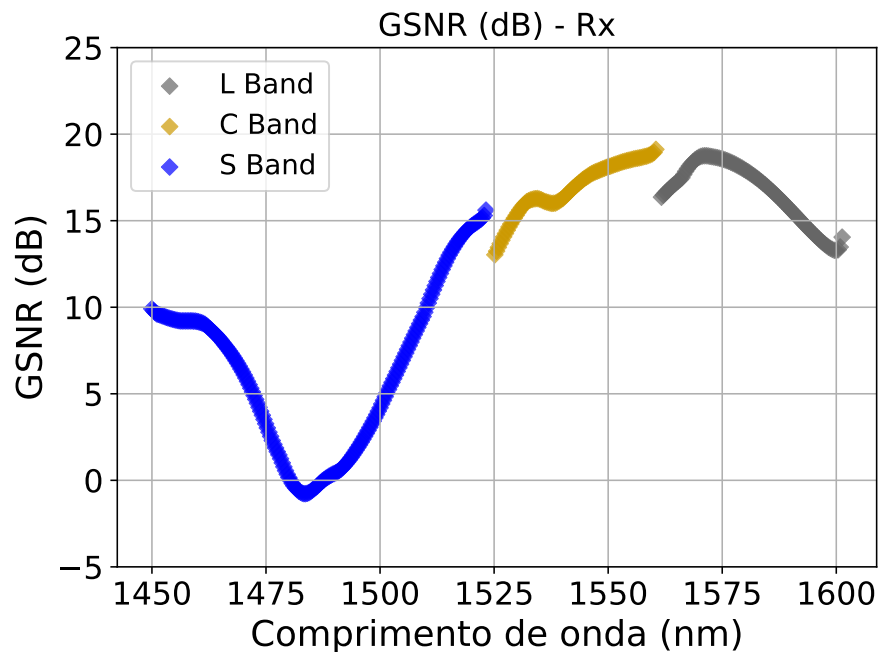


Figura 59 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

Tabela 6 – Resumo dos cenários apresentados. Valores de GSNR e ripple de potência obtidos no final do enlace dos cenários simulados para as potências de lançamento de 0 dBm e -10 dBm

Cenário/ Técnica	Potência de Lançamento	GSNR (dB)	Potência de Ripple (dB)
ACOP-MB - 90 Km	- 10 dBm	14,34	17,2
Loss-Comp - 90 Km	-10 dBm	6,8	24,2
ACOP-MB - 110 Km	0 dBm	4,48	15,5
Loss-Comp - 110 Km	0 dBm	-0,77	29
ACOP-MB - 110 Km	- 10 dBm	8,72	21,08

suas restrições em aplicações multibanda, pois compromete a banda S, tornando uma parte significativa do espectro da banda S inadequada para transmissão.

Quando observamos o espectro de potência no final do link na figura 64, vemos que, diferentemente do resultado no cenário de 110 km (Figura 60), a técnica ACOP-MB apresentou um resultado melhor que o LossComp em termos de ondulação de potência. As figuras 64 e 65 mostram esses resultados. Na técnica ACOP-MB, a ondulação de potência foi de 17,2 dB, enquanto na LossComp o valor foi de 24,2 dB.

Os resultados dos cenários estão resumidos na Tabela 6. O cenário com 90 km e uma potência de lançamento de 0 dBm por canal apresentou desempenho insatisfatório, cuja análise detalhada é apresentada na Subseção 5.3.4.

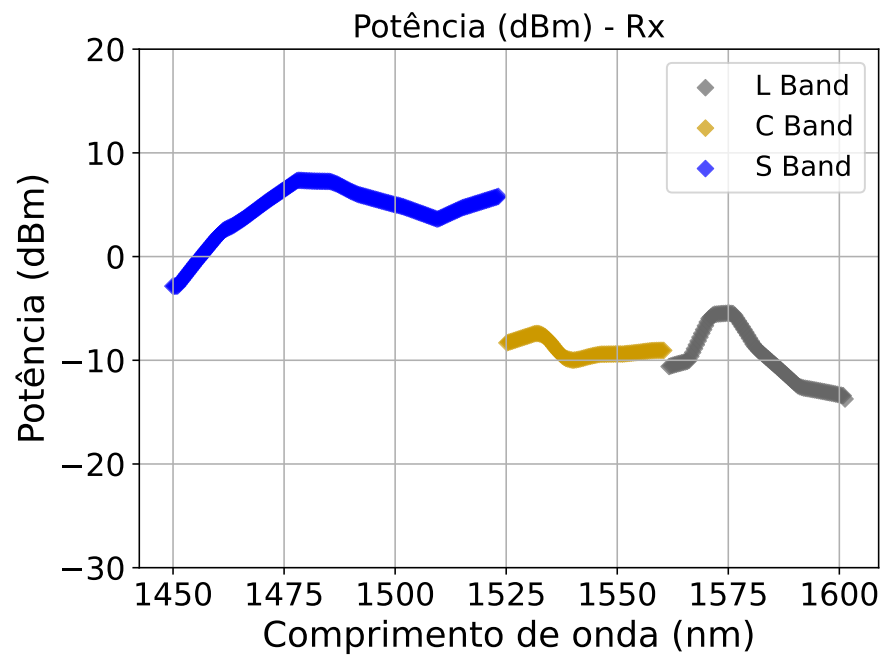


Figura 60 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

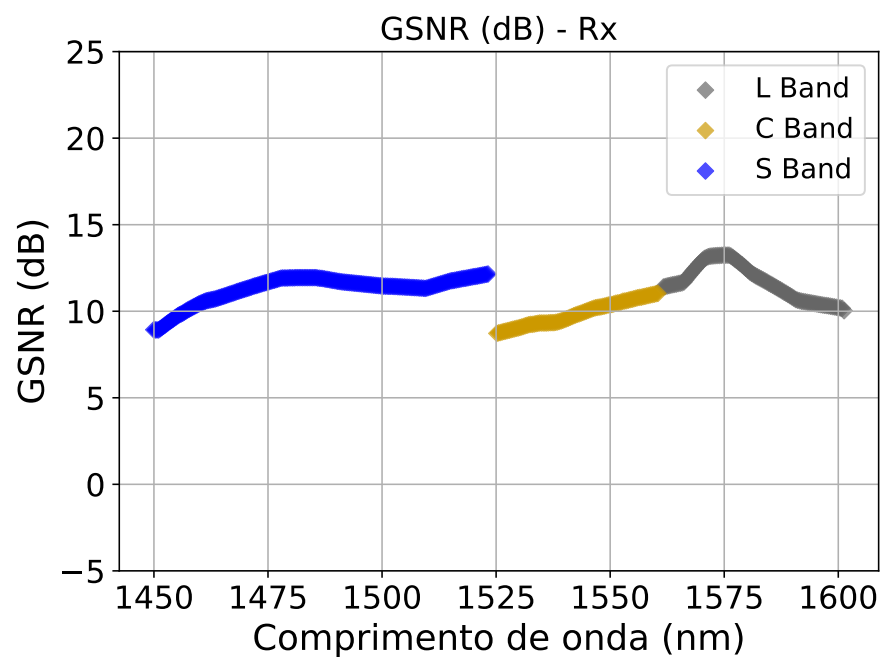


Figura 61 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 110 km.

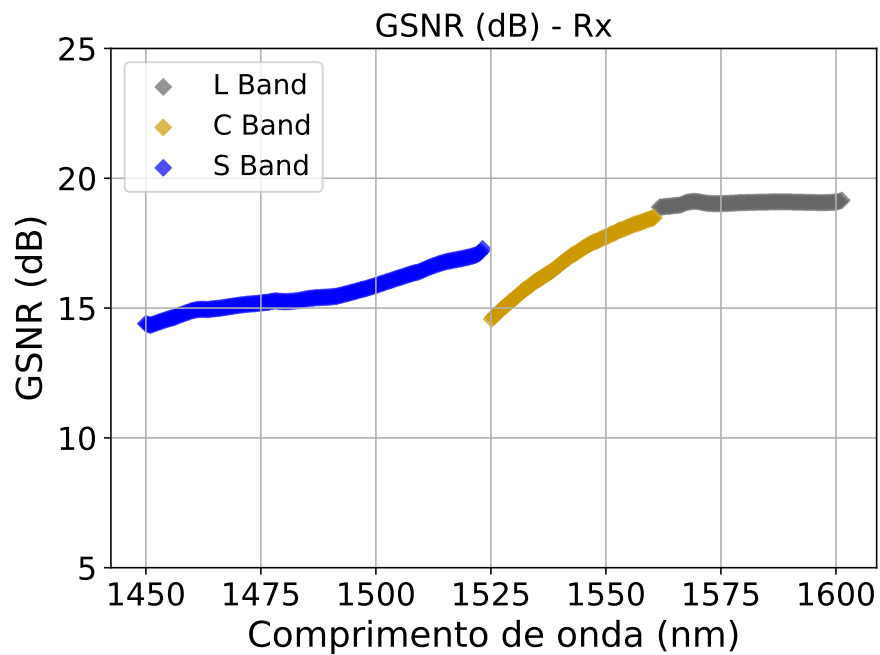


Figura 62 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica ACOP-MB e considerando uma potência de lançamento = -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.

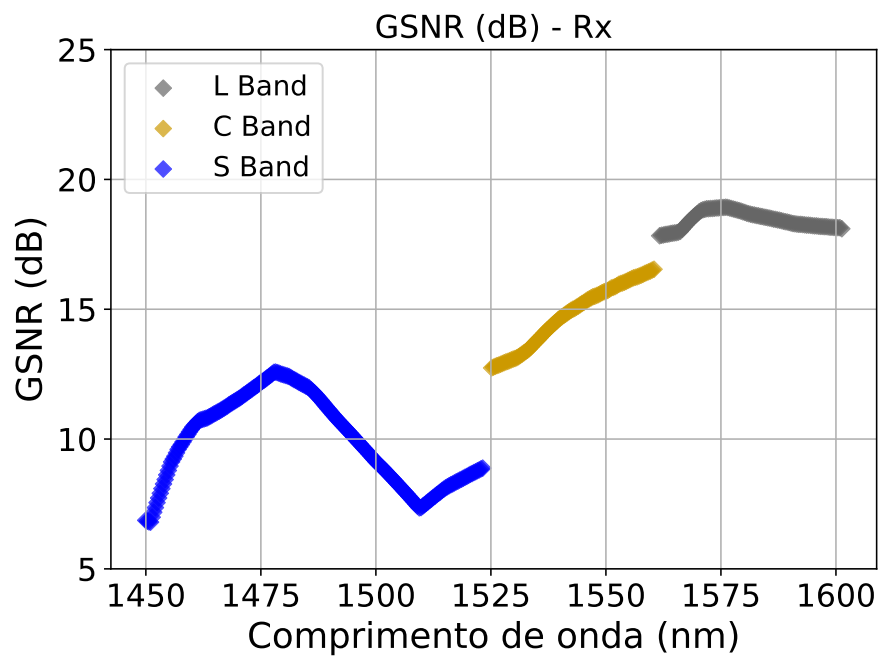


Figura 63 – GSNR (dB) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento = -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.

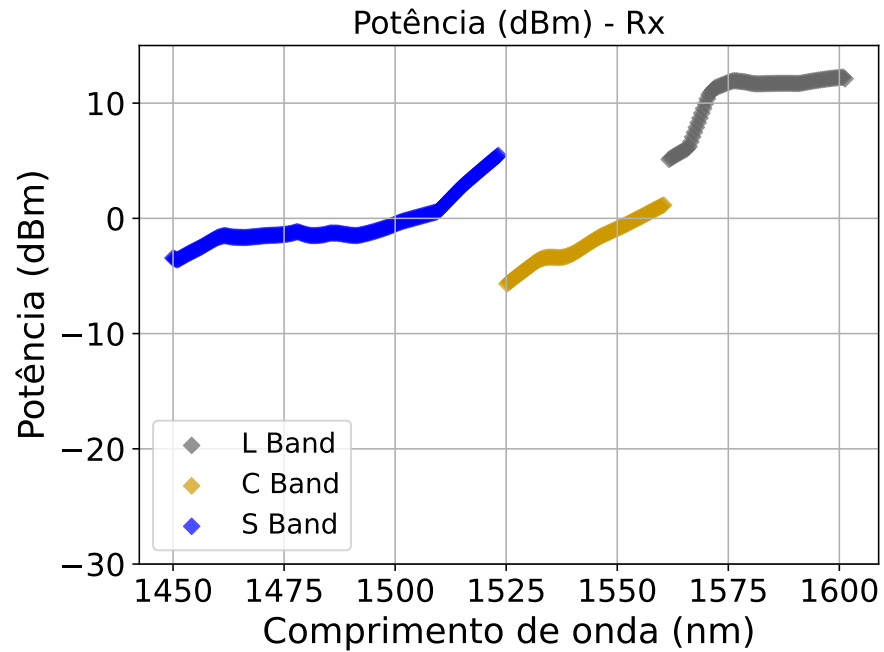


Figura 64 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica ACOP-MB e LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.

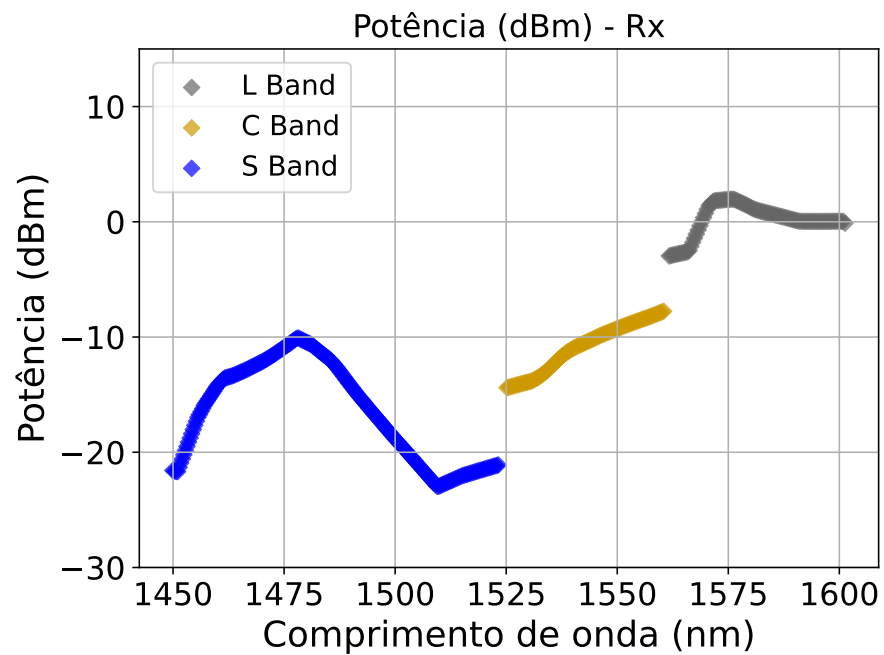


Figura 65 – Potência (dBm) no final do link usando a técnica LossComp e considerando uma potência de lançamento igual a -10 dBm por canal em 4 spans de 90 km.

5.3.4 O Impacto dos Efeitos Não Lineares

Os efeitos não lineares têm um impacto fundamental quando se considera a transmissão multibanda, sendo o efeito Raman o principal fator na propagação do sinal. Para verificar o impacto na propagação, simulamos o cenário de 4 spans com 90 km, considerando uma potência de lançamento de 0 dBm por canal e outra simulação desconsiderando os efeitos não lineares na propagação. Em ambos os casos, o ACOP-MB foi usado para configurar o ponto de operação dos amplificadores.

A figura 66 mostra os resultados para um cenário com 4 spans de 90 km e uma potência de lançamento de 0 dBm por canal. A curva em vermelho mostra o caso em que todos os efeitos são considerados na propagação. A curva em laranja desconsidera os efeitos não lineares na propagação, considerando apenas o ruído ASE nos amplificadores e as perdas devido à atenuação da fibra. É evidente que, com potência “alta”, os efeitos não lineares influenciam significativamente a transmissão do sinal, impedindo a transmissão efetiva em grande parte do espectro das bandas S e C. A figura demonstra que o GSNR é negativo em uma parte substancial do espectro. Embora não prevista inicialmente uma degradação tão acentuada do sinal, esse resultado evidencia a sensibilidade do desempenho multibanda à escolha da potência de lançamento, destacando sua relevância no planejamento e na otimização de redes ópticas avançadas. Quando os efeitos não lineares são ignorados, conforme indicado pela curva verde, a GSNR permanece em aproximadamente 29 dB em quase todo o espectro. Essa constatação destaca a influência dos efeitos não lineares na propagação com base na potência de lançamento selecionada.

5.3.5 Otimização de Bandas Individuais e Otimização Multibanda

Outra análise realizada nesta pesquisa foi o impacto causado pela otimização das bandas individualmente. Utilizamos a técnica ACOP-MB no processo de otimização de cada banda para encontrar a melhor configuração para os pontos de operação dos amplificadores. O cenário utilizado foi de 4 spans de 90 km. A estratégia usada para encontrar a potência de lançamento ideal em cada banda foi a mesma usada para encontrar a potência de lançamento na transmissão completa em várias bandas.

No processo de otimização individualizado da banda S, a potência de lançamento ideal foi de -5 dBm por canal. Esse valor de potência possibilitou a obtenção de um GSNR mínimo de 15,92 dB após a otimização usando o ACOP-MB. A figura 67 mostra o GSNR no final do link. A curva azul mostra o valor de GSNR por canal quando apenas a banda S é considerada para propagação. A curva em laranja mostra o valor GSNR da banda S quando a propagação é multibanda. Podemos ver que a propagação considerando apenas a banda S supera a banda S na propagação multibanda. A propagação da banda S sozinha tem um valor GSNR médio de 19,14 dB, enquanto na propagação multibanda a banda S tem um valor GSNR médio de 16 dB. A disparidade de 3 dB destaca os efeitos não lineares que se tornam mais pronunciados quando

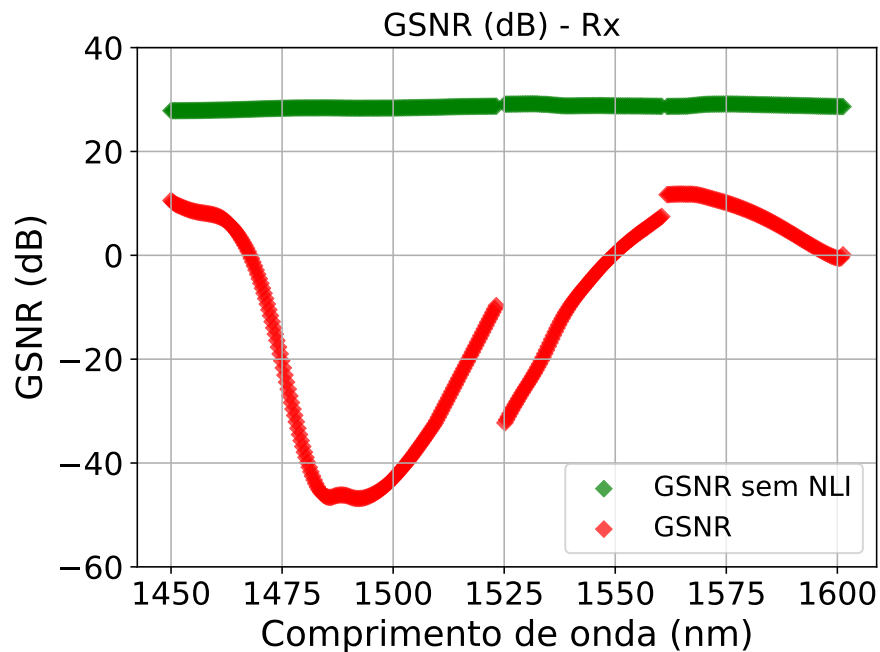


Figura 66 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando uma potência de lançamento igual a 0 dBm por canal e 4 spans de 90 km. A curva verde mostra um cenário sem interferência não linear (NLI).

uma faixa de espectro mais ampla é levada em consideração.

A potência de lançamento ideal, considerando a banda C individualizada, foi de -2 dBm por canal. A figura 68 mostra o valor de GSNR na banda C no final do link. Na mesma fórmula da análise anterior, a curva azul mostra o resultado da banda C otimizada individualmente, enquanto a curva laranja mostra o valor de GSNR da banda C quando há otimização multibanda. A propagação da banda C sozinha tem um valor GSNR médio de 21,82 dB, enquanto a propagação da banda C multibanda tem um valor GSNR médio de 17,43 dB. Seguindo o mesmo raciocínio do resultado da banda S, a justificativa para a diferença de 4,4 dB ao considerar a otimização individual e multibanda deve-se ao impacto dos efeitos não lineares no sinal, que ocupa uma faixa mais ampla do espectro.

O mesmo comportamento é observado na banda L, mas com menos impacto no resultado final. Nesse caso, a potência de lançamento ideal, considerando a banda L individualmente, foi de -6 dBm por canal. A figura 69 mostra o GSNR da banda L no final do link. Seguindo essa linha de raciocínio, a curva em azul mostra o valor GSNR considerando a otimização individual da banda L e a curva em laranja quando a otimização multibanda é realizada. Nesse caso, os valores de GSNR são mais próximos em ambos os cenários. A propagação de banda L isolada teve um valor médio de GSNR de 20,4 dB, enquanto a propagação de banda L multibanda teve um valor médio de GSNR de 19,05 dB.

Para confirmar a necessidade de otimização completa quando se considera várias bandas, foi realizada uma simulação na qual as bandas otimizadas individualmente foram transmitidas

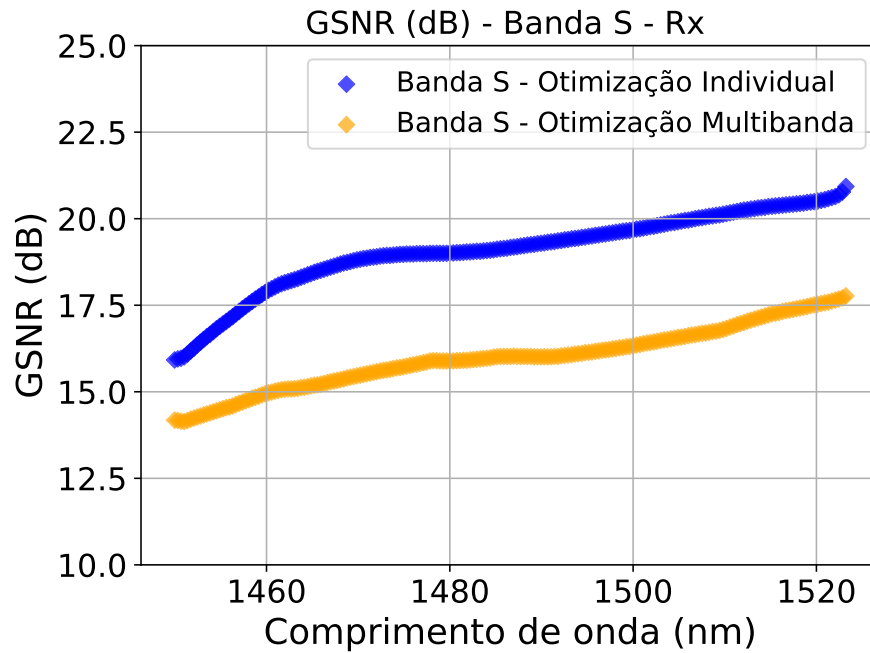


Figura 67 – Espectro GSNR no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda S e uma potência de lançamento = -5 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda S otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda S quando a otimização é realizada em um contexto multibanda.

juntas. A figura 70 mostra o valor GSNR no final do link em dois casos: A curva laranja mostra o resultado quando a banda múltipla completa é otimizada e a curva azul mostra o valor GSNR quando as bandas são otimizadas individualmente e transmitidas juntas. A curva laranja mostrada na figura 62 foi demonstrada anteriormente como o resultado ideal em relação ao GSNR mínimo obtido nos cenários simulados. Por outro lado, a curva azul representa um novo cenário, destacando que, em um ambiente multibanda, a otimização de cada banda individualmente degrada o GSNR do sinal até o ponto em que a transmissão em uma determinada banda espectral se torna impraticável, afetando principalmente a banda S. Portanto, no contexto da propagação multibanda, tanto a compensação de perda descrita nas figuras 59 e 63 quanto a otimização de bandas individuais indicam a necessidade de uma otimização multibanda abrangente. Isso envolve o ajuste adequado da potência de lançamento e dos pontos de operação dos amplificadores.

5.3.6 Otimização da Taxa de Transmissão

Nesta seção, analisamos a transmissão multibanda em termos de taxa de transmissão. Embora a GSNR seja uma métrica fundamental na análise da qualidade da transmissão, a taxa de transmissão é uma métrica conveniente quando se trata de aumentar a capacidade e a eficiência das redes ópticas. Em casos anteriores, a função objetiva no processo de otimização usando o ACOP-MB era maximizar a GSNR mínima do espectro. Agora, a função do objetivo é maximizar a taxa de transmissão agregada.

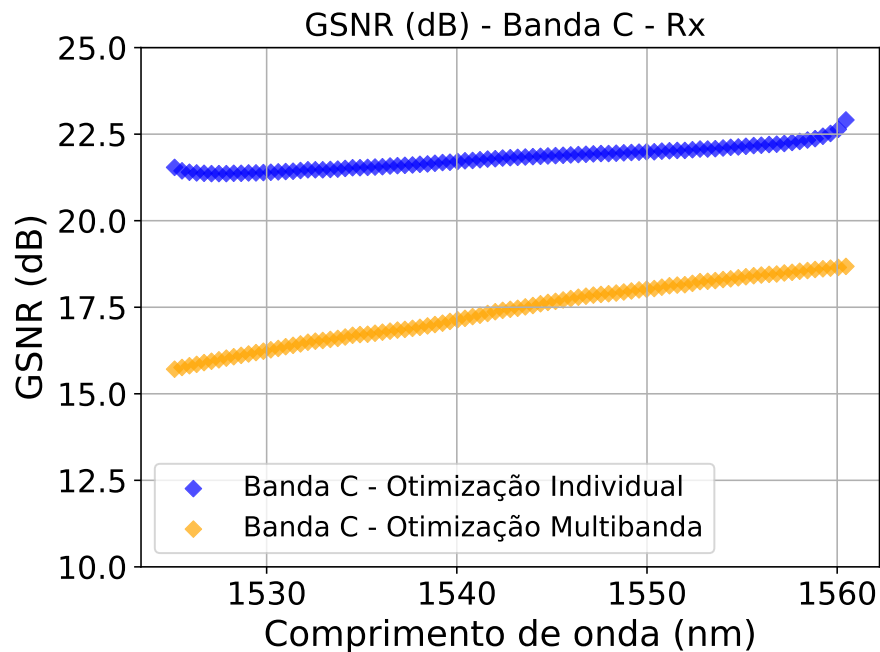


Figura 68 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda C e uma potência de lançamento = -2 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda C otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda C quando a otimização é realizada em um contexto multibanda.

Tabela 7 – Taxa de Transmissão x GSNR. Adaptado de (Smith; Zhou, 2017).

Gb/s	Formato de Modulação	GSNR mínimo requerido (dB)
40	DP-BPSK	9
100	DP-QPSK	12,5
200	DP-QPSK	16
200	DP-16QAM	19
400	DP-64QAM	24

A taxa de transmissão agregada é calculada com base na tabela 7. Com base no valor GSNR de cada canal, verificamos qual formato de modulação e taxa de transmissão são possíveis. A taxa de todos os canais é somada, e a taxa de transmissão agregada é obtida.

O cenário usado nessa simulação foi de 4 spans de 90 km e uma potência de lançamento de -10 dBm por canal. Esse cenário foi escolhido porque apresentou o melhor resultado (14,34 dB) em termos de GSNR mínimo. Para fins de comparação, três situações foram levadas em conta no cálculo da taxa de transmissão: 1) Configuração dos amplificadores usando o ACOP-MB, 2) Configuração dos amplificadores usando o LossComp e 3) Configuração dos amplificadores usando o ACOP-MB e desconsiderando os efeitos não lineares na propagação. A ideia é verificar o impacto dos efeitos não lineares na capacidade da rede.

A figura 71 mostra o valor da taxa de transmissão obtida por canal considerando uma

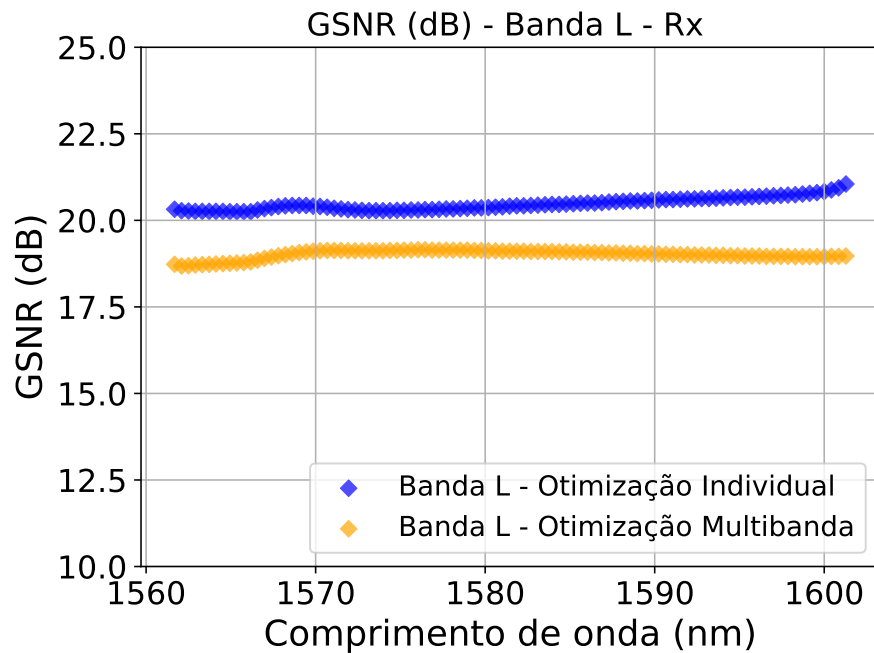


Figura 69 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, considerando apenas a banda L e uma potência de lançamento = -6 dBm por canal em 4 spans de 90 km. A curva azul representa o desempenho da banda L otimizada e transmitida individualmente, enquanto a curva amarela ilustra o desempenho da banda L quando a otimização é realizada em um contexto de várias bandas.

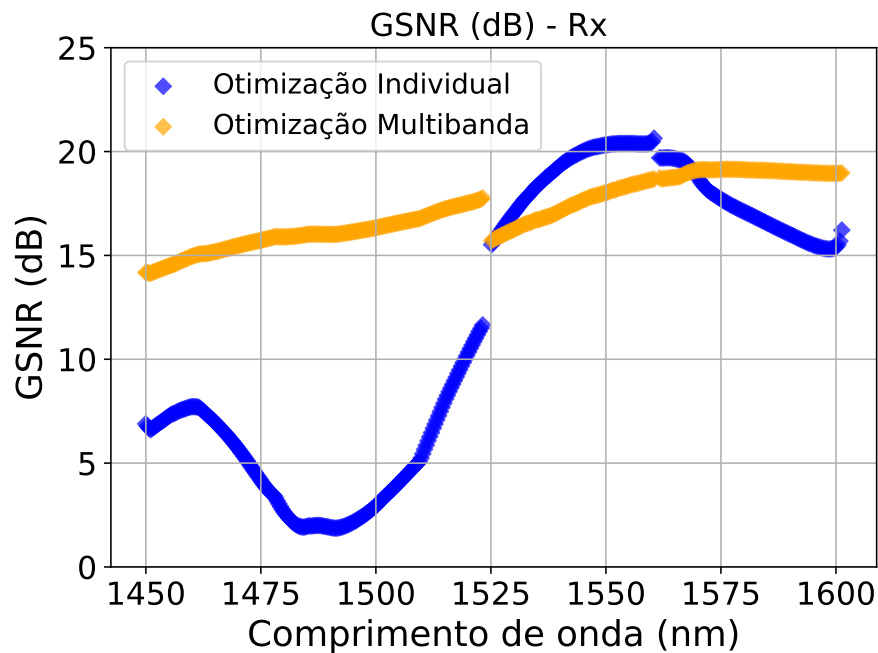


Figura 70 – GSNR em dB no final do link usando a técnica ACOP-MB, e considerando as bandas otimizadas individualmente e em multibanda. A curva azul representa as bandas S, C e L otimizadas individualmente e transmitidas simultaneamente. A curva laranja representa as bandas S, C e L otimizadas e transmitidas simultaneamente.

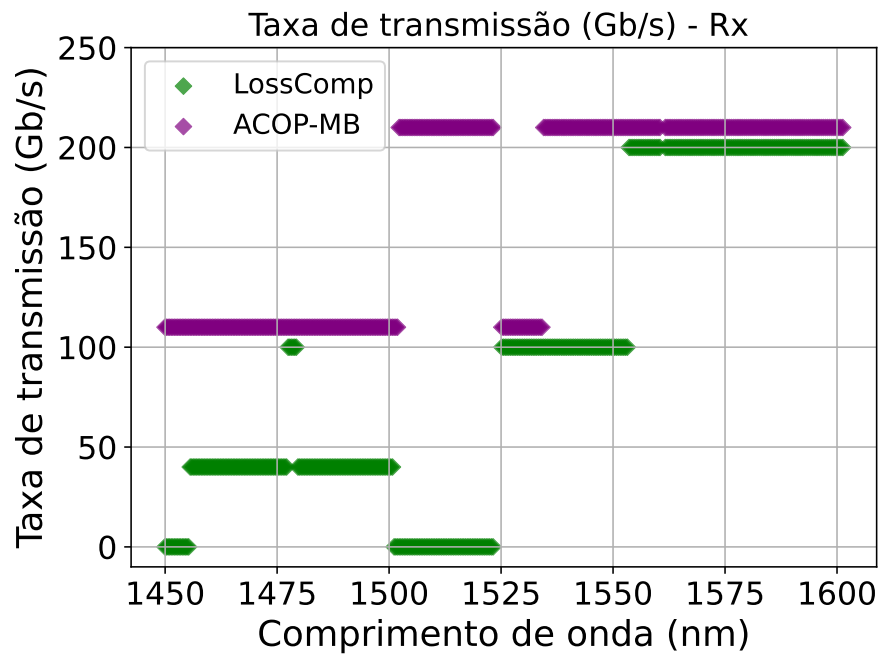


Figura 71 – Taxa de transmissão por canal considerando as técnicas ACOP-MB e LOSS COMP, e uma potência de lançamento de -10 dBm.

potência de lançamento de -10 dBm por canal e as técnicas Loss Comp e ACOP-MB. Esses resultados são para o GSNR mostrado nas figuras 62 e 63 e convertidos em taxa de transmissão usando a tabela 7. Nesse caso, conforme apresentado acima, a função objetiva na otimização era maximizar a GSNR mínima. A tabela 8 mostra os possíveis valores de taxa de transmissão por banda nos três cenários descritos.

Tabela 8 – Taxa de transmissão por banda e total em Tb/s considerando as técnicas ACOP-MB, LOSS COMP e um cenário hipotético sem os efeitos não lineares.

Técnica/ Taxa (Tb/s)	Banda S	Banda C	Banda L	Total (Tb/s)
ACOP-MB(GSNR)	25,6	15,6	19,2	60,4
LossComp	5,36	10,8	19,2	35,36
No-NLI	40	18	19,2	77,2

Como podemos ver na tabela 8, a técnica ACOP-MB(GSNR) obteve uma taxa de transmissão de 60,4 Tb/s, a mais alta considerando um cenário real. A técnica LossComp apresentou um valor de 35,36 Tb/s e, no cenário hipotético em que os efeitos não lineares não são considerados, a taxa agregada foi de 77,2 Tb/s. Esse resultado indica que o impacto dos efeitos não lineares nesse caso resultou em uma perda de capacidade de 17,2 Tb/s em termos de taxa de transmissão.

Outra comparação foi feita em termos de taxa de transmissão e é mostrada na figura 72. Nos resultados apresentados anteriormente neste tópico, a função objetiva no processo de otimização era maximizar a GSNR mínima. Agora, a otimização foi feita para maximizar a

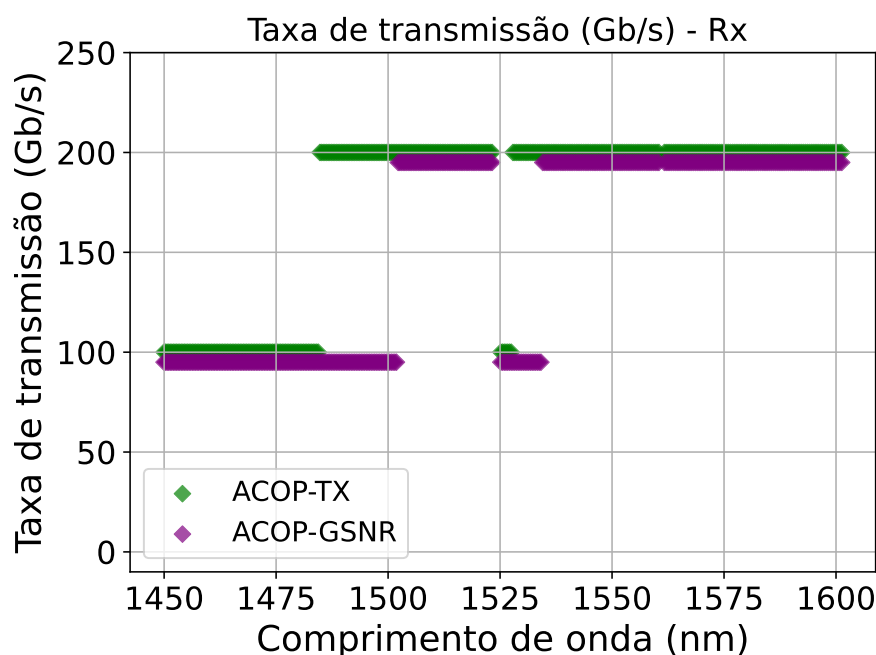


Figura 72 – Taxa de transmissão por canal considerando as técnicas ACOP-MB (GSNR) e ACOP-MB (Tx) e uma potência de lançamento de -10 dBm.

taxa de transmissão agregada (ACOP-TX). A figura 72 mostra que essa alteração na função de objetivo aumenta a taxa de transmissão agregada. A curva roxa que representa a otimização ACOP-TX mostra uma parte maior do espectro capaz de transmitir a 200 Gb/s em relação à curva verde. A taxa de transmissão agregada nesse caso foi de 66,8 Tb/s, aumentando quase 7 Tb/s em comparação com o resultado anterior. Nesse processo, o GSNR mínimo foi de 14,02 dB. Percebemos que o algoritmo, nesse caso, reduziu ligeiramente a GSNR mínima para obter uma taxa de transmissão mais alta, já que essa é a função objetivo do processo.

Outro ponto interessante na análise da capacidade em termos de taxa de transmissão agregada é quando realizamos otimizações de banda individuais em comparação com a otimização completa de várias bandas. A tabela 9 mostra esses resultados. Os pares de casos 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6 mostram o desempenho de cada banda em termos de capacidade quando elas são otimizadas individualmente e seus desempenhos quando a otimização é feita em várias bandas. Podemos observar que a banda L na otimização multibanda não sofreu nenhum impacto, retornando a mesma capacidade da otimização individual. A banda C perdeu uma capacidade de 1,4 Tb/s quando a transmissão multibanda foi realizada e a banda S recebeu o maior impacto, perdendo 9,4 Tb/s na capacidade de tráfego agregado. O caso 7 mostra o melhor resultado da otimização multibanda nos cenários testados.

O caso 8 é o resultado de uma simulação em que as bandas S, C e L são otimizadas individualmente e transmitidas simultaneamente com as configurações obtidas nas otimizações individuais. Esse resultado mostra um impacto em termos de capacidade de transmissão de quase 50% em relação ao processo de otimização geral. Ou seja, em um processo multibanda, não

Tabela 9 – Taxa de transmissão por banda e total em Tb/s, considerando as otimizações por banda e a otimização global.

Case	Banda(s) Otimizada	Rate (Tb/s)
1	S (Individual)	39,7
2	S (Multibanda)	30,3
3	C (Individual)	18
4	C (Multibanda)	16,6
5	L (Individual)	19,2
6	L (Multibanda)	19,2
7	S + C + L Otimização Completa	66,8
8	S + C + L Otimização Individualizada	34,84

basta usar o melhor cenário de cada banda para realizar a transmissão multibanda. Os efeitos dos impactos não lineares tornam a transmissão menos eficiente. Em geral, é necessária a otimização de várias bandas.

Um ponto importante a ser observado é que experimentos práticos recentes em transmissão multibanda enfatizaram o uso de formatos de modulação avançados, como PCS (Probabilistic Constellation Shaping) e GCS (Geometric Constellation Shaping), amplificação híbrida (Raman combinada com EDFA ou TDFAs) e transponders de última geração para maximizar as taxas de transmissão em sistemas ópticos. No entanto, este artigo apresenta uma análise focada exclusivamente no desempenho de EDFAs e TDFAs, usando o algoritmo ACOP-MB para otimizar a operação conjunta desses amplificadores em cenários de 360 km e 440 km. Os resultados demonstram a eficácia do ACOP-MB na maximização da qualidade do sinal, explorando a sinergia entre os amplificadores em um contexto multibanda. Além disso, ao combinar essa abordagem com tecnologias avançadas, como transponders modernos, formatos de modulação eficientes e algoritmos de otimização específicos, o potencial da transmissão multibanda pode ser totalmente explorado, alcançando uma taxa de transmissão superior e métricas de qualidade de sinal.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 5

A definição adequada da potência de lançamento na fibra em sistemas de transmissão multibanda é crucial para minimizar a degradação do sinal. Estudos recentes ([HAMAOKA et al., 2019](#)), ([BUGLIA et al., 2021](#)), ([SHEVCHENKO; NALLAPERUMA; SAVORY, 2022](#)), ([WU et al., 2023](#)), ([YANG et al., 2024](#)) exploraram esse tema, apresentando diferentes abordagens para o ajuste da potência em redes multibanda. Neste trabalho, propomos o modelo ACOP-MB, cujos resultados são discutidos no presente capítulo. Em conformidade com a literatura, nossos achados reforçam a necessidade do controle preciso da potência na fibra. No caso específico deste estudo, a otimização foi realizada pela técnica proposta ACOP-MB, garantindo uma melhoria na

qualidade da transmissão nos cenários analisados.

Um aspecto relevante analisado foi o impacto da otimização na taxa de transmissão. Embora a GSNR tenha sido a principal função objetivo no processo de otimização, sua relação com a taxa de transmissão é bem estabelecida. Nesta pesquisa, adotamos o modelo proposto em (Smith; Zhou, 2017) como referência para estabelecer uma relação conservadora entre GSNR e taxa de transmissão, enquanto estudos recentes (HAMAOKA et al., 2025), (KIMURA et al., 2024), (YANG et al., 2024), baseados em outros métodos alcançaram taxas de transmissão superiores em cenários multibanda. Além do controle preciso da potência, esses trabalhos incorporaram formatos avançados de modulação e transponders de última geração para maximizar o desempenho. Um aspecto fundamental deste estudo é a proposta de um modelo de otimização voltado à maximização da qualidade da transmissão em sistemas multibanda, sem depender de um modelo específico de transponder ou taxa de transmissão. Dessa forma, o ACOP-MB pode ser aplicado a qualquer sistema de transmissão óptica para aprimorar sua qualidade de transmissão. Em etapas futuras, exploraremos transponders de última geração, formatos avançados de modulação e algoritmos mais sofisticados para potencializar ainda mais a taxa de transmissão.

Com base nos resultados apresentados neste capítulo, destacam-se os seguintes pontos como conclusão:

- A escolha da potência de lançamento em sistemas multibanda é um fator crítico para garantir o equilíbrio entre alcance e qualidade do sinal. Potências elevadas podem intensificar efeitos não lineares e impactar negativamente a relação sinal-ruído na transmissão.
- A otimização de um sistema multibanda não pode ser feita de forma isolada para cada banda, pois a interação entre os sinais de diferentes faixas espectrais afeta o desempenho geral do enlace. O efeito do espalhamento Raman interbanda, por exemplo, pode transferir potência entre bandas, alterando o balanceamento de sinal e ruído. Assim, qualquer ajuste nos parâmetros da transmissão deve considerar todas as bandas simultaneamente para garantir um desempenho otimizado e uniforme.
- Os resultados apresentados para taxa de transmissão foram obtidos a partir de um conjunto específico de parâmetros (Tabela 7). No entanto, diversas configurações podem ser exploradas utilizando formatos avançados de modulação e transponders de última geração, possibilitando maior eficiência espectral e alcance. A metodologia adotada não se limita ao cenário específico analisado, podendo ser aplicada a diferentes configurações de redes ópticas, tornando-se uma ferramenta flexível para otimização em diversos contextos.

6 CONCLUSÕES

Apresentamos nessa pesquisa a técnica ACOP-MB (ACOP Multibanda) com o objetivo de prover um aumento de capacidade das redes ópticas e melhorar a eficiência da transmissão em sistemas multibanda. A técnica determina quais os ganhos dos amplificadores e qual a potência de lançamento deve ser escolhida em um cenário de transmissão óptica para maximizar a qualidade de transmissão. O primeiro passo foi obter as máscaras de potência dos amplificadores das bandas S e L, visto que as técnicas ACOP tem seu funcionamento baseado nas máscaras de potência e não tínhamos esses amplificadores disponíveis em nosso laboratório. Para isso, utilizamos amplificadores comerciais e baseado nas especificações fornecidas pelos fabricantes, foi aplicada uma estratégia de interpolação dos dados para criar as curvas de desempenho operacional dos amplificadores. Com essas curvas, foi possível extrair informações cruciais, como potência de saída e figura de ruído, e construir um banco de dados detalhado sobre o comportamento dos amplificadores. Esse banco de dados permitiu a construção das máscaras de potência para os amplificadores TDFA (banda S) e EDFA (banda L). No caso da banda C, foi possível realizar medições diretas devido à disponibilidade de um protótipo no laboratório, o que facilitou a obtenção dos parâmetros necessários para construir a máscara de potência dessa banda.

As simulações foram conduzidas utilizando o GNPY, um software de código aberto amplamente empregado para modelar e calcular a propagação de sinais em redes ópticas. Uma das principais modificações realizadas foi a inclusão do método da máscara de potência, que foi integrado ao código fonte do GNPY para melhorar a precisão dos cálculos de propagação, especialmente no contexto de cenários multibanda. Além dessa modificação, foram feitos ajustes adicionais no GNPY para adaptar a ferramenta à transmissão multibanda. O software foi originalmente desenvolvido para aplicações na banda C, considerando parâmetros como atenuação e área efetiva da fibra como constantes ao longo da largura de banda. Para refletir a realidade de um cenário multibanda, esses parâmetros passaram a variar conforme o comprimento de onda, ajustando-se às características específicas das bandas S, C e L. Essas mudanças foram fundamentais para permitir uma modelagem mais precisa e realista, considerando a influência dos diferentes parâmetros óticos que afetam a propagação do sinal em redes multibanda.

Após realizar os ajustes necessários no GNPY e obter as máscaras de potência dos amplificadores, iniciamos a análise dos cenários propostos utilizando a técnica ACOP-MB. A abordagem foi aplicada a dois cenários distintos, um com quatro spans de 90 km e outro com quatro spans de 110 km, testando diferentes configurações de potência de lançamento e outros parâmetros. A avaliação do desempenho nos cenários foi baseada no GSNR mínimo e na taxa de transmissão total. Esses parâmetros são cruciais para determinar a qualidade e a eficiência da transmissão. Dentre os cenários testados, o que apresentou o melhor desempenho foi o de quatro spans de 90 km, com uma potência de lançamento de -10 dBm por canal.

Com base nos resultados obtidos nas simulações realizadas, algumas conclusões podem ser destacadas. Primeiramente, a escolha da potência de lançamento em sistemas multibanda se mostra um fator crítico para equilibrar o alcance e a qualidade do sinal. Potências de lançamento muito elevadas podem intensificar os efeitos não lineares, como a distorção e a interferência, prejudicando a relação sinal-ruído (SNR) e, conseqüentemente, a qualidade da transmissão. Por outro lado, potências muito baixas podem comprometer o alcance da transmissão, tornando a escolha de potência uma tarefa delicada e fundamental para o sucesso do enlace.

Em segundo lugar, a otimização de um sistema multibanda não deve ser realizada isoladamente para cada banda. A interação entre os sinais de diferentes faixas espectrais tem um impacto direto no desempenho do sistema como um todo. Um exemplo disso é o efeito do espalhamento Raman interbanda, que pode transferir potência entre as bandas, desbalanceando a relação sinal-ruído e, em última análise, afetando a qualidade da transmissão. Para obter um desempenho otimizado, qualquer ajuste nos parâmetros do sistema deve levar em consideração todas as bandas simultaneamente, garantindo um equilíbrio entre elas. Por fim, os resultados relativos à taxa de transmissão foram obtidos a partir de um conjunto específico de parâmetros, conforme apresentado na Tabela 7. No entanto, diversas outras configurações podem ser exploradas, principalmente com o uso de formatos avançados de modulação e transponders de última geração. Esses recursos têm o potencial de aumentar a eficiência espectral. A metodologia adotada neste estudo não está restrita ao cenário específico analisado, mas pode ser aplicada a diferentes configurações de redes ópticas, tornando-se uma ferramenta flexível e valiosa para otimização em diversos contextos de redes de comunicação óptica.

As contribuições desta pesquisa para o avanço do estado da arte em transmissão óptica multibanda incluem o desenvolvimento de um método de otimização baseado em máscara de potências e algoritmo bioinspirado, voltado para cenários multibanda. Propomos um método conservador para determinar a máscara de potência de amplificadores com base nas informações disponíveis em seu datasheet, visando cenários em que o amplificador não está acessível para testes em laboratório. Além disso, demonstramos o impacto da variação de parâmetros da fibra óptica, como área efetiva, dispersão e atenuação, em função do comprimento de onda. Evidenciamos que a utilização de valores constantes, como é comumente adotado para a banda C em simuladores, pode levar a imprecisões na modelagem e na análise do desempenho do sistema.

Para trabalhos futuros, a análise poderá ser expandida com a avaliação de outros modelos de amplificadores e cenários de simulação, investigando o desempenho em diferentes condições operacionais. Outra sugestão é a consideração de redes com enlaces multibanda, integrando algoritmos de roteamento e resiliência. Além disso, é interessante incorporar transponders de última geração e formatos avançados de modulação, visando maximizar a capacidade e a eficiência da transmissão de dados. Por fim, experimentos de laboratório poderão ser realizados para validar os resultados de simulação e aprimorar a aplicabilidade das soluções em ambientes reais.

7 PUBLICAÇÕES

Artigos como autor principal feitos durante o Mestrado:

- LIMA, F. C. N. O.; BARBOZA, E. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. Maximizing the transmission rate in optical systems using swarm intelligence. In: 2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). Santo Domingo, Dominican Republic: IEEE, 2020. p. 1–6. Doi: 10.1109/LATINCOM50620.2020.9282307.
- LIMA, F. C. N. O. et al. OSNR ripple and tilt: comparison between PSO and MOO ACOP techniques for EDFAs links. In: 2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Fortaleza, Brazil: IEEE, 2021. p. 1–3. Doi: 10.1109/IMOC53012.2021.9624820.
- LIMA, F. C. N. O.; ARAÚJO, L. K. S.; SILVA, S. A.; MARTINS-FILHO, J. F.; ARAÚJO, D. R. B.; BARBOZA, E. A.; OLIVEIRA, A. S.; BASTOS-FILHO, C. J. A. Defining amplifier's gain to maximize the transmission rate in optical systems using evolutionary algorithms and swarm intelligence. *Photonics Network Communications*, v. 43, p. 74–84, 2022. Doi:10.1007/s11107-022-00968-w

Artigos como autor principal feitos durante o Doutorado:

- LIMA, F. C. N. O.; BARBOZA, E. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. A comparison of DGT and power mask for EDFA modeling in GNPpy. In: 2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). 2023. p. 79–81. Doi: 10.1109/IMOC57131.2023.10379688.
- LIMA, F. C. N. O.; BARBOZA, E. A.; COELHO, L. D.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. ACOP-MB: Amplifiers operating point optimization to increase QoT in multiband scenarios. *Optical Fiber Technology*, v. 94, 2025. Art. 104334. Doi: 10.1016/j.yofte.2025.104334.

Artigo como coautor feito durante o Doutorado:

- SILVA, A. A. B.; BARBOZA, E. D. A.; LIMA, F. C. N. O.; MARTINS-FILHO, J. F.; SILVA, M. J. Evaluating the impact of EDFA response modeling in the optical network QoT estimation. *Optical Fiber Technology*, v. 92, p. 104177, 2025. Doi: 10.1016/j.yofte.2025.104177.

REFERÊNCIAS

- ABRAMCZYK, H. Dispersion phenomena in optical fibers. In: . [s.n.], 2008. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:32698497>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 65.
- AGRAWAL, G. P. **Nonlinear Fiber Optics**. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1989. Citado na página 19.
- ALI, M. et al. Simulation of 64 wdm 10 gb/s transmission over 1000 km of standard single mode fiber using silica-based two-band edfa configuration. In: **Conference Proceedings. LEOS'98. 11th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1998 Annual Meeting (Cat. No.98CH36243)**. Orlando, FL, USA: IEEE, 1998. v. 1, p. 370–371. Citado na página 18.
- AOZASA, S. et al. Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band wdm signals. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 10, p. 1331–1333, 2000. Citado na página 19.
- BARBOZA, E. et al. Local and global approaches for the adaptive control of a cascade of amplifiers. **Photonic Network Communications**, v. 33, 04 2017. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 82.
- Barboza, E. A. **Amplificadores Ópticos Autônomos: desenvolvimento e análise de técnicas**. Tese (Doutorado), 2017. Citado 7 vezes nas páginas 8, 23, 30, 31, 33, 34 e 52.
- BARBOZA, E. d. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; FILHO, J. F. M. Adaptive control of optical amplifier operating point using voa and multi-objective optimization. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 16, p. 3994–4000, 2019. Citado na página 34.
- BARBOZA, E. de A. et al. Amplifier adaptive control of operating point considering non-linear interference. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 30, n. 6, p. 573–576, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- BOYD, W. R. **Nonlinear Optics**. San Diego, CA, USA: Academic Press - Elsevier, 2020. Citado na página 54.
- BROMAGE, J. Raman amplification for fiber communications systems. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 1, p. 79–93, 2004. Citado na página 19.
- BUGLIA, H. et al. Challenges in extending optical fibre transmission bandwidth beyond c+l band and how to get there. In: **2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)**. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2021. p. 1–4. Citado 5 vezes nas páginas 20, 27, 79, 82 e 101.
- CANTONO, M. et al. Introducing the generalized gn-model for nonlinear interference generation including space/frequency variations of loss/gain. 10 2017. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 74.
- CHBAT, M.; FEVRIER, H. Low-cost, high-capacity ultra-long-haul wdm systems based on wide-band raman amplification. In: **2002 28TH European Conference on Optical Communication**. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2002. v. 3, p. 1–2. Citado na página 19.

CHRAPLYVY, A.; NAGEL, J.; TKACH, R. Equalization in amplified wdm lightwave transmission systems. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 4, n. 8, p. 920–922, 1992. Citado na página 18.

Cisco. **Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper**. 2018. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>. Acesso em: 22 de maio 2023. Citado na página 17.

COLE, B.; DENNIS, M. S-band amplification in a thulium doped silicate fiber. In: **OFC 2001. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition (IEEE Cat. 01CH37171)**. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2001. v. 2, p. TuQ3–TuQ3. Citado na página 19.

CORREIA, B. et al. Power control strategies and network performance assessment for c+l+s multiband optical transport. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 13, n. 7, p. 147–157, 2021. Citado na página 79.

DENG, N. et al. Challenges and enabling technologies for multi-band wdm optical networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 40, n. 11, p. 3385–3394, 2022. Citado na página 21.

D'AMICO, A. et al. Scalable and disaggregated ggn approximation applied to a c+l+s optical network. **Journal of Lightwave Technology**, v. 40, n. 11, p. 3499–3511, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 10, 63 e 68.

FERRARI, A. et al. Gnpy: an open source planning tool for open optical networks. In: **2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)**. Barcelona, Spain: IEEE, 2020. p. 1–6. Citado na página 39.

FERRARI, A. et al. Assessment on the achievable throughput of multi-band itu-t g.652.d fiber transmission systems. **Journal of Lightwave Technology**, v. 38, n. 16, p. 4279–4291, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.

FILER, M. et al. Multi-vendor experimental validation of an open source qot estimator for optical networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 36, n. 15, p. 3073–3082, 2018. Citado na página 23.

GEOFF, B. **All You Ever Wanted to Know About Optical Transmission Bands**. 2021. Accessed on February 2nd, 2025. Disponível em: <<https://encr.pw/YMgB0>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 26.

GILES, C.; DESURVIRE, E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 9, n. 2, p. 271–283, 1991. Citado na página 18.

GILES, C.; GIOANNI, D. D. Spectral dependence of gain and noise in erbium-doped fiber amplifiers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 2, n. 11, p. 797–800, 1990. Citado na página 18.

GOVIND, P. A. **Fiber-Optic Communication Systems**. Hoboken, New Jersey, EUA.: Wiley - 4th Edition, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 10, 66, 68 e 69.

GROSZ, D. et al. Demonstration of all-raman ultra-wideband transmission of 1.28 tb/s (128/spl times/10 gb/s) over 4000 km of nz-dsf with large ber margins. In: **Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No.01TH8551)**. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2001. v. 6, p. 72–73 vol.6. Citado na página 19.

- HAMAOKA, F. et al. Ultra-wideband wdm transmission in s-, c-, and l-bands using signal power optimization scheme. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 8, p. 1764–1771, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 20, 27, 79, 82 e 101.
- HAMAOKA, F. et al. Long-haul >100-tb/s transmission over >1000 km with high-symbol-rate triple-band wdm signals. **Journal of Lightwave Technology**, v. 43, n. 4, p. 1987–1994, 2025. Citado na página 102.
- HOSHIDA, T. et al. Ultrawideband systems and networks: Beyond c + l-band. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 11, p. 1725–1741, 2022. Citado 4 vezes nas páginas 9, 21, 54 e 61.
- JIANG, C. Modeling a broadband bismuth-doped fiber amplifier. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 15, n. 1, p. 79–84, 2009. Citado na página 19.
- KARFAA, Y. M. et al. Stimulated raman scattering for various fiber types and walk-off lengths. In: **2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics**. Melaka, Malaysia: IEEE, 2007. p. 1–5. Citado na página 54.
- KIMURA, K. et al. 101-tb/s c+l+u-band transmission over 5×80-km nz-dsf with closed-form-gn-model-based launch power optimisation. In: **ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication**. Frankfurt, Germany: VDE Verlag GmbH, 2024. p. 71–74. Citado na página 102.
- LIMA, A. I. **ESPALHAMENTO DE RAMAN EM FIBRAS ÓPTICAS: CARACTERIZAÇÃO TEÓRICA E SIMULAÇÕES**. 2012. Citado 6 vezes nas páginas 9, 54, 55, 56, 57 e 60.
- LIMA, F. et al. Defining amplifier's gain to maximize the transmission rate in optical systems using evolutionary algorithms and swarm intelligence. **Photonic Network Communications**, v. 43, 02 2022. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 39.
- LIMA, F. C. N. O. **Algoritmo de Enxames de Partículas para Maximizar a Taxa de Transmissão em Sistemas de Comunicações Ópticas a partir do Ajuste do Ponto de Operação dos Amplificadores Ópticos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Pernambuco - Escola Politécnica, Fevereiro 2021. Citado 3 vezes nas páginas 8, 26 e 35.
- LIMA, F. C. N. O. et al. Maximizing the transmission rate in optical systems using swarm intelligence. In: **2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. Santo Domingo, Dominican Republic: IEEE, 2020. p. 1–6. Citado 6 vezes nas páginas 8, 30, 35, 36, 37 e 38.
- LIMA, F. C. N. O. et al. A comparison of dgt and power mask for edfa modeling in gnpy. In: **2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.: IEEE, 2023. p. 79–81. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 52.
- LU, P. et al. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. **Applied Physics Reviews**, v. 6, p. 041302, 09 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 55.
- MASHINSKY, V. et al. Bismuth-doped optical fibres - spectroscopic study and interpretation of spectra. In: **2006 European Conference on Optical Communications**. Cannes, France: IEEE, 2006. p. 1–2. Citado na página 19.

MOURA, C. U. et al. Caracterizador automatizado de mascara de potencia de amplificadores opticos para redes wdm reconfiguraveis. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, v. 43, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 8, 24 e 25.

MOURA, U. et al. Cognitive methodology for optical amplifier gain adjustment in dynamic dwdm networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 34, n. 8, p. 1971–1979, 2016. Citado na página 32.

MOURA, U. C. de et al. Multi-band programmable gain raman amplifier for high-capacity optical networks. p. 1–2, 2021. Citado na página 54.

MURO, R. D. The er3+ -fiber gain coefficient derived from a dynamic gain tilt technique. **J. Lightwave Technol.**, Optica Publishing Group, v. 18, n. 3, p. 343, Mar 2000. Disponível em: <<https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-18-3-343>>. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 52.

NAMIKI, S.; EMORI, Y. Recent advances in ultra-wideband raman amplifiers. In: **Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition. Trends in Optics and Photonics Vol.37 (IEEE Cat. No. 00CH37079)**. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2000. v. 4, p. 98–99 vol.4. Citado na página 19.

OLIVEIRA, J. et al. Demonstration of edfa cognitive gain control via gmpls for mixed modulation formats in heterogeneous optical networks. In: **2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)**. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2013. p. 1–3. Citado na página 30.

POGGIOLINI, P. et al. The gn-model of fiber non-linear propagation and its applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 32, n. 4, p. 694–721, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 70, 71 e 74.

PROCOPIO, A. S. C. **MODELAGEM E PROJETOS DE AMPLIFICADORES RAMAN DISTRIBUÍDOS**. 2007. Citado 4 vezes nas páginas 9, 56, 58 e 60.

PUTTNAM, B. J. et al. 402 tb/s gmi data-rate oesclu-band transmission. In: **2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)**. San Diego, CA, USA: IEEE, 2024. p. 1–3. Citado na página 22.

Reinsel, David and Gantz John and John, Rydning . **Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critica - White Paper**. 2017. Disponível em: <<https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>>. Citado na página 17.

RENAUDIER, J. et al. Devices and fibers for ultrawideband optical communications. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 11, p. 1742–1759, 2022. Citado na página 20.

SAKAMOTO, T. S-band fiber optic amplifiers. In: **OFC 2001. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition (IEEE Cat. 01CH37171)**. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2001. v. 2, p. TuQ1–TuQ1. Citado na página 19.

SEO, Y.-S.; FUJIMOTO, Y.; NAKATSUKA, M. Amplification in a bismuth-doped silica glass at second telecommunication windows. In: **(CLEO). Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005**. Baltimore, Maryland, EUA: Optica Publishing Group, 2005. v. 3, p. 1858–1860 Vol. 3. Citado na página 19.

SHEVCHENKO, N. A.; NALLAPERUMA, S.; SAVORY, S. J. Maximizing the information throughput of ultra-wideband fiber-optic communication systems. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 30, n. 11, p. 19320–19331, May 2022. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-30-11-19320>. Citado 5 vezes nas páginas 21, 27, 79, 82 e 101.

SILVA, A. A. et al. Evaluating the impact of edfa response modeling in the optical network qot estimation. **Optical Fiber Technology**, v. 92, p. 104177, 2025. ISSN 1068-5200. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520025000525>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 52.

SILVA, A. A. B. D. et al. Adapting optical amplifier response estimation to consider non-flat input signals. In: **2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. Santo Domingo, República Dominicana: IEEE, 2021. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

Smith, K.; Zhou, Y. Optical communications. **World Intellectual Property Organization**, n. PCT/EP2017/058555, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 13, 36, 97 e 102.

SRIVASTAVA, A. et al. L-band 64/spl times/10 gb/s dwdm transmission over 500 km dsf with 50 ghz channel spacing. In: **24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No.98TH8398)**. Madrid, Spain: IEEE, 1998. v. 3, p. 71–75 vol.3. Citado na página 18.

STOLEN, R. H.; IPPEN, E. P. Raman gain in glass optical waveguides. **Applied Physics Letters**, v. 22, p. 276–278, 1973. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:121084030>. Citado na página 19.

SUN, Y. et al. Optical fiber amplifiers for wdm optical networks. **Bell Labs Technical Journal**, v. 4, n. 1, p. 187–206, 1999. Citado na página 18.

WU, T. et al. Performance analysis and power tilt mitigation of ultra-wideband wdm transmission systems. **Photonics**, v. 10, n. 5, 2023. ISSN 2304-6732. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/5/530>. Citado 5 vezes nas páginas 18, 21, 27, 79 e 101.

YANG, J. et al. Record 202.3 tb/s transmission over field-deployed fibre using 15.6 thz s+c+l-bands. **50th European Conference on Optical Communication (ECOC)**, arXiv:2407.12485, p. 1–3, 07 2024. Citado 5 vezes nas páginas 22, 28, 79, 101 e 102.

ZHANG, X. et al. 214.7 tbit/s s, c, and l-band transmission over 50km ssmf based on silicon photonic integrated transceivers. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 31, n. 25, p. 41546–41555, Dec 2023. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-31-25-41546>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 78 e 79.

ZHANG, X.; MITCHELL, A. A simple black box model for erbium-doped fiber amplifiers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 1, p. 28–30, 2000. Citado na página 52.