



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Luis Gustavo Maciel Riveros

**Modelagem e Otimização por Inteligência Artificial de
Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio em
Banda Estendida**

Campinas

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Luis Gustavo Maciel Riveros

Modelagem e Otimização por Inteligência Artificial de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio em Banda Estendida

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Conforti
Coorientador: Dr. Tiago Sutili
Coorientador: Dr. Rafael Carvalho Figueiredo

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Luis Gustavo Maciel Riveros, e orientada pelo Prof. Dr. Evandro Conforti.

Campinas
2023

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R524m Riveros, Luis Gustavo Maciel, 1995-
Modelagem e otimização por inteligência artificial de amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio em banda estendida / Luis Gustavo Maciel Riveros. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Evandro Conforti.

Coorientadores: Tiago Sutili e Rafael Carvalho Figueiredo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Amplificador a fibra dopada com érbio. 2. Tecnologia de fibra óptica. 3. Sistemas de comunicação em banda larga. 4. Redes neurais artificiais. 5. Otimização multiobjetivo. I. Conforti, Evandro, 1947-. II. Sutili, Tiago, 1988-. III. Figueiredo, Rafael Carvalho, 1982-. IV. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. V. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Artificial intelligence modeling and optimization of wideband erbium-doped fiber optical amplifiers

Palavras-chave em inglês:

Erbium-doped fiber amplifier

Fiber optic technology

Broadband communication systems

Artificial neural networks

Multiobjective optimization

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Evandro Conforti [Orientador]

Joaquim Ferreira Martins Filho

Darli Augusto de Arruda Mello

Data de defesa: 28-04-2023

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8118-0944>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6964246878366102>

Comissão Julgadora - Dissertação de Mestrado

Candidato: Luis Gustavo Maciel Riveros (RA: 232839)

Data da Defesa: 28 de Abril de 2023

Título da Tese: “Modelagem e Otimização por Inteligência Artificial de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio em Banda Estendida”

Prof. Dr. Evandro Conforti (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho (Membro Externo, UFPE)

Prof. Dr. Darli Augusto de Arruda Mello (Membro Interno, FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Dedico esta dissertação à minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades em minha vida. Agradeço à minha família, em especial Graciete Pereira Maciel e Luis Edgardo Riveros Aguilar, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando diante das adversidades e junto com eles os meus sonhos foram se realizando, sou muito feliz por serem meus pais e grato por todo o amor, carinho e cuidado que me deram em todos esses anos. Agradeço ao meu irmão Luis Eduardo, por toda a convivência e brincadeiras realizadas, apesar das pequenas intrigas entre irmãos na infância, os ótimos momentos vividos se sobressaem e sempre serão recordados. Agradeço às minhas irmãs Milena, Luhely e Cláudia, por toda a ajuda e confiança que depositaram em mim, pelas suas forças e conselhos que me guiaram nessa trajetória e por sempre acreditarem em mim, pelas viagens incríveis e lugares inesquecíveis que conhecemos, agradeço por tê-las como irmãs. Agradeço aos meus cunhados Valterlei, Cruyff e Marcelo, pela motivação e inspiração que obtive em suas presenças, tanto a minha formação profissional quanto a pessoal derivam de seus esforços e comprometimento, sendo exemplos para o meu crescimento. Agradeço aos tios, primos e sobrinhos que estiveram presentes e todos sabem da importância que tiveram na minha jornada.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Evandro Conforti por todo o conhecimento, orientação, instruções e dedicação que me deu ao longo desse período de trabalhos e realizações. Aos meus coorientadores Dr. Tiago Sutili e Dr. Rafael C. Figueiredo pelo apoio, aprendizado e auxílio durante este projeto de pesquisa. Ao meu colega de laboratório Dr. Felipe L. D. Lúcia pelas orientações e ensinamentos em laboratório de sala limpa. Aos meus colegas de profissão Dr. Fábio D. Simões e Carine Mineto pelas discussões enriquecidas e contribuições em trabalhos de laboratório. Aos meus colegas de turma, pela ajuda nos estudos e trabalho em conjunto. Aos meus colegas de trabalho da plataforma de comunicações ópticas, pela receptividade, lições, suporte e diversão que proporcionaram na minha carreira e me mostraram um novo mundo exuberante.

Agradeço à UNICAMP e ao CPQD pelo apoio financeiro, acadêmico e estrutural para a realização das pesquisas desenvolvidas no presente trabalho.

*“Se eu vi mais longe,
foi por estar sobre ombros de gigantes.”*
(Isaac Newton)

Resumo

A aplicação de inteligência artificial e métodos de otimização em sistemas ópticos de alta capacidade têm aberto novas possibilidades flexíveis visando aperfeiçoar a capacidade sistêmica, assim como introduzir novas modelagens em sistemas ópticos futuros. Nesse aspecto, os estágios de amplificação exercem impactos significativos no desenvolvimento de enlaces de transmissão óptica, principalmente o amplificador a fibra com érbio, que apresenta novas perspectivas de projeto e otimização de modelos do amplificador para sistemas em banda estendida. A proposta desenvolvida consiste na integração entre a modelagem do amplificador a fibra dopada, por meio de redes neurais, e a otimização multiobjetivo aplicada aos estágios de amplificação. Diante dessa abordagem, o trabalho destaca-se pela simplificação da complexidade de modelos de estágios de amplificação para sistemas ópticos em banda estendida, reduzindo tempo de processamento para resolução de equações de propagação não linear com parâmetros complexos, obtendo um projeto universalizado para modelos simulados ou experimentais. A partir da definição e construção de conjuntos de dados de modelos de amplificadores a fibra dopada (analítico ou experimental), os dados são designados para a geração de modelos treinados por redes neurais profundas que caracterizam e predizem métricas do amplificador, integrando os modelos em laços de otimização com algoritmo bioinspirado multiobjetivo, partindo de uma investigação do ponto de vista do elemento de amplificação para operação dinâmica com diferentes níveis de potência de sinal em sistemas de banda C e banda L e ampliando para a otimização sistêmica de transmissões ópticas de longo alcance em banda estendida. As soluções apresentadas demonstram uma ampla faixa linear de parâmetros otimizados do amplificador a fibra dopada para operação de rede óptica dinâmica com elevado ganho e figura de ruído reduzida, bem como pontos de operação ótimos dos estágios de amplificação em enlaces de longa distância que maximizam a eficiência do sistema, reduzindo os impactos de efeitos deletérios. Portanto, obtém-se estágios de amplificadores ópticos flexíveis e escalonáveis de acordo com a dimensão dos enlaces de transmissão, proporcionando alternativas para os próximos sistemas de alta capacidade.

Palavras-chave: Amplificador a Fibra Dopada com Érbio, Sistemas Ópticos, Banda Estendida, Redes Neurais Artificiais e Otimização Multiobjetivo.

Abstract

The application of machine learning and optimization techniques to create solutions for high-capacity optical systems evidences new areas for improving system performance and creating models for upcoming optical systems. In this context, an important part of these models is the gain stage, which contributes to transmission link performance. Particularly, erbium-doped fiber amplifiers offer great flexibility in amplifier design and model optimization for wideband systems. This work aims to integrate amplifier modeling using neural networks and multi-objective optimization applied to the amplification stages. For the next system generation, it is expected that doped fiber amplifiers operate in more than one optical band, increasing the number of control metrics and complexity. Given this approach, the research stands out by reducing the complexity of amplification stages models for wideband optical systems, decreasing processing time, computational effort and by solving non-linear equations using complex parameters to obtain a generalized design for performed models with experimental or simulated data. From the definition of selected parameters and the construction (either analytical or experimental) of datasets of doped fiber amplifier models, the datasets are sent to generate a trained model through a deep neural network that characterizes and predicts amplifier metrics. The models are then integrated into the optimization process with a multi-objective bio-inspired algorithm, starting from studying gain factors in an investigation of the amplification element for link dynamic operation. This includes different signal power levels for C- and L- bands, as well as the systematic optimization of long haul optical links in wideband processing. The presented solutions show a wide linear range of optimized parameters for doped fiber amplifiers to operate in dynamic optical networks with high gain and low noise figure, as well as obtaining optimal operation points from amplification stages in long haul links that maximize the system's performance, decreasing the impacts of deleterious effects. Thus, scalable and flexible optical amplifier stages are obtained according to the dimensions of the transmission link and characteristics of system configuration, creating new alternatives for the next generation of high-capacity optical systems.

Keywords: Erbium-Doped Fiber Amplifier, Optical Systems, Wideband, Artificial Neural Networks, Multi-Objective Optimization.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Atenuação das fibras ópticas de transmissão nas bandas ópticas pertencentes ao espectro infravermelho. Adaptado de [1].	25
Figura 2 – Transições dos estados energéticos do érbio de três níveis [2].	32
Figura 3 – Coeficientes de absorção e emissão de uma fibra dopada com érbio.	34
Figura 4 – Níveis de energia dos estados do érbio nos bombeios em 980 nm e 1480 nm.	36
Figura 5 – Esquemático de simulação dos elementos ópticos de transmissão e amplificação.	53
Figura 6 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de ganho do EDFA na banda C.	56
Figura 7 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de figura de ruído do EDFA na banda C.	57
Figura 8 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de ganho do EDFA na banda L.	59
Figura 9 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de figura de ruído do EDFA na banda L.	60
Figura 10 – Modelo de otimização bioinspirado do ciclo hídrico dinâmico da água.	62
Figura 11 – Resposta do amplificador com o filtro equalizador em função do perfil de ganho de saída.	69
Figura 12 – Atenuação do filtro equalizador aplicado a saída do EDFA.	70
Figura 13 – Potência óptica de saída do laser de bombeio em função da corrente aplicada.	72
Figura 14 – Esquema de montagem de um amplificador a fibra dopada.	73
Figura 15 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando -30 dBm de potência total de entrada.	75
Figura 16 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando -15 dBm de potência total de entrada.	76

Figura 17 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando 0 dBm de potência total de entrada.	77
Figura 18 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de ganho.	81
Figura 19 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de figura de ruído.	85
Figura 20 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de ganho e figura de ruído concatenados.	87
Figura 21 – Região de soluções do ganho em função do <i>ripple</i> para as fibras dopadas com érbio do tipo HP, MP e LP. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas das fibras dopadas tem mínimo: {5,7 m, 6,0 m, 5,5 m} e máximo: {32,8 m, 27,3 m, 35,0 m}, respectivamente.	88
Figura 22 – Soluções da investigação do perfil de ganho do EDFA em banda C com potência de entrada variável. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas dos níveis de potência de entrada com -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm e 0 dBm tem mínimo: {6,5 m, 6,0 m, 5,9 m, 5,0 m} e máximo: {30,0 m, 27,3 m, 23,0 m, 17,0 m}, respectivamente.	91
Figura 23 – Ampliação da fronteira de soluções para investigação do perfil de ganho do EDFA em banda C com potência de entrada variável.	92
Figura 24 – Soluções da investigação do perfil de ganho do EDFA em banda L com potência de entrada variável. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas dos níveis de potência de entrada com -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm e 0 dBm tem mínimo: {61,0 m, 64,3 m, 81,9 m, 81,9 m} e máximo: {102,3 m, 110,0 m, 110,0 m, 110,0 m}, respectivamente.	94
Figura 25 – Ampliação da fronteira de soluções para investigação do perfil de ganho do EDFA em banda L com potência de entrada variável.	95
Figura 26 – Soluções obtidas da investigação da figura de ruído do EDFA em banda C com potência de entrada 0 dBm. A variação do comprimento de EDF obtido na curva tem mínimo de 5,0 m e máximo de 17,0 m.	97

Figura 27 – Fronteira de soluções em três dimensões para investigação da figura de ruído do EDFA em banda C com potência de entrada 0 dBm.	98
Figura 28 – Soluções obtidas para investigação da figura de ruído do EDFA em banda L com potência de entrada 0 dBm. A variação do comprimento de EDF obtido na curva tem mínimo de 81,9 m e máximo de 110,0 m.	99
Figura 29 – Fronteira de soluções em três dimensões para investigação da figura de ruído do EDFA em banda L com potência de entrada 0 dBm.	100
Figura 30 – Enlace de transmissão para banda C e L.	102
Figura 31 – Enlace de transmissão em banda estendida.	105
Figura 32 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda C da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.	108
Figura 33 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda C da SNR generalizada em função do contraste do filtro de amplificação.	110
Figura 34 – Comparação da SNR generalizada em banda C.	112
Figura 35 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda L da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.	113
Figura 36 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda L da SNR generalizada em função do contraste do filtro de amplificação.	114
Figura 37 – Comparação da SNR generalizada em banda L.	116
Figura 38 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda estendida da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.	117
Figura 39 – Sinais transmitidos em banda estendida ao longo do enlace de 1000 km.	119
Figura 40 – Curvas otimizadas do enlace de transmissão com grades de 37,5, 50 e 100 GHz.	119

Lista de tabelas

Tabela 1 – Elementos do simulador óptico para a implementação do meio de amplificação.	52
Tabela 2 – Valores do erro quadrático médio para os modelos de estimação do ganho e figura de ruído na banda C.	56
Tabela 3 – Valores do erro quadrático médio para os modelos de predição do ganho e figura de ruído na banda L.	58
Tabela 4 – Parâmetros definidos para a montagem de amplificador a fibra dopada com érbio.	73
Tabela 5 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando -30 dBm de potência total de entrada.	74
Tabela 6 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando -15 dBm de potência total de entrada.	76
Tabela 7 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando 0 dBm de potência total de entrada.	77
Tabela 8 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para banda C e no algoritmo de otimização.	82
Tabela 9 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para banda L e no algoritmo de otimização.	83
Tabela 10 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para o cálculo de figura de ruído dos amplificadores de banda C e banda L.	84
Tabela 11 – Resultados dos tipos de fibras dopadas para amplificação considerando os pontos de mínimo (“Min”) e máximo (“Máx”) ganho e uma configuração intermediária (“Inter”) adequada para a amplificação de enlaces com longo alcance.	89

Tabela 12 – Resultados dos parâmetros otimizados das fibras dopadas para amplificação considerando os pontos de mínimo (“ <i>Min</i> ”) e máximo (“ <i>Máx</i> ”) ganho e uma configuração intermediária (“ <i>Inter</i> ”) adequada para a amplificação de enlaces com longo alcance.	90
Tabela 13 – Resultados dos parâmetros otimizados para sinais de entradas distintos para amplificação considerando diversos pontos da faixa de ganho do amplificador para banda C.	93
Tabela 14 – Resultados dos parâmetros otimizados para sinais de entradas distintos para amplificação considerando diversos pontos da faixa de ganho do amplificador para banda L.	96
Tabela 15 – Resultados dos parâmetros otimizados para 0 dBm de potência total de entrada considerando diversos pontos da faixa de figura de ruído do amplificador para banda C.	96
Tabela 16 – Resultados dos parâmetros otimizados para 0 dBm de potência total de entrada considerando diversos pontos da faixa de figura de ruído do amplificador para banda L.	99
Tabela 17 – Parâmetros do sistema de transmissão para as bandas C e L.	103
Tabela 18 – Parâmetros do sistema de transmissão para a banda estendida.	106
Tabela 19 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda C da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal.	109
Tabela 20 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda C da curva de SNR generalizada em função do contraste do filtro do amplificador.	111
Tabela 21 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda L da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal.	112
Tabela 22 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda L da curva de SNR generalizada em função do contraste do filtro do amplificador.	115

Tabela 23 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda estendida da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal. 118

Lista de acrônimos, símbolos e unidades

Acrônimos

AI	<i>Artificial Intelligence</i> – Inteligência Artificial
ANN	<i>Artificial Neural Network</i> – Rede Neural Artificial
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> – Emissão Espontânea Amplificada
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> – Ruído Aditivo Gaussiano Branco
BER	<i>Bit Error Rate</i> – Taxa de Erro de Bit
CS	<i>Constellation Shaping</i> – Formatação de Constelação
CW	<i>Continuous Wave</i> – Onda Contínua
DP-QPSK	<i>Dual Polarization Quadrature Shift Keying</i> – Dupla Polarização de Fase e Quadratura
DRA	<i>Distributed Raman Amplification</i> – Amplificação Raman Distribuída
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> – Processamento Digital de Sinais
EDF	<i>Erbium-doped Fiber</i> - Fibra Dopada com Érbio
EDFA	<i>Erbium-doped Fiber Amplifier</i> - Amplificador a Fibra Dopada com Érbio
EON	<i>Elastic Optical Network</i> – Rede Óptica Elástica
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> – Grade de Fibra de Bragg
FEC	<i>Forward Error Correction</i> – Código Corretor de Erro
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i> – Mistura de Quatro Ondas
GA	<i>Genetic Algorithm</i> – Algoritmo Genético
GFF	<i>Gain Flattening Filter</i> – Filtro Planificador de Ganho
GN	<i>Gaussian Noise</i> – Ruído Gaussiano

GWO	<i>Grey Wolf Optimization</i> – Otimização do Lobo Cinzento
HA	<i>Hybrid Amplifier</i> – Amplificador Híbrido
IGN	<i>Incoherent Gaussian-noise model</i> – Modelo do Ruído Gaussiano Incoerente
LED	<i>Light Emitting Diode</i> - Diodo Emissor de Luz
LPG	<i>Long Period Grating</i> – Grade de Longo Período
ML	<i>Machine Learning</i> – Aprendizado de Máquina
MOP	<i>Multi-Objective Problem</i> – Problema de Multiobjetivo
MOWCA	<i>Multi-Objective Water Cycle Algorithm</i> – Algoritmo do Ciclo da Água Multi-objetivo
MSE	<i>Mean Squared Error</i> – Erro Quadrático Médio
NF	<i>Noise Figure</i> – Figura de Ruído
NLC	<i>Nonlinear Compensation</i> – Compensação não linear
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i> – Algoritmo Genético de Classificação Não Dominado II
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i> – Analisador de Espectro óptico
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise</i> – Relação Sinal-Ruído Óptica
PF	<i>Pareto Front</i> – Fronteira de Pareto
ReLU	<i>Rectified Linear Unit</i> – Unidade Linear Retificada
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> – Erro Quadrático Médio da Raiz
SDM	<i>Spatial Division Multiplexing</i> – Multiplexação por Divisão Espacial
SMF	<i>Single Mode Fiber</i> – Fibra Monomodo
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> – Relação Sinal-Ruído
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> – Auto Modulação de Fase

TIP	<i>Telecom Infra Project</i> – Telecom Infra Project
WDM	<i>Wavelength-division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda
WSS	<i>Wavelength Selector Switch</i> – Chave Seletora de Comprimento de Onda
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i> – Modulação de Fase Cruzada

Unidades

dB	Decibel
dB/km	Decibel por quilômetro
dBm	Potência em relação a um miliwatt expresso em decibéis
Gb/s	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
km	Quilômetro
m	Metro
mA	Miliampere
mW	Miliwatt
nm	Nanômetro
THz	Terahertz

Outros Símbolos

Er^{3+}	<i>Erbium</i> - Érbio
Ho^{3+}	<i>Holmium</i> - Hólmio
Nd^{3+}	<i>Neodymium</i> - Neodímio
Tm^{3+}	<i>Thulium</i> - Túlio
Yb^{3+}	<i>Ytterbium</i> - Itérbio

Sumário

Resumo	8
Abstract	9
Lista de ilustrações	10
Lista de tabelas	13
Lista de acrônimos, símbolos e unidades	16
1 Introdução	21
1.1 Justificativa	26
1.2 Objetivos	28
1.3 Contribuições	29
1.4 Estrutura	29
2 Fundamentação teórica	31
2.1 Modelagem do amplificador a fibra dopada com érbio	33
2.1.1 Propagação e equações de taxa	37
2.1.2 Análise de ganho e emissão espontânea	40
3 Revisão bibliográfica	42
4 Ambiente de amplificação e integração dos elementos de simulação óptica	50
4.1 Ambiente de simulação da camada física óptica	50
4.1.1 Modelo óptico considerado nas simulações	51
4.2 Modelagem do amplificador a fibra dopada com érbio por rede neural artificial	54
4.3 Algoritmo de otimização bioinspirado multiobjetivo	59
4.4 Implementação da plataforma GNPY	62
4.5 Integração do GNPY com o ambiente de simulação	67
4.5.1 Implementação do filtro planificador de ganho	68
5 Otimização isolada de amplificadores a fibra dopada com érbio nas bandas C e L	71
5.1 Montagem e caracterização de um amplificador a fibra dopada com érbio .	71
5.2 Validação experimental dos modelos de amplificação	73
5.3 Otimização do amplificador a fibra dopada	78
5.3.1 Otimização do perfil de ganho do EDFA nas bandas C e L	78

5.3.2	Otimização da figura de ruído do EDFA nas bandas C e L	82
5.3.3	Otimização conjunta dos perfis de ganho e figura de ruído	86
5.4	Análise da otimização do perfil de ganho para os EDFAs em banda C e L .	86
5.4.1	Análise de desempenho dos tipos de fibras dopadas	86
5.4.2	Análise da variação da potência total de entrada	90
5.4.2.1	Ganho em banda C	90
5.4.2.2	Ganho em banda L	92
5.5	Análise da otimização da figura de ruído dos EDFAs na banda C e L . . .	95
5.5.1	Figura de ruído em banda C	95
5.5.2	Figura de ruído em banda L	97
6	Otimização sistêmica de amplificadores a fibra dopada com érbio	101
6.1	Otimização sistêmica de enlaces em banda C e L	101
6.2	Otimização sistêmica de enlaces em banda estendida	104
6.3	Análise da otimização do enlace de transmissão óptica em banda estendida	107
6.3.1	Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda C	107
6.3.2	Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda L	110
6.3.3	Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda estendida	114
7	Conclusão	120
7.1	Trabalhos futuros	123
7.2	Publicações	124
7.2.1	Prêmio	125
	Referências	126

1 Introdução

O avanço das tecnologias como serviços de mídia digital sob demanda, processamento e armazenamento de dados na nuvem, inteligência artificial e, atualmente, redes móveis de quinta geração (5G), assim como a próxima sexta geração (6G) moldaram a qualidade de vida e o acesso dos usuários a essas tecnologias. No entanto, tais tecnologias têm impulsionado um elevado crescimento no volume de dados trafegados pela infraestrutura de telecomunicações em proporção global [3], exigindo contínuos investimentos na melhoria da infraestrutura já estabelecida e no desenvolvimento tecnológico de novas abordagens visando suprir tais demandas. Dentro de tal cenário tecnológico, as redes ópticas se estabeleceram como a tecnologia dominante em transmitir grandes volumes de dados, atualmente excedendo a marca de petabits por segundo de capacidade agregada por cada fibra óptica [4], em conexões de longo alcance. Portanto, grandes investimentos têm sido demandados para a constante evolução das tecnologias elementares que suportam a transmissão por fibras ópticas, permitindo a evolução de sistemas baseados em modulação de intensidade e detecção direta para sistemas com multiplexação em comprimento de onda com formatos de modulação em amplitude, fase e polarização com recepção coerente e compensação de efeitos deletérios no domínio digital.

A constante evolução dos meios de comunicação em atender à demanda de tráfego de informações fez com que sistemas de comunicações ópticas se destacassem como a melhor infraestrutura e tecnologia promissora. Entre suas vantagens, a transmissão por fibra óptica destaca-se por oferecer maior largura de banda do espectro, baixas perdas de transmissão, imunidade a interferências eletromagnéticas, segurança, dimensão reduzida e materiais leves com fácil manuseio. O passo inicial para o emprego dos sistemas ópticos surgiu por conta do desenvolvimento de lasers a semicondutores e da fabricação de fibras ópticas para transmissão de sinais ópticos confinados em um guia de onda [5]. Novas pesquisas, investigando a pureza do material do guia de onda, produziram fibras ópticas mais eficientes, com atenuação em torno de 20 dB/km entre as décadas de 1960 e 1970 [6], proporcionando os avanços necessários para a desenvolvimento dos primeiros enlaces de transmissão óptica ponto a ponto.

A primeira geração dos sistemas ópticos iniciou-se utilizando o diodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) e lasers multimodo com operação em 800 nm em fibras multimodo. Adiante, o desenvolvimento de fibras ópticas monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*) solucionou problemas de dispersão modal em fibras multimodo e alcançou níveis de atenuação por volta de 0,2 dB/km em 1550 nm, possibilitando novos avanços para os enlaces de transmissão [7]. Ao mesmo tempo, com o desenvolvimento dos novos lasers a semicondutores, uma nova janela do espectro em 1300 nm se tornou disponível para operação com perda de 1 dB/km e mínima dispersão cromática. Por conseguinte, uma vez que a menor atenuação da fibra óptica estava em 1550 nm e é desenvolvida a fibra de dispersão deslocada com menores valores de dispersão para essa região espectral, a janela óptica de operação foi movida para 1550 nm, atingindo o melhor desempenho em termos da atenuação e dispersão das fibras óptica de transmissão. A partir desse ponto, as fibras ópticas não eram mais um fator limitante dos sistemas de transmissão, elevando o desempenho para maiores alcances sem repetição. Todavia, nesse caso, a limitação do sistema é direcionada para a eletrônica, uma vez que, os componentes eletrônicos de processamento de sinais não suportavam modular e detectar sinais com maior largura de banda de transmissão, os quais demandavam também maiores taxas de amostragem. Então, surge a necessidade em dividir o espectro em pequenas “fatias”, para compartilhar a mesma fibra óptica de único enlace.

A solução apresentada consiste em uma tecnologia já desenvolvida e demonstrada em comunicações ópticas que se baseia no uso dividido do espectro, conhecido como multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM – *Wavelength-division Multiplexing*), onde sinais ópticos em faixas distintas de frequência são acoplados através de um multiplexador e transmitidos na mesma fibra óptica [8]. Na recepção, tais sinais são separados por meio de um demultiplexador de acordo com os respectivos comprimentos de onda. Esse método promoveu um salto tecnológico para a capacidade dos sistemas por fibra óptica, aumentando as taxas de transmissão do sistema em uma única fibra com a mesma infraestrutura eletrônica paralelizada para a geração e recepção de cada canal transmitido. Entretanto, no primeiro momento a implementação da WDM não se tornou viável economicamente com a tecnologia existente, dado que, os trechos dos enlaces de transmissão de longo alcance eram conectados por repetidores eletrônicos e possuíam um alto custo de implementação e manutenção [9].

Para aumentar o alcance total dos enlaces, era preciso uma recuperação do sinal em trechos ao longo do enlace óptico, de modo que, os sinais seriam totalmente degradados ao longo da transmissão sem nenhum condicionamento em caso de que houvesse somente a fibra óptica no enlace. Para resolver esse caso, a eletrônica era altamente exigida em sistemas de transmissão óptica, solucionando parcialmente alguns problemas sistêmicos e demandando restrições de operação. Os repetidores eletrônicos atuavam em trechos do enlace óptico, com a função de regenerar os sinais degradados e transmitir novamente, através do domínio eletrônico [9]. Essa operação é feita pela conversão do domínio óptico para o eletrônico, onde a recuperação acontece no domínio eletrônico e no fim é convertido novamente para o sinal óptico, tal que cada comprimento de onda requer seu próprio conversor. Além disso, o principal problema estava no custo elevado do conversor, onde o custo da estação de regeneradores se torna proporcional ao número de canais transmitidos. Portanto, devido ao alto custo aliado à falta de escalabilidade do sistema óptico, tornou inviável comercialmente o potencial uso de WDM em sistemas de transmissão óptica.

Na metade da década de 1980, a solução viabilizadora para esses problemas sistêmicos estava prestes a surgir. Devido aos estudos das fibras dopadas com elementos das terras raras e lasers a fibra, deu-se origem ao amplificador óptico a fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium-doped Fiber Amplifier*). A principal característica apresentada pelo EDFA é a capacidade de amplificar todos os sinais ópticos no domínio óptico, sem realizar a conversão eletro-óptica e manter a escalabilidade de acordo com o número de canais. A investigação é proveniente da Universidade de *Southampton*, no Reino Unido, que demonstrou o experimento do primeiro EDFA aplicado a banda de transmissão dos sistemas ópticos [10]. A tecnologia do amplificador a fibra dopada proporcionou um marco nos sistemas ópticos de comunicação, tornando-se uma nova alternativa além dos amplificadores a semicondutores, que não são viáveis com o WDM devido ao elevado ruído e à intermodulação entre canais; e do amplificador Raman [11], que realiza o processo de amplificação por meio do espalhamento não linear Raman. Dessa forma, o EDFA se adaptou satisfatoriamente com os requisitos demandados e transformou os sistemas de comunicação por fibra óptica no pilar para o crescimento da tecnologia de informação e comunicação.

Nesse contexto, os sistemas com WDM foram beneficiados com a introdução dos EDFAs, que proporcionaram novos avanços com o aumento da capacidade de trans-

missão em alcances de milhares de quilômetros [12]. A solução encontrada, além de prover novos ganhos científicos, destacou-se pelo baixo custo de implementação, tornando-se uma tecnologia com o mínimo custo incremental, independente do número de canais transmitidos. Portanto, os sistemas comerciais começaram a se expandir por todo o globo, com enlaces terrestres de longa distância e transoceânicos, suportando maiores taxas de transmissão agregada [12].

No início do século XXI, devido ao crescimento exponencial da demanda de serviços e usuários em relação ao crescimento da infraestrutura óptica, novos métodos disruptivos precisavam ser desenvolvidos. O acesso à Internet, a terceira geração de telefonia móvel, os serviços de nuvem e o aumento de usuários conectados superaram as expectativas previstas em apenas uma década. A rápida necessidade em encontrar novas tecnologias e aprimorar as já existentes foi possível devido ao amadurecimento da tecnologia de redes por fibras ópticas, onde a fibra óptica possuía banda de transmissão disponível e ainda não explorada comercialmente. O uso de novas bandas de transmissão possibilita alcançar um novo patamar em termos de taxa de transmissão agregada com centenas de canais transmitidos, denominando os sistemas ópticos de alta capacidade em banda estendida [13].

A implementação do incremento de banda espectral para transmissão é usualmente conhecida como banda óptica estendida, que transmite canais em mais de uma banda de operação. As bandas ópticas são categorizadas em larguras fixas, onde as principais para transmissão estão dentro do espectro infravermelho. Entre as principais estão: a banda curta (banda S), a banda convencional (banda C) e a banda longa (banda L), que possuem propriedades de menor atenuação e dispersão na fibra óptica conforme é demonstrado na Figura 1. Os sistemas ópticos tradicionais transmitiam somente na banda C, dado que, os estágios de amplificação implementados por EDFAs operam especialmente nessa banda. Entretanto, para requerer o uso de banda estendida, os estágios de amplificação necessitam de novas adaptações e inovações, sendo destacado o amplificador Raman de alta ordem [14, 15], o EDFA para a banda C+L [13, 16] e modelos de amplificação híbrida EDFA/Raman [17, 18].

As novas soluções permitem aos estágios de amplificação suportarem o aumento de canais com maiores taxa de dados, possibilitando mais uma evolução dos enlaces

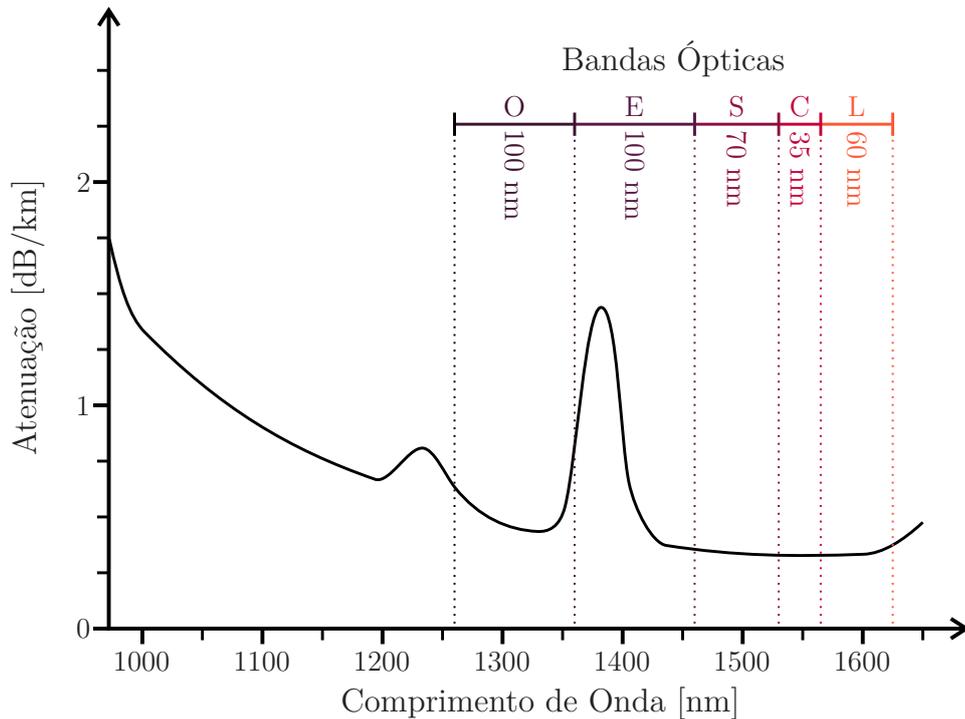


Figura 1 – Atenuação das fibras ópticas de transmissão nas bandas ópticas pertencentes ao espectro infravermelho. Adaptado de [1].

ópticos e transferindo os requisitos limitantes do sistema óptico com uma fibra monomodo para o processamento de sinais. Dessa forma, o processamento digital de sinais se torna totalmente necessário para os transmissores e receptores que já eram requisitados em sistemas utilizando somente banda C, incluindo os algoritmos compensadores de efeitos deletérios, códigos de correção de erros, filtragem de sinais e adaptações nos formatos de modulação, considerando um sistema óptico digital coerente de alta capacidade.

A geração atual dos sistemas ópticos continua obtendo avanços significativos, sistemas digitais em banda estendida com mais de 10 THz , transmissão de 800 Gb/s por canal em transceptores comerciais e alcances que conectam todos os continentes [19]. Portanto, em sistemas atuais é possível observar experimentos com produto da taxa agregada e distância de 881 Pb/s · km em fibra monomodo e banda estendida [20]. Novas investigações exploram a fibra óptica com múltiplos núcleos ou múltiplos modos de propagação, e com auxílio da fotônica integrada, novos dispositivos desenvolvidos apresentam menores dimensões e melhor eficiência em apenas um chip, de modo que, a tecnologia por fibra óptica poderá alcançar Eb/s · km em taxas de informação [21].

1.1 Justificativa

Nesse contexto, um dos principais subsistemas para transmissão de grande volume de dados por enlaces de grande alcance são os estágios de amplificação óptica, os quais permitem prover ganho ao conjunto de canais transmitido de modo transparente em relação à taxa de símbolos e ao formato de modulação empregados. O surgimento do amplificador óptico a fibra dopada com érbio na década de 1980 foi a tecnologia viabilizadora para o estabelecimento de redes ópticas multiplexadas em comprimento de onda, as quais permitiram um salto exponencial na capacidade de sistemas ópticos comerciais no final do século passado.

O EDFA é formado por um trecho de fibra dopada com érbio (EDF – *Erbium-doped Fiber*) e um sinal óptico de bombeio acoplado na fibra dopada junto com os sinais transmitidos. O processo de amplificação óptica é baseado na emissão estimulada (assim como os lasers), que acontece através da incidência do bombeio no érbio (Er^{3+}), em um comprimento de onda com elevado fator de absorção do Er^{3+} (usualmente em 980 nm ou 1480 nm) [10]. A escolha dos íons de Er^{3+} como dopante é devido à diferença entre dois de seus níveis energéticos, o qual permite os sinais de bombeio da fibra em 980 nm e 1480 nm amplificar os canais transmitidos na região espectral que envolve especialmente a banda C [10].

O princípio da amplificação é baseado na inversão de população dos elétrons, que depende do comprimento de onda do bombeio e apresenta níveis energéticos distintos de acordo com o elemento das terras raras. Para o bombeio em 980 nm, os íons saltam do estado de menor energia para o estado com nível energético mais elevado e decaem por emissão espontânea para o estado energético intermediário sem emitir fótons, que a partir daí realizam a emissão estimulada. Com bombeio em 1480 nm, os íons saltam diretamente para o estado intermediário e através da emissão estimulada o decaimento dos íons para o estado fundamental origina novos fótons na região espectral em torno de 1530 nm [22].

Inicialmente, o projeto de EDFA demonstrou desempenho satisfatório em amplificar sinais transmitidos na região espectral da banda C. Posteriormente, notou-se que a partir de arranjos construtivos no projeto do amplificador a fibra dopada era possível amplificar sinais transmitidos na banda L [23]. Devido aos requisitos atendidos do EDFA na banda C, os sistemas ópticos comerciais estavam sendo suportados pelo WDM exclu-

sivamente na banda convencional, sem a necessidade de migrar para uma nova banda de transmissão. Além disso, o custo de EDFA na banda L era mais elevado, tornando a implementação sistêmica mais custosa, e a falta de disponibilidade de lasers que operassem na banda L e componentes ópticos para recepção de canais em outras bandas de operação. Em virtude desses principais fatores, os estágios de amplificação para contemplar a banda L ainda continuou só em desenvolvimento pelas produções científicas, tornando-se necessária décadas mais tarde.

Atualmente, os EDFAs são elementos ópticos de elevada maturidade tecnológica e com desenvolvimento e produção já consolidados, sendo um dos elementos de maior relevância no projeto de sistemas ópticos no atual estado da arte. No entanto, para suprir a crescente demanda por maiores volume de dados trafegados em vias ópticas, a geração atual de tais sistemas deve ser constituída em transmissões de banda estendida [24], mais especificamente ampliando a região espectral de transmissão da banda C convencional (definida em 1530 nm a 1565 nm) adicionada com a banda L (1565 nm a 1610 nm). Os EDFAs podem ser projetados especificamente para prover ganho óptico aos canais transmitidos também na banda L [23], que diferenciam-se principalmente pelo comprimento de fibra dopada maior utilizado e níveis de bombeio de acordo com o comprimento de onda.

Mesmo com uso de uma tecnologia já bem desenvolvida, dada a alta complexidade dos fenômenos físicos intrínsecos ao processo de amplificação e da degradação dos sinais transmitidos pela intensificação dos efeitos deletérios de natureza não linear em sistemas de banda estendida [25], o projeto dos estágios de amplificação da nova geração demanda o uso de inteligência artificial para modelar e otimizar o desempenho dos sistemas ópticos de alta tecnologia. Diante da situação, sistemas que operam com amplificadores de baixo desempenho, conseqüentemente, têm o desempenho sistêmico comprometido devido a baixa amplificação dos sinais ou a maior contribuição com efeitos lineares ou não lineares provendo degradação nos canais. Desse modo, realizando o projeto com o melhor desempenho dos estágios de amplificação, além de garantir a qualidade ótima de operação do enlace, provém melhor desempenho ao sistema, ou seja, dado as variações de configurações do transmissor e receptor, os impactos aplicados ao sistema são reduzidos. A análise sistêmica dos estágios de amplificação requer várias métricas de desempenho e a otimização de uma pluralidade de parâmetros sistêmicos, por sua vez, realizar o processo tradicional por completo sem recursos de otimização se torna inviável, havendo a

necessidade de se estabelecer métodos, criar novas ferramentas e adaptar os elementos disponíveis para os estágios de amplificação.

1.2 Objetivos

Nesse contexto, o trabalho proposto visa explorar o uso de métodos de otimização bioinspirados com múltiplos objetivos para o projeto de subsistemas de amplificação em banda estendida empregando EDFAs especialmente projetados em configuração paralela, para prover ganhos ópticos aos canais transmitidos na banda C e na banda L. Usualmente, dada a alta complexidade de tais sistemas, considera-se somente transmissão de sinais em onda contínua (*CW – Continuous Wave*), utilizando como figura de mérito a relação sinal-sinal-ruído óptica (*OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio*) dos canais recebidos. Tal abordagem não é ideal por mensurar somente o impacto da inserção de ruído espontâneo amplificado (*ASE – Amplified Spontaneous Emission*) nos canais, não avaliando o impacto de efeitos deletérios de natureza não linear. Todavia, o projeto e otimização de um amplificador óptico considerando seus impactos sistêmicos, tanto pela inserção de ruído em regime linear quanto pela geração de efeitos não lineares, demanda a resolução de equações não lineares de propagação do sinal óptico pela fibra, adicionando grande complexidade de processamento.

Nessa proposta, a modelagem e a otimização dos estágios de amplificação em banda estendida propõem demonstrar os recursos necessários de aprendizado de máquina e otimização, as ferramentas operacionais e de código aberto, os parâmetros construtivos necessários de amplificação, as métricas de avaliação consideradas e as sequências de etapas do desenvolvimento para garantir um projeto efetivo. O presente trabalho empregou o ambiente de simulação óptica (desenvolvido e validado pelo CPQD) integrado com a ferramenta de construção e análise de redes e enlaces ópticos GNPY, modelos desenvolvidos por inteligência artificial (*AI – Artificial Intelligence*) e algoritmos de otimização bioinspirados visando maximizar e equalizar em toda banda de transmissão uma ou mais figuras de mérito simultaneamente, visando garantir o melhor desempenho de operação para os estágios de amplificação.

1.3 Contribuições

A proposta desenvolvida destaca-se pelo projeto e otimização sistêmica do amplificador óptico a fibra dopada com érbio para enlaces de alta capacidade e longa distância com otimização bioinspirada e multiobjetivo, que amplia a exploração dos efeitos e impactos de múltiplos parâmetros a serem otimizados, objetivos requeridos e soluções obtidas simultaneamente do ponto de vista dos elementos e do sistema óptico de transmissão.

Além da implementação de algoritmo evolutivo, integra-se ao processo de otimização as redes neurais artificiais (ANN – *Artificial Neural Network*). A partir do treinamento da rede neural com dados investigados do modelo de um amplificador óptico a fibra dopada, obtém-se a estimação e a generalização do modelo do subsistema óptico para a amplificação de sinais de transmissão com diferentes níveis de magnitude, com otimização eficiente para sistemas ópticos em banda estendida.

Em virtude de uma metodologia simplificada, evidencia-se a integração plena entre o aprendizado de máquina e os algoritmos bioinspirados aplicados para se obter soluções em problemas de comunicações ópticas. Dessa forma, o esforço computacional e o tempo de processamento são significativamente reduzidos, apresentando conceitos de implementação simplificados e objetivos, de modo a se atender aos requisitos demandados. Então, a redução da complexidade no projeto de subsistema de comunicação óptica é um dos principais fatores alcançados, tornando-se um sistema flexível, escalonável e robusto. Nesse caso, obtém-se um desenvolvimento com base no aprendizado do ambiente, onde os dados utilizados por natureza de simulação ou analítica, podem ser substituídos por dados experimentais e de forma a se construir modelos mais próximos do sistema real, a partir da mesma técnica implementada.

1.4 Estrutura

A dissertação é apresentada de acordo com os seguintes capítulos: o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, demonstrando as equações que modelam o amplificador e as variáveis envolvidas. O capítulo 3 mostra a revisão do estado da arte, no que diz respeito às principais pesquisas desenvolvidas na área de otimização de estágios de amplificação e uso de sistemas de alta capacidade. No capítulo 4 demonstra-se a me-

todo metodologia desenvolvida, descrevendo-se os ambientes de amplificação e sistemas ópticos implementados, as ferramentas necessárias, o algoritmo utilizado, as métricas abordadas e os procedimentos realizados. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos das investigações adotadas, realizando análise e discussão em torno dos dados gerados. No capítulo 6 apresentam-se as considerações finais a respeito da temática desenvolvida e dos resultados apresentados, avaliando pontos de destaque e trabalhos que ainda possam dar continuidade em novas perspectivas.

2 Fundamentação teórica

Na década de 1960, muitos estudos estavam voltados em torno da recente inovação que expandiria o mundo das comunicações ópticas: o laser. Um dos campos investigados era a fluorescência nos vidros, que apresentava mudanças em suas características operacionais e propriedades espectroscópicas variando a composição química do vidro [26]. Diante disso, as pesquisas demonstraram novas descobertas com a aplicação de íons de elementos químicos de uma mesma série, conhecidos como terras raras da tabela periódica. Entre eles, destacam-se os principais da série: neodímio (Nd^{3+}), itérbio (Yb^{3+}), túlio (Tm^{3+}), hólmio (Ho^{3+}) e o érbio (Er^{3+}) [27]. Considerando as propriedades particulares de cada íon, eles diferenciam-se em relação às características de fluorescência, mudanças na natureza física, o comprimento de onda do bombeio de excitação e a banda óptica de amplificação.

Nesse contexto, o érbio é o elemento a ser explorado e que foi objeto fundamental de estudo ao longo dos anos para desenvolver um dos marcos inovadores dos sistemas de comunicação óptica modernos: o amplificador a fibra dopada com érbio [10]. A principal característica da dopagem do érbio no meio de transmissão óptico (ou seja, como dopante de fibras de sílica) é a resposta do espectro de fluorescência, que resulta em uma emissão estimulada de fótons na faixa de comprimento de onda em torno de 1530 nm. Essa faixa espectral tem notoriedade devido aos parâmetros físicos da fibra óptica, em especial a atenuação das fibras ópticas SMF, que foi possibilitando que os sistemas de transmissão óptica fossem desenvolvidos nessa faixa espectral.

A emissão de fluorescência na faixa de 1530 nm é obtida a partir dos níveis de energia do érbio (Er^{3+}), que depende do comprimento de onda do bombeio de excitação. Um modelo de três níveis considerado em um dos primeiros experimentos para geração de laser em fibra SMF proposto por [2], demonstra o espectro de fluorescência do érbio. Os níveis são definidos em fundamental (1 – sem excitação dos íons de érbio), excitado (3 – estado de íons excitado) e metaestável (2 – estado intermediário que provém a inversão de população), como são apresentados na Figura 2.

No esquema apresentado, λ_b e λ_s correspondem aos comprimentos de onda do

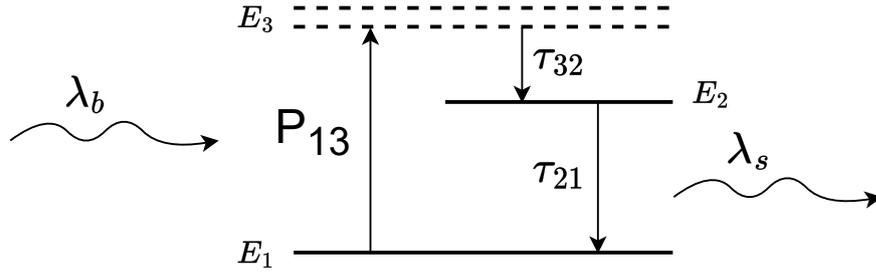


Figura 2 – Transições dos estados energéticos do érbio de três níveis [2].

sinal de excitação dos íons e do sinal de emissão, respectivamente. No qual, o modelo apresentado é definido pelas seguintes equações demonstradas em [2]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -P_{13}N_1 + \frac{N_2}{\tau_{21}} + (N_2 - N_1)W_{21} \quad (2.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - (N_2 - N_1)W_{21} \quad (2.2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = P_{13}N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} \quad (2.3)$$

em que, N_i é a população no nível i , $P_{13}N_1$ é taxa de bombeio do nível 1 para o 3, τ_{ij} é o tempo de vida entre os níveis i e j e $(N_2 - N_1)W_{21}$ é a taxa de emissão estimulada, onde W_{21} é dado em função do coeficiente de emissão estimulada. Considerando um estado sem variação de taxa, tem-se [2]:

$$\frac{N_3}{\tau_{32}} = P_{13}N_1 \quad (2.4)$$

A partir dessa premissa, para o caso de um sistema ideal de três níveis, onde o tempo de vida entre os níveis $\tau_{32} \ll \tau_{21}$, pode-se determinar que $N_3 \ll N_2$, assim obtendo-se [2]:

$$N_2 = \frac{P_{13}N_1}{\frac{1}{\tau_{21}} + W_{21}} \quad (2.5)$$

Dessa forma, se uma fibra de seção transversal A é bombeada por um laser com frequência ν_b , a taxa de íons excitados em qualquer ponto ao longo da fibra é expressa

como [2]:

$$P_{13}N_1 = \frac{I_b\sigma_A}{h\nu_b}N_1 \quad (2.6)$$

em que σ_A é seção de absorção na frequência ν_b , h é a constante de *Planck* e I_b é intensidade do campo óptica de bombeio no local. Na transição do nível metaestável para o fundamental, N_3 é desconsiderado, onde $N_1 = N_T - N_2$ e N_T é o número total de íons no volume incremental, então a inversão $N_2 - N_1$ ocorre da seguinte forma [2]:

$$N_2 - N_1 = \frac{\frac{I_b\sigma_A}{h\nu} - \frac{1}{\tau_{21}} - W_{21}}{\frac{I_b\sigma_A}{h\nu} + \frac{1}{\tau_{21}} + W_{21}}N_T \quad (2.7)$$

De modo simplificado, o modelo de três níveis de energia para os íons de érbio é apresentado para mostrar o deslocamento dos íons que resulta na fluorescência de fótons em 1530 nm, demonstrando aplicação de amplificadores ópticos e lasers em fibra para operar em sistemas de comunicações. Um dos desafios do próximo passo para modelar o EDFA é o uso do laser de bombeio para prover ganho de amplificação, dado que, diferentes comprimentos de onda do laser de bombeio foram demonstrados nos anos iniciais de desenvolvimento de tais dispositivos, especialmente em 514,5 nm [28], 670 nm [29] e 807 nm [30]. Entretanto, apesar de tais tentativas iniciais baseadas em lasers multimodo fabricados com argônio, a solução definitiva para o EDFA seria baseada em lasers a semicondutores, alcançando a plena fluorescência nos comprimentos de onda 980 nm e 1480 nm, permitindo a definição do modelo dos estados energéticos do amplificador dopado com érbio [31].

2.1 Modelagem do amplificador a fibra dopada com érbio

As características que determinaram a caracterização dos amplificadores a fibra dopada com érbio se dão principalmente pelos parâmetros de dopagem da fibra e o comprimento de onda do bombeio para a amplificação. Entre os comprimentos de onda, destacam-se os bombeios em 980 nm e 1480 nm, por possuírem maior coeficiente de absorção dos íons de érbio em seus respectivos comprimentos de onda, resultando em maior ganho de emissão na banda de 1532 nm por potência de bombeio aplicado, conforme é apresentado na Figura 3. Em estudo de caso, demonstrou-se que bombeio em 807 nm possui menor eficiência de emissão, devido à sua menor seção transversal de absorção no

estado fundamental [31], demonstrando a necessidade de altos níveis de bombeios para suprir o ganho de emissão com eficiência significativamente inferior.

A partir de dados de medição de uma fibra comercial dopada com érbio, os coeficientes de absorção e emissão são apresentados nas curvas de espectro do érbio. Na Figura 3, tem-se o espectro do parâmetro de absorção dos fótons de bombeio, com destaque para os pontos vermelhos, sendo os comprimentos de onda 980 nm e 1480 nm, que possuem níveis de absorção em torno de 4,2 dB/m e 2,8 dB/m, respectivamente. Embora, o espectro de absorção possua níveis ainda maiores em torno de 1532 nm, essa região é inviável para uso de bombeio em fibra dopada com érbio devido ao espectro dos sinais de transmissão, onde ambas as regiões estarão presentes na banda C e ocasionará a saturação do amplificador, reduzindo a eficiência do coeficiente de ganho.

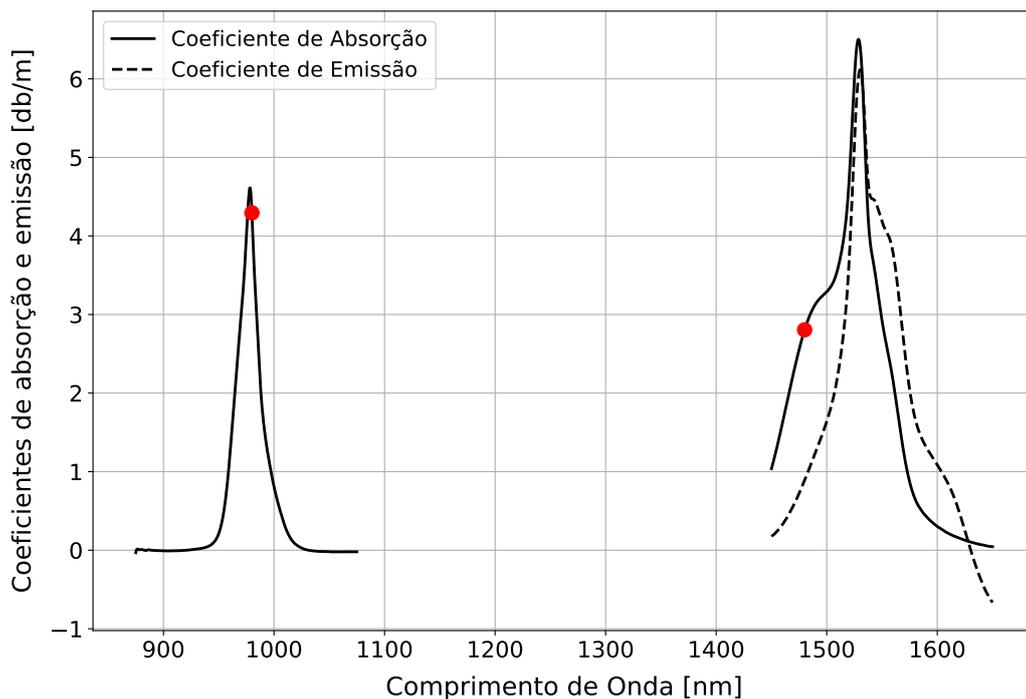


Figura 3 – Coeficientes de absorção e emissão de uma fibra dopada com érbio.

O espectro do coeficiente de emissão da fibra dopada define a região de operação do amplificador, conforme mostrado na Figura 3. Nesse caso, os coeficientes apresentam maiores níveis em 1532 nm com pico em torno de 6 dB/m. O formato da região espectral demonstra a faixa de amplificação, dado os demais níveis de emissão para comprimentos de onda mais longos, sinais em banda L podem ser amplificados com adaptações

aos parâmetros construtivos do amplificador.

Os bombeios em 980 nm e 1480 nm definem o modelo de níveis de energia do amplificador dopado com érbio em estados bem definidos, que simplificam a modelagem matemática do amplificador. A Figura 4 resume o diagrama de níveis de energia para os estados correspondentes do érbio, sendo o estado fundamental ($I_{15/2}$), o estado metaestável $I_{13/2}$ e o estado excitado ($I_{11/2}$). A diferença entre os bombeios para o diagrama de energia está na transição entre os estados, onde a transição entre ($I_{15/2}$) para ($I_{11/2}$) corresponde ao bombeio 980 nm e a transição de ($I_{15/2}$) para ($I_{13/2}$) corresponde ao bombeio 1480 nm. A transição de ($I_{13/2}$) para ($I_{15/2}$) ocorre para a banda do sinal em 1532 nm, resultado da emissão de ambos os bombeios. Além dessas principais transições, ocorre a transição intermediária entre ($I_{11/2}$) para ($I_{13/2}$) para o bombeio de 980 nm, sendo que o decaimento dos íons de érbio é não radioativo, ou seja, sem emissão de fótons, além do tempo de transição ser menor que microssegundos. Portanto, o modelo pode ser simplificado para dois níveis, sendo que para outros comprimentos de onda dos bombeios, níveis mais altos estão presentes e podem ser modelados por fenômenos mais complexos [22].

De acordo com o diagrama dos estados energéticos dos íons de érbio aplicados ao sistema de amplificação do EDFA, o modelo é representado na Figura 4. Nesse caso, o comprimento de onda do sinal de excitação pode ser definido em 980 nm ou 1480 nm, que, com elevado fator de absorção no estado fundamental ($I_{15/2}$), promove a excitação dos íons para os estados ($I_{11/2}$) e ($I_{13/2}$), respectivamente. Dado o nível mais energético do estado ($I_{11/2}$), os íons não retornam diretamente para o estado fundamental por meio do efeito de emissão estimulada, de modo que, por emissão espontânea realizam o decaimento até o estado metaestável ($I_{13/2}$) sem emitir fluorescência em curto período de tempo da ordem de μs . A partir do nível metaestável ($I_{13/2}$), em ambos comprimentos de onda, por meio da emissão estimulada os fótons são emitidos especialmente na região espectral de 1532 nm, gerando fótons com as mesmas características do sinal transmitido, sendo assim, com mesma energia, fase e frequência. Entretanto, em decorrência da emissão estimulada, os fótons gerados a partir do fenômeno de emissão espontânea também são amplificados, ocasionando a amplificação do ruído junto com o sinal emitido, resultando na geração do ruído espontâneo amplificado ou ruído ASE. Esse é um dos principais fenômenos dos amplificadores a fibra dopada, tornando-se objeto de estudo para o equacionamento de grandezas físicas e na modelagem do amplificador.

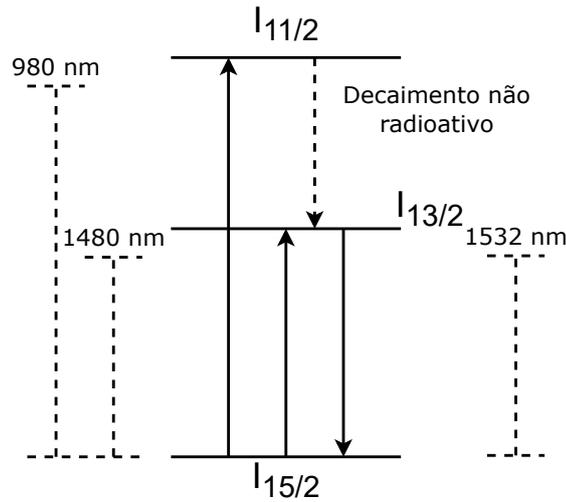


Figura 4 – Níveis de energia dos estados do érbio nos bombeios em 980 nm e 1480 nm.

Os parâmetros das fibras dopadas estão relacionados com os processos de amplificação óptica, geração de emissão espontânea amplificada e lasers à fibra. Esses parâmetros permitem realizar principalmente a simulação dos modelos sistêmicos de EDFAs, tal que, a abordagem utilizada para equacionar esses modelos de amplificação é baseada sobre os parâmetros de Giles [32].

Os amplificadores dopados a fibra com érbio podem ser modelados com base nos parâmetros de atenuação espectral $\alpha(\lambda)$ por unidade de comprimento e pelo espectro de emissão por unidade de comprimento $g^*(\lambda)$, conhecidos como parâmetros Giles. Os parâmetros são dados por [32]:

$$\alpha(\lambda) = \sigma_a(\lambda)\Gamma(\lambda)n_t \quad (2.8)$$

$$g^*(\lambda) = \sigma_e(\lambda)\Gamma(\lambda)n_t \quad (2.9)$$

onde n_t é a concentração de íons de érbio (densidade de dopagem), $\Gamma(\lambda)$ é a integral de sobreposição entre o sinal e os íons de érbio, e as seções transversais radiais médias de absorção e emissão são $\sigma_a(\lambda)$ e $\sigma_e(\lambda)$, respectivamente.

A determinação desses parâmetros pode ser realizada a partir de método clássico químico para encontrar n_t , e considerando feixes ópticos com elevada largura de banda, o espectro é medido considerando $\Gamma(\lambda) = 1$. Dessa forma é possível encontrar $\sigma_a(\lambda)$ e $\sigma_e(\lambda)$ diretamente, para o caso da densidade de dopagem uniforme ao longo do

comprimento do guia de onda. Porém, em casos em que a densidade de dopagem varia ao longo do comprimento da fibra óptica e $\Gamma(\lambda)$ é desconhecido, as seções transversais são obtidas de acordo com a seção transversal de pacote, dado por [32]:

$$\sigma_{a,e}(\lambda) = \frac{\lambda_{a,e}^4 I_{a,e}(\lambda)}{8\pi c n^2 \tau \int I_{a,e}(\lambda) d\lambda} \quad (2.10)$$

em que, $I_{a,e}$ é a intensidade do espectro de emissão e absorção, $\lambda_{a,e}$ é o comprimento de onda de emissão e absorção, τ é o tempo de vida no nível metaestável e n é o índice de refração do meio de transmissão.

2.1.1 Propagação e equações de taxa

Os modelos de dois níveis dos sistemas de amplificação são úteis para amplificadores bombeados nas bandas de absorção de 980 nm e 1480 nm. Nestes modelos, as equações são reduzidas sem considerar efeitos como: absorção de estado excitado (*Excited State Absorption*) do bombeio, expansão não homogênea das bandas de energia e transferência de energia entre íons [32]. Os métodos de solução para os efeitos citados são semelhantes para todos os casos, adicionando algumas variáveis no modelo de amplificação, porém, para os comprimentos de onda abordados, restringe-se os exemplos a seguir ao modelo de dois níveis.

Demonstra-se que o sinal óptico no amplificador propaga-se como um número de feixes de largura de banda Δ_{v_k} centrada no comprimento de onda óptico λ_k obtido por c/v_k . A largura de banda descreve ambos os feixes de banda estreita, como bombeios e fontes de sinal, onde Δ_{v_k} se reduz e tende a zero, e feixes de banda alargada, como a ASE, onde a largura de banda é equivalente às bandas de frequências utilizadas no ambiente de simulação para solucionar o espectro de ASE. Portanto, aproxima-se por meio de um somatório sobre o número de feixes a integração sobre a frequência óptica, integrando a distribuição de intensidade da luz do k -ésimo feixe $I_k(r, \phi, z)$ sobre as coordenadas radiais e azimutais, assim obtendo a potência total do feixe $P_k(z)$ na posição z da fibra óptica [32]:

$$P_k(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty I_k(r, \phi, z) r dr d\phi \quad (2.11)$$

Definindo a intensidade óptica normalizada como [32]:

$$i_k(r, \phi) = \frac{I_k(r, \phi, z)}{P_k(z)} \quad (2.12)$$

onde, assume-se que o formato do k -ésimo modo de $I_k(r, \phi, z)$ é independente de z .

As equações de taxa do modelo de amplificação descrevem os efeitos da absorção, emissão estimulada e emissão espontânea nas populações dos estados metaestável e fundamental. Considerando o sistema de dois níveis com k feixes ópticos tem-se [32]:

$$\frac{dn_2}{dt} = \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{a_k}}{h\nu_k} n_1(r, \phi, z) - \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{e_k}}{h\nu_k} n_2(r, \phi, z) - \frac{n_2(r, \phi, z)}{\tau} \quad (2.13)$$

$$n_t(r, \phi, z) = n_1(r, \phi, z) + n_2(r, \phi, z) \quad (2.14)$$

nesse caso, σ_{a_k} e σ_{e_k} são, respectivamente, as seções transversais de absorção e emissão na banda de integração k , ν_k é a frequência da banda k e τ é o tempo médio de decaimento do nível metaestável. A Equação (2.14) mostra a conservação de partículas para o sistema de dois níveis, onde $n_t(r, \phi, z)$ é a densidade de íons de érbio local, $n_1(r, \phi, z)$ é a densidade de íons no estado fundamental e $n_2(r, \phi, z)$ é a densidade de íons no estado metaestável.

Por sua vez, a equação a seguir descreve a propagação dos feixes luminosos através da fibra óptica [32]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_k}{dz} = & u_k \sigma_{e_k} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) n_2(r, \phi, z) r dr d\phi (P_k(z) + mh\nu_k \Delta\nu_k) \\ & - u_k \sigma_{a_k} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) n_1(r, \phi, z) r dr d\phi (P_k(z)) \end{aligned} \quad (2.15)$$

em que $u_k = 1$ representa o feixe propagando-se na direção z_+ e $u_k = -1$ propagando-se na direção z_- , representando os esquemas de bombeios co-propagante ou contra-propagante, $mh\nu_k \Delta\nu_k$ é a contribuição de emissão espontânea e m é normalmente 2, representando as duas polarizações ortogonais da onda eletromagnética. Na Equação (2.15), nota-se que o primeiro termo trata do aumento da potência de sinal e da geração da emissão espontânea

pelos íons no estado excitado, enquanto que o segundo termo trata da absorção da potência de bombeio e de sinal pelos íons no estado fundamental. Uma vez que as condições de contorno para as bandas k são especificadas em $z = 0$ e L (comprimento total da fibra óptica), a Equação (2.13) e a Equação (2.15) são integradas ao longo do comprimento z da fibra óptica para cada banda k e tempo t .

Na condição de estado estável da inversão de população ao longo da fibra e no tempo, considera-se, por definição, que $dn_2/dt = 0$. Assim, com base na Equação (2.15), são definidos os termos aplicados da Equação (2.8) e da Equação (2.9) [32]:

$$\alpha_k = \sigma_{a_{a_k}} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) n_t(r, \phi, z) r dr d\phi \quad (2.16)$$

$$g_k^* = \sigma_{a_{e_k}} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) n_t(r, \phi, z) r dr d\phi \quad (2.17)$$

Adicionalmente, de acordo com o grau de simplificação, se a dopagem dos íons de érbio estiver uniformemente distribuída ao longo de uma região de raio constante b , centrada no núcleo da fibra, e mantendo sua concentração constante ao longo do eixo z , define-se a integral de sobreposição entre o modo óptico e a região de dopagem Γ_k da seguinte maneira [32]:

$$\Gamma_k = \int_0^{2\pi} \int_0^b i_k(r, \phi) r dr d\phi \quad (2.18)$$

Assim, aplicando-se as Equações (2.8, 2.9 e 2.18) na Equação (2.15), obtém-se [32]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_k}{dz} = & \frac{\alpha_k + g_k^*}{\Gamma_k} P_k \int_0^{2\pi} \int_0^b \frac{n_2(r, \phi, z)}{n_t} i_k r dr d\phi - (\alpha_k + l_k) P_k \\ & + \frac{g_k^*}{\Gamma_k} m h \nu_k \Delta \nu_k \int_0^{2\pi} \int_0^b \frac{n_2(r, \phi, z)}{n_t} i_k r dr d\phi \end{aligned} \quad (2.19)$$

nela o termo l_k foi inserido para incluir as perdas da fibra por fenômenos não excitantes, como fibras com alto teor de água. Sem adição do bombeio na fibra, $n_2 = 0$, logo a equação de propagação se reduz apenas a componente de atenuação com taxa de $\alpha_k + l_k$. Quando a inversão de população é completa ($n_2 = n_t$), a Equação (2.19) é reescrita da seguinte forma [32]:

$$\frac{dP_k}{dz} = (\alpha_k + g_k^*)P_k - (\alpha_k + l_k)P_k + g_k^*mh\nu_k\Delta\nu_k \quad (2.20)$$

nesse caso, os termos de atenuação espectral são eliminados, resultando em:

$$\frac{dP_k}{dz} = (g_k^* - l_k)P_k + g_k^*mh\nu_k\Delta\nu_k \quad (2.21)$$

onde, $g_k^* - l_k$ é a componente de ganho do sinal bombeado ao longo da fibra. Dessa forma, assumindo-se a condição estável de população, as equações podem ser integradas e descritas com aproximação do estado fundamental para o estado metaestável, da Equação (2.13) tem-se [32]:

$$n_2(r, \phi, z) = n_t \frac{\sum_k \frac{\tau\sigma_{a_k}}{h\nu_k} P_k i_k}{1 + \sum_k \frac{(\sigma_{a_k} + \sigma_{e_k})}{h\nu_k} P_k i_k} \quad (2.22)$$

2.1.2 Análise de ganho e emissão espontânea

A partir da Equação (2.21), considerando um comprimento total L , a solução para a equação de propagação na fibra óptica pode ser dada por:

$$P_k(L) = P_k(0)e^{(g_k^* - l_k)L} + \frac{g_k^*mh\nu_k\Delta\nu_k}{g_k^* - l_k} \left[e^{(g_k^* - l_k)L} - 1 \right] \quad (2.23)$$

assim, assumindo a condição de completa inversão de população ao longo de todo o comprimento da fibra e que o nível do sinal de entrada é baixo o suficiente para não causar depleção significativa do bombeio ao longo da fibra, obtém-se à expressão de ganho de pequenos sinais G_k . Admitindo um comprimento L da fibra, a potência de entrada é definida por $P_{in} = P_k(0)$ e a potência de saída como $P_{out} = P_k(L)$:

$$G_k(L) = \frac{dP_{out}}{dP_0} = e^{(g_k^* - l_k)L} \quad (2.24)$$

por sua vez, a potência de emissão espontânea na saída do amplificador pode ser obtida quando nenhum sinal é aplicado na entrada, ou seja, $P_k(0) = 0$:

$$P_{ASE}(L) = \frac{g_k^* m h v_k \Delta v_k}{g_k^* - l_k} \left[e^{(g_k^* - l_k)L} - 1 \right] \quad (2.25)$$

$$P_{ASE}(L) = \frac{g_k^* m h v_k \Delta v_k}{g_k^* - l_k} [G_k(L) - 1] \quad (2.26)$$

Já em fibras dopadas com atenuação I_k muito menor que sua absorção g_k^* , pode-se simplificar a Equação (2.24) para:

$$G_k(L) = e^{g_k^* L} \quad (2.27)$$

$$g_k^* = \frac{\ln [G_k(L)]}{L} \quad (2.28)$$

dado que em fibras dopadas com érbio convencionais o valor de $m = 2$, devido as polarizações, a equação geral da potência de emissão espontânea é simplificada por:

$$P_{ASE}(L) = 2h v_k \Delta v_k [G_k(L) - 1] \quad (2.29)$$

Portanto, o cálculo da potência de emissão espontânea é determinante para modelar-se os impactos sistêmicos do amplificador a fibra dopada, bem como calcular a relação sinal ruído-óptica dos sinais em sua saída e, em consequência, a figura de ruído do amplificador. No enlace óptico, além do sinal propagante amplificado, a potência de emissão espontânea dos amplificadores em cascata é propagada, criando um efeito linear de impacto sistêmico na propagação do ruído emitido pelos amplificadores [33]. Dessa forma, a fim de se estabelecerem critérios e, assim como a estimação dos impactos providos pelos efeitos deletérios, a obtenção dessas potências de emissão é essencial para a modelagem, além dos estágios de amplificação, do sistema óptico completo.

3 Revisão bibliográfica

A maturidade tecnológica dos amplificadores a fibra dopada com érbio foi um dos fatores determinantes para o crescimento e a larga implementação das redes ópticas globais, sendo um elemento chave na evolução da capacidade dos sistemas ópticos. Dentre as gerações, o seu desenvolvimento esteve presente na tecnologia de modulação de intensidade com um único canal e detecção direta, avançando para os sistemas ópticos implementados com WDM e detecção coerente clássica, e evoluindo para a tecnologia de WDM com detecção coerente e processamento digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processing*). Nas gerações atuais, os sistemas ópticos são desenvolvidos empregando WDM em banda estendida C+L e DSP, com o uso de inteligência artificial e algoritmos de otimização. Adicionalmente, investiga-se os sistemas com multiplexação por divisão espacial (SDM – *Spatial Division Multiplexing*), que por meio de múltiplos canais espaciais expande a capacidade das fibras ópticas, embora que ainda seja um desafio a integração plena dessa tecnologia com os amplificadores a fibra dopada.

Em específico, a transmissão em banda estendida usando as bandas C e L tem alcançado resultados significativos com expansão da capacidade sistêmica. Nesse contexto, em [34, 35], destacam-se a demonstração laboratorial de sistemas com capacidade de 70,46 Tb/s com alcance de 7600 km e 65 Tb/s com alcance de 6600 km, respectivamente, com transmissões em longa distância empregando as bandas C e L somente suportadas pela amplificação baseada em EDFAs. Para tanto, os experimentos exploram o uso da combinação de amplificação de banda estendida com avançados algoritmos de processamento digital de sinais para otimizar o formato de modulação empregado e compensar efeitos de distorção não linear. A implementação dos estágios de amplificação para as bandas C e L se dá pela separação dos canais transmitidos em cada banda e amplificando-os através de EDFAs convencionais otimizados para operar em cada região espectral. Com objetivo de maximizar a capacidade de transmissão, algoritmos de processamento de sinais para compensação de efeitos não lineares (NLC – *Nonlinear Compensation*) e formatação de constelação (CS – *Constellation Shaping*) são utilizados, demonstrando ganhos em termos do fator Q e permitindo ao sistema que os canais transmitidos atinjam maiores potências com o mínimo de degradação.

De modo complementar, dentre as interessantes propostas no estudo de amplificação em banda estendida, destaca-se os amplificadores híbridos (HA – *Hybrid Amplifier*) combinando EDFAs com amplificação Raman distribuída (DRA – *Distributed Raman Amplification*). Entretanto, por tais dispositivos se basearem em efeitos não lineares e arranjos complexos para prover ganho óptico, demanda-se o uso de métodos de otimização a fim de viabilizar e simplificar o modelo sistêmico. Por exemplo, em [36], os pesquisadores aplicaram redes neurais artificiais para otimizar um amplificador híbrido. O trabalho propôs aprendizado de máquina (ML – *Machine Learning*) para otimizar 12 bombeios para ganho Raman distribuído combinados com EDFAs nas bandas C e L. Para um aprimoramento dos sistemas baseados em EDFAs, foca-se na otimização dos bombeios do amplificador Raman como ferramenta para manipular o perfil de ganho, considerando-se que o EDFA define a potência lançada dentro do enlace de transmissão, portanto mantém sua potência de saída fixa. A acurácia dos modelos é avaliada para os perfis e planicidade do ganho do EDFA. No laço de otimização, duas ANNs são consideradas, uma rede direta e outra inversa: na inversa o perfil de ganho é a entrada estimando os bombeios necessários, que são refinados como variáveis de entrada da rede direta, estimando-se o perfil de ganho na saída como métrica de desempenho. O resultado é a redução do *ripple* do perfil de ganho em comparação com a configuração do sistema sem o DRA utilizando uma rede neural otimizada.

Nos esquemas de amplificação híbrida, os amplificadores apresentam características específicas do ponto de vista de projeto e otimização, como proposto em [37]. Com o uso de algoritmos bioinspirados, o artigo compara dois algoritmos de otimização, sendo um já bem estabelecido na literatura, algoritmo genético (GA – *Genetic Algorithm*) e outro desenvolvido recentemente, otimização do lobo cinzento (GWO – *Grey Wolf Optimization*), em relação ao desempenho e a convergência aplicado ao projeto de estágios de amplificação. Os parâmetros de otimização são o comprimento de EDF e o bombeio de cada amplificador que maximiza o ganho, considerado como única figura de mérito. Com objetivo de se obter o máximo valor de ganho, o GWO demonstrou melhor desempenho alcançando valores de ganho maiores, com total de 29 dB para um EDFA com 14,52 m e 456 mW e um Raman com 32,98 km e 400 mW, com maior convergência e menor tempo de iteração.

Nesse contexto, o uso de ML em sistemas de transmissão óptica, além de

permitir a emulação dos processos físicos, pode fornecer uma generalização do modelo do dispositivo. A partir de dados obtidos da caracterização de um EDFA em bancada de laboratório, pode-se treinar uma rede neural para estimar determinada função custo de saída do amplificador e generalizar para diferentes enlaces, como descrito em [38]. Dentro da proposta, o trabalho tem por objetivo estimar e generalizar o ganho do EDFA para uma faixa de potências de entrada de operação, podendo substituir o modelo do EDFA numa rede óptica elástica (EON – *Elastic Optical Network*) [39] na qual é realizado o chaveamento de diferentes enlaces pra redirecionamento dos canais. São considerados três EDFAs comerciais do mesmo fabricante e três tipos de operações são realizados: treinamento de um EDFA e teste da predição no mesmo (intra-EDFA); treinamento de um EDFA e teste da predição em outro (inter-EDFA); e treinamento de todos juntos e teste de predição para cada um deles. O trabalho demonstra que o perfil de ganho estimado apresenta generalização para amplificadores distintos treinados juntamente, o que possibilita um modelo único para a emulação de EDFAs em enlaces distintos em uma rede óptica.

Adicionalmente, modelos de aprendizado de máquina vêm trazendo resultados mais precisos para estimação do ganho espectral do amplificador, como mostra [40]. A ideia consiste em modelar o amplificador por meio de ANNs e determinar o ganho dinâmico dependente do comprimento de onda com mínimo erro para entradas com alcance de ± 3 dB, ± 6 dB e ± 9 dB. Para tanto, o trabalho [40] considera um modelo analítico que determinam o ganho dependente do comprimento de onda em condições de operação para comparar com o modelo de predição da rede neural considerando a transmissão de 90 canais e ANN constituída por 4 camadas ocultas com funções de ativação ReLu e linear, com entradas igual ao número de canais e apenas uma saída do canal amplificado, sendo uma ANN criada para cada sinal de saída. Um teste experimental é montado, onde ocorre a amplificação de cada canal selecionado por uma chave seletora de comprimento de onda e os dados são utilizados nos modelos. Por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*), a predição dos ganhos nos três casos de ganhos dinâmicos possuem erros até 50% menores que os modelos analíticos e com erros de predição inferiores a 0,5 dB.

Além do ganho, a principal métrica de projeto e prototipagem do amplificador óptico, outra métrica de bastante relevância que deve ser considerada é o nível de inserção

de ruído ASE pelo amplificador. Em [41], propõe-se a otimização de um sistema com múltiplos enlaces de fibra óptica em função da relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*), por meio da estimação do perfil de ganho e da figura de ruído (NF – *Noise Figure*) de um amplificador na banda C, sem uso de filtro planificador de ganho (GFF – *Gain Flattening Filter*). Demonstra-se que outros parâmetros do amplificador além do ganho podem ser estimados por meio de rede neural, sendo, nesse caso, a figura de ruído inclusa na otimização sistêmica. Portanto, a investigação é realizada com um sistema de até 3 enlaces, mostrando que com o perfil de potência de entrada otimizado, a SNR é maximizada com maior planicidade entre os canais.

Tais trabalhos indicam que para o uso de técnicas de otimização multiobjetivo, a escolha das funções objetivo deve ser analisada pelo impacto individual e conjunto, devido à interdependência das funções, e o efeito resultante que pode levar à otimização. A comparação entre diferentes quantidades de funções e tipos de funções objetivo em uma otimização de amplificação óptica é demonstrada em [42]. O foco é otimizar o controle adaptativo do ponto operacional de um EDFA, comparando quatro configurações, sendo uma com três objetivos e o restante com duas funções objetivo. Entre os objetivos, tem-se a minimização da inclinação da potência, a maximização da mínima OSNR e a minimização do *ripple* de OSNR. Já em relação às quatro configurações investigadas, uma considera todos os objetivos e o restante em pares. Os parâmetros de otimização a serem obtidos são o valor de inclinação do sinal e o ganho do amplificador, considerando um cenário de 40 canais e cinco EDFAs espaçados de 100 km. A partir dos resultados obtidos, constata-se que as configurações com os três objetivos juntos é a melhor opção dada a qualidade das soluções encontradas, pois ela pode retornar as melhores soluções individualmente e ainda a opção com a maior diversidade de soluções. Portanto, em uma só análise pode-se decidir usar o ponto de operação com menor inclinação de potência, maior OSNR alcançada, menor *ripple* de OSNR, ou, possivelmente, uma condição intermediária que melhor satisfaça às condições desejadas.

No mesmo contexto, diversas abordagens para a otimização do ponto de operação de controle adaptativo do amplificador óptico são exploradas a fim de se estabelecer um melhor compromisso do ponto de operação para minimizar efeitos deletérios e maximizar a amplificação dos canais transmitidos. Em [43], utilizam-se duas abordagens para investigar o ponto de operação do amplificador sendo, o controle adaptativo de ganho e o

método heurístico de pesquisa de recozimento com retropropagação, que propõe avaliar de forma efetiva essas abordagens usando o modelo de ruído gaussiano incoerente (IGN – *Incoherent Gaussian-noise model*) para interferências não lineares [44]. Ao incluir o modelo não linear, as duas técnicas são aprimoradas e passam a obter informação dos efeitos não lineares. Dessa forma, considerando-se quatro técnicas para a avaliação, além do método tradicional de definição do ganho para compensar as perdas. Em específico, as métricas de avaliação consideram a inserção do ruído ASE e os efeitos não lineares presentes na fibra óptica, sendo a $OSNR_{ASE}$ definida somente pela informação da ASE e a $OSNR_{ASE+NLI}$ definida pelo modelo não linear gaussiano junto com a ASE. O cenário simulado consiste em um enlace de 4 amplificadores espaçados de 100 km, que avalia os melhores valores obtidos das duas OSNR ao fim do enlace a partir das cinco técnicas mencionadas. O resultado constata que as técnicas de controle adaptativo que utilizam o modelo não linear se destacam em relação às demais, obtendo os maiores valores de OSNR com um *ripple* minimamente superior às outras abordagens, demonstrando duas novas alternativas para a seleção do ponto operacional do amplificador, agora considerando também os efeitos não lineares provenientes do enlace óptico.

Em sistemas de transmissão óptica, a degradação do sinal pelo ruído ASE e efeitos deletérios não lineares impactam significativamente a qualidade do sistema de transmissão. Por isso, diversas técnicas implementadas em estágios de amplificação ajudam a minimizar os efeitos degradantes, como o controle adaptativo de operação, que altera o ponto de operação do amplificador dados os requisitos; pré-ênfase, que ajusta o perfil do sinal de entrada dada a resposta do amplificador; filtros planificadores de ganho, que aplicam equalização no sinal de saída; dentre entre outras. Entretanto, com auxílio da otimização, é possível aprimorar o desempenho do sistema óptico com técnicas de compensação, como exemplificado em [45]. A proposta é otimizar-se ambos os pontos de operação do EDFA e, assim como o declínio da potência de lançamento nos transmissores, visando juntamente minimizar o declive da OSNR e maximizar a mínima OSNR entre todos os canais na recepção de um sistema composto por vários enlaces ópticos. O algoritmo utilizado é o algoritmo genético de classificação não dominado II (NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*). O arranjo de simulação é constituído por vinte enlaces/EDFAs, onde cada amplificador tem uma excursão de ganho entre 14 dB e 24 dB, e pré-ênfase variando de -20 dB a 20 dB, sendo estas as variáveis de otimização.

Como resultado, observou-se que a otimização completa contendo pré-ênfase e ganho possui soluções com maior OSNR mínima e menor desigualização quando comparado com a otimização sem considerar a pré-ênfase. Tais descobertas foram comparadas com respostas de um simulador óptico comercial (OptiSystem), verificando 1 dB de erro para o declínio do perfil do sinal e 0,5 dB para mínima OSNR entre todos os canais.

Conforme já comentado anteriormente, algumas das métricas apresentadas aqui são importantes para se medir a qualidade da transmissão do sinal em sistemas ópticos, destacando-se a potência ótima de lançamento e a potência total de recepção; o perfil de ganho e o *ripple* dos amplificadores; a OSNR dos canais, o *ripple* de OSNR e a declividade da OSNR (sendo esta definida como a inclinação da linha gerada a partir da regressão linear dos valores de OSNR dos canais). A topologia de otimização das métricas consideradas pode ser definida em conjunto, pares, separadas ou individualmente, representando múltiplos objetivos ou apenas único, como descrito em [46], que aborda otimização multiobjetivo e de único objetivo usando PSO para um sistema de amplificadores EDFAs em cascata. A ideia consiste em avaliar cenários com 5, 6, 7 e 8 amplificadores espaçados de 90 km resultando em um comprimento de enlace de até 720 km, analisando a declividade e o *ripple* da OSNR como métricas de desempenho. Em cenários com até sete amplificadores, o desempenho foi similar em ambas as técnicas considerando o *ripple* e a declividade. Com oito amplificadores, a otimização multiobjetivo se sobressaiu em relação ao PSO em sua versão com um único objetivo, pois, o multiobjetivo manteve o *ripple* e a declividade com valores inferiores aos encontrados no PSO. A explicação é pelo fato de o algoritmo PSO visar somente maximizar a OSNR e obter a maior taxa de transmissão; por outro lado, o multiobjetivo considera o *ripple* simultaneamente, demonstrando melhor desempenho na qualidade de transmissão para todo o conjunto de canais ópticos.

Em muitos casos, como uma simplificação, a caracterização do amplificador óptico é realizada com sinais de entradas planos. Contudo, em redes ópticas dinâmicas, o espectro do sinal óptico é não plano, gerando a necessidade de uso de filtros GFF, controles adaptativos e até chaves seletoras de comprimentos de ondas (WSS – *Wavelength Selector Switch*) para garantir a equalização dos sinais. A estimação de sinais amplificados a partir de dados com perfis não planos para ANN treinada com dados de perfis planos pode levar a maiores erros em comparação com o sistema que possui perfis não planos. Nesse contexto, conforme o trabalho descrito em [47], busca-se uma forma de realizar estimação da resposta

do amplificador óptico com sinais não planos por meio de ANN. São considerados quatro modelos de redes neurais: sendo o primeiro modelo já utilizado na literatura que considera o ganho, a potência total do sinal de entrada e a frequência do canal como entradas e como saída a potência por canal; o segundo modelo considera o ganho e sinal de entrada de todos os canais como entrada e a saída sendo a potência do espectro. Em relação aos outros dois novos modelos, eles possuem uma adição em relação aos anteriores, incluindo a declividade do sinal como parâmetro de entrada, sendo as saídas das ANNs a potência do sinal de saída por canal e do espectro total, respectivamente. Para a modelagem dos amplificadores, são utilizadas máscaras de potência de EDFA comerciais na banda de operação e a geração de máscaras de potências de sinais de entrada não planos a partir de um simulador. A fim de se obter a ANN que apresenta melhor desempenho na estimação, mínimo erro e menos dados de coleta, utiliza-se o erro quadrático médio (MSE – *Mean Squared Error*) em função do número de épocas e com variação do número de máscaras utilizadas em seu treinamento. Os resultados demonstram que os modelos sem informação da declividade não predizem tão bem quanto aqueles treinados com a declividade como entrada para sinal não planos e que o modelo do espectro com declividade apresenta eficácia na predição do sinal de saída.

Conforme já discutido anteriormente, novas aplicações de transmissões em banda estendida C+L surgem na medida em que o uso do espectro mais largo é implementado nos sistemas de transmissão comerciais. Diante disso, sistemas de transmissão de longa distância empregando fibras ópticas com múltiplos núcleos foram demonstrados pela primeira vez utilizando amplificadores a fibra dopada de múltiplos núcleos em banda estendida. A demonstração apresentada em [48] mostra a avaliação e implementação de um EDFA com 19 núcleos em banda C+L, sobre um sistema de longa distância de 1500 km com fibras de transmissão com 12 núcleos, de modo que, explora-se o potencial dos sistemas SDM. O sistema conta com 181 canais alocados ao longo da banda de transmissão, utilizando dupla polarização com modulação QPSK de 32 GBd dos sinais e com filtros GFF na saída de cada núcleo. Como resultado, avaliam-se o fator Q e a OSNR de 25 canais selecionados após a recepção do enlace de 1500 km, mostrando que todos os canais ficaram acima do limite do código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*) ($> 4,95$ dB), conseguindo ganhos superiores a 13 dB e figura de ruído inferior a 7 dB por núcleo.

Como discutido ao longo do presente capítulo, a integração entre o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas de comunicação óptica e os métodos de otimização já se provou vantajosa e necessária para diversas aplicações. De forma plena e objetiva, as técnicas de otimização vêm evoluindo progressivamente, as quais passaram a abordar além de somente um único objetivo, problemas de multiobjetivos (MOP – *Multi-Objective Problem*), possibilitando o desenvolvimento de novas soluções na área de comunicações ópticas.

Diante dos trabalhos apresentados com respeito a estágios de amplificação e transmissão óptica, a sua maioria demonstra o uso exclusivo de uma área de aplicação tecnológica, como otimização bioinspirada em amplificadores, modelagem por rede neural artificial do amplificador a fibra dopada, uso de processamento digital, expansão da banda espectral e técnicas de amplificação. Nesse contexto, considera-se no presente trabalho desenvolvido maior abrangência das áreas de aplicações para os sistemas ópticos de alta capacidade em banda estendida. Por conseguinte, o método de integração entre as diversas áreas destaca-se pela capacidade de implementação e otimização do estágio de amplificação considerando apenas como elemento óptico isolado ou os estágios de amplificação visto como elementos sistêmicos contidos no enlace de transmissão em banda estendida. Adicionalmente, dados os recursos disponíveis, os dados utilizados para construção do modelo de implementação podem ser provenientes de simulação ou experimental, possibilitando maior flexibilidade ao sistema.

4 Ambiente de amplificação e integração dos elementos de simulação óptica

Nesse capítulo, inicialmente na Seção 4.1, apresenta-se a estrutura da camada de simulação óptica e os elementos necessários que compõem o modelo do sistema. Na Seção 4.2 e 4.3, a modelagem do sistema de amplificação por rede neural e o algoritmo de otimização bioinspirado são descritos, respectivamente. Por fim, na Seção 4.4, uma demonstração da plataforma GNPpy e sua fundamentação teórica, concluindo-se, na Seção 4.5, a integração entre o GNPpy e o simulador óptico para investigação de enlaces de transmissão.

4.1 Ambiente de simulação da camada física óptica

Nessa seção será apresentado o simulador óptico *Optrapy*, o qual contém a modelagem numérica de componentes ópticos, simulação sistêmica e análise de métricas para propagação eletromagnética de sinais luminosos por fibra óptica e pela camada física de redes ópticas. Para tanto, o simulador é composto por diversos blocos que compõem os três subsistemas principais de um enlace de comunicação por fibra óptica: transmissor, enlace óptico e receptor. O transmissor é formado por algoritmos de processamento digital de sinais para transmissão, como geração de dados, codificação de sinais, códigos corretores de erros, formatos de modulação, geração de sinal óptico, além de moduladores ópticos e filtros. No enlace, o simulador contém fibras ópticas para transmissão, amplificadores ópticos (EDFA e DRA) e filtros equalizadores de ganho. Para completar a arquitetura do sistema, tem-se o receptor que é constituído por blocos de fotodetectores e híbridas de 90°, além da cadeia de processamento digital de sinais para recepção e recuperação dos dados, contendo filtros, equalizadores, recuperadores de frequência e de fase, códigos corretores de erros e decodificação dos sinais. Nesse trabalho, o foco está no enlace de transmissão, voltado especialmente para o amplificador EDFA, para realizar a simulação sistêmica dos estágios de amplificação. O simulador é implementado inteiramente em linguagem *Python*, com base na biblioteca *Tensorflow*, para a aceleração de processamento de dados

dos modelos de simulação óptica.

Em específico, o amplificador óptico é modelado no simulador por parâmetros físicos que são obtidos a partir de dados do amplificador real. Dentre os parâmetros estão: o comprimento da fibra dopada, o nível de bombeio, o comprimento de onda do bombeio, o diâmetro do núcleo da fibra dopada, a concentração de érbio da fibra, o tempo metaestável de decaimento e os coeficientes de emissão e absorção através dos parâmetros de *Giles* de fibras dopadas comerciais [49]. O bloco de amplificação considera como sinais de entrada o comprimento de onda do sinal, a potência dos canais definidos e a faixa de comprimento de onda da ASE na banda de amplificação, o qual, através desses parâmetros sistêmicos são calculados os coeficientes das equações de taxa que modelam o EDFA. O método consiste na resolução de equações diferenciais, tal que nesse modelo o cálculo é discretizado e utiliza elementos finitos, tornando-se um processo iterativo. A resposta obtida ao fim do processo de amplificação é dada pela potência de saída do sinal e pela potência do ruído ASE gerado na amplificação. Portanto, o sistema de amplificação é modelado com parâmetros construtivos e sistêmicos que definem o EDFA como um bloco com entradas e saídas dentro do simulador.

4.1.1 Modelo óptico considerado nas simulações

Para o projeto sistêmico do amplificador a fibra dopada com érbio, a determinação da região de operação do amplificador é um fator fundamental para se obter resultados precisos dentro da abordagem investigada. Dentro dela, um dos parâmetros de operação do amplificador é a banda espectral: os estágios amplificam em banda C e banda L, a que, nessa investigação deverão ser preenchidas completamente a fim de executar o processo de amplificação com a máxima capacidade sistêmica possível. Portanto, o estágio de amplificação na banda C utiliza uma faixa de comprimento de onda de 1527,6 nm até 1565,5 nm, resultando em uma largura de banda 37,9 nm. De acordo com o ITU-T, para transmissão de sinais ópticos em WDM, a separação entre os canais é de 50 GHz. Desse modo, o amplificador para a banda C tem que fornecer ganho para 96 canais distribuídos em toda sua banda. Em relação ao estágio da banda L, tem-se uma faixa que varia o comprimento de onda entre 1568,362 nm e 1610,056 nm, assim obtendo uma maior banda de 41,69 nm. A faixa de 50 GHz também é usada na banda L, portanto, o número de canais distribuídos em toda a banda é de 100 canais. Conforme será investigado posteriormente,

a quantidade de canais varia de acordo com a banda de separação. Entretanto, os limites superior e inferior de cada banda foram mantidos no decorrer do trabalho investigado.

Na Tabela 1, apresentam-se os parâmetros de configuração contidos nos elementos ópticos do ambiente de simulação. Dentre os elementos principais estão: o transmissor, que pode enviar apenas um único canal ou conjuntos de canais dentro da banda especificada e potência de sinal determinada; o bombeio, determinado no comprimento de onda do érbio e sua potência de excitação; a emissão espontânea, que possui a banda espectral abrangendo o sinal de transmissão e pode variar o nível de ruído de entrada; o EDFA, que possui parâmetros configuráveis de acordo com dados do sistema físico; e o modelo de simulação, que consiste nas funções que contêm as equações numéricas dos elementos, além do EDFA tem-se outros modelos de amplificadores, fibras ópticas de transmissão, filtros e entre outros.

Tabela 1 – Elementos do simulador óptico para a implementação do meio de amplificação.

Elementos do sistema	Parâmetro	Valor
Sinal de Transmissão	Comprimento de Onda [nm] Espaçamento [GHz] Potência de Sinal [W]	Único Canal ou WDM
Sinal de Bombeio	Comprimento de Onda [nm] Potência [W]	Único Canal
Ruído	Espectro [nm] Resolução [nm]	Variável com o sinal transmitido
EDFA	Parâmetros de Giles [dB/m] Comprimento [m] Esquema de Bombeio Concentração de íons [íons/cm ³] tempo metaestável [ms] diâmetro do núcleo [um] Eficiência do sinal e bombeio no núcleo [%]	Configurável com os dados inseridos
Modelo de Simulação	Portas de Entrada Função Amplificador Portas de Saída	Funções dos elementos ópticos

Dados os elementos presentes, a estrutura do modelo de amplificação é mostrada na Figura 5. Os blocos representam as etapas do processo de amplificação do ambi-

ente, as quais seguem os fluxos de acordo com a ordem enumerada, sendo: 1 - determina-se a frequência de transmissão dos canais; 2 - identificam-se os sinais com os respectivos canais e a potência de entrada dos sinais; 3 - realiza-se a conversão dos canais em frequência para o comprimento de onda e potência em dBm para Watts; 4 - seleciona-se o bombeio de excitação em comprimento de onda e potência; 5 - adiciona-se o bombeio e os parâmetros físicos do amplificador no modelo do EDFA; 6 - o EDFA é aplicado ao canal de transmissão que adapta o amplificador em um elemento com entradas e saídas e com conexão a outros elementos como a fibra de transmissão; 7 - define-se a banda espectral de emissão espontânea presente no amplificador, 8 - integra-se a banda da ASE com o canal de transmissão; 9 - recebe os sinais de transmissão e aplica-se ao canal de propagação, com os modelos numéricos contidos, realiza-se o cálculo das equações de taxa do modelo de amplificação; 10 - a partir do fim das iterações, obtém os sinais de transmissão do modelo e o espectro da ASE de saída; 11 - a partir dos sinais recebidos, pode-se calcular as métricas sistêmicas como ganho, OSNR e figura de ruído.

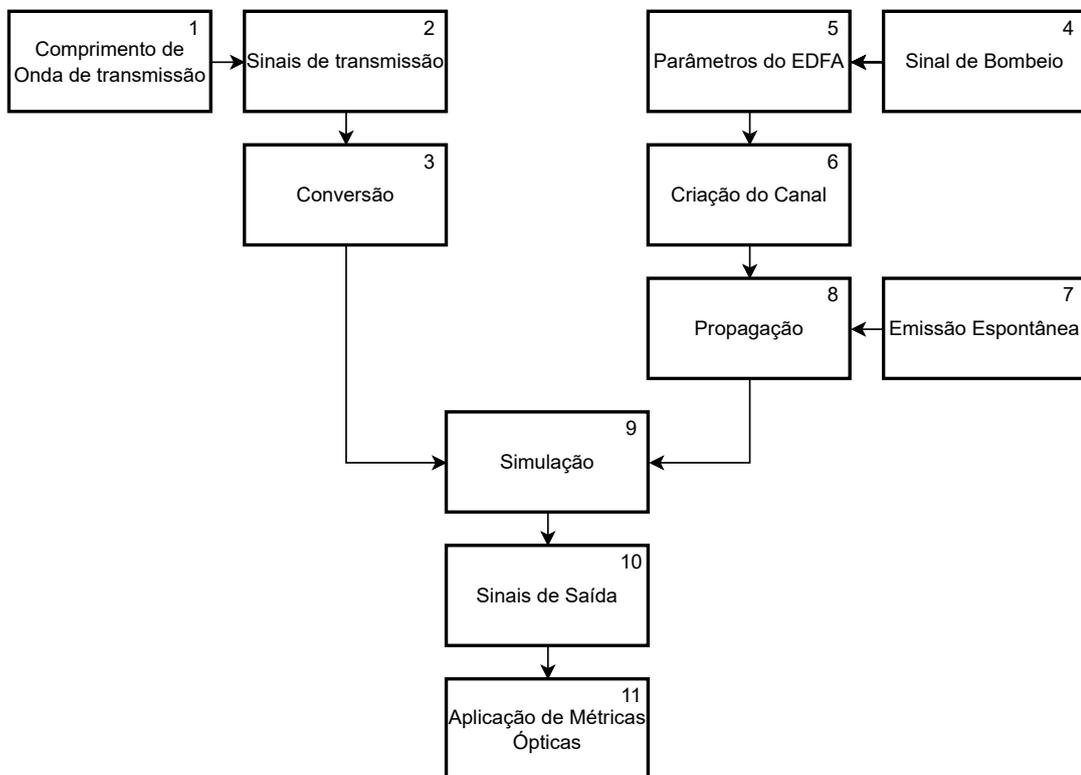


Figura 5 – Esquemático de simulação dos elementos ópticos de transmissão e amplificação.

4.2 Modelagem do amplificador a fibra dopada com érbio por rede neural artificial

O modelo convencional de amplificadores a fibra dopada com érbio emprega o cálculo das equações diferenciais de taxa por meio de elementos finitos, método que discretiza a fibra dopada em n partes e aplica o modelo de propagação em cada parte discreta da fibra de amplificação. Conseqüentemente, o tempo total de processamento do modelo depende diretamente do comprimento da fibra dopada, obtendo-se um tempo de resposta variável de acordo com a configuração de EDFA utilizada (escala de segundos até minutos). Portanto, em uma simulação de caso de uso com algumas execuções do modelo do amplificador, o tempo total das execuções não costuma ser significativo. Por outro lado, em um ambiente de otimização, o número de execuções pode ser milhares de vezes maior e torna o tempo total de execução um fator limitante para a convergência do sistema implementado. Sendo assim, a velocidade de processamento do algoritmo de otimização é dependente do modelo sistêmico empregado para a emulação do processo físico de amplificação óptica, que pode requerer um elevado esforço computacional.

Uma alternativa, para se reduzir o tempo de processamento em função do aumento da complexidade do modelo físico, se dá pelo uso de redes neurais artificiais. A ANN substitui o modelo de cálculo sistêmico do EDFA para estimar o parâmetro de saída desejável. A redução e independência do esforço computacional em função da complexidade do sistema é uma das maiores vantagens do uso de ANN para emular o EDFA, além de que, a rede neural pode ser construída a partir de um treinamento com dados simulados ou dados experimentais a partir de uma montagem em laboratório. Neste trabalho, cada amplificador atua reproduzindo uma arquitetura de rede neural adaptada com as configurações definidas em sua banda de operação, assim obtendo redes neurais exclusivas para estágios de amplificação na banda C e na banda L. Mais especificamente, o EDFA de cada banda é formado por duas ANNs, que se dividem em estimar o ganho de amplificação e a figura de ruído para o respectivo amplificador.

Começando pela construção da ANN na banda C, sua estrutura é definida em três entradas e noventa e seis saídas, onde as três entradas são: a potência total do sinal de entrada, o comprimento de EDF e a potência de bombeio. As saídas são o ganho para a primeira ANN e a figura de ruído para a segunda, tal que, cada saída representa um canal

do sinal óptico após a amplificação. Os dados para treinamento são obtidos via ambiente de simulação resultando na potência de saída do sinal de transmissão e a potência da ASE, a partir das quais, calcula-se o ganho e a figura de ruído de todos os canais. Para os dados calculados são gerados *datasets*, em que cada linha do *dataset* contém as três entradas e as noventa e seis saídas, de modo que cada *dataset* representa um valor de potência total de entrada com um total de 6000 configurações dentro da faixa de valores para bombeio e comprimento de EDF consideradas para a banda C. De maneira analítica, o *dataset* pode ser representado por um vetor d_c , com dimensões $d_{c(6000 \times 99)}$. Ao todo são gerados nove *datasets* para cada ANN correspondente aos sinais de entrada selecionados, com valores de +10 dBm, +5 dBm, 0 dBm, -5dBm, -10 dBm, -15 dBm, -20 dBm, -30 dBm e -40 dBm. Por fim, todos os *datasets* são concatenados formando um único *dataset* completo representado pelo vetor D_c , onde $D_c = \{d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}, d_{c4}, d_{c5}, d_{c6}, d_{c7}, d_{c8}, d_{cn}\}$, com $n = 9$ e dimensões $D_{c(54000 \times 99)}$.

Dado a implementação do *dataset* para o sistema de amplificação em banda C, os dados são selecionados para realizar as etapas de treinamento, validação e testes. Neste processo, a definição da arquitetura da rede neural é realizada através de avaliações da quantidade de camadas e neurônios em cada camada, dos tipos de função de ativação e algoritmos otimizadores, ajuste de parâmetros variáveis e etc. Para cada rede referente ao ganho e figura de ruído, a arquitetura das redes neurais foram implementadas de forma independente, de modo que as configurações aplicadas sejam adequadas para o respectivo *dataset* da rede neural que maximize a acurácia do treinamento.

A arquitetura das ANNs se diferencia em relação ao número de camadas. Para a rede do ganho, tem-se a camada de entrada com 150 neurônios, uma camada oculta com 2100 neurônios e a camada de saída com 96 neurônios. Já a rede da figura de ruído apresenta uma camada de entrada com 150 neurônios, duas camadas ocultas com 150 e 2100 neurônios e a camada de saída com 96 neurônios. Os modelos foram implementados usando `keras` da biblioteca do `Tensorflow`, as camadas foram definidas usando a função de ativação retificada (ReLU – *Rectified Linear Unit*), realizando um treinamento de 1000 épocas e usando como métrica principal de erro MSE para avaliação da acurácia dos modelos.

Na Tabela 2 estão os valores de MSE geral para os modelos de predição trei-

nados das ANNs do ganho e figura de ruído, apresentando um nível de perda em torno de $0,02 \text{ dB}^2$ e $0,01 \text{ dB}^2$, respectivamente.

Tabela 2 – Valores do erro quadrático médio para os modelos de estimação do ganho e figura de ruído na banda C.

MSE	
<i>Ganho</i>	<i>Figura de Ruído</i>
$0,02 \text{ dB}^2$	$0,01 \text{ dB}^2$

Como resultado da predição, a Figura 6 mostra uma comparação do perfil de ganho na banda C entre os dados de predição da rede neural e os dados de teste do *dataset*, nessa análise os parâmetros do amplificador são -20 dBm de potência de entrada, comprimento de EDF de $11,78 \text{ m}$ e bombeio de 384 mW . Nota-se que pelo nível da *loss*, o modelo treinado para o perfil geral de ganho apresenta baixo erro de estimação.

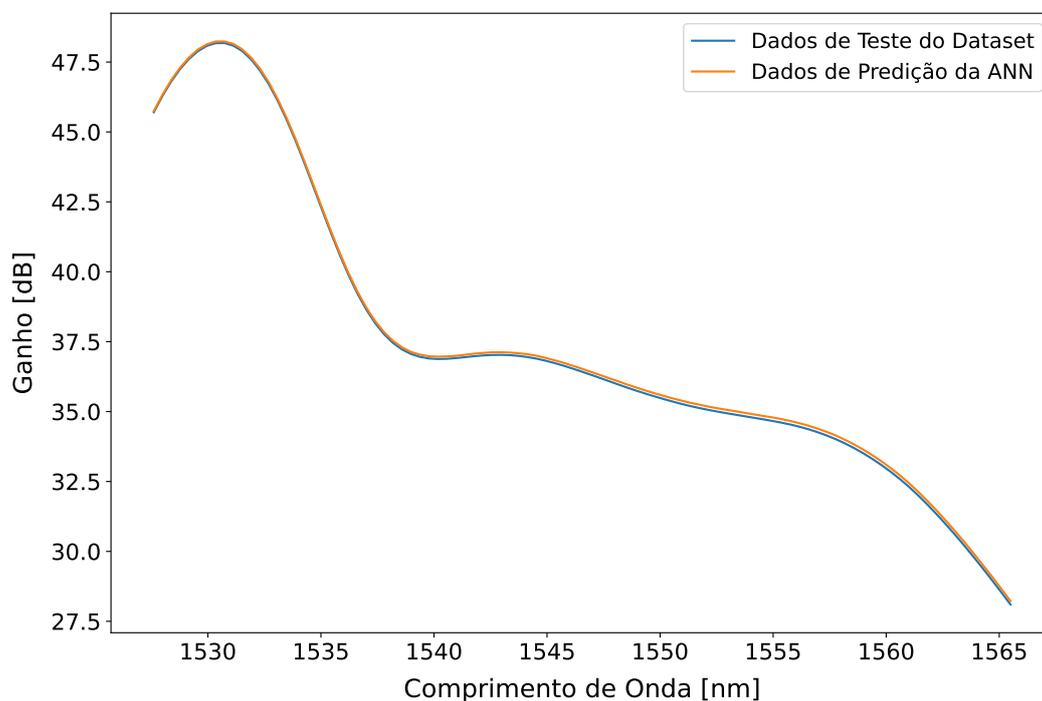


Figura 6 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de ganho do EDFA na banda C.

O perfil da figura de ruído é mostrado na Figura 7, utilizando 5 dBm de potência de entrada, comprimento da fibra dopada de $18,31 \text{ m}$ e bombeio de 375 mW . A

predição também demonstra alta convergência em relação ao comportamento dos dados de testes.

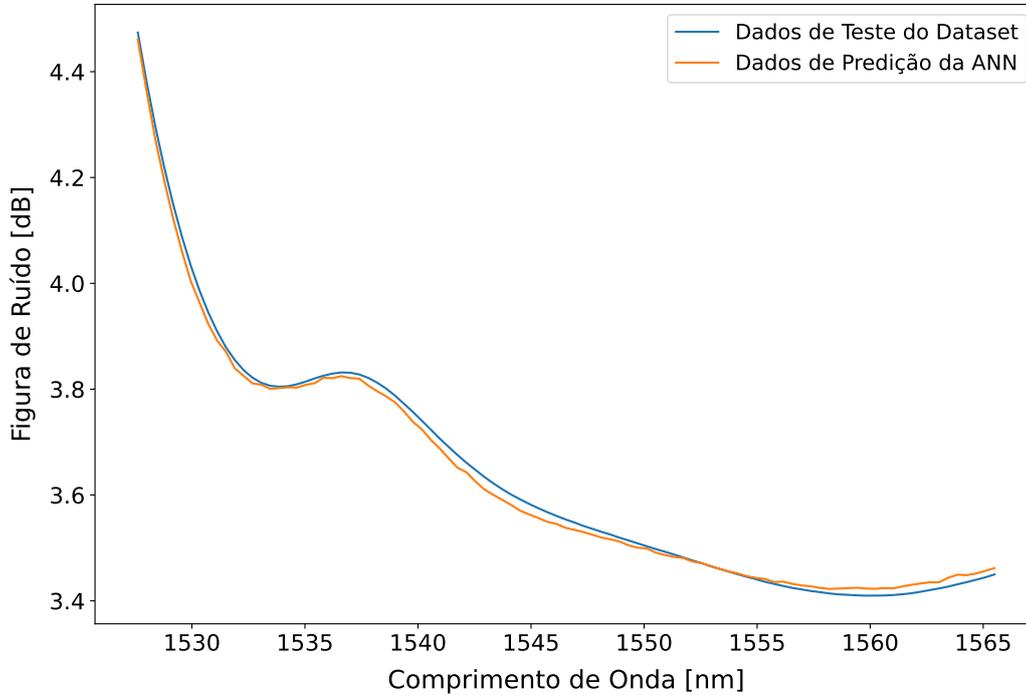


Figura 7 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de figura de ruído do EDFA na banda C.

Para a construção do modelo da ANN na banda L seguiu-se o mesmo procedimento realizado anteriormente, modificando a estrutura de acordo com os parâmetros definidos para operação na banda L. Dessa forma, a sua estrutura é definida com três entradas e cem saídas, mantendo as entradas como potência total de entrada, bombeio e comprimento de EDF, já as saídas correspondendo ao perfil de ganho e de figura de ruído para os cem canais cobrindo a banda inteira. Da mesma maneira, os *datasets* são gerados com três entradas e as cem saídas respectivos para cada potência total de entrada, utilizando os nove sinais de entrada usados na banda C, tal que, cada *dataset* é gerado com 6000 configurações para o alcance de valores do bombeio e comprimento de EDF considerado para a banda L, sendo expresso por um vetor d_l com dimensões $d_{l(6000 \times 103)}$. Então, agrupando os *datasets* forma-se o vetor D_l , definido por $D_l = \{d_{l1}, d_{l2}, d_{l3}, d_{l4}, d_{l5}, d_{l6}, d_{l7}, d_{l8}, d_{ln}\}$, sendo $n = 9$ e dimensões $D_{l(54000 \times 103)}$.

De forma similar ao treinamento do *dataset* definido no processo da banda

C, a definição das arquiteturas das redes de ganho e figura de ruído para a banda L são independentes entre as métricas e as bandas de operação em virtude das grandezas e dimensões dos dados presentes no respectivo *dataset*. Em relação à arquitetura das ANNs, o modelo do ganho de amplificação é formado por uma camada de entrada com 150 neurônios, duas camadas ocultas com 150 e 2400 neurônios e a camada de saída com 100 neurônios. Para a figura de ruído, a camada de entrada contém 150 neurônios, uma camada oculta com 1200 neurônios e camada de saída com 100 neurônios. As camadas da biblioteca `keras` contêm a função de ativação ReLu, com treinamento de 1000 épocas e métrica para avaliação da *loss*, sendo a MSE para medir a acurácia do modelo.

Na tabela 3 estão os valores de MSE geral para os modelos de predição treinados das ANNs do ganho e figura de ruído, apresentando um nível de *loss* em torno de $0,02 \text{ dB}^2$ e $0,0003 \text{ dB}^2$, respectivamente.

Tabela 3 – Valores do erro quadrático médio para os modelos de predição do ganho e figura de ruído na banda L.

MSE	
<i>Ganho</i>	<i>Figura de Ruído</i>
$0,02 \text{ dB}^2$	$0,0003 \text{ dB}^2$

Como resultado da predição, a Figura 8 mostra uma comparação do perfil de ganho na banda L entre os dados de predição da rede neural e os dados de teste do *dataset*, nessa análise os parâmetros do amplificador são 0 dBm de potência de entrada, comprimento de EDF de 50,26 m e bombeio de 668 mW. Nota-se que pelo nível da *loss*, o modelo treinado para o perfil geral de ganho apresenta baixo erro de predição para a banda L.

Já o perfil da figura de ruído é mostrado na Figura 9, utilizando 5 dBm de potência de entrada, comprimento da fibra dopada de 103,37 m e bombeio de 808 mW. A predição demonstra alta convergência em relação ao comportamento dos dados de testes para todos os perfis de figura de ruído em banda L.

Esta metodologia de modelagem dos amplificadores apresenta algumas propriedades a serem destacadas, entre elas são: a discretização dos *datasets* proporcionam uma redução do processamento para geração de dados e menor tempo computacional, realizando um processamento paralelo para *datasets* independentes e com menos memória;

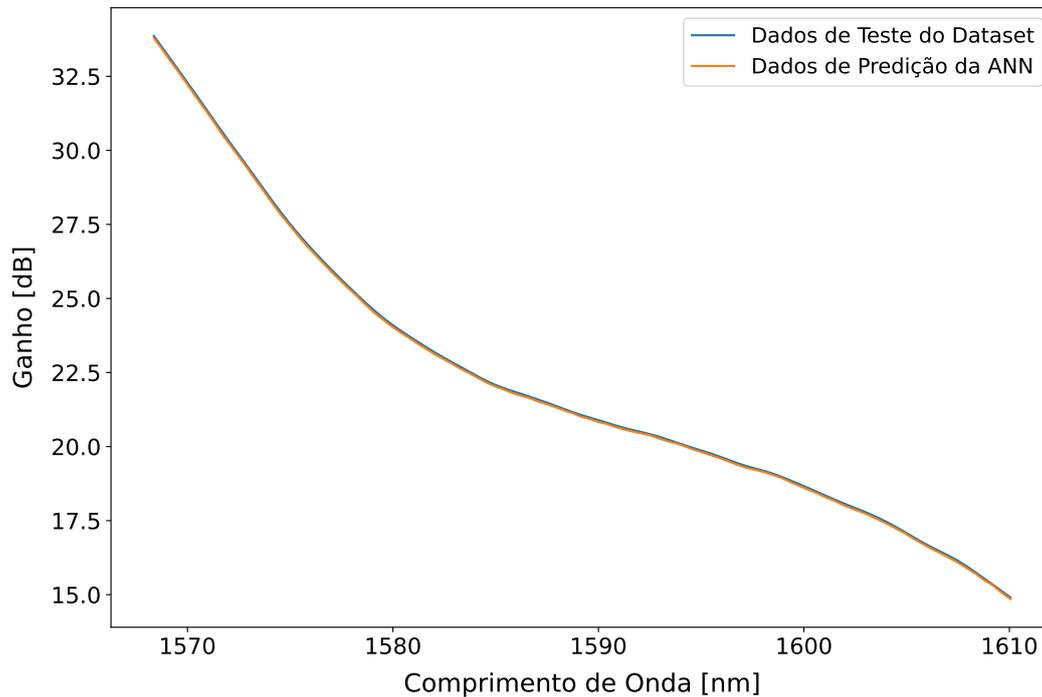


Figura 8 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de ganho do EDFA na banda L.

os modelos de geração de *datasets* possuem escalabilidade, ou seja, é possível concatenar n *datasets* sem exigir um maior esforço computacional, assim determinando o grau de escalabilidade de acordo com os requisitos do projeto; dependendo da aplicação é possível modelar ANNs com um respectivo *dataset* com parcial ou sem escalabilidade, reduzindo a complexidade e o processamento, gerando modelos mais simples e particulares; e a escalabilidade possibilita a generalização de diversos pontos de operação dos amplificadores nas bandas C e L, transformando em uma faixa de operação dinâmica para um único modelo generalizado de estimação dos parâmetros de saída dos amplificadores.

4.3 Algoritmo de otimização bioinspirado multiobjetivo

Processos físicos podem apresentar modelos complexos de otimização, no qual, vários objetivos devem ser satisfeitos para resolução do problema. Em certos casos, os objetivos podem ser separados e otimizados individualmente, mas em outros têm-se uma dependência mútua entre os objetivos do problema, demandando que os mesmos sejam

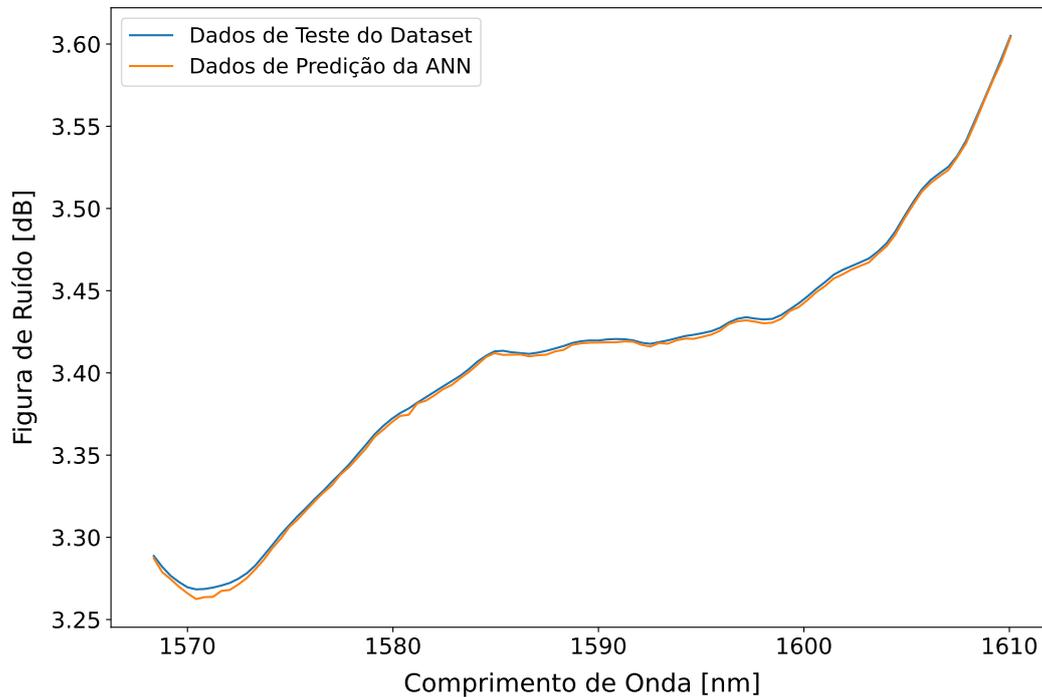


Figura 9 – Análise da predição da rede neural em relação aos dados de testes para o perfil de figura de ruído do EDFA na banda L.

executados simultaneamente para uma otimização completa. Devido à interdependência que ocorre nos MOPs, a solução encontrada para um objetivo pode não ser a solução ótima para o outro. Dessa forma, faz-se necessário encontrar uma linha de equilíbrio entre as funções objetivo que permitam ao projetista do sistema determinar o compromisso mais adequado entre elas para o cenário de aplicação objetivado. Portanto, a partir dessa abordagem, a otimização do sistema resulta em um conjunto de soluções obtidas que busca a região ótima de operação dado o compromisso entre as funções objetivo consideradas. O conjunto de soluções ótimas formam uma curva, comumente chamada de fronteira de Pareto (PF — *Pareto Front*) [50], indicando as soluções que apresentam o melhor compromisso entre todos os objetivos, as quais são denominadas soluções não dominadas.

Este trabalho propõe o emprego do algoritmo do ciclo da água multiobjetivo (MOWCA — *Multi-Objective Water Cycle Algorithm*) [51] no projeto e otimização de EDFAs para amplificar as bandas C e L completamente preenchidas com canais ópticos, investigando os impactos de diferentes configurações e parâmetros operacionais em seu desempenho. Este algoritmo bioinspirado é uma das alternativas para otimizar MOPs

em sistemas ópticos, se destacando por contar com número reduzido de parâmetros do otimizador a serem ajustados e complexidade reduzida ao ser combinado com o modelo sistêmico, especialmente quando comparado a outras técnicas de otimização com múltiplos objetivos. O algoritmo do ciclo da água (WCA – *Water Cycle Algorithm*) proposto em [52], baseia-se no ciclo dinâmico hídrico, emulando a interação entre os fluxos de água, rios e mar. O percurso da água em desaguar nos rios, os rios seguindo para desaguar no mar e até mesmo o fluxo de água encontrar diretamente o mar, é uma dinâmica abiótica que pode ser explorada na busca pela melhor solução a ser encontrada em problemas de engenharia.

A implementação do MOWCA considera inicialmente uma população de variáveis (neste caso modelando os fluxos de água) criada aleatoriamente, com o melhor fluxo inicializado (aquele que resulta no menor valor de determinada função custo) sendo escolhido como o mar, com um conjunto dos outros melhores valores selecionados como rios e o restante designado como riachos. Após a inicialização, a cada iteração, as diferenças em relação à iteração anterior entre o mar, rios e riachos são empregadas como referência para atualizar suas posições e gerar novos riachos em direção às posições dos rios. O processo também é feito para que os rios se movam em direção ao mar. Semelhante ao passo de mutação em outros algoritmos, se a diferença na posição do riacho e do rio em relação ao mar está dentro de um valor ajustável do otimizador, novos riachos são criados para buscar soluções em outra região através de processos de evaporação e condensação gerando chuvas. Ao final de cada iteração, o ordenamento da população com os melhores valores de função de custo é atualizado como referência para a próxima iteração.

Na Figura 10, tem-se uma visualização do algoritmo bioinspirado no ciclo hídrico, onde as setas indicam as transições entre os cursos de água, começando nos fluxos e desaguardo no mar. Os processos de condensação de chuva e evaporação são eventos que definem o início e o fim do ciclo em períodos específicos, de forma a garantir o maior espaço de busca em soluções possíveis e que os cursos fluam na direção desejada.

O algoritmo foi originalmente desenvolvido em linhas de código na plataforma Matlab® (sendo um software proprietário e de uso licenciado). Desse modo, neste trabalho o algoritmo foi recodificado em linguagem *Python*, utilizando principalmente os recursos das bibliotecas *numpy* e *pandas*, tal que, permitisse a integração do algoritmo com o am-

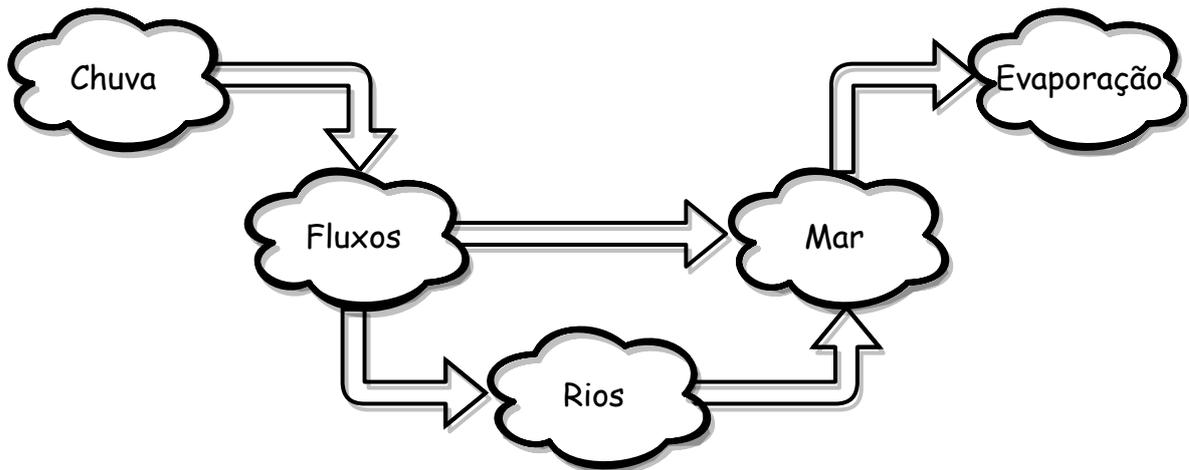


Figura 10 – Modelo de otimização bioinspirado do ciclo hídrico dinâmico da água.

biente de simulação óptica e com outras plataformas de código aberto. Na implementação do algoritmo, alguns parâmetros são editados de acordo com os requisitos do otimizador, entre eles são: o tamanho da população; o número de rios e mares dentro da população; o valor da distância entre as posições do mar e o rio próximo ao mar; o número de iterações da otimização, que leva ao número de funções avaliadas sendo o produto entre as iterações e a população; e o valor da dimensão dos parâmetros de entrada, que é determinado de acordo com o número de variáveis otimizadas.

4.4 Implementação da plataforma GNPpy

A partir de dados utilizados e resultados úteis obtidos da otimização do perfil de ganho do amplificador a fibra dopada isoladamente, uma nova abordagem é proposta visando-se explorar o desempenho sistêmico de amplificadores a fibra dopada associados em cascata, objetivando minimizar o impacto dos efeitos deletérios no sistema de transmissão óptica. Todavia, simular enlaces de transmissão óptica considerando a propagação do sinal eletromagnético em fibra óptica, como usualmente, é necessário para se avaliar o impacto dos efeitos não lineares em transmissões de sinais modulados. Este procedimento requer um processamento digital robusto e resolução de complexas equações numéricas e não lineares que descrevem o comportamento do sistema óptico, um fator limitante já encontrado somente no processamento de estágios de amplificação em banda L.

Alternativamente, a plataforma de código aberto chamada GNPpy [53], desen-

volvida pelo grupo de pesquisadores que compõe o projeto Telecom Infra (TIP – *Telecom Infra Project*), visa o desenvolvimento de ferramentas computacionais para implementar, operar e otimizar sistemas de comunicações ópticas. O GNP_y, baseia-se no modelo de estimação dos efeitos não lineares modelados como ruído gaussiano (GN – *Gaussian Noise*), dessa forma o modelo de estimação do impacto das não linearidades na propagação do sinal óptico é simplificado e o processamento é otimizado para simular enlaces de transmissão com múltiplos estágios de amplificadores ópticos.

O modelo GN foi proposto inicialmente em [54], em que parte do princípio de que para sistemas de transmissão óptica sem compensação de dispersão cromática, a interferência não linear comporta-se como um ruído aditivo gaussiano branco (AWGN – *Additive White Gaussian Noise*). Essa não linearidade é comumente decorrente do efeito *Kerr* [55], que consiste na ampliação do sinal de propagação à terceira potência. Através da birrefringência do guia de onda óptico, no efeito *kerr*, a intensidade do campo do sinal propagante ocasiona a variação do índice de refração, uma vez que, tem-se apenas um feixe óptico propagante, a variação ocorre no seu índice refrativo modulando a própria fase. No caso de vários feixes propagantes, o índice de refração é variado em decorrência da intensidade de outro feixe em uma frequência distinta, além de causar a interação entre três feixes em frequências distintas gerar novos modos propagantes, fazendo com que a interferência não linear de terceira de ordem considere uma mistura de três comprimentos de onda. Sendo assim, todas as contribuições de não linearidades são contabilizadas incluindo a auto modulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), a modulação de fase cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) e a mistura de quatro ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*).

O modelo do ruído gaussiano é baseado na expressão para a densidade espectral de potência de interferência não linear, dado por [54]:

$$G_{NLI}(f) = \frac{16}{27} \gamma^2 L_{eff}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{WDM}(f_1) G_{WDM}(f_2) G_{WDM}(f_1 + f_2 - f) \cdot \rho(f_1, f_2, f) \cdot \chi(f_1, f_2, f) df_2 df_1 \quad (4.1)$$

onde γ é o coeficiente não linear da fibra óptica, L_{eff} é o comprimento efetivo da fibra e

G_{WDM} é a densidade espectral de potência do sinal propagante. O ρ determina o fator de eficiência FWM, expressado como [54]:

$$\rho(f_1, f_2, f) = \left| \frac{1 - e^{[j4\pi^2|\beta_2|(f_1-f)(f_2-f)-2\alpha]L_s}}{2\alpha - j4\pi^2|\beta_2|(f_1-f)(f_2-f)} \right|^2 \cdot L_{eff}^{-2} \quad (4.2)$$

em que, L_s é o comprimento do trecho, α é o coeficiente de atenuação e β_2 é a constante de propagação de segunda ordem relacionada com a dispersão cromática. O fator de matriz de fase mede o grau de coerência no acúmulo de interferência não linear do enlace e é dado por [54]:

$$\chi(f_1, f_2, f) = \frac{\sin^2(2N_s\pi^2(f_1-f)(f_2-f)\beta_2L_s)}{\sin^2(2\pi^2(f_1-f)(f_2-f)\beta_2L_s)} \quad (4.3)$$

sendo N_s o número de trechos que compõem o enlace óptico.

A solução da Equação (4.1) se torna sistematicamente não trivial devido aos domínios de integração. De modo a simplificar o modelo GN, assume-se que os sinais ópticos propagantes no canal possuem perfil plano sobre o espectro WDM, considerando filtros ideais de pulsos sem o fator de *roll-off*. Portanto, o espectro de transmissão é formado pela largura de banda mínima necessária em formato de pulsos Nyquist, considerando-se um perfil constante de $G_{WDM}(f)$ dentro do espectro de B_{WDM} , com largura de $-B_{WDM}/2$ até $B_{WDM}/2$. Para o caso de $f = 0$ e $N_s = 1$, a Equação (4.1) pode ser simplificada para um único trecho, que corresponde ao caso de maior impacto devido à interferência não linear de ambos os lados da frequência central do espectro WDM. Com $N_s > 1$, o impacto não linear é incrementado de acordo com número de trechos do enlace, portanto, a densidade espectral de potência não linear em $f = 0$ e em um único trecho é dada por [54]:

$$G_{NLI,0} = \frac{16}{27} \gamma^2 G_{WDM}^2 \int_{-B_{WDM}/2}^{B_{WDM}/2} \int_{-B_{WDM}/2}^{B_{WDM}/2} G_{WDM}(f_1 + f_2) \cdot \left| \frac{1 - e^{j4\pi^2|\beta_2|f_1f_2L_s - 2\alpha L_s}}{2\alpha - j4\pi^2|\beta_2|f_1f_2} \right|^2 \cdot df_1 df_2 \quad (4.4)$$

dado que $G_{WDM}(f_1 + f_2)$ é constante assim como outras frequências dentro do espectro considerado, a equação pode ser expressa com os fatores espectrais fora do domínio de

integração, sendo [54]:

$$G_{NLI,0} = \frac{16}{27} \gamma^2 G_{WDM}^3 \cdot \int_{-B_{WDM}/2}^{B_{WDM}/2} \int_{-B_{WDM}/2}^{B_{WDM}/2} \left| \frac{1 - e^{j4\pi^2|\beta_2|f_1f_2L_s - 2\alpha L_s}}{2\alpha - j4\pi^2|\beta_2|f_1f_2} \right|^2 \cdot df_1 df_2 \quad (4.5)$$

em relação aos novos domínios de integração, a expressão pode ser convertida em coordenadas polares por meio da aproximação de um domínio circular, sendo aproximada por uma função hiperbólica [54]:

$$G_{NLI,0} = \frac{8}{27} \gamma^2 G_{WDM}^3 L_{eff}^2 \frac{\operatorname{asinh}\left(\frac{\pi^2}{2} \beta_2 L_{eff,a} B_{WDM}^2\right)}{\pi \beta_2 L_{eff,a}} \quad (4.6)$$

onde, $L_{eff,a} = 1/2\alpha$ corresponde ao comprimento efetivo assintótico e asinh é o arco seno hiperbólico.

Traduzindo a modelagem das não linearidades em termos da potência de interferência não linear, denota-se que a potência é dada em função da densidade espectral não linear e da banda óptica transmitida, tem-se [44]:

$$P_{NLI} = G_{NLI} R_s \quad (4.7)$$

conforme a densidade espectral não linear do enlace se incrementa linearmente com o número de trechos, mostra-se que a potência de não linearidade se incrementa linearmente, dado por [44]:

$$G_{NLI} = N_s G_{NLI,0} \quad (4.8)$$

$$P_{NLI} = N_s G_{NLI,0} R_s \quad (4.9)$$

Na fibra óptica, a potência não linear é dependente da potência do sinal transmitido, dadas as interferências em decorrência do efeito Kerr. Tal efeito é definido pela não linearidade de terceira ordem, fazendo com que a interferência se incremente com a terceira potência do sinal, sendo [44]:

$$P_{NLI} = N_s \eta_1 P_T^3 \quad (4.10)$$

definindo η_1 como função da densidade espectral independente de P_T , tem-se [44]:

$$\eta_1 = \frac{P_{NLI}}{N_s P_T^3} \quad (4.11)$$

em que, η_1 é o fator eficiência de não linearidade para um único trecho. Assumindo que a densidade espectral do sinal WDM é $G_{WDM} = P_T/R_s$, de acordo com critérios adotados do pulso de Nyquist, onde R_s é a taxa de símbolos, tem-se [44]:

$$\eta_1 = \frac{8}{27} \gamma^2 L_{eff}^2 \frac{a \sinh\left(\frac{\pi^2}{2} \beta_2 L_{eff,a} B_{WDM}^2\right)}{\pi \beta_2 L_{eff,a} R_s^2} \quad (4.12)$$

Nesse contexto, é possível determinar a SNR do enlace, que conta com a geração do ruído ASE e da contribuição não linear, dada por [44]:

$$SNR = \frac{P_T}{P_{ASE} + P_{NLI}} \quad (4.13)$$

dado que a SNR do enlace é composta por duas componentes sendo SNR_{ASE} e SNR_{NLI} , expressas como:

$$SNR_{ASE} = \frac{P_T}{P_{ASE}} \quad (4.14)$$

$$SNR_{NLI} = \frac{P_T}{P_{NLI}} \quad (4.15)$$

A relação entre a potência de transmissão e a potência não linear demonstra os impactos em termos da SNR, dado que, o aumento da potência do sinal eleva mais rápido a interferência não linear, reduzindo a SNR do sistema. Adicionalmente, a SNR pode ser definida em termos das relações sinais-ruídos de cada interferência, descritas da seguinte forma:

$$SNR = \left(\frac{1}{SNR_{ASE}} + \frac{1}{SNR_{NLI}} \right)^{-1} \quad (4.16)$$

onde, a contribuição da SNR_{ASE} corresponde a interferência no regime linear do ruído ASE e a SNR_{NLI} é formada pela contribuição das não linearidades. Essa expressão é utilizada pelo GNPpy, conhecida como SNR generalizada do enlace óptico.

4.5 Integração do GNPpy com o ambiente de simulação

Para realizar a implementação de um sistema de transmissão para a otimização dos estágios de amplificação nos enlaces ópticos, foi necessário a integração da plataforma aberta GNPpy com o simulador óptico. O simulador é responsável por gerar o modelo do sistema, com a topologia requerida e os equipamentos presentes incluindo os valores dos parâmetros de configuração do enlace, e os modelos dos estágios de amplificação, que são modelados de acordo com os requisitos de implementação. Conseqüentemente, as possibilidades de implementações dos estágios de amplificação com o enlace são ampliadas com a modelagem realizada pelo simulador. Nessa proposta, a investigação do desempenho sistêmico dos amplificadores em virtude do impacto dos efeitos deletérios de natureza não linear será feita através do modelo GN simplificado empregado no GNPpy. Essa integração proporciona uma elevada flexibilidade e alternativas de se testar diferentes enlaces de transmissão com diversas configurações em termos de taxa, largura de banda, alcance, número de dispositivos, dentre outros, bem como ampliar o sistema para a transmissão em banda estendida.

O GNPpy possui atributos que permitem modelar a infraestrutura do sistema óptico, entre eles está a escolha da topologia do sistema. A topologia do sistema aqui investigado é uma estrutura de enlace ponto a ponto, sendo escolhida uma topologia linear. Dentro da estrutura estão os componentes que compõem o enlace de transmissão: transceptores, fibras ópticas, amplificadores, filtros e demais componentes. A estrutura do sistema é montada em arquivos de formato `.json`, em que são gerados dois arquivos principais sendo o `topology.json` e o `equip.json`.

No `topology.json` são descritos os pontos de conexão do sistema, detalhando a arquitetura da rede entre os transmissores e receptores, bem como identificando cada trecho do enlace óptico com os componentes ali presentes. Já o `equip.json` especifica os parâmetros dos elementos presentes no enlace, ou seja, cada componente é criado com os valores dos seus parâmetros físicos necessários para montar a infraestrutura do enlace

óptico. Além desses dois arquivos, o GNPY importa os parâmetros dos estágios de amplificação, nesse caso EDFAs de diferentes modelos, sendo n amplificadores `edfa_n.json`, onde n é o número de amplificadores no enlace.

Nesse contexto, a implementação é realizada começando pelo simulador óptico, onde define-se todo o modelo sistêmico de transmissão, sendo: a frequência dos canais, a potência de transmissão, a largura de banda, a OSNR de transmissão e taxa de símbolos. Adicionalmente, para as fibras ópticas, tem-se a dispersão, o coeficiente de não linearidade, o coeficiente de perda por polarização, o comprimento do trecho e o coeficiente de atenuação da fibra. Já os amplificadores são definidos pelo ganho dos canais, a figura de ruído e a frequência mínima e máxima da banda espectral, conforme simulações empregando os modelos matemáticos anteriormente descritos. Por fim, o transceptor é formado pelo formato de modulação, taxa de símbolos, taxa de bits, a OSNR requerida, o fator *roll-off*, a OSNR de transmissão e o mínimo espaçamento entre canais. A partir da modelagem dos elementos sistêmicos e armazenados em formatos `.json`, o GNPY interpreta a configuração exportada e realiza uma nova simulação estimando os efeitos não lineares em conjunto com o sinal de propagação no sistema implementado.

4.5.1 Implementação do filtro planificador de ganho

Para os sistemas ópticos, a degradação do sinal transmitido ao longo do enlace é um efeito limitante do desempenho do sistema, devido à desqualização dos canais provenientes dos estágios de amplificação. Para solucionar esse efeito, uma das principais soluções é utilizar o filtro aplanador de ganho, que promove a equalização do espectro de ganho dos canais após a amplificação [56]. O filtro pode ser projetado a partir de dois componentes ópticos: por uma grade de longo período (LPG – *Long Period Grating*) ou por uma grade de fibra de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*), sendo a FBG geralmente a mais utilizada. A utilização desses filtros permite a equalização dos canais após os estágios de amplificação, que evita a maior degradação dos canais com menor ganho após a concatenação de diversos estágios de amplificação, conseqüentemente, elevando o alcance dos enlaces de transmissão com maior capacidade.

Nesse contexto, ocorre a necessidade de se implementar o GFF de acordo com suas características físicas para realizar a equalização dos canais ao longo do enlace de

transmissão. O filtro é acoplado na saída do amplificador, onde recebe o sinal amplificado e aplica um perfil de atenuação de acordo com o perfil de ganho gerado pelo EDFA. Na Figura 11, observa-se a resposta do amplificador para um sinal WDM em banda C sem equalização e com o filtro equalizador. O filtro tem como resposta um perfil de sinal óptico plano na saída, que aplica uma atenuação variável de acordo com o nível de potência de cada canal.

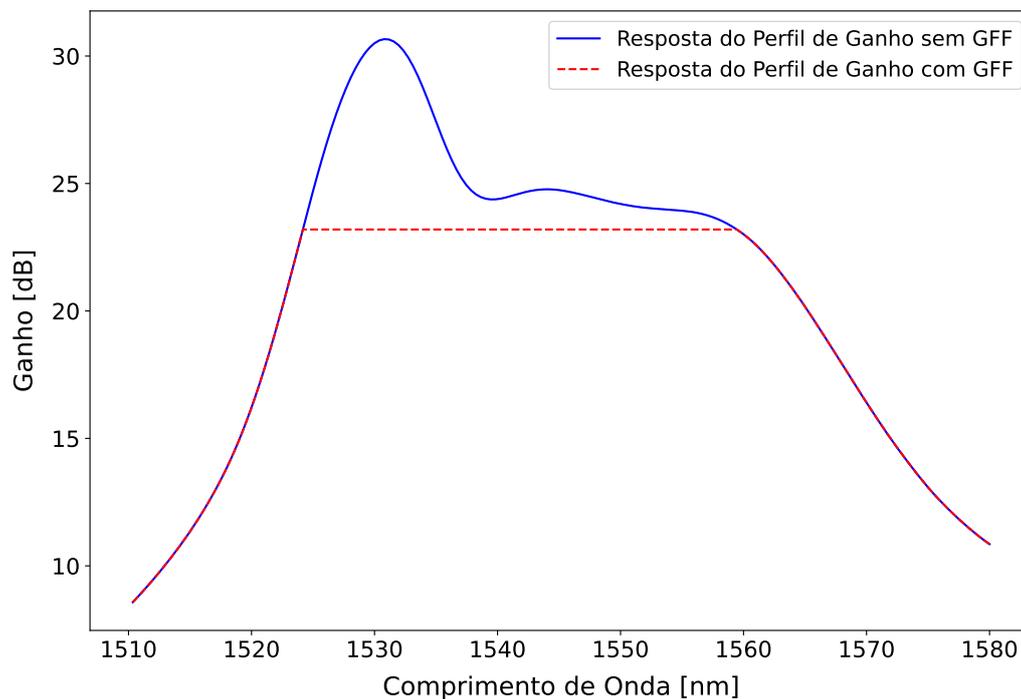


Figura 11 – Resposta do amplificador com o filtro equalizador em função do perfil de ganho de saída.

Na Figura 12, tem-se o perfil de atenuação do filtro GFF aplicado ao espectro dos canais amplificados na saída do EDFA. A atenuação do filtro começa a partir do comprimento de onda do canal com menor nível de sinal, sendo esse uma referência para os outros canais com maiores amplitudes. O valor máximo de atenuação ocorre no comprimento de onda do canal com maior valor de ganho, representando o contraste do filtro e um perfil de atenuação inverso ao espectro de ganho do amplificador.

Desse modo, o GFF é projetado como um componente sistêmico dos EDFAs, podendo ser adicionado ou retirado no modelo do enlace óptico. Assim como outros elementos exportados para o GNPY, o filtro GFF se torna um elemento a ser reconhecido

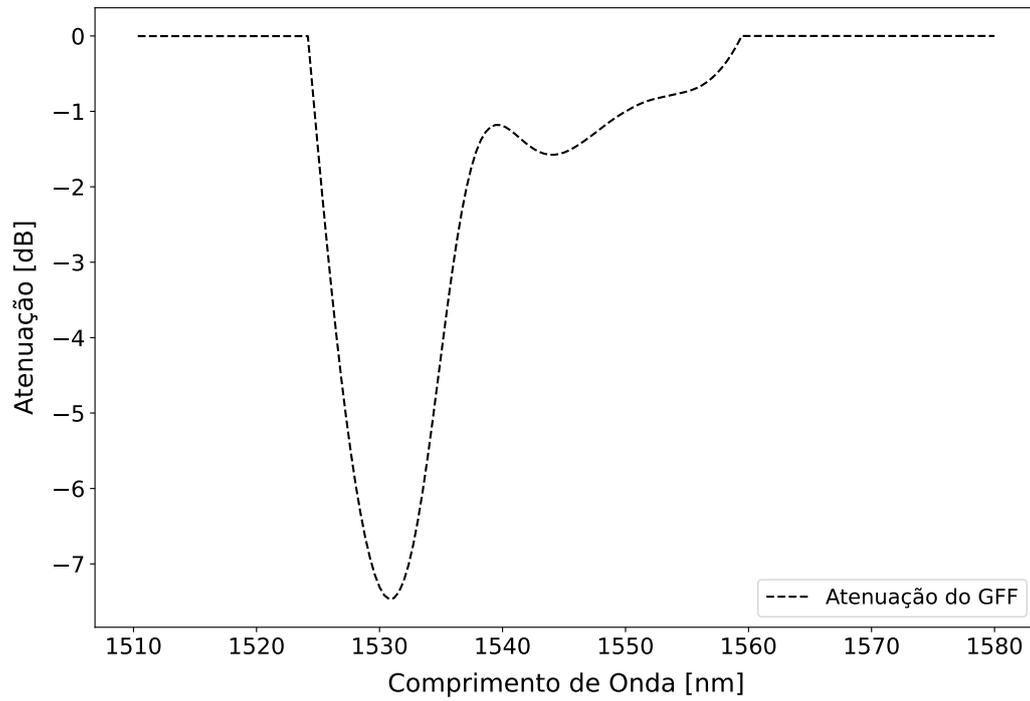


Figura 12 – Atenuação do filtro equalizador aplicado a saída do EDFA.

pelo GNP_y, sendo incluído na topologia do sistema e nos parâmetros de modelagem dos equipamentos presentes no enlace de transmissão.

5 Otimização isolada de amplificadores a fibra dopada com érbio nas bandas C e L

Inicialmente, a seção 5.1 apresenta a montagem experimental e a caracterização do amplificador a fibra dopada com érbio, seguindo-se, na Seção 5.2, a validação do amplificador em ambiente simulado com o amplificador experimental. Na seção 5.3, é descrito o processo de otimização do amplificador nas bandas C e L. Por fim, na Seção 5.4, os resultados das otimizações do amplificador nas bandas C e L são apresentados e discutidos.

5.1 Montagem e caracterização de um amplificador a fibra dopada com érbio

Nesta seção, será apresentada a montagem e o processo de caracterização de um amplificador a fibra dopada com érbio em bancada de laboratório, descrevendo-se os componentes e os elementos necessários para realização dos testes, além dos parâmetros considerados para análise do amplificador. Com base na sua caracterização, foi possível avaliar o desempenho de um amplificador real e validar os modelos matemáticos empregados nas simulações propostas.

Para tanto, o primeiro passo é realizar a caracterização do laser de bombeio mapeando a sua corrente de polarização, uma vez que o laser de bombeio é controlado pela corrente aplicada. Na Figura 13, observa-se o perfil de potência óptica emitida em função da corrente de polarização, evidenciando que esse laser não alcança níveis de potências muito elevados, chegando à sua saturação em torno de 250 mW. Nessa avaliação, consideraram-se três casos para utilizar como bombeio, definindo os valores de corrente em 150 mA, 300 mA e 450 mA, que correspondem aos níveis de potências 91,5 mW, 190,3 mW e 243,5 mW, respectivamente.

Adiante, após a caracterização do laser de bombeio, realizou-se a montagem experimental caracterizando cada elemento, calculando a perda de inserção do acoplador

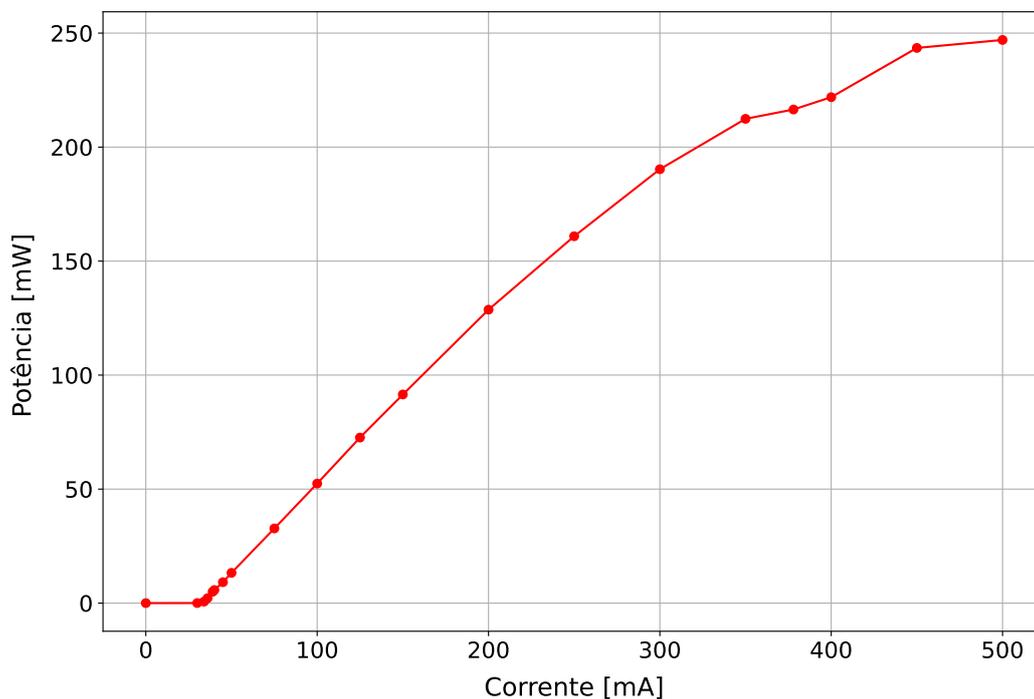


Figura 13 – Potência óptica de saída do laser de bombeio em função da corrente aplicada.

e do isolador, medindo a atenuação da fibra dopada e fibra convencional, e considerando as perdas de cada emenda e conexão realizada. Portanto, de acordo com a Figura 14, a montagem é constituída de uma bancada de lasers de transmissão e um laser de bombeio que são acoplados na entrada da fibra dopada e, após a amplificação, tem-se um isolador (impede o retorno de fluxo do sinal óptico), direcionando os sinais amplificados até um analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyser*).

Os dados caracterizados experimentalmente para os elementos utilizados na montagem experimental são mostrados na Tabela 4. Os canais a serem amplificados foram espaçados em torno de 2 nm na banda C, resultando em 19 canais não modulados para transmissão, com potências dos sinais ajustada para os seguintes valores: -30 dBm, -15 dBm e 0 dBm. A fibra dopada possui um comprimento de 13,8 m e é do tipo MP-980. O laser de bombeio foi utilizado na configuração co-propagante e no comprimento de onda de 980 nm com níveis de 91,5 mW, 190,3 mW e 243,5 mW. Entre os outros elementos necessários para o experimento, o acoplador WDM é do tipo C+980, que acopla sinais na banda C e bombeios no comprimento de 980 nm, e o analisador de espectro foi configurado com resolução de 0,2 nm.

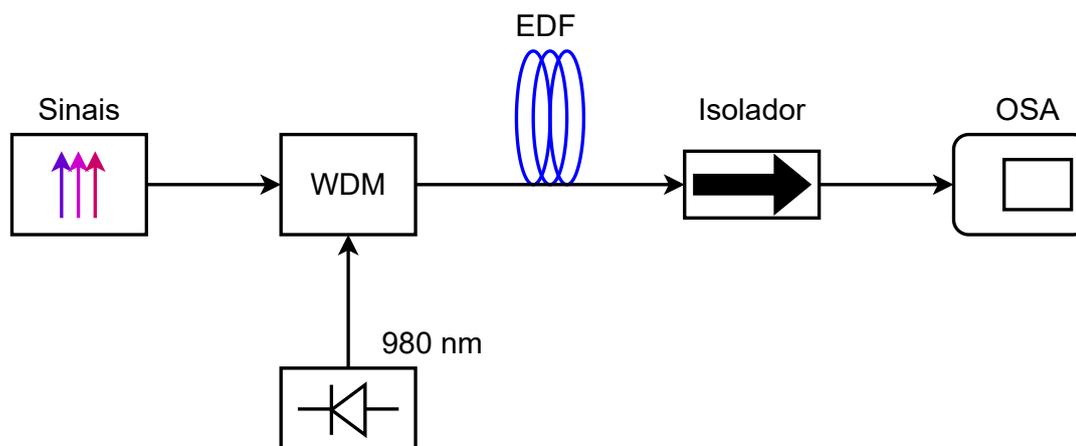


Figura 14 – Esquema de montagem de um amplificador a fibra dopada.

Tabela 4 – Parâmetros definidos para a montagem de amplificador a fibra dopada com érbio.

Elementos do sistema	Parâmetro	Valor
Sinal	Comprimento de Onda [nm]	1527,9914 até 1563,9981
	Espaçamento [GHz]	250
	Número de Canais	19
	Potência Total [dBm]	-30, -15 e 0
Fibra Dopada	Tipo de Fibra	MP-980
	Comprimento [m]	13,8
Laser de Bombeio	Níveis [mW]	91,5, 190,3 e 243,5
	Comprimento de Onda [nm]	980
	Esquema	Co-Propagante
Elementos	Acoplador WDM	Sim
	Isolador	Sim
	Res. Analisador de Espectro [nm]	0,2
	Fonte de Corrente CC [mA]	150, 300 e 450

5.2 Validação experimental dos modelos de amplificação

Para iniciar o desenvolvimento do projeto e otimização do amplificador óptico a fibra dopada com érbio, uma montagem experimental em bancada de laboratório é construída para caracterização e validação do simulador óptico. A investigação a seguir apresenta resultados da comparação de um EDFA experimental com um EDFA simulado,

investigando semelhanças ou diferenças entre o ganho e a figura de ruído de ambos.

Nessa análise, o EDFA é projetado com um comprimento de EDF de 13,8 m, com esquema de bombeio co-propagante e comprimento de onda em 980 nm. Determinam-se três níveis de bombeio para a operação do amplificador (91,5 mW, 190,3 mW e 243,5 mW) considerando amplificar sinais com potência total de entrada de -30 dBm, -15 dBm e 0 dBm. Para o experimento, utiliza-se ao todo 19 canais espaçados em 2 nm ocupando a banda C em sua totalidade, avaliando o perfil de ganho (linha azul) e a figura de ruído (linha vermelha) de cada configuração. Para correlacionar os resultados experimentais com os simulados, adota-se o erro quadrático médio para os perfis obtidos.

Na Figura 15, tem-se os resultados para os sinais de -30 dBm de potência de entrada para os bombeios considerados. Nota-se a equivalência da magnitude e do comportamento entre os perfis dos modelos para o ganho e para figura de ruído, embora que a figura de ruído experimental possui maiores oscilações devido a medição do espectro da ASE no analisador de espectros óptico. Na Tabela 5, mostram-se os valores de MSE para o ganho e figura de ruído para cada configuração, o ganho possui o erro em torno de $0,6$ dB² e a figura de ruído possui um erro menor de $0,07$ dB² para 91,5 mW e $0,12$ dB² para os outros casos.

Na Figura 16, apresentam-se os perfis para os sinais de -15 dBm de potência total de entrada, mantendo a similaridade entre os modelos. Os erros mostrados na Tabela 6 apresentam o mesmo valor de $0,07$ dB² para a figura de ruído, em relação ao ganho, o maior valor é de $0,9$ dB² com bombeio de 91,5 mW, enquanto os bombeios superiores apresentam um erro menor em torno de $0,1$ dB².

Por último, observam-se os perfis dos modelos para 0 dBm de potência total de entrada sendo mostrados na Figura 17. Nesse caso, o perfil de ganho apresenta menor

Tabela 5 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando -30 dBm de potência total de entrada.

Sinais de bombeio	MSE	
	Ganho	Figura de Ruído
91,5 mW	0,67 dB ²	0,07 dB ²
190,3 mW	0,62 dB ²	0,12 dB ²
243,5 mW	0,63 dB ²	0,12 dB ²

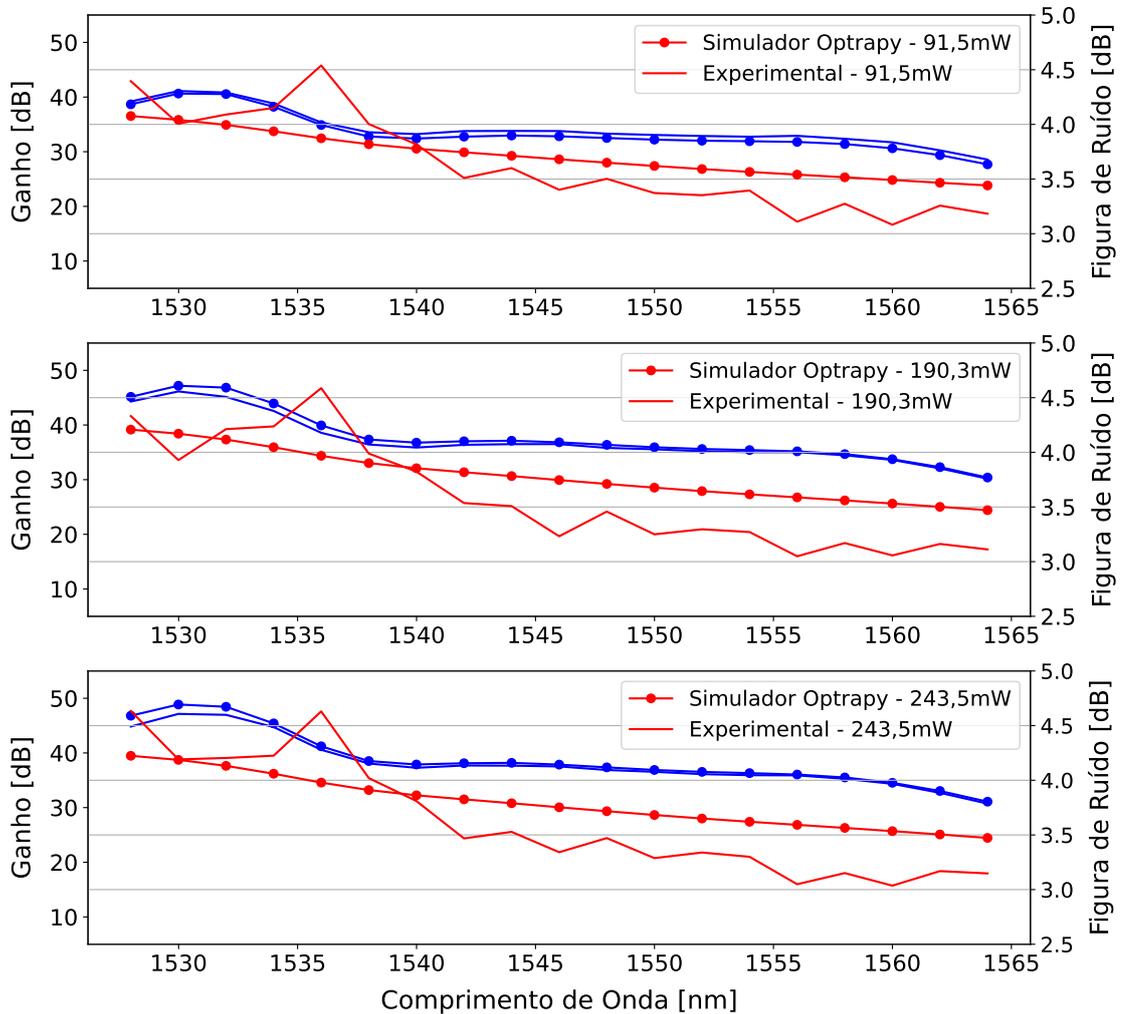


Figura 15 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando -30 dBm de potência total de entrada.

magnitude para os três casos implementados e com menor erro dentre os modelos. Dados os valores mostrados na Tabela 7, destacam-se o mesmo valor para o ganho dos bombeios de 190,3 mW e 243,5 mW com $0,11$ dB² e para o menor bombeio com valor de $0,23$ dB². Para a figura de ruído, o erro é obtido em torno de $0,1$ dB² para todas configurações.

Portanto, analisando os valores gerais do erro quadrático médio para os modelos experimental e simulado de todos casos, demonstra-se valores inferiores a 1 dB² para o perfil de ganho e em torno de $0,1$ dB² para a figura de ruído. Dessa forma, o simulador óptico garante elevada confiabilidade na simulação de um amplificador a fibra

Tabela 6 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando -15 dBm de potência total de entrada.

Sinais de bombeio	MSE	
	Ganho	Figura de Ruído
91,5 mW	0,9 dB^2	0,07 dB^2
190,3 mW	0,1 dB^2	0,07 dB^2
243,5 mW	0,12 dB^2	0,07 dB^2

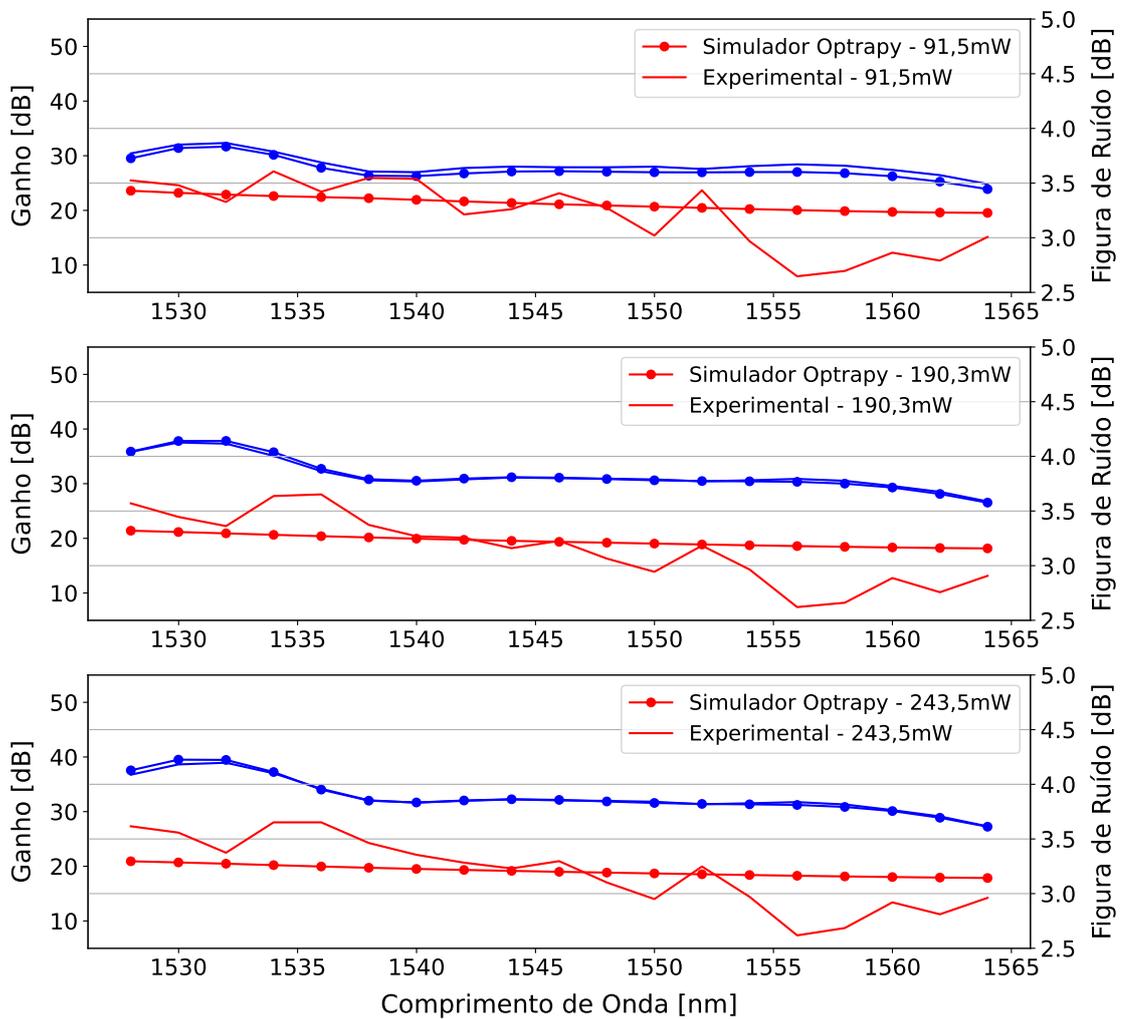


Figura 16 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando -15 dBm de potência total de entrada.

dopada com érbio, apresentando uma resposta equivalente a um amplificador projetado em laboratório e com fenômenos físicos reais. A partir disso, o uso do simulador se torna

Tabela 7 – Resultado do erro quadrático do perfil de ganho e figura de ruído dos modelos de EDFA experimental e simulado considerando 0 dBm de potência total de entrada.

Sinais de bombeio	MSE	
	Ganho	Figura de Ruído
91,5 mW	0,23 dB ²	0,1 dB ²
190,3 mW	0,11 dB ²	0,13 dB ²
243,5 mW	0,11 dB ²	0,12 dB ²

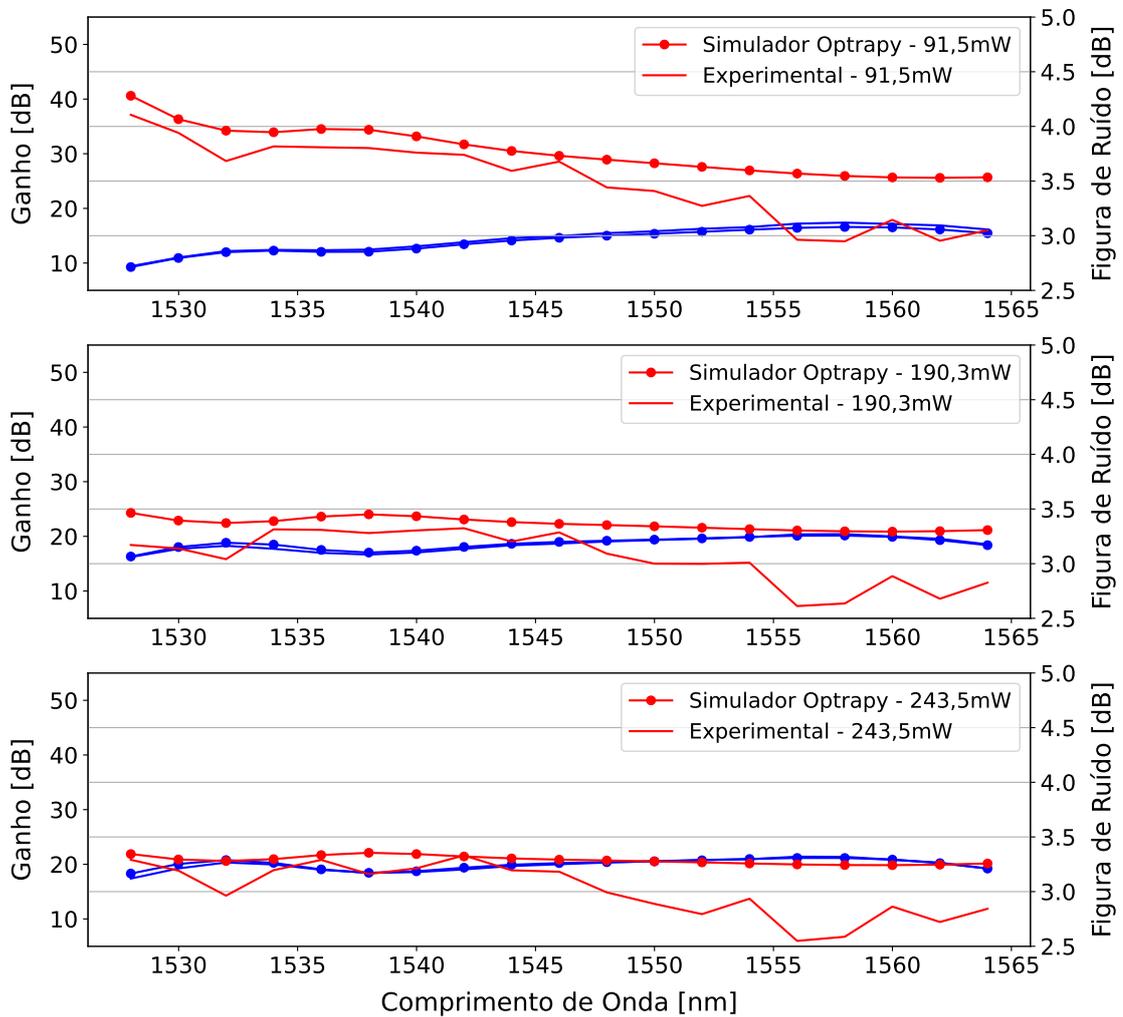


Figura 17 – Perfis de ganho (azul) e figura de ruído (vermelho) para os modelos de EDFA experimental e simulado considerando 0 dBm de potência total de entrada.

uma ferramenta eficaz e confiável para a modelagem de EDFAs, integrando inteligência artificial e algoritmos de otimização para a obtenção dos resultados posteriores.

5.3 Otimização do amplificador a fibra dopada

Nesta seção será abordado a implementação do processo de otimização do amplificador a fibra dopada como elemento óptico independente, ou seja, sem considerar o seu impacto sistêmico em um enlace óptico completo. Eventualmente, descrevendo as principais métricas de saída do amplificador e os parâmetros necessários para construção do modelo de otimização.

5.3.1 Otimização do perfil de ganho do EDFA nas bandas C e L

Como prova de conceito para a aplicação de algoritmos de otimização com múltiplos objetivos no projeto de amplificadores ópticos, inicialmente optou-se por realizar a otimização do perfil de ganho, visando a maximização do ganho médio e a minimização do *ripple* de ganho (diferença entre o máximo e o mínimo ganho dentre os canais amplificadas), em um EDFA operando na banda óptica C e na banda L. Considerou-se uma ampla faixa de comprimentos de fibra dopada e potências ópticas de bombeio, conforme listado nas Tabelas 8 e 9, como parâmetros de entrada para o algoritmo, permitindo estabelecer a configuração construtiva do EDFA que garante a maior excursão em seu ganho total com menor *ripple* de ganho. Esses critérios de otimização foram escolhidos visando obter-se uma configuração final que permita o controle de ganho do EDFA em uma rede dinâmica sem perturbar a equalização dos canais ou demandando GFFs com alto contraste.

O ganho é dado pela razão entre o sinal de saída amplificado e o sinal de entrada, como é expresso na Equação (5.1):

$$Gain_{lin} = \frac{p_{sout}}{p_{sin}} \quad (5.1)$$

em que, p_{sin} e p_{sout} são as potências de entrada e saída dos canais em Watts (W) e o $Gain_{lin}$ é o ganho dos canais em escala linear.

O *ripple* pode ser obtido a partir do perfil de ganho dos canais definindo o grau de desigualização entre os canais, obtendo os canais com o máximo e o mínimo ganho, assim como expressa a Equação (5.2):

$$ripple = \frac{\max(Gain_{lin})}{\min(Gain_{lin})} \quad (5.2)$$

De maneira convencional, o ganho dos estágios de amplificação é expressado em escala logarítmica (dB), sendo assim, o ganho em decibéis é calculado como mostra a Equação (5.3):

$$Gain_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{sout}}{p_{sin}} \right) \quad (5.3)$$

Portanto, de modo semelhante, o *ripple* em decibéis é calculado da seguinte maneira:

$$ripple_{dB} = \max(Gain_{dB}) - \min(Gain_{dB}) \quad (5.4)$$

Para o modelo de otimização a função de ganho médio é obtida pela Equação (5.5).

$$Gain_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N Gain_{lin}(i)}{N} \quad (5.5)$$

onde N é o número total de canais do perfil de ganho e o ganho médio em decibéis é dado por:

$$Gain_{med_dB} = 10 \cdot \log(Gain_{med}) \quad (5.6)$$

Dentro do modelo de otimização os parâmetros de resposta do amplificador são convertidos nas funções objetivos, essa conversão é necessária para a abstração de métricas sistêmicas pelo modelo do algoritmo. A função custo f_g é definida como o valor negativo do ganho médio devido a uma generalização da otimização no algoritmo. Sendo assim, o modelo é escolhido para minimizar todas as funções selecionadas, portanto é necessário a inversão de sinal para maximizar o ganho médio. As Equações (5.7) e (5.8) são descritas por:

$$f_r = ripple_{dB} \quad (5.7)$$

$$f_g = -Gain_{med_dB} \quad (5.8)$$

Na Figura 18 é mostrada a implementação do modelo de otimização para o ganho dos amplificadores, em que, nesse caso f_g e f_r formam a fronteira de Pareto com os valores das soluções obtidas. O algoritmo gera uma população inicial das posições de entrada sendo o nível do sinal, a potência de bombeio e o comprimento de EDF introduzidos como entradas para a rede neural, a qual fornece o ganho e o *ripple* para o algoritmo de otimização. O processo é realizado até o fim das iterações, onde f_g e f_r geram a fronteira contendo as soluções com os valores de bombeio e comprimento de EDF otimizados.

Em uma primeira análise, a abordagem foi em relação à construção do EDFA, portanto desempenho foi avaliado considerando três fibras dopadas (todas fabricadas pela *OFS Optics*): a convencional (MP-980), a otimizada para aplicações de alta potência (HP-980) e a otimizada para amplificação remota (LP-980). Nessa análise, para os três tipos de fibras dopadas foi utilizado um sinal de entrada de -20 dBm e bombeio co-propagante, com espectro de amplificação na banda C.

Por fim, analisou-se o impacto de variações na potência de entrada dos canais a serem amplificados, verificando-se o desempenho do amplificador considerando potências de 0 dBm, -10 dBm, -20 dBm e -30 dBm, as quais espera-se que resultem em amplificadores operando em diferentes condições. O processo de otimização considerou EDFs com comprimentos variando de 5 m até 35 m, com potências de bombeio variando de 20 mW até 900 mW centrado em 980 nm. Com base em tais parâmetros, a otimização baseada no MOWCA deverá resultar em fronteiras de Pareto relacionando os valores ótimos para o comprimento de fibra dopada e para a potência de bombeio para cada configuração do amplificador, permitindo definir a ótima configuração em termos do máximo ganho médio considerando todos os canais transmitidos, máxima excursão de ganho e mínimo *ripple* de ganho.

Para o projeto de otimização do EDFA na banda L, utilizando novamente um

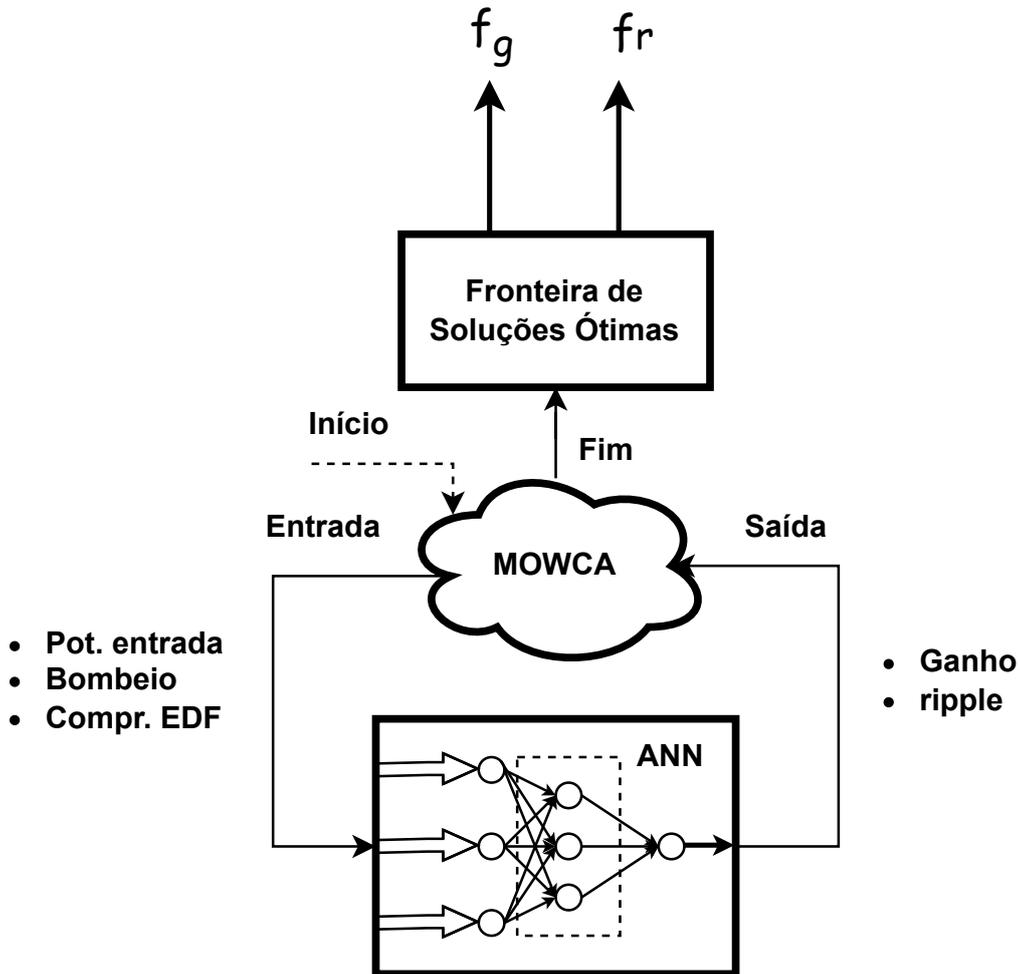


Figura 18 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de ganho.

modelo numérico de simulação óptica, a restrição por conta do tempo de processamento é mais significativa e limita bastante a otimização, uma vez que, demanda-se comprimentos de EDF 3 a 5 vezes maiores do que os ótimos para a banda C, conforme parâmetros de otimização mostrados na Tabela 9. Entretanto, conforme descrito anteriormente, com o uso de ANNs, a carga computacional dos modelos de otimização são equiparáveis e não varia de acordo com a banda de operação. Os canais de transmissão estão dentro de uma faixa de 41,694 nm espaçados em 50 GHz, o qual possibilita um total de 100 canais agrupados na banda L. Os parâmetros de bombeio e comprimento de EDF, variam em relação ao EDFA na banda C, para essa banda valores de bombeio inferior a 200 mW não conseguem suprir um ganho necessário para toda a região, devido aos maiores valores

requeridos de comprimentos de EDF, que foram variados em uma faixa ampla de 40 m até 110 m.

Do mesmo modo que a banda de operação sistêmica do amplificador em banda C, a variação do sinal de entrada ocorre para os quatro valores de potência total na banda L. O algoritmo WCA para otimização do EDFA na banda L possui as mesmas configurações das simulações anteriores, diferenciando-se do modelo de ANN aplicado ao laço de otimização, que fornecerá a resposta de acordo com os parâmetros específicos da respectiva banda espectral.

5.3.2 Otimização da figura de ruído do EDFA nas bandas C e L

A otimização do perfil de ganho possibilita escolher o arranjo de operação do amplificador que garante o máximo nível de amplificação com a menor desigualização entre os canais. Todavia, essa otimização não mede o grau de inserção do ruído emitido pelo amplificador, que tem um impacto significativo, especialmente considerando-se a concatenação de diversos estágios de amplificação nos sistemas ópticos modernos. O nível de inserção de ruído gerado pelo amplificador é medido pela figura de ruído, que está entre as principais métricas a ser considerada em projeto de estágios de amplificação, tal que, dois amplificadores distintos podem amplificar os sinais com o mesmo ganho, mas com desempenhos diferentes devido à figura de ruído de cada amplificador. A figura de ruído descrita nesse projeto é expressa pela Equação (5.9):

$$NF = \frac{1}{Gain_{lin}} + \frac{\left(\frac{1}{OSNR_{out}} - \frac{1}{OSNR_{in}}\right) \cdot p_s}{B \cdot f \cdot h} \quad (5.9)$$

Tabela 8 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para banda C e no algoritmo de otimização.

Parâmetros EDFA - Banda C		Parâmetros WCA ¹	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Canais	96	N_{pop}	50
Comprimento de onda [nm]	1527,6 até 1565,5	d_{max}	10^{-16}
Potência de entrada [dBm]	-30 até 0	N_{sr}	4
Potência de bombeio [mW]	20 até 900	n	2
Comprimento EDF [m]	5 até 35	N_{fe}	25000

¹ N_{pop} é o tamanho da população; d_{max} compara a distância entre mar e rio que intensifica a busca próxima ao mar; N_{sr} é o número de rios adicionado com o mar; n é a dimensão das variáveis de entrada; e N_{fe} é o número de avaliações de funções para cada fronteira de Pareto.

Tabela 9 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para banda L e no algoritmo de otimização.

Parâmetros EDFA - Banda L		Parâmetros WCA ¹	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Canais	100	N_{pop}	50
Comprimento de onda [nm]	1568,362 até 1610,056	d_{max}	10^{-16}
Potência de entrada [dBm]	-30 até 0	N_{sr}	4
Potência de bombeio [mW]	200 até 900	n	2
Comprimento EDF [m]	40 até 110	N_{fe}	25000

onde, $Gain_{lin}$ é o ganho do sinal em escala linear calculado na Equação (5.1); $OSNR_{out}$ e $OSNR_{in}$ são a razão sinal-ruído óptica de saída e entrada em escala linear, respectivamente; p_s é a potência do sinal de entrada em Watts; B é a largura de banda de referência do canal em Hertz; f é a frequência do canal em Hertz; e h é a constante de Planck. Em específico, $OSNR_{in}$, $OSNR_{out}$ e f podem ser expressas de acordo com as equações a seguir:

$$OSNR_{in} = \frac{p_{s_{in}}}{P_{ASE_{in}}} \quad (5.10)$$

$$OSNR_{out} = \frac{p_{s_{out}}}{P_{ASE_{out}}} \quad (5.11)$$

$$f = \frac{c}{\lambda_s} \quad (5.12)$$

sendo $p_{s_{in}}$ e $p_{s_{out}}$ a potência do sinal de entrada e de saída em Watts, respectivamente; $P_{ASE_{in}}$ e $P_{ASE_{out}}$ as potência do ruído ASE na entrada e na saída do amplificador em Watts; c é a velocidade da luz no vácuo em metros por segundo; e λ_s é o comprimento de onda do canal em nanômetros.

A representação da figura de ruído em decibéis, como é geralmente apresentada, é obtida de acordo com a Equação (5.13):

$$NF_{dB} = 10 \cdot \log(NF) \quad (5.13)$$

Na Tabela 10 são mostrados os valores de alguns parâmetros fixos necessários para o cálculo da figura de ruído. Note, que a $OSNR_{in}$ é predeterminada na modelagem

sistêmica, pois na entrada do amplificador o ruído é muito inferior ao sinal óptico de transmissão ($p_{s_{in}} \gg P_{ASE_{in}}$), portanto, a $OSNR_{in}$ pode ser considerada em termos de escala linear muito elevada dado o nível de sinal na transmissão, mas para o método de projeto de amplificadores é fixado em um valor na escala de decibéis.

Tabela 10 – Parâmetros adotados no modelo de simulação para o cálculo de figura de ruído dos amplificadores de banda C e banda L.

Parâmetros da Figura de Ruído	
Parâmetro	Valor
OSNR de entrada [dB]	70
Largura de banda de referência do canal [GHz]	12,5
Velocidade da luz [m/s]	299792458
Constante de Planck [$m^2 kg/s$]	$6,62607015 \cdot 10^{-34}$

Neste cenário, a otimização da figura de ruído é especificada somente para o sinal de 0 dBm, de forma a simplificar a resposta do modelo sistêmico. Sendo assim, o fluxo de otimização conta com os mesmos parâmetros da otimização do perfil de ganho para a banda C e banda L apresentados nas Tabelas 8 e 9. Nessa otimização as funções objetivo do modelo sistêmico consideradas são: a figura de ruído média e o *ripple* de ganho, tal que, os objetivos da otimização é minimizar tanto a figura de ruído média quanto o *ripple*.

A otimização leva em consideração a figura de ruído média do perfil de canais, logo a Equação (5.14) demonstra o cálculo da figura de ruído média.

$$NF_{med} = \frac{\sum_{i=1}^K NF(i)}{K} \quad (5.14)$$

onde K é o número total de canais do perfil da figura de ruído e a figura de ruído média em decibéis é dada por:

$$NF_{med_dB} = 10 \cdot \log(NF_{med}) \quad (5.15)$$

As funções objetivos do fluxo de otimização são obtidas nas Equações (5.16) e (5.17).

$$f_r = ripple_{dB} \tag{5.16}$$

$$f_{nf} = NF_{med_dB} \tag{5.17}$$

De modo semelhante ao modelo do perfil de ganho, o modelo do fluxo de otimização da figura de ruído é apresentado na Figura 19, onde o processo iterativo acontece gerando os parâmetros de entrada e atualizando as respostas da rede neural, nesse caso sendo o *ripple* e a figura de ruído, formando a fronteira de soluções pelas funções f_{nf} e f_r com os valores ótimos de comprimento de EDF e bombeio.

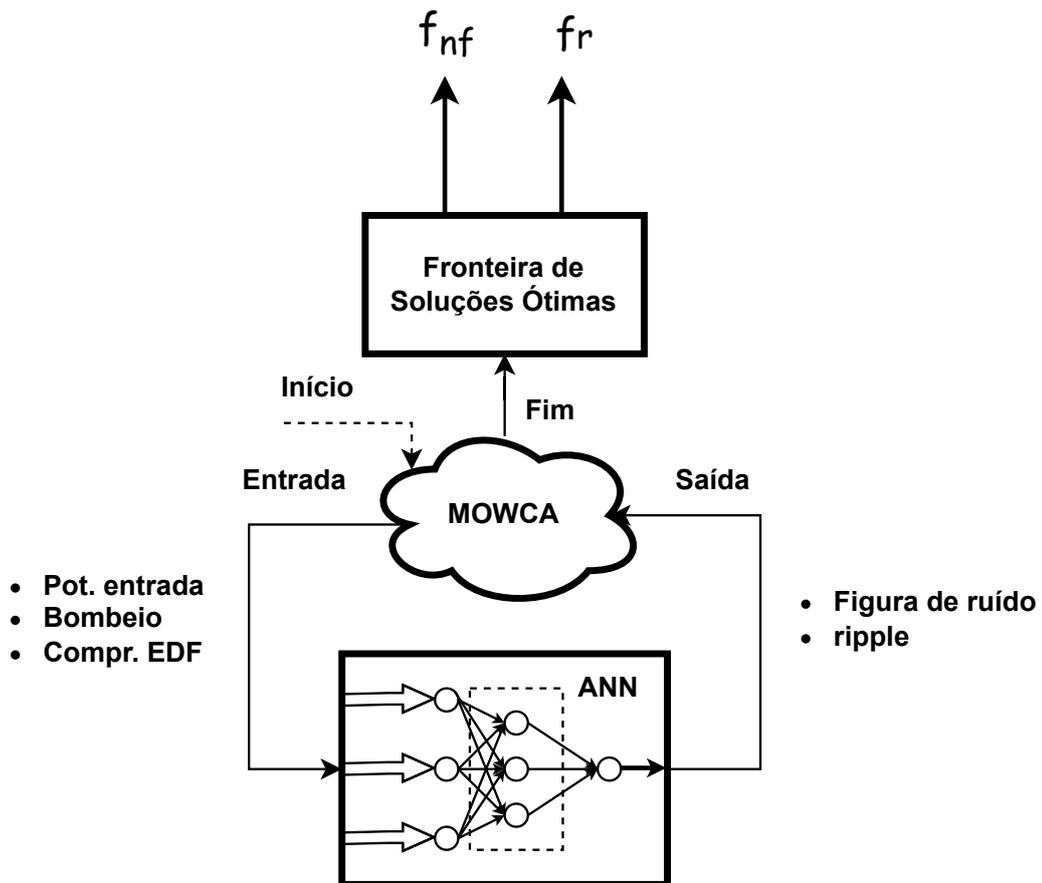


Figura 19 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de figura de ruído.

5.3.3 Otimização conjunta dos perfis de ganho e figura de ruído

A seguir, realizou-se a integração entre as duas otimizações anteriores, de modo que o modelo sistêmico antes bidimensional (duas funções custo) passa a ser um modelo de otimização tridimensional. Essa flexibilidade do número de dimensões do sistema de otimização é em virtude de o algoritmo ser multiobjetivo, que garante a otimização de diferentes objetivos simultaneamente com número de dimensões variável. Desse modo, a otimização agora aborda os três objetivos já descritos anteriormente, visando a maximização do ganho médio, a minimização do *ripple* e da figura de ruído média. As funções objetivos consideradas para o fluxo de otimização tridimensional permanecem sendo f_g , f_r e f_{nf} , conforme anteriormente definidas.

O novo fluxo de otimização pode ser observado na Figura 20, onde a fronteira de soluções apresenta uma resposta em três dimensões para as funções consideradas. De maneira diferente das outras implementações, nesse modelo sistêmico a rede neural retorna como resposta para o algoritmo o ganho, o *ripple* e a figura de ruído simultaneamente para completar o laço de otimização, o sistema mantém o mesmo número de iterações dos modelos anteriores, de modo que, a extração de mais métricas não altera e mantém o mesmo modelo sistêmico, demonstrando desempenho similar com o aumento de variáveis. A fronteira ao fim do processo relaciona uma região tridimensional entre f_g , f_r e f_{nf} para os parâmetros de entrada otimizados.

5.4 Análise da otimização do perfil de ganho para os EDFAs em banda C e L

As análises a seguir consistem na otimização do perfil de ganho do amplificador para a banda C e L, a partir da análise das duas métricas do perfil de ganho propostas: o ganho médio e o *ripple*. As análises verificam o desempenho de diferentes tipos de fibras dopadas para a amplificação e a variação da potência total de entrada em cada banda.

5.4.1 Análise de desempenho dos tipos de fibras dopadas

As análises realizadas verificaram o desempenho dos amplificadores considerando o uso de diferentes tipos de fibra dopada (*i.e.*, LP-980, MP-980 e HP-980), para

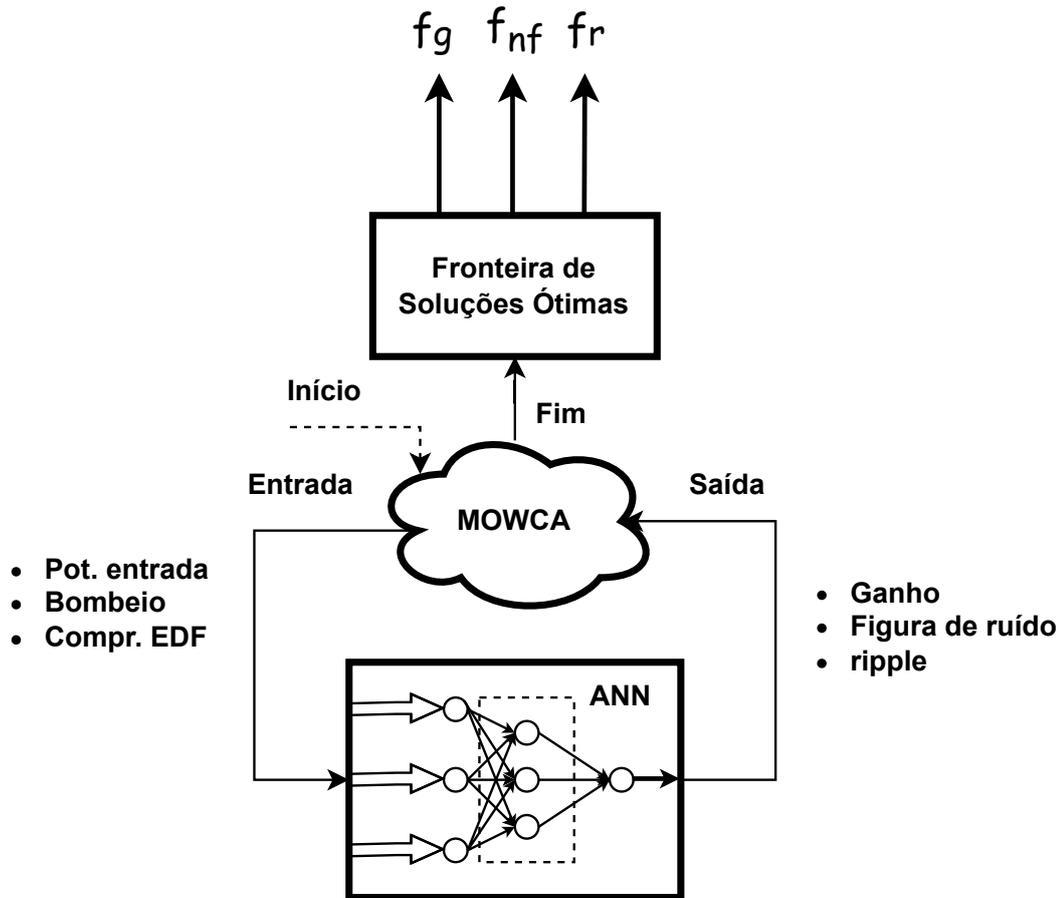


Figura 20 – Fluxo de otimização do modelo sistêmico implementado para otimização do perfil de ganho e figura de ruído concatenados.

–20 dBm de potência total de entrada distribuída em um conjunto de 96 canais na banda C e esquema co-propagante de bombeio. Para representar os gráficos definidos pela fronteira de Pareto, a fronteira é determinada por diferentes formatos de símbolos, cores e tamanhos. Em específico, os formatos de símbolos diferenciam as configurações investigadas, como indicada na legenda de cada figura, as cores representam uma escala das potências de bombeio ótimas em cada símbolo, como indicado na barra de cores, e o tamanho é uma representação qualitativa do comprimento ótimo da EDF, novamente para cada símbolo apresentado.

As múltiplas soluções obtidas a partir da otimização do amplificador óptico denotam a diversificação da faixa operacional com os parâmetros ótimos de acordo com a finalidade apresentada, conforme [57]. Os valores obtidos para otimização das fibras

MP-980, HP-980 e LP-980 são mostrados na Figura 21, na qual observa-se duas regiões: uma região de ganho linear crescente e uma região de saturação do ganho. Nessa análise, é possível notar que a convencional MP-980 e a HP-980 (representada por triângulos e estrelas, respectivamente) apresentam resultados similares de variabilidade do ganho em função *ripple*, enquanto menores valores de ganho para todas as configurações neste cenário são observados para a LP-980. De fato, a LP-980 foi especialmente projetada para prover ganho remoto em sistemas sem repetição, sendo adaptada para amplificar sinais de entrada de baixa potência e otimizada para ser bombeada em 1480 nm, justificando seu baixo desempenho nessa aplicação mais convencional. Comparando-se as duas fibras de melhor desempenho, este cenário específico não requer a amplificação de sinais de entrada de alta potência, onde a HP-980 poderia ser a mais adequada. Como resultado, a MP-980 apresenta melhor compromisso entre desempenho e custo, com desempenho excelente aliado ao baixo custo de uma fibra convencional.

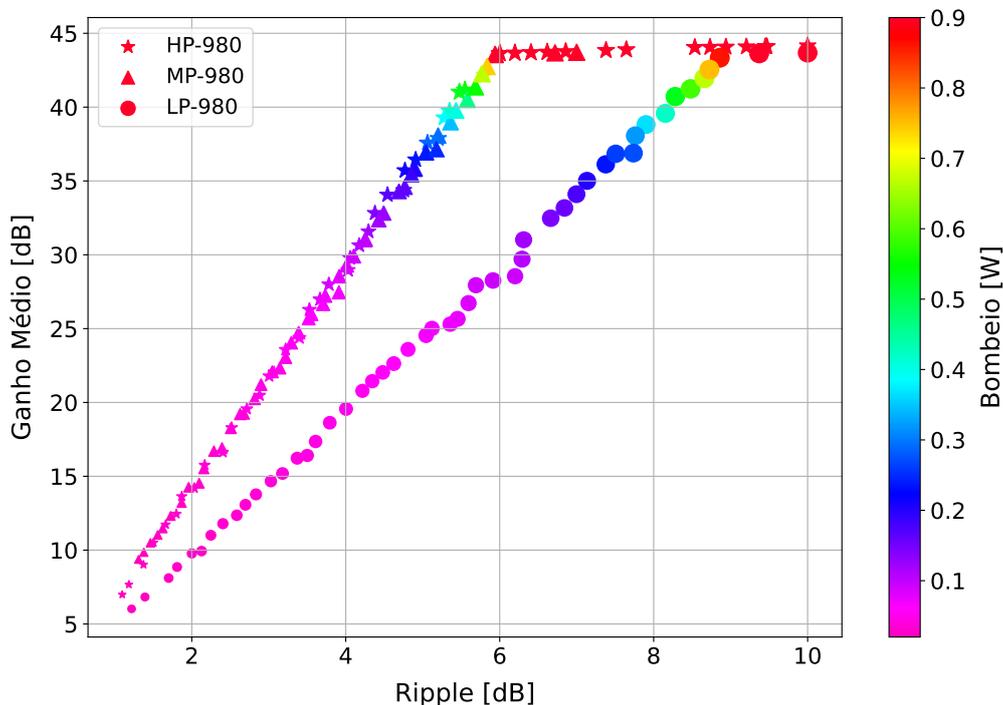


Figura 21 – Região de soluções do ganho em função do *ripple* para as fibras dopadas com érbio do tipo HP, MP e LP. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas das fibras dopadas tem mínimo: {5,7 m, 6,0 m, 5,5 m} e máximo: {32,8 m, 27,3 m, 35,0 m}, respectivamente.

Na Tabela 11, os pontos selecionados para a análise são os mínimos e máxi-

mos do *ripple* correspondente ao valor de ganho da região linear e um valor considerado satisfatório para um amplificador óptico em operação de um enlace de transmissão. Em um enlace de longa distância com amplificadores espaçados em trechos de até uma centena de quilômetros, a atenuação total de cada trecho geralmente é em torno de 20 dB, considerando uma fibra óptica SMF padrão com coeficiente de atenuação de 0,2 dB/km. Portanto, o amplificador precisaria de 20 dB de ganho para compensar a perda dos trechos, esse ponto é encontrado na curva de otimização do ganho para cada tipo de fibra dopada.

Tabela 11 – Resultados dos tipos de fibras dopadas para amplificação considerando os pontos de mínimo (“Min”) e máximo (“Máx”) ganho e uma configuração intermediária (“Inter”) adequada para a amplificação de enlaces com longo alcance.

Tipos de fibras dopadas	Métrica de Avaliação					
	<i>Min Ripple</i>	<i>Min Ganho</i>	<i>Inter Ripple</i>	<i>Inter Ganho</i>	<i>Máx Ripple</i>	<i>Máx Ganho</i>
MP-980	1,3 dB	9,4 dB	2,8 dB	20,2 dB	5,9 dB	43,6 dB
LP-980	1,2 dB	6,0 dB	4,2 dB	20,8 dB	8,9 dB	43,3 dB
HP-980	1,1 dB	7,0 dB	2,8 dB	20,0 dB	6,0 dB	43,6 dB

Destacando-se os parâmetros otimizados (bombeio e comprimento de EDF), considerando as mesmas faixas de mínimo, intermediário e máximo ganho, as fibras MP-980 e HP-980 apresentam as configurações otimizadas semelhantes, com valores mínimos (20 mW e 6 m), intermediários (50 mW e 15 m) e máximos (900 mW e 33 m). Em relação a fibra LP-980, os parâmetros obtiveram valores mínimos (20 mW e 5,5 m), intermediários (54 mW e 17 m) e máximos (861 mW e 35 m). Na tabela 12, é mostrado os valores obtidos de bombeio e comprimento de EDF para a faixa linear de ganho.

Em resumo, os tipos de fibras dopada com érbio possuem uma variabilidade de acordo com suas características de fabricação, sendo eles: os coeficientes de absorção e emissão nos comprimentos de onda do bombeio e do sinal a ser amplificado, os valores de atenuação (mais elevados do que as fibras de transmissão), a concentração de dopagem do érbio por comprimento de fibra, o diâmetro do núcleo dopado e entre outros. Algumas informações são fornecidas em detalhes pelos fabricantes e outras de maneira geral como uma curva ou gráfico, tal que, implica-se em uma maior dificuldade em caracterizar diferentes fibras dopadas em bancada de laboratório ou por meio de simulação, aumentando a variabilidade. Por meio de análises funcionais com o EDFA, o tipo de EDF escolhida

Tabela 12 – Resultados dos parâmetros otimizados das fibras dopadas para amplificação considerando os pontos de mínimo (“*Min*”) e máximo (“*Máx*”) ganho e uma configuração intermediária (“*Inter*”) adequada para a amplificação de enlaces com longo alcance.

Tipos de fibras dopadas	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	Ganho
MP-980	20,0 <i>mW</i>	6,0 <i>m</i>	9,37 <i>dB</i>
	22,0 <i>mW</i>	6,7 <i>m</i>	10,0 <i>dB</i>
	42,0 <i>mW</i>	12,9 <i>m</i>	20,0 <i>dB</i>
	90,0 <i>mW</i>	19,0 <i>m</i>	30,0 <i>dB</i>
	460,0 <i>mW</i>	25,3 <i>m</i>	40,0 <i>dB</i>
	900,0 <i>mW</i>	27,3 <i>m</i>	43,6 <i>dB</i>
LP-980	20,0 <i>mW</i>	5,5 <i>m</i>	6,0 <i>dB</i>
	28,0 <i>mW</i>	8,7 <i>m</i>	10,0 <i>dB</i>
	54,0 <i>mW</i>	17,0 <i>m</i>	20,0 <i>dB</i>
	109,0 <i>mW</i>	25,1 <i>m</i>	30,0 <i>dB</i>
	529,0 <i>mW</i>	33,2 <i>m</i>	40,0 <i>dB</i>
	861,0 <i>mW</i>	35,0 <i>m</i>	43,3 <i>dB</i>
HP-980	20,0 <i>mW</i>	5,7 <i>m</i>	6,98 <i>dB</i>
	28,0 <i>mW</i>	7,6 <i>m</i>	10,0 <i>dB</i>
	50,0 <i>mW</i>	15,0 <i>m</i>	20,0 <i>dB</i>
	109,0 <i>mW</i>	23,1 <i>m</i>	30,0 <i>dB</i>
	420,0 <i>mW</i>	30,0 <i>m</i>	40,0 <i>dB</i>
	900,0 <i>mW</i>	32,8 <i>m</i>	43,6 <i>dB</i>

acaba sendo, muitas vezes, a que possui maior disponibilidade e acessibilidade com uso de EDFAs comerciais, aliada com a melhor relação de custo-benefício.

5.4.2 Análise da variação da potência total de entrada

Uma investigação final do ganho do amplificador foi realizada com a configuração ótima definida previamente, ou seja, considerando a fibra MP-980 com um esquema de bombeio co-propagante, operando com diferentes potências totais de entrada.

5.4.2.1 Ganho em banda C

Para o caso da variação de potência de entrada total do sistema WDM com EDFA na banda C, as curvas de Pareto levantadas para cada valor de potência de entrada com a utilização da ANN são mostradas na Figura 22. Os resultados indicam, como esperado, o EDFA saturando em diferentes patamares de ganho, entretanto, com uma

região distinta de ganho linear e com uma pequena penalidade de *ripple* de ganho. Esse perfil de sobreposição das curvas de Pareto com ANN, mantém a equidade do comprimento da EDF ótimo para o mesmo valor de ganho médio e *ripple* com variação do bombeio para as potências de entrada distintas. Nesse contexto, a região otimizada com parâmetros que apresentam melhor desempenho do EDFA é a faixa linear de ganho que varia com o *ripple*, tal que o incremento do ganho implica na redução dos níveis de sinais de entrada.

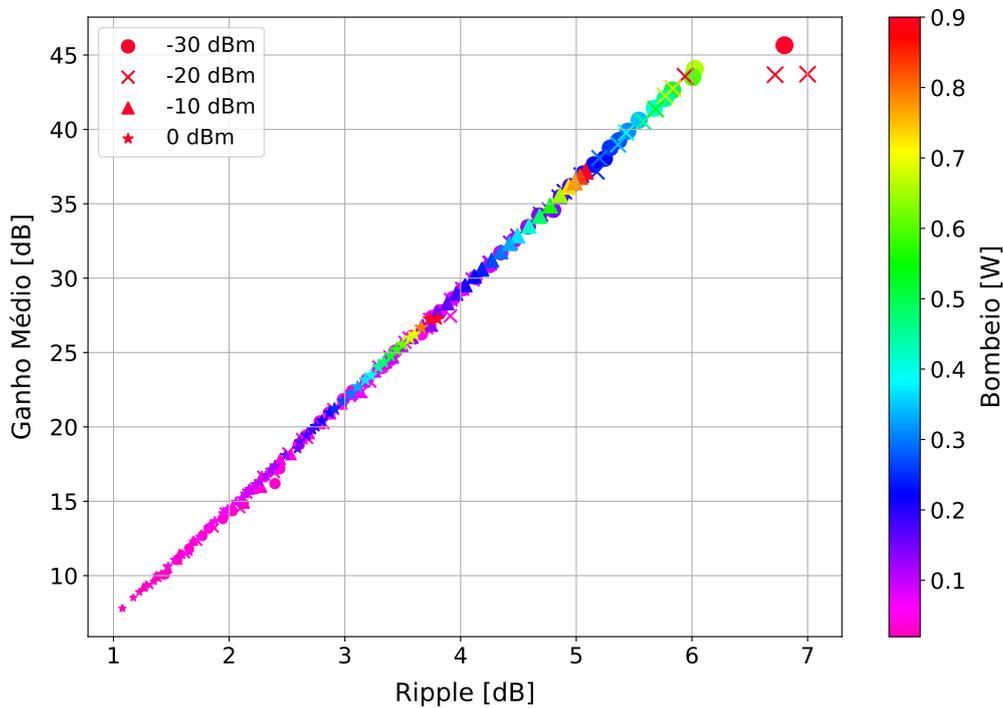


Figura 22 – Soluções da investigação do perfil de ganho do EDFA em banda C com potência de entrada variável. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas dos níveis de potência de entrada com -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm e 0 dBm tem mínimo: $\{6,5$ m, $6,0$ m, $5,9$ m, $5,0$ m $\}$ e máximo: $\{30,0$ m, $27,3$ m, $23,0$ m, $17,0$ m $\}$, respectivamente.

As curvas apresentadas no gráfico acima definem os limites de cada região para a respectiva potência de entrada. De certo modo, caso o amplificador precise do maior ganho possível, é possível incrementá-lo elevando o nível do nível de bombeio, tal que afasta-se da região de saturação do amplificador, obtendo um menor *ripple* de acordo com as configurações otimizadas como mostrado nas curvas. Entretanto, a região de maior interesse é a que possui a sobreposição de todas as curvas, demonstrando maior grau de operação com a variação do sinal de entrada. Ampliando essa região, na Figura 23 observa-

se a sobreposição das curvas com um maior detalhamento. Portanto, considerando uma condição de operação para o amplificador garantir 20 dB de ganho médio e 2,8 dB de *ripple*, é necessário ter 13 m de EDF e variar o bombeio para cada ponto de operação do sinal de entrada, permitindo controlar o ganho pelo ajuste da potência de bombeio do EDFA com grande flexibilidade operacional.

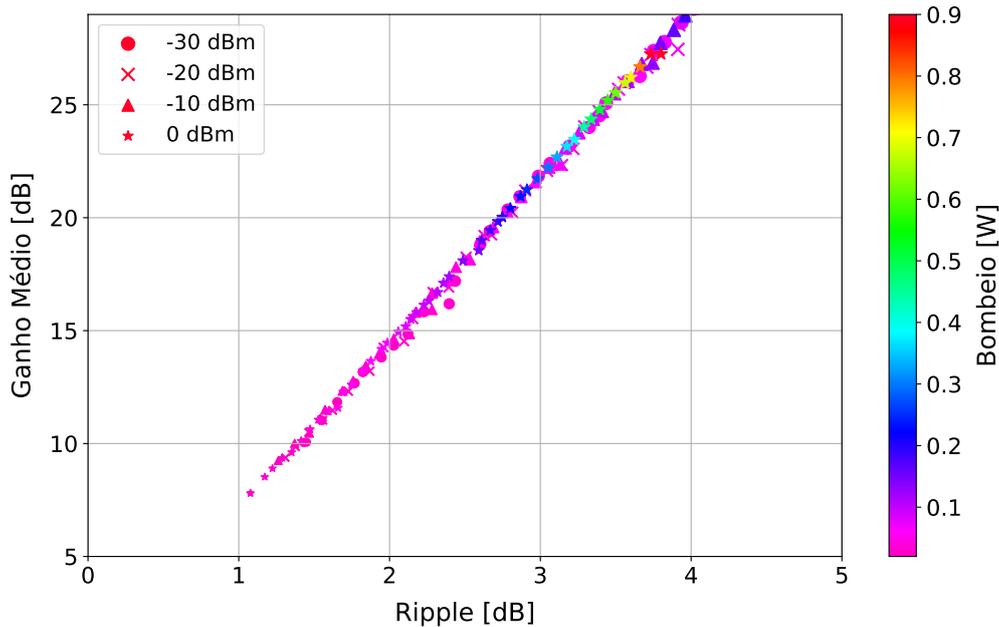


Figura 23 – Ampliação da fronteira de soluções para investigação do perfil de ganho do EDFA em banda C com potência de entrada variável.

A fim de visualizar o mapeamento completo da curva de sobreposição dos sinais de entrada para amplificação na banda C, a Tabela 13 mostra os valores dos parâmetros otimizados (nível de bombeio e comprimento de EDF) correspondente a diversas faixas de ganho do amplificador. Nota-se, que o crescimento da curva em relação ao ganho mantém o comprimento de EDF fixo para um bombeio variável correspondente ao sinal de entrada, demonstrando a possibilidade do seu ponto operacional ser ajustado dinamicamente em uma rede óptica elástica.

5.4.2.2 Ganho em banda L

De forma análoga ao projeto otimizado do EDFA na banda C, as figuras de mérito (ganho médio e *ripple*) são também consideradas na otimização do amplificador na banda L, conforme a análise realizada em [58]. Na Figura 24, são mostradas as fronteiras

Tabela 13 – Resultados dos parâmetros otimizados para sinais de entradas distintos para amplificação considerando diversos pontos da faixa de ganho do amplificador para banda C.

Sinais de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	Ganho
0 dBm	27,0 mW	5,0 m	7,8 dB
	36,0 mW	6,5 m	10,0 dB
	81,0 mW	9,7 m	15,0 dB
	195,0 mW	12,7 m	20,0 dB
	570,0 mW	15,9 m	25,0 dB
	900,0 mW	17,0 m	27,2 dB
-10 dBm	20,0 mW	5,9 m	9,25 dB
	22,0 mW	6,5 m	10,0 dB
	36,0 mW	9,7 m	15,0 dB
	55,0 mW	12,7 m	20,0 dB
	105,0 mW	15,9 m	25,0 dB
	146,0 mW	17,0 m	27,2 dB
-20 dBm	20,0 mW	6,0 m	9,4 dB
	22,0 mW	6,5 m	10,0 dB
	30,0 mW	9,7 m	15,0 dB
	42,0 mW	12,7 m	20,0 dB
	61,0 mW	15,9 m	25,0 dB
	70,0 mW	17,0 m	27,2 dB
-30 dBm	20,0 mW	6,5 m	10,0 dB
	25,0 mW	8,0 m	12,5 dB
	30,0 mW	9,7 m	15,0 dB
	41,0 mW	12,7 m	20,0 dB
	57,0 mW	15,9 m	25,0 dB
	67,0 mW	17,0 m	27,2 dB

de Pareto para a mesma análise na banda C (*i.e.*, variação dos níveis de potência de entrada total utilizando o tipo de fibra MP-980 com bombeio co-propagante). As curvas também apresentam duas regiões bem definidas, a primeira com uma larga excursão linear de ganho e pequena variação de *ripple*, ocorrendo a sobreposição das curvas; a segunda definida pelo regime de saturação do bombeio, o qual o ganho varia não linearmente com o *ripple* que tem um aumento intensificado. A sobreposição das curvas na região linear demonstra aspecto similar a otimização na banda C, tal que, as EDFs possuem o comprimento similar para um determinado ganho e um valor de *ripple* equivalente, com variação exclusivamente no bombeio para potências de entrada distintas, sendo oportunamente a região de interesse.

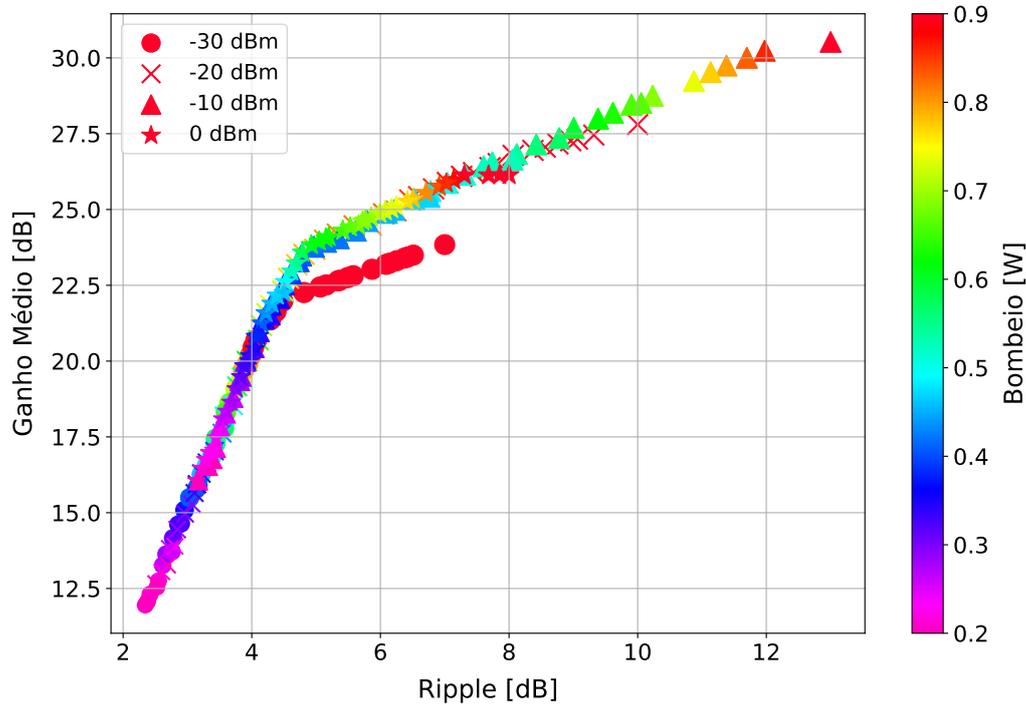


Figura 24 – Soluções da investigação do perfil de ganho do EDFA em banda L com potência de entrada variável. As variações do comprimento de EDF obtido nas curvas dos níveis de potência de entrada com -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm e 0 dBm tem mínimo: $\{61,0$ m, $64,3$ m, $81,9$ m, $81,9$ m $\}$ e máximo: $\{102,3$ m, $110,0$ m, $110,0$ m, $110,0$ m $\}$, respectivamente.

Da mesma maneira, ampliando a região de interesse das curvas otimizadas em banda L, uma visão mais detalhada é apresentada na Figura 25. Nota-se, que em relação ao tamanho dos símbolos para o ganho da banda L, são pontos visivelmente maiores em virtude do comprimento de EDF ser significativamente maior que a configuração do amplificador utilizado na banda C. Sendo assim, entre a faixa de operação de ganho linear do amplificador com 20 dB e $3,8$ dB de *ripple*, resulta-se em aproximadamente 100 m de EDF com bombeio variável para as respectivas entradas.

Os parâmetros otimizados de nível de bombeio e comprimento de EDF possuem grandezas distintas mas seguem o mesmo comportamento na região de sobreposição, de forma análoga à análise anterior. Na Tabela 14, visualiza-se os parâmetros para a banda L, demonstrando as características do amplificador com o comprimento de fibra dopada fixo e um bombeio variável em função da potência do sinal de entrada.

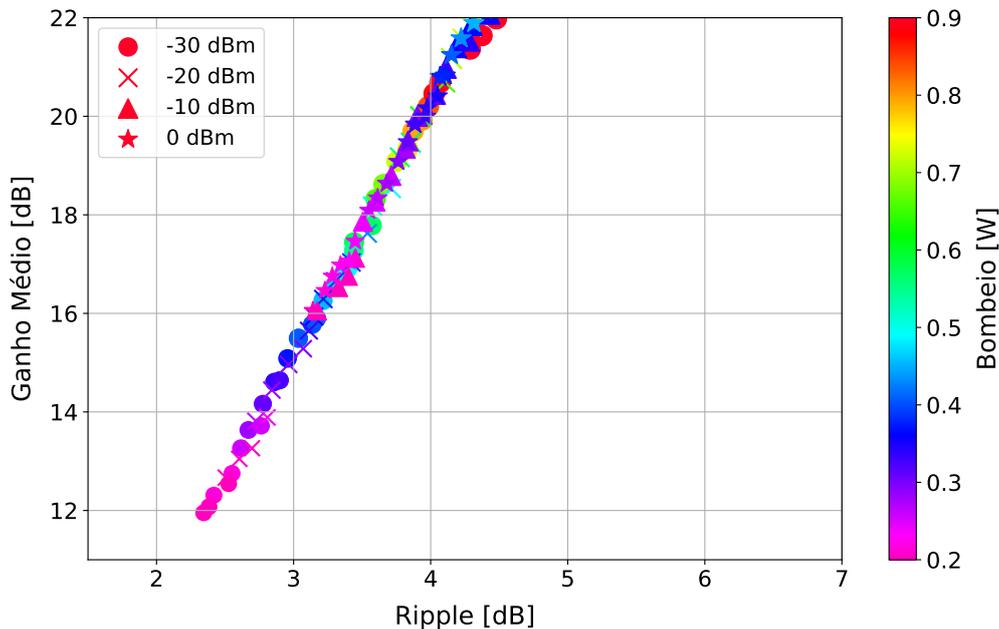


Figura 25 – Ampliação da fronteira de soluções para investigação do perfil de ganho do EDFA em banda L com potência de entrada variável.

5.5 Análise da otimização da figura de ruído dos EDFAs na banda C e L

Além da análise do ganho dos amplificadores da banda C e L, outro parâmetro crucial a ser otimizado é a figura de ruído do EDFA. Essa análise consiste em mensurar a região operacional com o menor impacto do ruído ASE emitido pelo amplificador no sinal a ser amplificado. De maneira simplificada, essa investigação considera um valor total de sinal de entrada de 0 dBm, sendo os parâmetros selecionados a figura de ruído média de todos canais e o *ripple* do valor do ganho.

5.5.1 Figura de ruído em banda C

A resposta da figura de ruído do amplificador na banda C em função do *ripple* é mostrada na Figura 26. A partir dela, percebe-se que a otimização resulta na diminuição do valor da figura de ruído do amplificador com o incremento do valor do *ripple*, consequentemente, com o aumento do bombeio. Note, que a figura de ruído tem o decréscimo em função do *ripple* ($< 3,5$ dB), a partir desse valor, a figura de ruído amortece o decaimento. A região do bombeio acompanha o decaimento da figura de ruído até 600 mW,

Tabela 14 – Resultados dos parâmetros otimizados para sinais de entradas distintos para amplificação considerando diversos pontos da faixa de ganho do amplificador para banda L.

Sinais de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	Ganho
0 dBm	200,0 mW	81,9 m	16,06 dB
	278,0 mW	93,2 m	18,0 dB
	340,0 mW	100,2 m	20,0 dB
	603,0 mW	110,0 m	23,8 dB
-10 dBm	200,0 mW	81,9 m	16,1 dB
	261,0 mW	93,2 m	18,0 dB
	303,0 mW	100,2 m	20,0 dB
	420,0 mW	110,0 m	23,8 dB
-20 dBm	200,0 mW	64,3 m	12,7 dB
	332,0 mW	77,8 m	15,0 dB
	620,0 mW	100,2 m	20,0 dB
	770,0 mW	110,0 m	22,7 dB
-30 dBm	200,0 mW	61,0 m	12,0 dB
	370,0 mW	76,2 m	15,0 dB
	820,0 mW	100,2 m	20,0 dB
	900,0 mW	102,3 m	22,0 dB

alcançando o valor máximo de bombeio na saturação da figura de ruído.

Para mapear a curva da figura de ruído, seleciona-se pontos ao longo da fronteira de Pareto para identificar os valores dos parâmetros obtidos da otimização, como mostra a Tabela 15. Nota-se que os valores otimizados presentes na curva de figura de ruído foram também visualizados na curva de ganho do amplificador anteriormente analisada, demonstrando uma correlação entre as curvas.

Tabela 15 – Resultados dos parâmetros otimizados para 0 dBm de potência total de entrada considerando diversos pontos da faixa de figura de ruído do amplificador para banda C.

Sinal de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	Figura de Ruído
0 dBm	27,0 mW	5,0 m	4,18 dB
	32,0 mW	6,2 m	4,0 dB
	83,0 mW	9,7 m	3,7 dB
	197,0 mW	12,7 m	3,33 dB
	570,0 mW	15,9 m	3,16 dB
	900,0 mW	17,0 m	3,12 dB

Essa curva de redução da figura de ruído em função do *ripple* tem um com-

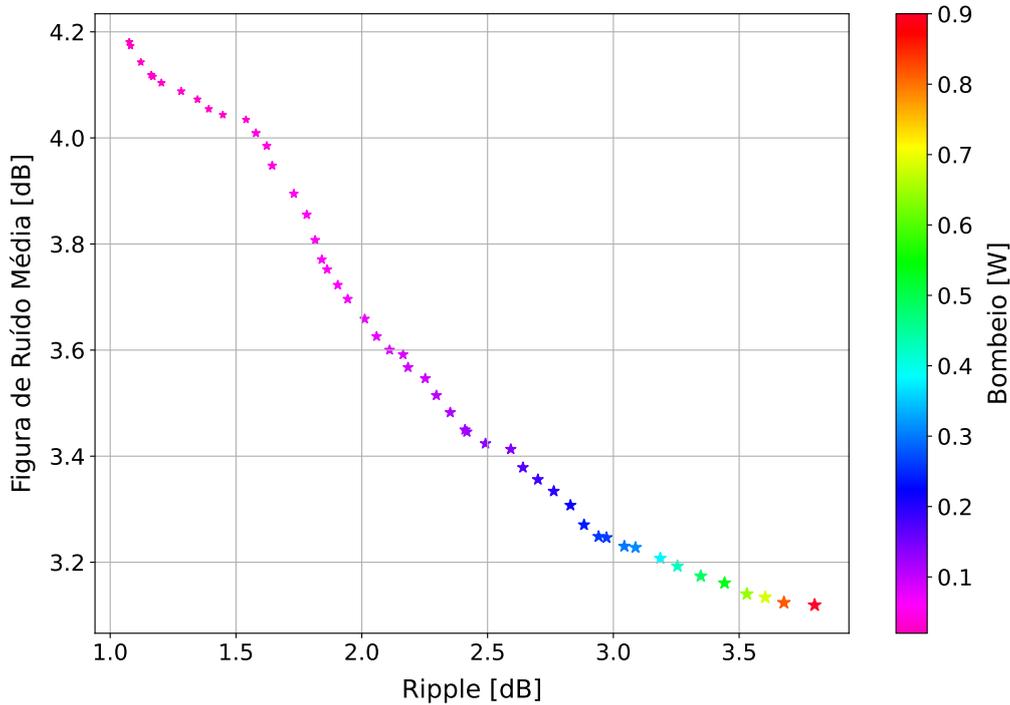


Figura 26 – Soluções obtidas da investigação da figura de ruído do EDFA em banda C com potência de entrada 0 dBm. A variação do comprimento de EDF obtido na curva tem mínimo de 5,0 m e máximo de 17,0 m.

portamento do aumento de bombeio semelhante à curva de ganho. Nesse contexto, é interessante, além das duas funções, adicionar o ganho na investigação e realiza-se uma otimização considerando as 3 funções objetivos simultaneamente. Na Figura 27, observa-se o resultado da otimização com o ganho incluído, nessa otimização percebe-se a relação entre as curvas do ganho e da figura de ruído para 0 dBm de potência total de entrada. Os valores dos parâmetros otimizados obtidos estão presentes nas duas investigações, dessa forma, conclui-se que ao otimizar a curva de ganho, a curva da figura de ruído é otimizada para a região com valores otimizados, da mesma maneira que, ao otimizar a figura de ruído, a curva de ganho otimizada do amplificador é obtida indiretamente.

5.5.2 Figura de ruído em banda L

Para a otimização da banda L, verifica-se na Figura 28 a região com a mínima figura de ruído média na banda L. Nesse caso, a fronteira de Pareto pode ser novamente segmentada em duas regiões: a primeira com baixo *ripple* (< 5 dB), na qual tem-se uma

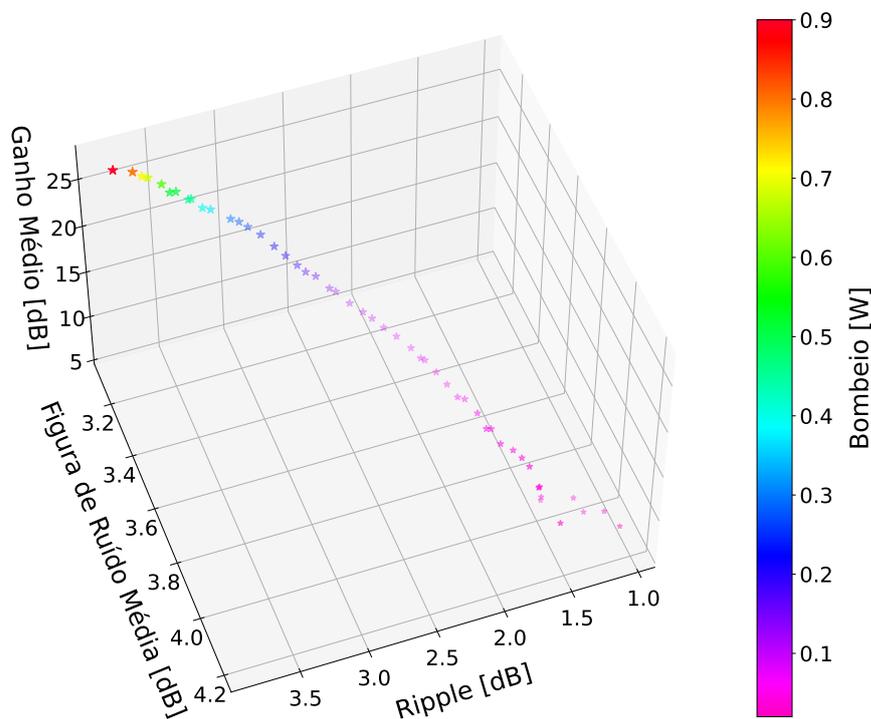


Figura 27 – Fronteira de soluções em três dimensões para investigação da figura de ruído do EDFA em banda C com potência de entrada 0 dBm.

redução rápida da figura de ruído conforme a potência de bombeio aumenta de 200 mW até 600 mW; a segunda com um aumento acelerado do *ripple* e redução da figura de ruído em menor ritmo. Entretanto, destaca-se também que toda a curva apresenta figuras de ruído menores do que cerca de 3,5 dB, com uma variação máxima de aproximadamente de 0,4 dB, indicando que todas as configurações otimizadas pelo WCA oferecem desempenho satisfatório com baixa inserção de ruído. Já em termos do *ripple* de ganho, a variação apresentada pela curva é significativa, sendo, portanto, um fator decisivo a ser considerado no projeto do amplificador. Adicionalmente, destaca-se que a região com menores valores de *ripple* em função da figura de ruído coincide em termos dos parâmetros otimizados com a região equivalente apresentada na Figura 25, para o caso também considerando potência de entrada total de 0 dBm. Dessa forma, é possível afirmar que tal região representa as possíveis configurações de um amplificador óptico na qual tem-se máxima excursão de ganho, menor *ripple* e figura de ruído aceitável.

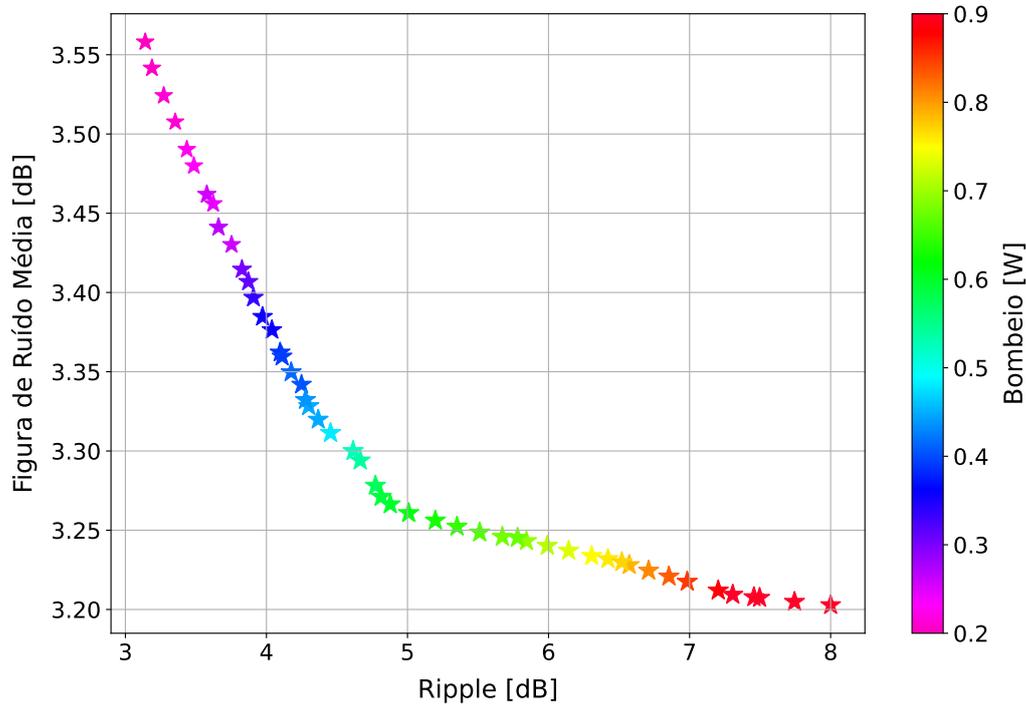


Figura 28 – Soluções obtidas para investigação da figura de ruído do EDFA em banda L com potência de entrada 0 dBm. A variação do comprimento de EDF obtido na curva tem mínimo de 81,9 m e máximo de 110,0 m.

Os parâmetros que otimizam a figura de ruído para a banda L são mostrados na Tabela 16. Novamente, nota-se a correlação entre os valores obtidos do bombeio e do comprimento de EDF entre as curvas de ganho e figura de ruído, demonstrando o mesmo perfil otimizado também para a banda L.

Tabela 16 – Resultados dos parâmetros otimizados para 0 dBm de potência total de entrada considerando diversos pontos da faixa de figura de ruído do amplificador para banda L.

Sinal de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	Figura de Ruído
0 dBm	200,0 mW	81,9 m	3,56 dB
	260,0 mW	85,6 m	3,43 dB
	334,0 mW	101,0 m	3,39 dB
	415,0 mW	108,0 m	3,35 dB
	612,0 mW	110,0 m	3,26 dB
	900,0 mW	106,4 m	3,2 dB

Para facilitar a análise da inter-dependência entre todas as funções objetivo empregadas na otimização proposta (*i.e.*, ganho médio, *ripple* de ganho e figura de ruído),

a Figura 29 apresenta uma visualização tridimensional das fronteiras de Pareto resultantes nas otimizações propostas. Note que, conforme discutido anteriormente, há uma sobreposição considerável entre as fronteiras de Pareto que relacionam o *ripple* com o ganho médio e a figura de ruído, evidenciando a assertividade da análise anteriormente apresentada. Em específico, observa-se que para potências de bombeio com variações entre 200 mW até 600 mW tem-se uma região ideal de operação (com alta excursão de ganho e valores aceitáveis de *ripple* e figura de ruído para um mesmo comprimento de EDF em relação às curvas anteriores). Entretanto, à medida que o ganho aumenta e a figura de ruído é levemente reduzida para valores maiores de bombeio, o *ripple* passa a apresentar um rápido aumento, passando a demandar o uso de filtros planificadores de ganho (GFF – *Gain Flattening Filter*) com maior contraste e reduzindo a eficiência dos estágios de amplificação.

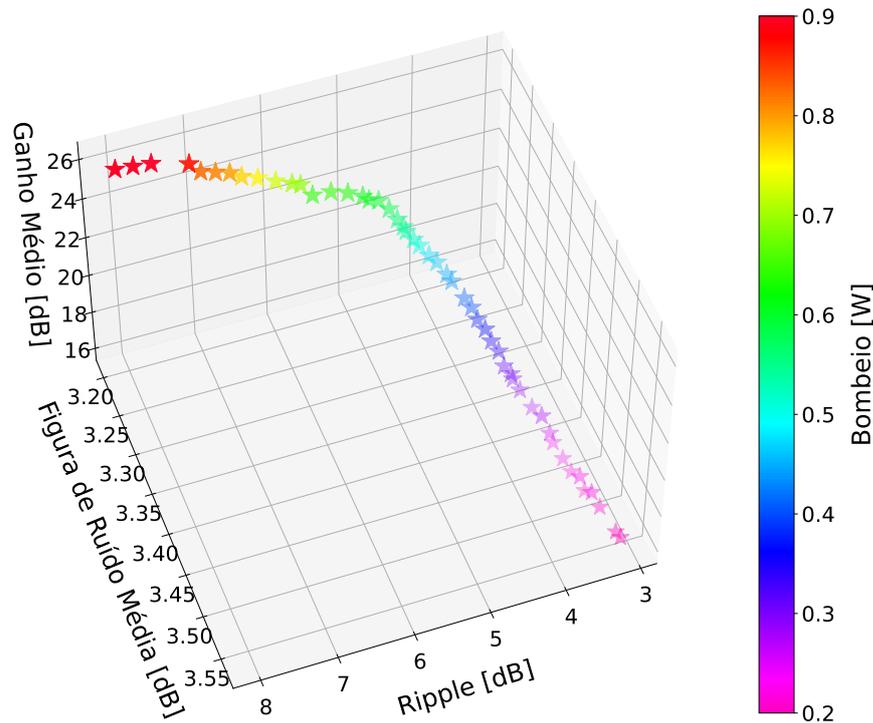


Figura 29 – Fronteira de soluções em três dimensões para investigação da figura de ruído do EDFA em banda L com potência de entrada 0 dBm.

6 Otimização sistêmica de amplificadores a fibra dopada com érbio

Dada a integração dos modelos de amplificação em ambiente de simulação óptica com o GNPY, busca-se a otimização dos estágios de amplificação além de um elemento óptico isolado, inserido em um sistema de transmissão e considerando os parâmetros do enlace óptico. Nesse sentido, na Seção 6.1, é apresentada a criação do enlace de transmissão nas bandas C e L individualmente, onde na Seção 6.2, continuando o processo realizado na Seção 6.1, adiciona-se a implementação do enlace em banda C+L. Na Seção 6.3, os resultados das otimizações dos enlaces nas bandas C e L são apresentados e discutidos. Por fim, na Seção 6.4, realiza-se análise dos resultados obtidos em banda estendida.

6.1 Otimização sistêmica de enlaces em banda C e L

Dada a implementação do ambiente de investigação para os sistemas ópticos, a proposta consiste em construir o enlace de longa distância com todos os elementos ópticos necessários. Nesse primeiro momento, o enlace é projetado para transmissão em banda C e banda L individualmente, analisando as propriedades dos estágios de amplificação para cada banda. A principal métrica de avaliação do sistema é a SNR, que define a qualidade de recepção dos sinais transmitidos no enlace implementado.

Em ambos os sistemas das respectivas bandas de transmissão, o enlace é definido com o comprimento total de 1000 km, dividido por 10 amplificadores espaçados em trechos de 100 km. Na Figura 30, observa-se o diagrama do sistema de transmissão óptica, constituído por transceptores, trechos de fibras ópticas e estágio de amplificação. O transmissor e receptor são divididos em s elementos, onde s é o número total de canais para o sistema na banda C ou banda L, de modo a gerar o conjunto de canais transmitido e estimado ao longo do enlace. A estrutura do enlace é implementada com um EDFA na entrada do enlace (representando um *booster*), tal que o ganho de amplificação seja igual a perda do trecho da fibra na condição ideal, um recurso de abordagem que permite investigar o sistema óptico com a maior eficiência de operação.

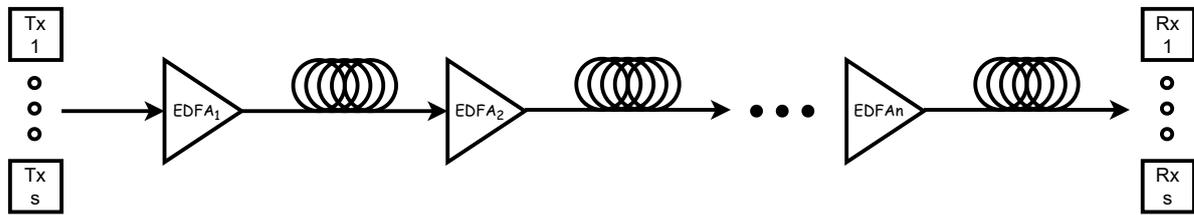


Figura 30 – Enlace de transmissão para banda C e L.

Na Tabela 17 são mostrados os dados do sistema implementado, em que são definidas: as configurações do sinal de transmissão para as bandas C e L; do enlace óptico, descrevendo os parâmetros da fibra utilizada; os estágios de amplificação, que são implementados de acordo com as respectivas bandas; e as informações do transceptor, sendo utilizada a modulação de dupla polarização de fase e quadratura (DP-QPSK – *Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*), com taxa de símbolos de 32 Gbaud, fator *roll-off* de 0,15 e elevada OSNR de transmissão.

A otimização sistêmica consiste em determinar a condição de máxima eficiência do sistema a partir das configurações ótimas dos estágios de amplificação das bandas espectrais. Nessa proposta, o modelo sistêmico do ambiente de simulação integrado com GNPY é implementado no algoritmo de otimização WCA, em que o algoritmo busca otimizar os estágios de amplificação para obter o melhor desempenho do sistema. A resposta do sistema para constituir as funções objetivo são definidas em: a SNR generalizada, que mede o impacto dos efeitos deletérios, de natureza linear e não linear, no enlace; a potência por canal recebida, demonstrando a qualidade dos amplificadores em manter o nível de sinal transmitido; e o bombeio dos amplificadores, mantendo elevado desempenho sistêmico com menores níveis de bombeio. Portanto, a otimização visa maximizar a SNR generalizada e a potência de recepção por canal, minimizando a potência de bombeio simultaneamente.

As funções sistêmicas objetivos f_b , f_p e f_{snr} são expressas da seguinte forma:

$$f_b = x_b \quad (6.1)$$

Tabela 17 – Parâmetros do sistema de transmissão para as bandas C e L.

Elementos do sistema	Parâmetro	Valor	
		Banda C	Banda L
Sinal	Comprimento de Onda [nm]	1527,6 até 1565,5	1568,362 até 1610,056
	Espaçamento [GHz]	50	50
	Número de Canais	96	100
	Potência Total [dBm]	0	0
Enlace	Tipo de Fibra	SSMF	SSMF
	Dispersão [ps/km.nm]	16,7	16,7
	Coefficiente de Atenuação [dB/km]	0,18	0,18
	Coefficiente de não linearidade [W^{-1}/km]	1,27	1,27
	Comprimento [km]	100	100
Amplificador EDFA	Bombeio [mW]	20 até 900	270 até 900
	Comprimento de EDF [m]	5 até 35	40 até 110
	GFF	Sim	Sim
	Número de estágios	10	10
Transceptor	Modulação	DP-QPSK	DP-QPSK
	Baud Rate [Gbaud]	32	32
	Tx OSNR [dB]	70	70
	Roll-off	0,15	0,15

$$f_p = -P_{out_ch} \quad (6.2)$$

$$f_{snr} = -SNR_{gen} \quad (6.3)$$

onde, x_b é o nível de bombeio para cada amplificador da respectiva banda, P_{out_ch} é a potência recebida por canal e SNR_{gen} é o valor de SNR generalizada estimada do enlace de transmissão.

Além da otimização mais complexa com três funções objetivos, é possível obter uma otimização mais particular a partir do modelo geral, a fim de realizar uma resposta refinada dos estágios de amplificação. Com apenas duas funções objetivos, mantendo a SNR generalizada e adicionando o contraste do GFF (máximo nível de atenuação absoluta aplicado pelo filtro), com objetivo de minimizar o contraste do filtro nos amplificadores, é possível visualizar de forma sutil os menores níveis de bombeio aplicado aos estágios que

maximize a SNR do sistema.

Nesse caso, as funções definidas são f_{snr} (expressa no modelo geral) e f_c expressa como:

$$f_c = \max\{|att|\} \quad (6.4)$$

em que, att é o perfil de atenuação do filtro no estágio de amplificação.

6.2 Otimização sistêmica de enlaces em banda estendida

Os cenários abordados demonstram a implementação dos estágios de amplificação de forma individual, utilizando-se as bandas espectrais separadas. Contudo, ainda não foi demonstrado o impacto da transição de um sistema de única banda para o sistema de banda estendida, que demonstra a ampliação da capacidade de transmissão por meio da implementação de um único sistema C+L. O novo enlace óptico consiste na transmissão simultânea dos sinais em banda C e L acoplando os sinais na entrada da fibra óptica e os separando para os respectivos amplificadores, dessa forma, a estrutura do enlace é composta por um duplo estágio de amplificação em esquema paralelo, que amplifica os sinais simultâneos em sua respectiva banda.

A Figura 31 apresenta o novo sistema C+L concatenando os transmissores e receptores das duas bandas, de modo que os amplificadores *booster* são mantidos para amplificar os sinais na entrada do enlace e o acoplamento é feito para inserção do sinal na fibra. Os trechos de fibra possuem novamente o comprimento de 100 km, dividido em 10 estágios ao longo do enlace, totalizando 1000 km de transmissão.

A Tabela 18 mostra os parâmetros do sistema de transmissão em banda C+L, denotando uma diferença no espectro do sinal em relação ao sistema de banda individual. Nesse caso, a banda é totalmente preenchida de canais desde o início da banda C até o fim da banda L, totalizando 196 canais espaçados em uma grade de 50 GHz. Note que, na separação dos canais para a entrada dos amplificadores, são utilizados filtros passivos (*splitters*) para a divisão, esses filtros possuem uma determinada faixa de corte espectral que isolam qualquer sinal dentro da frequência de corte do filtro, conseqüentemente, o espectro de amplificação não é totalmente uniforme possuindo uma lacuna entre as bandas, sendo um valor de aproximadamente 2,5 nm de separação. A potência de transmissão

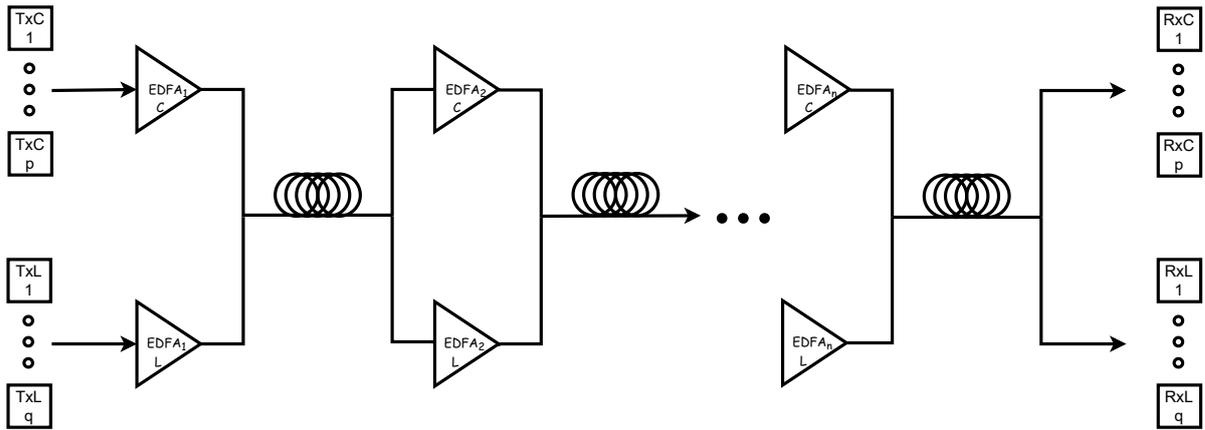


Figura 31 – Enlace de transmissão em banda estendida.

total é de 3,01 dBm, sendo a adição das potências totais (0 dBm) de cada banda do ponto de vista do amplificador. A construção dos subsistemas de amplificação está presente na mesma estrutura, formando um conjunto de configurações a partir da agregação dos estágios. Os parâmetros do enlace e do transceptor permanecem com a mesma configuração dos sistemas anteriores, apenas com variação do aumento da capacidade sistêmica.

A otimização do sistema completo é realizada por meio da maximização da SNR generalizada e potência recebida por canal, e minimizando o bombeio de ambos os amplificadores em cada estágio. Nesse caso, a otimização torna-se mais complexa devido a adição de um fator fundamental para garantir o desempenho pleno do sistema, o compromisso entre a máxima eficiência de interoperabilidade dos estágios de amplificação. Esse fator surge em decorrência de que a otimização precisa buscar soluções que satisfaçam ambos os requisitos dos amplificadores simultaneamente, para garantir que o espectro total de transmissão não sofra impactos de efeitos deletérios, dado que, há casos que o EDFA da banda C esteja na condição plena de operação e o EDFA da banda L esteja em uma condição ruim de operação e vice-versa, assim penalizando o espectro total pela baixa condição de operação de um ou ambos os amplificadores. Para ajudar o algoritmo a garantir a otimização plena dos estágios, adota-se a potência mínima recebida por canal e o valor médio dos níveis de bombeio entre os amplificadores, fazendo com que o processo de otimização reconheça o espectro degradado com maior facilidade.

Dessa forma, as funções objetivos f_{snr} , f_b e f_p definidas nesse sistema são

Tabela 18 – Parâmetros do sistema de transmissão para a banda estendida.

Elementos do sistema	Parâmetro	Valor <i>Banda estendida</i>
Sinal	Comprimento de Onda [nm]	1527,6 até 1610,056
	Espaçamento [GHz]	50
	Número de Canais	196
	Potência Total [dBm]	3,01
Enlace	Tipo de Fibra	SSMF
	Dispersão [ps/km.nm]	16,7
	Coefficiente de Atenuação [dB/km]	0,18
	Coefficiente de não linearidade [W^{-1}/km]	1,27
	Comprimento [km]	100
Amplificador EDFA	Bombeio [mW]	20 até 900 e 270 até 900
	Comprimento de EDF [m]	5 até 35 e 40 até 110
	GFF	Sim
	Número de estágios	10
Transceptor	Modulação	DP-QPSK
	Baud Rate [Gbaud]	32
	Tx OSNR [dB]	70
	Roll-off	0,15

expressas como:

$$f_b = \rho \left(\frac{x_{b_c} + x_{b_l}}{2} \right) \quad (6.5)$$

$$f_p = -(\min\{P_{out_ch}\}) \quad (6.6)$$

$$f_{snr} = -SNR_{gen} \quad (6.7)$$

onde x_{b_c} e x_{b_l} são os bombeios da banda C e banda L, ρ é um fator de adequação que pondera a escala de valores dos bombeios assumindo a ordem de grandeza recomendada em torno de 10^2 de acordo com a escala, P_{out_ch} é a potência recebida por canal do espectro e SNR_{gen} é a SNR geral do sistema C+L.

Nesse contexto, para uma investigação final do sistema em banda estendida é

realizado a variação da grade de espaçamento entre os canais, atualizando para as grades de 37,5 GHz e 100 GHz, resultando em um sistema com transmissão de 263 e 98 canais, respectivamente. A ideia é demonstrar o grau de impacto do ruído de emissão e dos efeitos não lineares presentes no sistema C+L, com adição e subtração do número de canais de acordo com a condição plena dos estágios de amplificação.

6.3 Análise da otimização do enlace de transmissão óptica em banda estendida

As análises mostradas previamente consistem em estabelecer um perfil de configuração otimizado do amplificador óptico operando isoladamente para as suas principais métricas: ganho e figura de ruído. Já as investigações a seguir propõem otimizar EDFAs nas bandas C e L otimizando seu desempenho sistêmico em um enlace de transmissão óptica de longa distância, analisando a otimização com as bandas separadas e em conjunto no mesmo enlace. Para tanto, o principal parâmetro a ser considerado é a SNR generalizada do enlace óptico, a qual mensura conjuntamente o impacto do ruído de emissão ASE e dos efeitos não lineares presentes, garantindo a eficiência de transmissão do sistema implementado.

6.3.1 Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda C

Nessa proposta, a curva de otimização do enlace óptico é composta pela SNR generalizada média, a potência recebida por canal e o bombeio dos estágios de amplificação. Na Figura 32, observa-se a resposta do enlace na banda C para as três funções otimizadas, tal que a curva é definida em três regiões que representam os impactos no enlace de transmissão. A primeira região é a de baixo bombeio e menor potência recebida, que implica no maior impacto do ruído ASE ao longo do enlace; a segunda região é representada pelos maiores níveis de bombeio e maior potência de recepção, sendo impactada mais significativamente pelas não linearidades do sistema óptico; por fim, a região de maior interesse, é o pico da curva, composta majoritariamente por bombeios intermediários, potência de recepção ótima e SNR generalizada máxima. Alguns níveis de bombeios

elevados aparecem na região pico, isso ocorre devido à utilização do GFF nos amplificadores, tal que, o perfil de planificação do ganho em configurações distintas de EDFA são semelhantes após a passagem dos sinais pelo filtro.

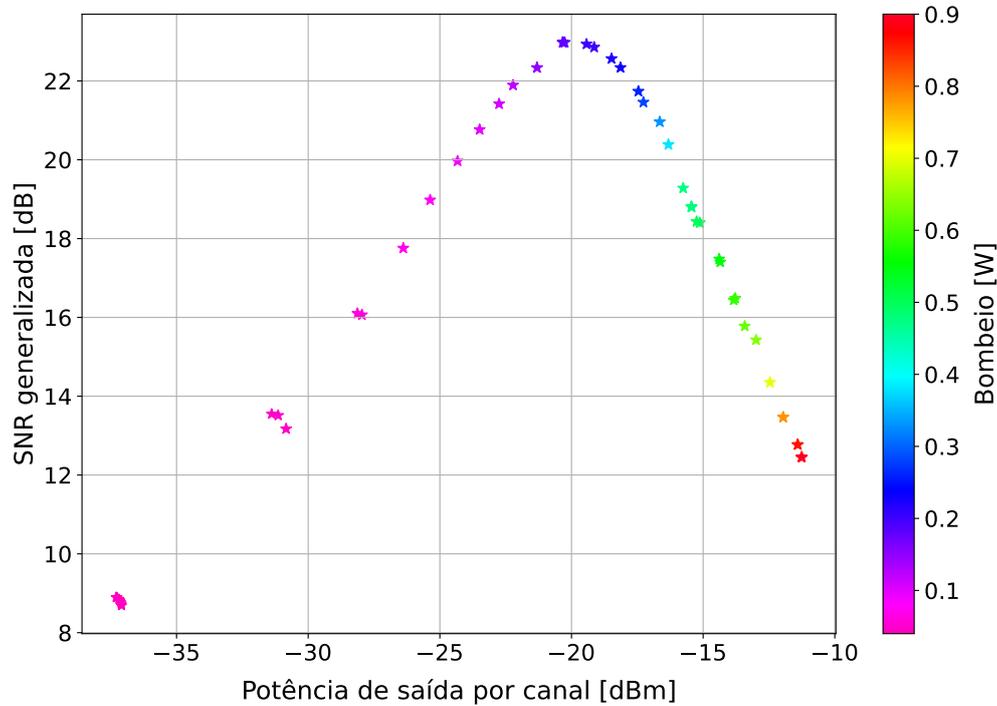


Figura 32 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda C da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

Os parâmetros que otimizam a SNR do enlace para a banda C são mostrados na Tabela 19. Nota-se, um valor de comprimento de fibra dopada que define toda a curva modelada, obtendo 12 m de comprimento para uma variação de bombeio crescente, alcançando um pico de SNR com 185 mW de bombeio.

Nesse contexto, para validar a otimização que garante a menor magnitude do bombeio fornecendo a máxima SNR generalizada do enlace de transmissão, considera-se um parâmetro adicional a ser otimizado, o contraste do GFF. O contraste é definido como a máxima atenuação aplicada ao sinal óptico de saída do amplificador. Na Figura 33, tem-se a SNR em função do contraste do filtro, onde o valor do contraste está diretamente relacionado com o nível de bombeio do amplificador devido à magnitude da atenuação aplicada pelo filtro. O resultado demonstra que a SNR generalizada alcança o valor máximo para um contraste de aproximadamente 2,8 dB com um nível de bombeio

Tabela 19 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda C da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

Enlace	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compr. EDF	SNR
Banda C	40,0 mW	11,0 m	8,7 dB
	50,0 mW	12,0 m	13,5 dB
	60,0 mW	12,0 m	16,1 dB
	70,0 mW	12,0 m	17,8 dB
	90,0 mW	12,0 m	20,0 dB
	120,0 mW	12,0 m	21,9 dB
	180,0 mW	12,0 m	23,0 dB
	230,0 mW	12,0 m	22,3 dB
	380,0 mW	12,0 m	20,4 dB
	500,0 mW	12,0 m	18,4 dB
	620,0 mW	12,0 m	15,8 dB
	890,0 mW	12,0 m	12,5 dB

de 185 mW, menor valor de bombeio que utiliza o mínimo de contraste para o maior valor de SNR. A partir desse limiar, o contraste incrementa progressivamente sem elevação da SNR até o máximo nível do bombeio, apresentando os limites superiores para as três funções de custo. Por ventura, a região de interesse dessa otimização com interseção entre o mínimo contraste e a máxima SNR, se sobrepõe no pico da curva da Figura 32, definindo a melhor configuração para o enlace de transmissão na banda C.

Os valores dos parâmetros que apresentam o menor contraste para o GFF em uma transmissão em banda C são mostrados na Tabela 20. Nesse caso, observa-se que o contraste é levemente incrementado com o aumento de bombeio até alcançar o pico de SNR com 180 mW, demonstrando a região ótima de operação encontrada na curva de enlace da banda C. O contraste passa a obter elevada taxa de incremento a partir dessa região, mantendo o mesmo nível de SNR, mas demandando bombeios elevados.

A configuração dos estágios obtida com melhor desempenho na região superior da curva do enlace da banda C é implementada no GNPY. Nesse caso, realizam-se duas investigações, uma empregando amplificadores otimizados de acordo com o proposto nesse trabalho e uma segunda empregando amplificadores padrão com configuração fornecida pelo próprio GNPY. A Figura 34 demonstra os dois casos para o sistema de transmissão em banda C, apresentando a SNR recebida ao longo do enlace com 96 canais transmitidos. Observa-se uma diferença de até 3 dB nos canais com desempenho reduzido dos estágios

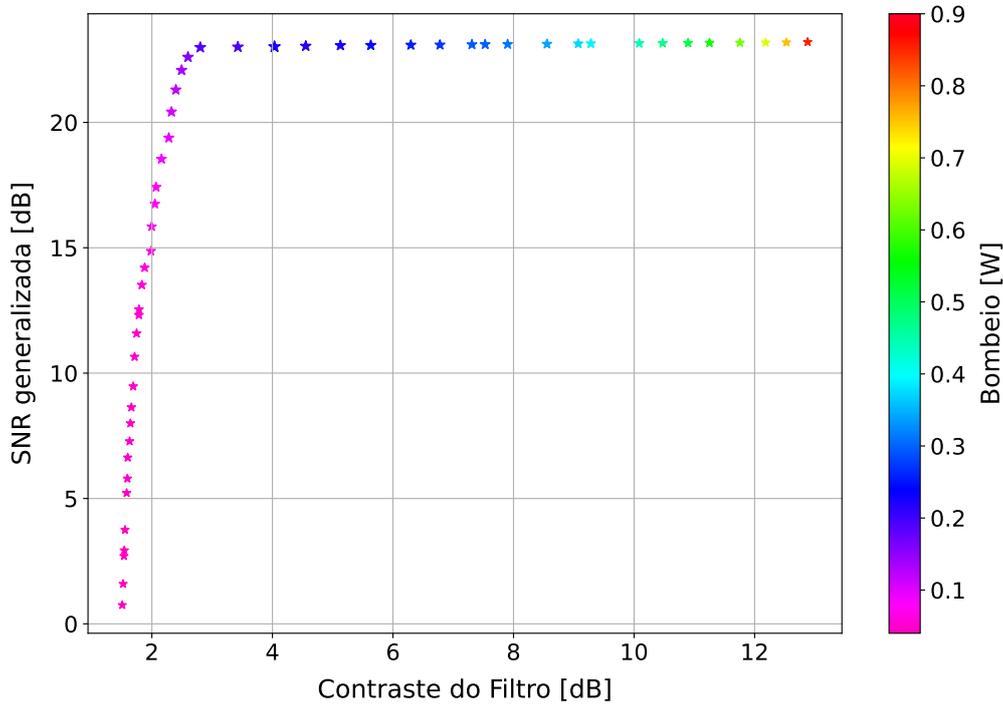


Figura 33 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda C da SNR generalizada em função do contraste do filtro de amplificação.

padronizados. O melhor desempenho dos amplificadores investigados deve-se ao fato da menor contribuição ao ruído linear e a inibição dos efeitos de natureza não linear.

6.3.2 Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda L

Da mesma maneira que o enlace óptico foi otimizado para transmissão na banda C, realizou-se também sua otimização somente para a transmissão dos canais na banda L. Como mostra a Figura 35, observa-se o comportamento semelhante a otimização da banda adjacente, definindo a relação entre a SNR generalizada, a potência por canal recebida e o bombeio dos amplificadores. A separação das três regiões se mantêm, apresentando configurações com: maior impacto do ruído ASE para potência recebida e bombeios menores; maior interferência dos efeitos não lineares em potência recebida e bombeios elevados; e a região de pico com os valores ótimos para a otimização em banda L. Devido a maior variabilidade de configurações possíveis de amplificadores após a filtragem, para garantir a máxima SNR em função do mínimo bombeio necessário, considera-se

Tabela 20 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda C da curva de SNR generalizada em função do contraste do filtro do amplificador.

Sinal de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compr. EDF	Contraste
Banda C	40,0 mW	6,9 m	1,51 dB
	43,3 mW	7,2 m	1,58 dB
	50,9 mW	7,9 m	1,71 dB
	64,5 mW	8,7 m	1,98 dB
	105,8 mW	10,6 m	2,32 dB
	117,7 mW	11,0 m	2,4 dB
	135,7 mW	11,4 m	2,49 dB
	158,7 mW	11,9 m	2,60 dB
	184,7 mW	12,3 m	2,80 dB
	193,7 mW	12,0 m	3,42 dB
	241,4 mW	10,9 m	5,63 dB
	312,7 mW	9,8 m	7,90 dB
	441,3 mW	8,7 m	10,1 dB
	853,2 mW	7,4 m	12,88 dB

novamente o contraste do filtro em banda L como um parâmetro adicional a ser otimizado.

Em relação a banda L, os parâmetros que otimizam a curva de SNR do enlace para a banda L são mostrados na Tabela 21. Em um aspecto diferente da banda C, a curva apresenta não somente um único valor de comprimento de fibra dopada que define toda a curva modelada, sendo destacado o comprimento de 106 m, que envolve a região superior de SNR da curva mostrada. O pico de SNR para o enlace de banda L é em torno de 400 mW, com redução para maiores valores de bombeio. Entretanto, em banda L o grau de sensibilidade é menos crítico, possibilitando obter-se uma margem dos parâmetros para um mesmo desempenho, e demonstrando que é possível reduzir o comprimento de fibra em até 10 m e incrementando o bombeio em 60 mW, ainda garantindo que o sistema em banda L opere no pico da região.

Na Figura 36, obtém-se a curva de otimização da SNR generalizada em função do contraste do filtro para banda L, resultando em uma configuração ótima definida para bombeio de 400 mW com contraste de aproximadamente 4,2 dB. O aspecto da curva se assemelha com a obtida para a banda C, elevando o bombeio para um maior nível de contraste e um mesmo valor de SNR generalizada. Novamente, a região de operação com menor contraste para a máxima SNR do enlace óptico se sobrepõe na curva de otimização

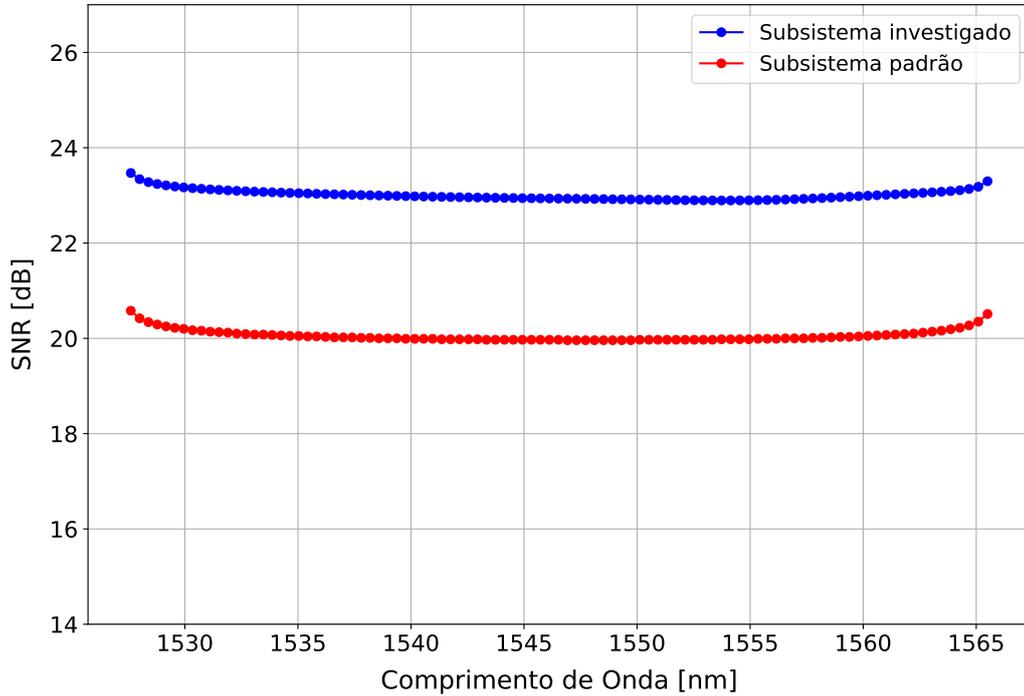


Figura 34 – Comparação da SNR generalizada em banda C.

anterior, permitindo um ótimo nível de sinal dos canais recebidos, com menor impacto do ruído ASE e não linearidades e bombeio dos amplificadores com baixo nível de magnitude. Esse comportamento semelhante entre a otimização dos amplificadores nas bandas C e L, propõe maior adaptação para transmissão em banda estendida, dessa maneira, obtendo as mesmas características das figuras de mérito permite uma otimização conjunta que

Tabela 21 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda L da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

Enlace	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compri. EDF	SNR
Banda L	270,0 mW	96,0 m	18,0 dB
	286,0 mW	98,0 m	20,0 dB
	298,0 mW	100,0 m	21,0 dB
	332,0 mW	106,0 m	22,0 dB
	395,0 mW	106,0 m	23,0 dB
	425,0 mW	106,0 m	22,3 dB
	541,0 mW	107,0 m	21,3 dB
	695,0 mW	107,0 m	20,0 dB
	861,0 mW	108,0 m	17,7 dB
	900,0 mW	108,0 m	14,9 dB

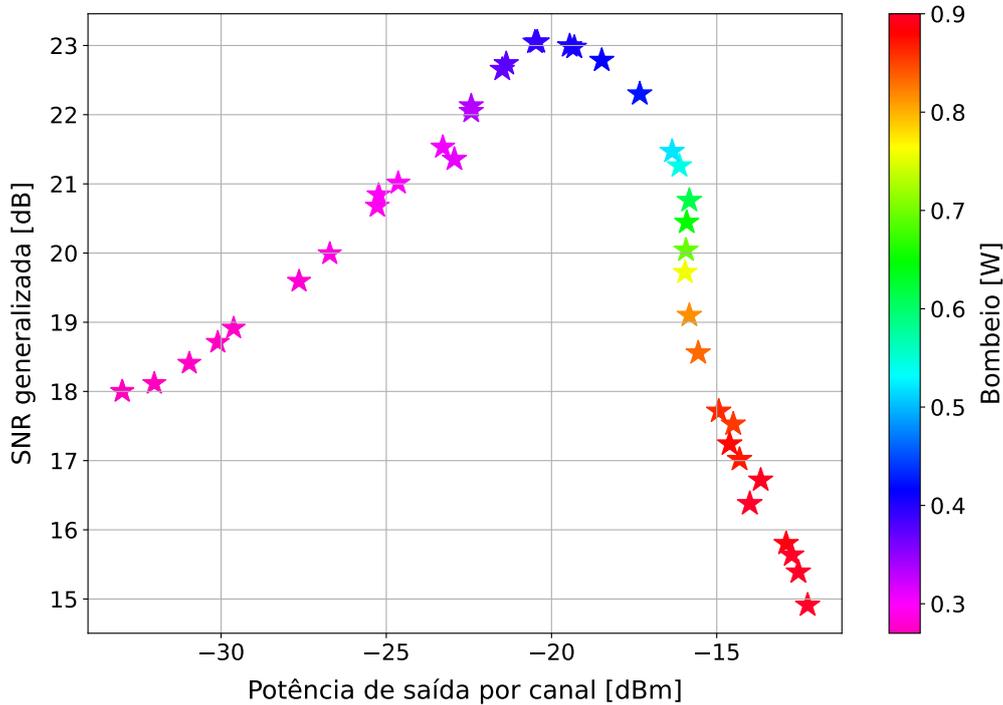


Figura 35 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda L da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

integre as duas bandas de transmissão em um mesmo enlace óptico, garantindo o melhor desempenho do sistema para ambas as bandas.

Os valores dos parâmetros que apresentam o menor contraste do enlace para a banda L são mostrados na Tabela 22. Nesse caso, observa-se o mesmo comportamento do contraste na banda de operação, sendo levemente incrementado com o aumento de bombeio até alcançar o pico de SNR agora em 400 mW, demonstrando-se a região ótima de operação encontrada na curva anterior de otimização do enlace da banda L. O contraste passa a obter elevada taxa de incremento a partir dessa região, mantendo o mesmo nível de SNR com bombeios sendo elevados ao máximo e reduzindo o comprimento de fibra.

A mesma demonstração apresentada anteriormente para o sistema de banda C também foi realizada para as topologias investigadas no ambiente de estimação em banda L. Dados o máximo valor médio da SNR encontrado na curva do enlace da banda L, os sinais transmitidos apresentam valor em torno de 23 dB totalizando 100 canais em um perfil equalizado. Na Figura 37, a mesma banda de transmissão utilizou amplificadores com parâmetros fixos fornecidos pelo GNPY, apresentando o comportamento similar da

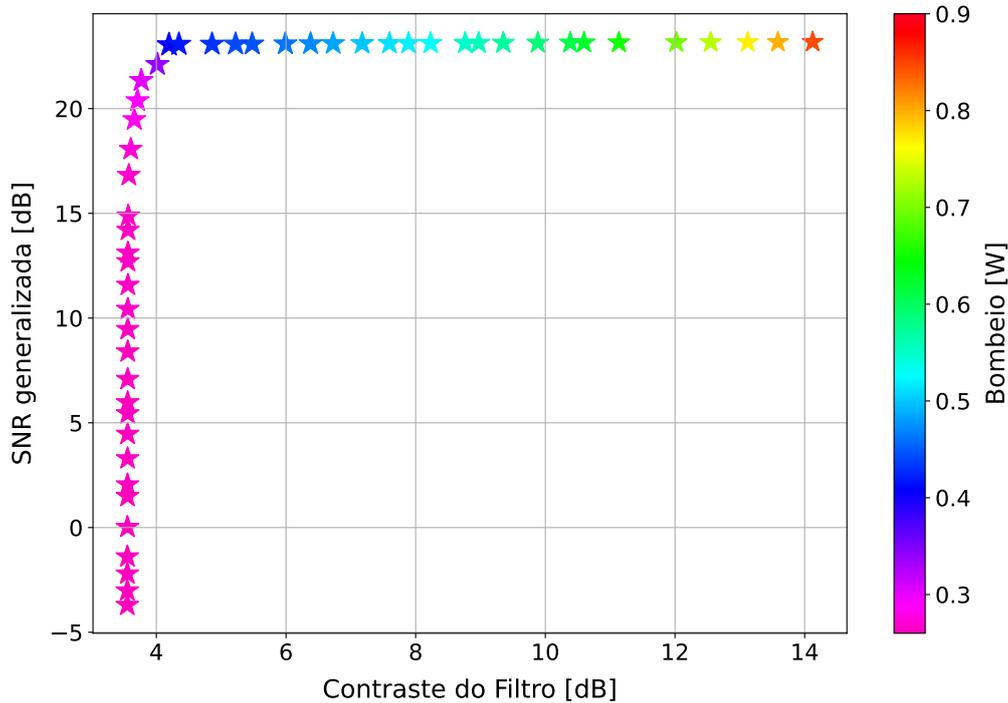


Figura 36 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda L da SNR generalizada em função do contraste do filtro de amplificação.

banda C, com nível de SNR reduzido e um sistema que tem maiores impactos dos efeitos deletérios.

6.3.3 Otimização da SNR generalizada para o enlace de transmissão em banda estendida

A partir das otimizações dos enlaces considerando a transmissão exclusiva em cada uma das bandas propostas, a qual apresentou perfis semelhantes da curva do enlace de transmissão para a SNR generalizada, realiza-se a otimização conjunta das bandas C e L para a transmissão em enlace de banda estendida. Dessa forma, ao todo, 196 canais são transmitidos pela fibra óptica e separados pelas suas respectivas bandas em direção a cada EDFA ao longo do enlace, com potência máxima de transmissão mantida em 0 dBm para cada banda, de modo a verificar se há um impacto na transmissão em banda estendida ao longo do sistema implementado. Conforme a Figura 38, o resultado da otimização da transmissão no enlace apresenta um perfil que contempla as duas bandas de modo semelhante aos resultados anteriores. O valor de SNR tem pico em torno de 22,89 dB centrado a

Tabela 22 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda L da curva de SNR generalizada em função do contraste do filtro do amplificador.

Sinal de entrada	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compr. EDF	Contraste
Banda L	261,0 mW	93,0 m	3,55 dB
	261,5 mW	93,0 m	3,55 dB
	262,1 mW	93,0 m	3,56 dB
	262,6 mW	93,0 m	3,56 dB
	263,3 mW	93,0 m	3,57 dB
	291,2 mW	96,0 m	3,71 dB
	304,6 mW	98,0 m	3,77 dB
	337,8 mW	98,0 m	4,02 dB
	404,2 mW	105,5 m	4,20 dB
	418,1 mW	102,2 m	4,35 dB
	431,7 mW	99,6 m	4,86 dB
	460,7 mW	96,5 m	5,99 dB
	518,1 mW	91,3 m	7,89 dB
	589,8 mW	87,0 m	9,88 dB
	695,4 mW	82,8 m	12,01 dB
845,5 mW	78,5 m	14,12 dB	

uma potência recebida por canal equivalente a 20,3 dBm, com decaimento para potências mais elevadas com impacto das não linearidades e para potências reduzidas com maior interferência do ruído ASE. Cada ponto obtido na curva representa uma configuração do estágio de amplificação, com tamanho de EDF e potência de bombeio, perfil de figura de ruído e ganho dos amplificadores.

Na banda estendida, os parâmetros que otimizam a curva geral de SNR do enlace contendo as bandas C e L conjuntamente são mostrados na Tabela 23. No caso do sistema C+L, os pontos de operação englobam simultaneamente os parâmetros que maximizam o desempenho de seu respectivo amplificador e minimizam a interferência na banda adjacente. Portanto os estágios de amplificação mantêm seus comportamentos de acordo com as bandas individuais, para o comprimento de fibra, no estágio de banda C é fixado em um valor em toda a curva e o estágio de banda L se mantém somente na região superior. O bombeio tem seu incremento simultâneo para as bandas C e L, mantendo o pico em 194 mW e 396 mW respectivamente, com níveis baixo para maior interferência da ASE e níveis elevados com interferência não linear.

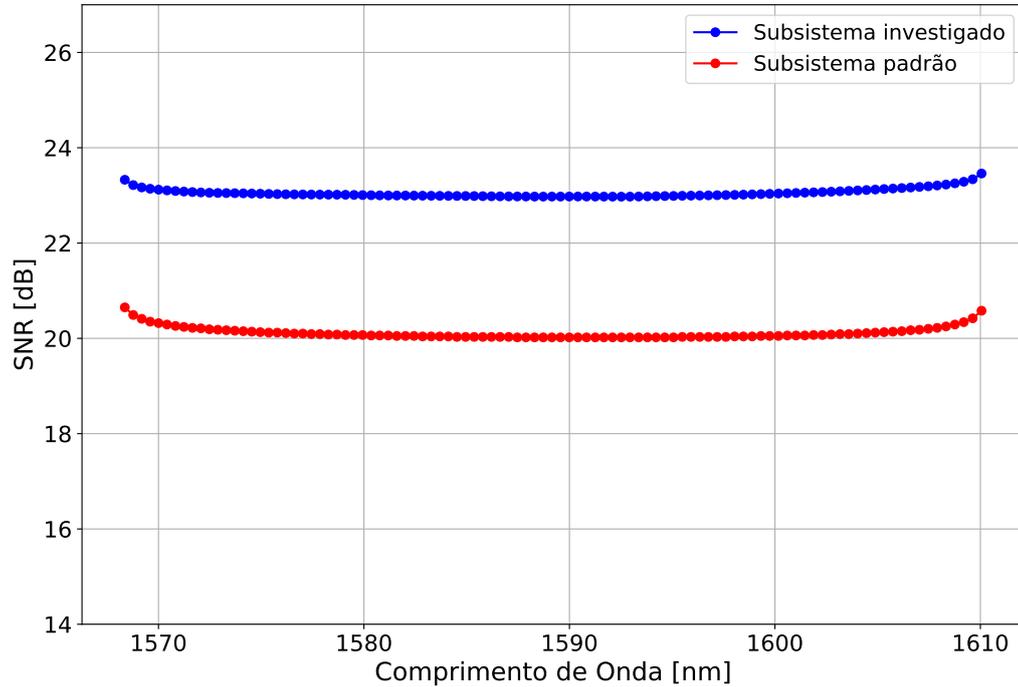


Figura 37 – Comparação da SNR generalizada em banda L.

Como resultado das configurações otimizadas dos amplificadores implementados de forma conjunta, demonstra-se que o comportamento da otimização se manteve para o comprimento de fibra dopada, com algumas leve variações dos níveis de bombeios em virtude da alteração da potência de entrada. Nesse caso, a SNR generalizada resultante teve um decremento em sua magnitude de alguns décimos de dB, pelo fato de que a potência total de transmissão foi incrementada o dobro das suas bandas. Conseqüentemente, o número de canais presentes ocasionou um leve incremento dos efeitos de não linearidades contribuindo para a redução da SNR do enlace. Todavia, os estágios de amplificação em banda estendida apresentam desempenho com mínima contribuição de efeitos deletérios, possibilitando menor impacto na redução do desempenho satisfatório do enlace óptico.

Na Figura 39, observa-se a recepção dos 196 canais transmitidos pelo enlace óptico, sendo avaliados pelo perfil de potência recebida e a SNR generalizada do espectro. Nota-se que a equalização do espectro recebido é um fator determinante para a recepção eficiente de todos os canais, sem haver a degradação de nenhum canal em sua respectiva banda. A magnitude dos sinais é praticamente equivalente para as duas bandas, garantindo uma implementação eficiente de cada estágio de amplificação; as bandas são separadas

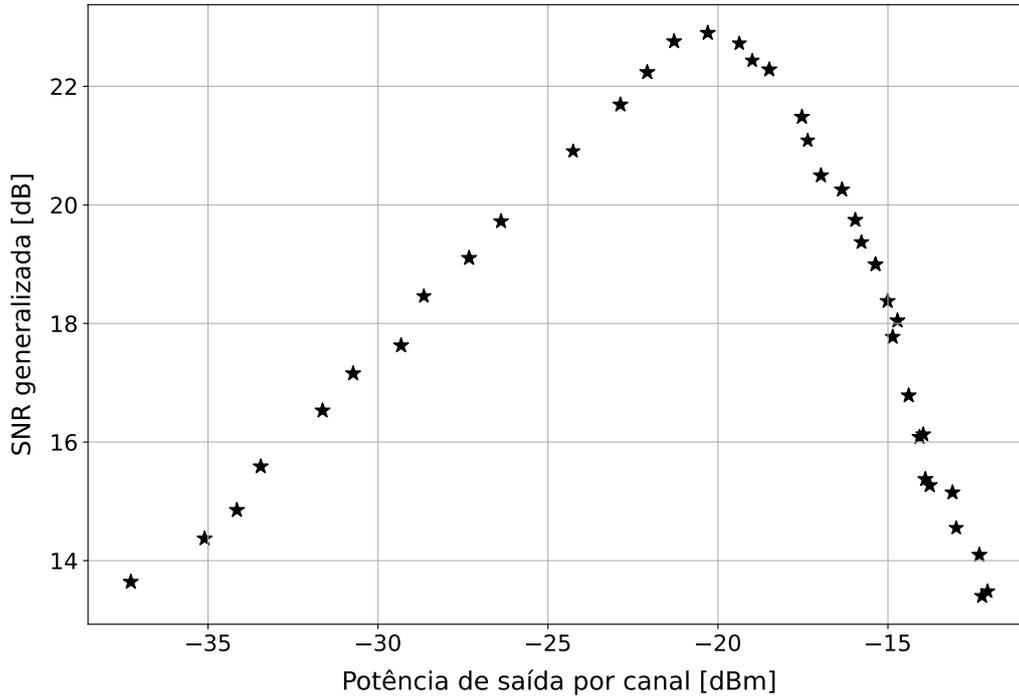


Figura 38 – Fronteira de soluções do enlace de transmissão em banda estendida da SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

por um filtro com largura de banda de aproximadamente 3 nm, permitindo a combinação e divisão das bandas sem perda de canais.

Além da implementação do sistema de óptico com grade de 50 GHz, é importante avaliar o desempenho do sistema em banda estendida para outras grades, permitindo um maior ou menor números de canais a serem transmitidos. O espaçamento entre os canais está relacionado diretamente com a capacidade total agregada do sistema de transmissão: sistemas que possuem maior nível de interferência não linear provocam um aumento significativo dos efeitos em grades mais densas, sendo evidenciada principalmente a modulação cruzada, que degrada os sinais por meio de modulação entre canais. Portanto, na Figura 40 tem-se um comparativo do impacto das grades de espaçamento no enlace óptico de transmissão, implementando grades de 37,5 GHz, 50 GHz e 100 GHz para as duas bandas C e L, resultando em 263 canais, 196 canais e 98 canais transmitidos, respectivamente.

De acordo com as curvas apresentadas, grades mais densas impactam na redução na SNR do sistema, um custo em função do aumento da capacidade sistêmica.

Tabela 23 – Resultados dos parâmetros otimizados para o enlace de transmissão em banda estendida da curva de SNR generalizada em função da potência recebida por canal.

Enlace	Parâmetros Otimizados		
	Bombeio	Compr. EDF	SNR
Banda C	40,0 mW	10,0 m	13,6 dB
	48,0 mW	11,0 m	15,6 dB
	59,0 mW	11,0 m	17,6 dB
	77,0 mW	12,0 m	19,7 dB
	127,0 mW	12,0 m	22,2 dB
	194,0 mW	12,0 m	22,9 dB
	228,0 mW	12,0 m	22,3 dB
	432,0 mW	12,0 m	20,2 dB
	599,0 mW	12,0 m	17,8 dB
	643,0 mW	12,0 m	15,3 dB
841,0 mW	12,0 m	13,5 dB	
Banda L	270,0 mW	96,0 m	13,6 dB
	270,0 mW	96,0 m	15,6 dB
	280,0 mW	96,0 m	17,6 dB
	295,0 mW	101,0 m	19,7 dB
	350,0 mW	106,0 m	22,2 dB
	396,0 mW	106,0 m	22,9 dB
	421,0 mW	106,0 m	22,3 dB
	573,0 mW	107,0 m	20,2 dB
	712,0 mW	107,0 m	17,8 dB
	900,0 mW	107,0 m	15,3 dB
900,0 mW	107,0 m	13,5 dB	

Entretanto, o grau de redução da magnitude da SNR depende da eficiência do sistema implementado, tal que, sistemas otimizados podem minimizar os impactos degradantes ocorridos pela variação do espaçamento entre canais. Observa-se que a grade de 100 GHz obteve uma SNR superior para toda a curva com uma maior potência por canal, sendo a grade de 50 GHz com a curva intermediária e a de 37,5 GHz, sendo a curva com menor nível de SNR. O grau de redução é amplamente compensado pela otimização sistêmica, que reduz o impacto para 1,45 dB da grade com maior espaçamento 100 GHz para a mais densa 37,5 GHz.

As curvas de SNR para os três enlaces de transmissão apresentam similaridades do comportamento dos parâmetros de otimização, seguindo o incremento e o decaimento dos níveis de potência dos bombeios de acordo com o aumento da potência de recepção

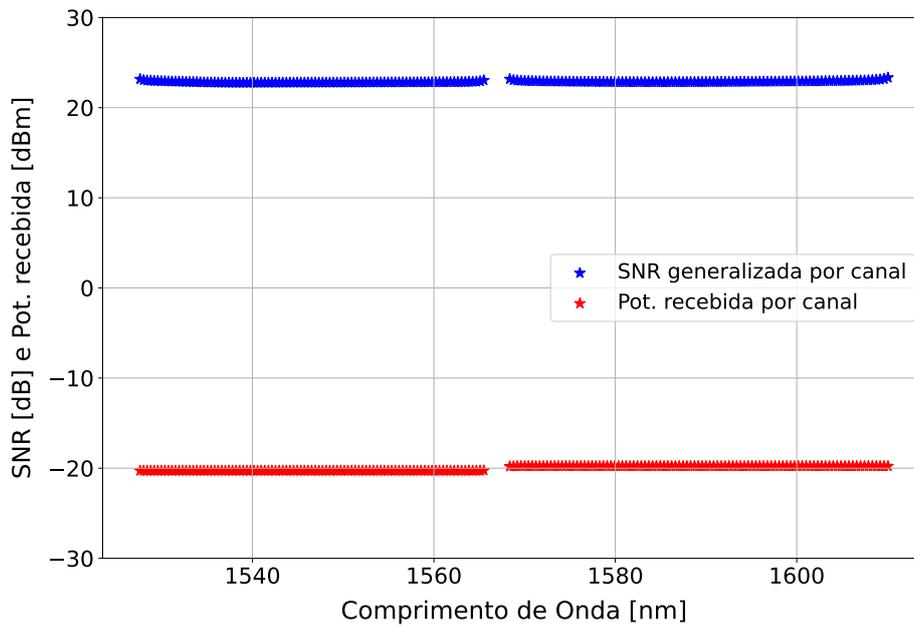


Figura 39 – Sinais transmitidos em banda estendida ao longo do enlace de 1000 km.

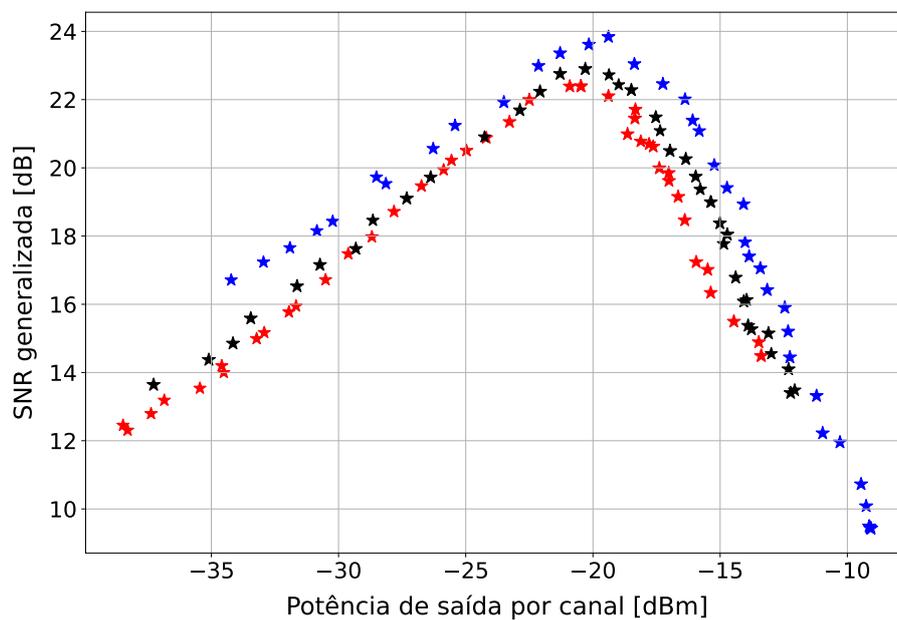


Figura 40 – Curvas otimizadas do enlace de transmissão com grades de 37,5, 50 e 100 GHz.

e o comprimento de fibra equivalente ao valor de SNR resultante. Portanto, possibilita-se implementar estágios de amplificação de alta capacidade que atenda a qualidade de operação de acordo com os requisitos demandados do sistema óptico de transmissão.

7 Conclusão

As novas soluções em comunicações ópticas, que podem ser implementadas atualmente devido aos avanços tecnológicos e a redução de custo, para atender a demanda e proporcionar evoluções na transmissão por fibra óptica, baseiam-se na otimização dos recursos de implementação. Especialmente para os sistemas ópticos em banda estendida, o conjunto de parâmetros configuráveis e a complexidade de operação sistêmica presente requerem soluções que satisfaçam as condições de forma geral, obtendo uma visão sistêmica que direcione a investigação para obter soluções conjuntas a fim de minimizar a complexidade existente.

Nesse contexto, o presente trabalho empregou diversas metodologias complementares visando o projeto de sistemas ópticos em banda estendida: técnicas de aprendizado de máquina, geração e manipulação de *datasets*, modelagem com redes neurais, otimização com algoritmo multi objetivo, matemática aplicada em linguagem de programação, dentre outros. Dessa forma, demonstrou-se a plena integração das vertentes distintas e o modo de fácil execução para a metodologia implementada, garantindo a busca pela máxima eficiência e soluções ótimas. A abordagem desenvolvida reforça a ótima contribuição dos métodos de inteligência artificial voltados para aplicações em comunicação óptica, uma vez que, as requisições necessitam de aprimoramentos e saltos evolutivos em termos de taxas, esses recursos tornam-se ferramentas de auxílio para a geração óptica atual.

O ambiente de implementação do modelo óptico demonstra diversas possibilidades que podem ser utilizadas, não limitando-se somente a modelos invariáveis de construção sistêmica. Dessa maneira, o universo da implementação do modelo sistêmico do amplificador se expande, podendo construir modelos a partir de dados sistêmicos de simuladores ópticos de código aberto e código fechado não licenciados, simuladores comerciais, ou por meio experimental, como amplificadores montados em bancada de laboratório e amplificadores comerciais.

A estrutura do processo de otimização apresenta uma alta flexibilidade, no que diz respeito à otimização, são estabelecidos os parâmetros de geração e funções de saída do

algoritmo proveniente do modelo sistêmico, possibilitando a adição e remoção de diferentes tipos de algoritmos bioinspirados e adaptação de acordo às suas respectivas configurações intrínsecas. Conseqüentemente, o processo de otimização dos amplificadores a fibra dopada com érbio é independente da escolha do algoritmo, proporcionando explorar o tempo de convergência e otimização, número de iterações necessárias, tamanho da população e outras métricas de desempenho entre os diversos tipos de algoritmos, investigando aquele que atende adequadamente aos requisitos da aplicação.

Em relação à modelagem sistêmica, a definição eficaz do número e tipos de parâmetros de entrada e saída foi essencial para garantir que os *datasets* entregassem dados precisos para as redes neurais. Diante disso, o modelo empregado de treinamento pode ser substituído e testado por diversos modelos de redes neurais como as convolucionais ou recorrentes; utilizando *tensorflow*, *scikit-learn* ou *pytorch*; alterando o número de camadas internas e de neurônios em cada camada; funções de ativação e otimizadores distintos; e métodos de *backpropagation* e gradiente descendente. Dentre as possibilidades, o treinamento e validação foi ajustado para que obtivesse o menor erro de convergência com menor complexidade dentro de um limiar considerado, assim, alcançando o resultado de modelagem com êxito.

No ambiente laboratorial, a montagem de um amplificador a fibra com érbio demonstrou-se desafiadora devido às adversidades encontradas. O cuidado ao manusear a fibra dopada é fundamental para não comprometer o estado da fibra, especialmente as que possuem dezenas de metros de comprimento. Portanto, antes de implementar o amplificador é necessário obter-se todos os valores com respeito à caracterização de perdas da fibra dopada e da fibra de transmissão, cálculo de perdas das emendas e conectores, cálculo da perda de inserção do acoplador óptico (ocorre diferença entre valor fornecido e medido), caracterização das correntes de polarização do laser de bombeio e calibração do analisador de espectro óptico para os valores recebidos. A completa elaboração garantiu a plena operação de um amplificador real, tal que, pôde-se validar de forma precisa dados de um modelo de amplificador óptico.

O uso de algoritmos de otimização multiobjetivo bio-inspirados, como ferramenta para caracterizar e projetar amplificadores de fibra dopada com érbio para enlaces ópticos multiplexados por comprimento de onda, apresenta resultado satisfatório desse

desenvolvimento. Os resultados indicam que a fronteira de Pareto, definindo a relação cruzada entre duas ou mais métricas de otimização, apresenta a possibilidade de avaliar simultaneamente o compromisso entre ganho, figura de ruído e *ripple* de ganho (ou quaisquer outras métricas de desempenho de interesse). Os resultados permitiram a identificação de configurações ótimas de EDFA variando a potência total de entrada tanto para a banda C e banda L, permitindo adaptar suas operações para as condições sistêmicas investigadas.

Além da investigação realizada da otimização do amplificador como elemento independente, demonstrando elevada acurácia de otimização, a otimização seguinte com maior complexidade dos estágios de amplificação pertencentes a um enlace sistêmico apresentou desempenho significativo. Dado o incremento de funções de avaliação e da estrutura a ser otimizada com enlace contendo amplificadores em cascata, o modelo implementado continuou resultando em uma resposta simplificada independente dos parâmetros de saída. Entre os estágios individuais da banda C e banda L, demonstrou-se resposta similar em termos de magnitude da SNR e formato da curva obtida, demonstrando alta correspondência em sua integração.

A configuração de amplificadores em banda estendida apresentou excelente estabilidade no desempenho sistêmico, garantindo a ótima qualidade de transmissão dos canais conjuntos em duas bandas ópticas acopladas em um mesmo enlace. A otimização dos estágios em configuração paralela ainda demonstrou a inibição dos impactos proveniente da variação da quantidade de canais transmitidos, reduzindo os impactos deletérios dado a variações externas no modelo do sistema óptico. Portanto, obteve-se um modelo otimizado de operação dos estágios na banda estendida que se destaca pelo suprimento de ganho aos sinais e pela redução de impactos degradantes, comprovando a eficiência do resultado alcançado e mostrando que amplificadores podem apresentar resposta de saída similar, entretanto operam com desempenhos distintos, de modo que, os estágios de amplificação comprometam o desempenho sistêmico.

Ao longo da execução do projeto, um dos obstáculos encontrados se deu por conta do tempo de processamento do simulador numérico do amplificador a fibra dopada, em que para se atingir alta taxa de convergência o tempo de execução se estendia por dias/semanas, dessa forma limitando o espaço de otimização, sendo contornado com uso

de aprendizado de máquina.

As soluções adquiridas demonstraram-se satisfatórias com a metodologia utilizada e serve como base para a continuação das novas abordagens que podem ser continuadas além dessa pesquisa. O desenvolvimento de novos sistemas ópticos eficientes e o aperfeiçoamento dos enlaces já implementados, com uso de modelagem artificial e métodos de otimização evidenciam o conceito deste trabalho em concatenar alto desempenho e viabilidade econômica aliado a investigação eficaz e otimizada dos sistemas modernos de comunicação óptica de alta capacidade.

7.1 Trabalhos futuros

Os resultados apresentados exemplificaram de modo geral o projeto de estágios de amplificação otimizados em banda estendida para uma estrutura de enlace de transmissão óptica representativa. Adicionalmente, em termos da estrutura do enlace, na investigação pode-se incrementar outros comprimentos totais de enlace, aumentando o comprimento total e avaliando os impactos sobre a SNR para enlaces mais longos. Ainda no canal de propagação, pode-se variar o número de amplificadores em um mesmo enlace, observando a mudança do comportamento em cada configuração, e considerar em novas investigações outros tipos de fibras de transmissão, como as fibras especiais que apresentam características particulares em atenuação, dispersão e não linearidade.

Do ponto de vista dos transceptores, as configurações que definem os diversos tipos de sistemas ópticos podem ser abordadas, alterando os tipos de formatos de modulação, a taxa de símbolos e a adição de códigos corretores em função dos impactos sobre o desempenho dos sistemas. Além da quantificação de métricas medidas como a razão sinal ruído óptica, pode-se converter essas métricas em termos da capacidade do sistema, ou seja, para uma determinada taxa de erro de bit como requisito sistêmico (BER – *Bit Error Rate*), determina-se a OSNR requerida para cada configuração do sistema de transmissão e analisa-se em relação aos valores obtidos do sistema óptico implementado. Por sua vez, sistemas em banda estendida podem não estar com o espectro completamente preenchido, dado ao número dinâmico de canais presentes, tornando-se necessário investigar o uso otimizado de alocação de canais. A subdivisão de canais entre as bandas disponíveis pode ser realizada para que melhor seja atendida pelos estágios de amplificação com menor

interferência de ruído e de não linearidade.

A partir de toda modelagem e otimização dos estágios de amplificação propostos em banda estendida, construir o enlace de transmissão óptica modelado de forma experimental promove a validação prática dos resultados alcançados. O enlace real ainda conta com condições externas do ambiente que podem ser consideradas na resposta final do experimento, testando a confiabilidade dos estágios projetados e comparando seus desempenhos com amplificadores comerciais já utilizados. Inicialmente, pode-se realizar a montagem e caracterização dos amplificadores ópticos com lasers de bombeio que operam na banda C e banda L para validar os modelos implementados e obter dados experimentais dos estágios de amplificação. A construção do enlace pode ser simplificada utilizando o laço de circulação óptica, sendo necessário implementar apenas um trecho do enlace de transmissão, incluindo um único estágio de amplificação C+L correspondente ao trecho de fibra óptica, e replicando o mesmo trecho até o número de vezes for equivalente ao comprimento total do enlace, considerando os impactos e efeitos deletérios ao longo de cada trecho. Em tese, usar os insumos adquiridos de um modelo óptico simplificado em um modelo de transmissão óptica real, propõe-se a uma alternativa em fornecer recursos para chegar em soluções inovadoras dos sistemas ópticos.

7.2 Publicações

L. G. Maciel Riveros, C. Mineto, L. S. Schanner, J. H. Da Cruz, F. D. Simões, T. Sutili, R. C. Figueiredo and E. Conforti, "Erbium-Doped Fiber Amplifier Design with Multi-Objective Water Cycle Algorithm,"2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMOC53012.2021.9624913.

L. G. M. Riveros, F. L. D. Lucia, Y. R. R. Bustamante, H. A. de Andrade, T. Sutili and R. C. Figueiredo, "Optical Grating Coupling on Silicon Photonics based on Metallized Angle-Polished Fibers,"2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SBFotonIOPC50774.2021.9461934.

C. Mineto, **L. G. M. Riveros**, L. S. Schanner, J. H. Da Cruz, F. D. Simões, T. Sutili, R. C. Figueiredo and E. Conforti, "Performance of Artificial-Intelligence-based

Modelling for Distributed Raman Amplification,"2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMOC53012.2021.9624795.

L. S. Schanner, C. Mineto, **L. G. M. Riveros**, F. D. Simões, T. Sutili and R. C. Figueiredo, "Low-Complexity Method for Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurement,"2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMOC53012.2021.9624878.

L. G. M. Riveros, C. Mineto, B. A. Gomes, F. E. C. Chaves, F. D. Simões, T. Sutili, R. C. Figueiredo e E. Conforti, "Otimização Multiobjetivo Para Projeto de Amplificador a Fibra Dopada Com Érbio Para a Banda L,"20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 2022.

B. A. Gomes, C. Mineto, **L. G. M. Riveros**, F. E. C. Chaves, F. D. Simões, T. Sutili e R. C. Figueiredo, "Arranjo Experimental Automatizado em Python para a Caracterização de Amplificadores Ópticos,"20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 2022.

C. Mineto, **L. G. M. Riveros**, B. A. Gomes, F. E. C. Chaves, F. D. Simões, T. Sutili, R. C. Figueiredo e E. Conforti, "Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais para Emulação de Amplificadores Raman Distribuídos,"20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 2022.

T. Sutili, C. Mineto, **L. G. M. Riveros**, M. J. Da Silva, F. D. Simões and R. C. Figueiredo, "Wideband Amplification for the Next Generation of Optical Transport Networks : (Invited Paper),"2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SBFotonIOPC54450.2022.9992916.

7.2.1 Prêmio

- 2º na competição estudantil de artigos científicos em apresentação oral no 2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference.

Referências

- 1 SUTILI, T.; MINETO, C.; RIVEROS, L. G. M.; SILVA, M. J. D.; SIMÕES, F. D.; FIGUEIREDO, R. C. Wideband Amplification for the Next Generation of Optical Transport Networks : (Invited Paper). In: *2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 25.
- 2 REEKIE, L.; MEARS, R.; POOLE, S.; PAYNE, D. Tunable single-mode fiber lasers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 4, n. 7, p. 956–960, 1986. Citado 4 vezes nas páginas 10, 31, 32 e 33.
- 3 CISCO. The Zettabyte Era: Trends and Analysis. In: . [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>>. Citado na página 21.
- 4 PUTTNAM, B.; LUS, R. S.; RADEMACHER, G.; GALDINO, L.; LAVERY, D.; ERIKSSON, T. A.; AWAJI, Y.; FURUKAWA, H.; BAYVEL, P.; WADA, N. 0.61 Pb/s S, C, and L-Band Transmission in a 125 μ m Diameter 4-core Fiber Using a Single Wide-band Comb Source. *Journal of Lightwave Technology*, p. 1, 2020. ISSN 1558-2213. [doi:10.1109/JLT.2020.2990987]. Citado na página 21.
- 5 KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 113, p. 1151–1158(7), July 1966. ISSN 0020-3270. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1966.0189>>. Citado na página 21.
- 6 KAPRON, P. F.; KECK, B. D.; MAURER, R. D. RADIATION LOSSES IN GLASS OPTICAL WAVEGUIDES. *Applied Physics Letters*, v. 17, n. 10, p. 423–425, 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1653255>>. Citado na página 21.
- 7 MIYA, T.; TERUNUMA, Y.; HOSAKA, T.; MIYASHITA, T. Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μ m. *Electronics Letters*, Institution of Engineering and Technology, v. 15, p. 106–108(2), February 1979. ISSN 0013-5194. Citado na página 22.
- 8 MIKI, T.; ISHIO, H. Viabilities of the Wavelength-Division-Multiplexing Transmission System Over an Optical Fiber Cable. *IEEE Transactions on Communications*, v. 26, n. 7, p. 1082–1087, 1978. Citado na página 22.
- 9 HENRY, P. Introduction to lightwave transmission. *IEEE Communications Magazine*, v. 23, n. 5, p. 12–16, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- 10 MEARS, R.; REEKIE, L.; JAUNCEY, I.; PAYNE, D. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m. *Electronics Letters*, v. 23, n. 19, p. 1026–1028, 1987. Disponível em: <<https://eprints.soton.ac.uk/78511/>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 31.
- 11 DAKSS, M.; MELMAN, P. Amplified spontaneous Raman scattering and gain in fiber Raman amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 3, n. 4, p. 806–813, 1985. Citado na página 23.

- 12 AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2010. 1–631 p. [doi:10.1002/9780470918524]. ISBN 9780470505113. Citado na página 24.
- 13 VAREILLE, G.; PITEL, F.; MARCEROU, J. 3 Tbit/s (300/spl times/11.6Gbit/s) transmission over 7380 km using C+L band with 25GHz channel spacing and NRZ format. In: *OFC 2001. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition (IEEE Cat. 01CH37171)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 4, p. PD22–PD22. Citado na página 24.
- 14 EMORI, Y.; NAMIKI, S. 100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes. In: *OFC/IOOC . Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*. [S.l.: s.n.], 1999. Supplement, p. PD19/1–PD19/3 Suppl. Citado na página 24.
- 15 LEWIS, S.; CHERNIKOV, S.; TAYLOR, J. Multi-wavelength pumped silica-fibre Raman amplifiers. In: *Optical Amplifiers and their Applications*. Optica Publishing Group, 1999. p. ThA2. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OAA-1999-ThA2>>. Citado na página 24.
- 16 CAI, J. X.; BATSHON, H. G.; MAZURCZYK, M. V.; DAVIDSON, C. R.; SINKIN, O. V.; WANG, D.; PASKOV, M.; PATTERSON, W. W.; BOLSHTYANSKY, M. A.; FOURSAs, D. G. 94.9 Tb/s Single Mode Capacity Demonstration over 1,900 km with C+L EDFAs and Coded Modulation. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 24.
- 17 IONESCU, M.; GALDINO, L.; EDWARDS, A.; JAMES, J.; PELOUCH, W.; SILLEKENS, E.; SEMRAU, D.; LAVERY, D.; KILLEY, R. I.; BARNES, S.; BAYVEL, P.; DESBRUSLAIS, S. 91 nm C+L Hybrid Distributed Raman–Erbium-Doped Fibre Amplifier for High Capacity Subsea Transmission. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 24.
- 18 OLIVEIRA, J. R. F. de; MOURA, U. C. de; PAIVA, G. E. R. de; FREITAS, A. P. de; CARVALHO, L. H. H. de; PARAHYBA, V. E.; OLIVEIRA, J. C. R. F. de; ROMERO, M. A. Hybrid EDFA/Raman Amplification Topology for Repeaterless 4.48 Tb/s (40 x 112 Gb/s DP-QPSK) Transmission Over 302 Km of G.652 Standard Single Mode Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 16, p. 2799–2808, 2013. Citado na página 24.
- 19 LIU, X. Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking Towards the 5G Era. *iScience*, v. 22, 11 2019. Citado na página 25.
- 20 CAI, J.-X.; BATSHON, H. G.; MAZURCZYK, M. V.; SINKIN, O. V.; WANG, D.; PASKOV, M.; DAVIDSON, C. R.; PATTERSON, W. W.; TURUKHIN, A.; BOLSHTYANSKY, M. A.; FOURSAs, D. G. 51.5 Tb/s Capacity over 17,107 km in C+L Bandwidth Using Single-Mode Fibers and Nonlinearity Compensation. *Journal of Lightwave Technology*, v. 36, n. 11, p. 2135–2141, 2018. Citado na página 25.
- 21 IGARASHI, K.; TSURITANI, T.; MORITA, I.; TSUCHIDA, Y.; MAEDA, K.; TADAKUMA, M.; SAITO, T.; WATANABE, K.; IMAMURA, K.; SUGIZAKI, R.; SUZUKI, M. 1.03-Exabit/skm Super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km seven-core fiber. In: *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3. Citado na página 25.

- 22 ARI, M.; TAPLAMACIOGLU, M.; GOKTAS, H. Analysis of Erbium Doped Fibre Amplifiers. *IEEE Journal of Light wave Technology*, v. 26, n. 11, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 35.
- 23 KARÁSEK, M. The design of L-band EDFA for multiwavelength applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, IOP Publishing, v. 3, n. 1, p. 96–102, 12 2000. [doi:10.1088/1464-4258/3/1/316]. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- 24 HAMAOKA, F. Ultra-Wideband Transmission and High-Symbol Rate Signal Handling Technologies. In: *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–43. [doi:10.1364/OFC.2020.W3E.1]. Citado na página 27.
- 25 OKAMOTO, S.; MINOGUCHI, K.; HAMAOKA, F.; HORIKOSHI, K.; MATSUSHITA, A.; NAKAMURA, M.; YAMAZAKI, E.; KISAKA, Y. A study on the effect of ultra-wide band WDM on optical transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 38, n. 5, p. 1061–1070, 2020. [doi:10.1109/JLT.2019.2962178]. Citado na página 27.
- 26 SNITZER, E. Optical Maser Action of Nd^{+3} in a Barium Crown Glass. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 7, p. 444–446, Dec 1961. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.7.444>>. Citado na página 31.
- 27 WEBER, M. J. Fluorescence and glass lasers. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 47, n. 1, p. 117–133, 1982. ISSN 0022-3093. Proceedings of the Conference on Optical Properties of Glass and Optical Materials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022309382903507>>. Citado na página 31.
- 28 DESURVIRE, E.; SIMPSON, J. R.; BECKER, P. C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Opt. Lett.*, Optica Publishing Group, v. 12, n. 11, p. 888–890, Nov 1987. Disponível em: <<https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-12-11-888>>. Citado na página 33.
- 29 MEARS, R. J.; REEKIE, L.; JAUNCEY, I. M.; PAYNE, D. N. High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm . In: *Optical Fiber Communication*. Optica Publishing Group, 1987. p. W12. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-1987-W12>>. Citado na página 33.
- 30 MEARS, R. J.; REEKIE, L.; JAUNCEY, I. M.; PAYNE, D. N. Optical fiber amplifiers for 1.5- μm operation. In: *Optical Fiber Communication*. Optica Publishing Group, 1988. p. ThD3. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-1988-ThD3>>. Citado na página 33.
- 31 ARMITAGE, J. Spectral dependence of the small-signal gain around 1.5- μm in erbium doped silica fiber amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v. 26, n. 3, p. 423–425, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- 32 GILES, C.; DESURVIRE, E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 9, n. 2, p. 271–283, 1991. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 38, 39 e 40.
- 33 GILES, C.; DESURVIRE, E. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 9, n. 2, p. 147–154, 1991. Citado na página 41.

- 34 GHAZISAEIDI, A.; IVAN, F. de J. R.; RIOS-MULLER, R.; SCHMALEN, L.; TRAN, P.; BRINDEL, P.; MESEGUER, A. C.; HU, Q.; BUCHALI, F.; CHARLET, G.; RENAUDIER, J. Advanced C+L-Band Transoceanic Transmission Systems Based on Probabilistically Shaped PDM-64QAM. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 7, p. 1291–1299, 2017. Citado na página 42.
- 35 CAI, J.-X.; BATSHON, H. G.; MAZURCZYK, M. V.; SINKIN, O. V.; WANG, D.; PASKOV, M.; PATTERSON, W. W.; DAVIDSON, C. R.; CORBETT, P. C.; WOLTER, G. M.; HAMMON, T. E.; BOLSHTYANSKY, M. A.; FOURSAs, D. G.; PILIPETSKII, A. N. 70.46 Tb/s Over 7,600 km and 71.65 Tb/s Over 6,970 km Transmission in C+L Band Using Coded Modulation With Hybrid Constellation Shaping and Nonlinearity Compensation. *Journal of Lightwave Technology*, v. 36, n. 1, p. 114–121, 2018. [doi:10.1109/JLT.2017.2757281]. Citado na página 42.
- 36 ROS, F. da; MOURA, U. de; LUIS, R.; RADEMACHER, G.; PUTTNAM, B.; BRUSIN, A. R.; CARENA, A.; AWAJI, Y.; FURUKAWA, H.; ZIBAR, D. Optimization of a Hybrid EDFA-Raman C+L Band Amplifier through Neural-Network Models. In: *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 43.
- 37 VERMA, R.; JANYANI, V.; NANDA, S. J. Design and Optimization of EDFA-Raman Hybrid Optical Amplifier using Grey Wolf Optimizer. In: *2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISc)*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 1, p. 1–6. Citado na página 43.
- 38 ROS, F. da; MOURA, U. C. de; YANKOV, M. P. Machine learning-based EDFA Gain Model Generalizable to Multiple Physical Devices. In: *2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado na página 44.
- 39 JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; YOSHIMATSU, T.; KOBAYASHI, T.; MIYAMOTO, Y.; YONENAGA, K.; TAKADA, A.; ISHIDA, O.; MATSUOKA, S. Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s. In: *2008 34th European Conference on Optical Communication*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–2. Citado na página 44.
- 40 ZHU, S.; GUTTERMAN, C. L.; MO, W.; LI, Y.; ZUSSMAN, G.; KILPER, D. C. Machine Learning Based Prediction of Erbium-Doped Fiber WDM Line Amplifier Gain Spectra. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 44.
- 41 YANKOV, M. P.; KAMINSKI, P. M.; HANSEN, H. E.; ROS, F. D. SNR Optimization of Multi-Span Fiber Optic Communication Systems Employing EDFAs With Non-Flat Gain And Noise Figure. *Journal of Lightwave Technology*, v. 39, n. 21, p. 6824–6832, 2021. Citado na página 45.
- 42 BARBOZA, E. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; CHAVES, D. A. R.; MARTINS-FILHO, J. F.; COELHO, L. D.; ALMEIDA, R. C.; SILVA, M. J.; ARAUJO, D. R. B. de; MARTINS, J. A. Analyzing the Objective Functions for Multi-Objective Optimization of the Amplifier Adaptive Control of Operating Point. In: *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 45.

- 43 BARBOZA, E. de A.; SILVA, M. J. da; COELHO, L. D.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; FILHO, J. F. M. Amplifier Adaptive Control of Operating Point Considering Non-Linear Interference. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 30, n. 6, p. 573–576, 2018. Citado na página 45.
- 44 POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; JIANG, Y.; FORGHIERI, F. 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 46, 65 e 66.
- 45 BARBOZA, E. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; CHAVES, D. A. R.; MARTINS-FILHO, J. F.; COELHO, L. D.; ALMEIDA, R. C.; SILVA, M. J.; XAVIER, A. V. S.; ARAUJO, D. R. B. de; MARTINS, J. A. Multi-objective Optimization of Amplifier Operating Point and Launch Signal Power Pre-emphasis in a Cascade of EDFAs. In: *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 46.
- 46 LIMA, F. C. N. O.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; BARBOZA, E. A.; MARTINS-FILHO, J. F. 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)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 47.
- 47 BARBOZA, E. d. A.; SILVA, A. A. B. da; FILHO, J. C. P.; SILVA, M. J. da; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. Optical Amplifier Response Estimation Considering Non-Flat Input Signals Characterization Based on Artificial Neural Networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 39, n. 1, p. 208–215, 2021. Citado na página 47.
- 48 SOMA, D.; BEPPU, S.; MAEDA, K.; TAKASAKA, S.; SUQIZAKI, R.; TAKAHASHI, H.; TSURITANI, T. Long-Haul MCF Transmission Using Full C+L-Band 19-Core Cladding-Pumped EDFA. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 48.
- 49 GILES, C.; BURRUS, C.; DIGIOVANNI, D.; DUTTA, N.; RAYBON, G. Characterization of erbium-doped fibers and application to modeling 980-nm and 1480-nm pumped amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 3, n. 4, p. 363–365, 1991. Citado na página 51.
- 50 GIAGKIOZIS, I.; FLEMING, P. J. Pareto Front Estimation for Decision Making. *Evolutionary Computation*, v. 22, n. 4, p. 651–678, 2014. [doi:10.1162/EVCO_a_00128]. Citado na página 60.
- 51 SADOLLAH, A.; ESKANDAR, H.; BAHREININEJAD, A.; KIM, H. J. Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems. *Soft Computing*, Springer, v. 19, p. 2587–2603, Sep 2015. [doi:10.1007/s00500-014-1424-4]. Citado na página 60.
- 52 ESKANDAR, H.; SADOLLAH, A.; BAHREININEJA, A.; SHUKOR, M. A. Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*, v. 110-111, p. 151–166, Sep 2012. [doi:10.1016/j.compstruc.2012.07.010]. Citado na página 61.
- 53 FERRARI, A.; FILER, M.; BALASUBRAMANIAN, K.; YIN, Y.; ROUZIC, E. L.; KUNDRAT, J.; GRAMMEL, G.; GALIMBERTI, G.; CURRI, V. GNPpy: an open source

application for physical layer aware open optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 12, n. 6, p. C31–C40, 2020. Citado na página 62.

54 POGGIOLINI, P. The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 24, p. 3857–3879, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 63, 64 e 65.

55 D., J. K. L. XL. A new relation between electricity and light: Dielectrified media birefringent. *Philosophical Magazine Series 1*, v. 50, p. 337–348, 1875. Citado na página 63.

56 TACHIBANA, M.; LAMING, R.; MORTEL, P.; PAYNE, D. Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 3, n. 2, p. 118–120, 1991. Citado na página 68.

57 RIVEROS, L. G. M.; MINETO, C.; SCHANNER, L. S.; JUNIOR, J. H. D. C.; SIMÕES, F. D.; SUTILI, T.; FIGUEIREDO, R. C.; CONFORTI, E. Erbium-Doped Fiber Amplifier Design with Multi-Objective Water Cycle Algorithm. In: *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 87.

58 RIVEROS, L. G. M.; MINETO, C.; GOMES, B. A.; CHAVES, F. E. C.; SIMÕES, F. D.; SUTILI, T.; FIGUEIREDO, R. C.; CONFORTI, E. Otimização Multiobjetivo Para Projeto de Amplificador a Fibra Dopada Com Érbio Para a Banda L. 2022. Citado na página 92.