



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Julia Aline Sousa Maciel

**Projeto de Sistemas Ópticos Sem Repetição Baseado na  
Otimização Conjunta dos Estágios de Transmissão,  
Amplificação e Recepção**

Campinas

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Julia Aline Sousa Maciel

## **Projeto de Sistemas Ópticos Sem Repetição Baseado na Otimização Conjunta dos Estágios de Transmissão, Amplificação e Recepção**

Dissertação de Mestrado 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. Darli Augusto de Arruda Mello

**Co-orientador:** Dr. Rafael Carvalho Figueiredo

**Co-orientador:** Dr. Tiago Sutili

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pela aluna Julia Aline Sousa Maciel, e orientada pelo Prof. Dr. Darli Augusto de Arruda Mello.

Campinas

2024

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

M187p Maciel, Julia Aline Sousa, 1997-  
Projeto de sistemas ópticos sem repetição baseado na otimização conjunta dos estágios de transmissão, amplificação e recepção / Julia Aline Sousa Maciel. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Darli Augusto de Arruda Mello.  
Coorientadores: Rafael Carvalho Figueiredo e Tiago Sutili.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Comunicações ópticas (Transmissão de dados). 2. Otimização. 3. Informação mútua. 4. Capacidade do canal. I. Mello, Darli Augusto de Arruda, 1976-. II. Figueiredo, Rafael Carvalho, 1982-. III. Sutili, Tiago, 1988-. IV. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. V. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Design of unrepeated optical systems based on joint optimization of transmission, amplification and reception stages

**Palavras-chave em inglês:**

Optical Communications (Data transmission)

Optimization

Mutual information

Channel capacity

**Área de concentração:** Telecomunicações e Telemática

**Titulação:** Mestra em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Darli Augusto de Arruda Mello [Orientador]

José Hélio da Cruz Júnior

Leonardo Didier Coelho

**Data de defesa:** 27-06-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-7928-600X>

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/7590919253961655>

# Comissão Julgadora - Dissertação de Mestrado

**Candidato:** Julia Aline Sousa Maciel (RA: 224001)

**Data da Defesa:** 27 de junho de 2024

**Título da Tese:** “Projeto de Sistemas Ópticos Sem Repetição Baseado na Otimização Conjunta dos Estágios de Transmissão, Amplificação e Recepção”

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

Prof. Dr. José Hélio da Cruz Júnior (Membro titular, UFRN)

Prof. Dr. Leonardo Didier Coelho (Membro titular, UFPE)

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta 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 AO MEU PAINHO, QUE É O RESPONSÁVEL POR TORNAR  
POSSÍVEL MINHA CAMINHADA ATÉ AQUI.*

# Agradecimentos

Agradeço a paiinho por todo o apoio durante toda minha vida. Por permitir que eu pudesse priorizar meus estudos, investindo na minha educação e sendo essencial na construção do meu caráter. Obrigada por tudo, paiinho.

Agradeço à mainha por sempre torcer por mim, estar ao meu lado, e ser a minha maior inspiração de luta, resistência e amor. Agradeço a Juliany e Diego, pelo companheirismo durante toda a vida. Faço tudo por vocês.

Agradeço ao meu amor, Isaac, por ser meu porto seguro, por dividir comigo tantas fases e desafios da vida. E, deixar meus dias mais leves e repletos de alegria.

Agradeço aos meus co-orientadores Dr. Rafael Carvalho e Dr. Tiago Sutili por todo suporte na realização deste trabalho. Admiro a trajetória acadêmica de vocês e sou imensamente grata por todo conhecimento compartilhado.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Darli por me aceitar como aluna de mestrado, por ser sempre solícito e contribuir para que este trabalho fosse bem sucedido. Agradeço ao meu supervisor de estágio, Dr. José Hélio, por ter me ensinado grande parte dos conceitos da área e por ter colaborado com meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Agradeço aos professores da banca, Prof. José Hélio, Prof. Leonardo Didier, Prof. Evandro e Profa. Mônica por todas as contribuições no meu trabalho.

Agradeço às minhas amigas Marília e Ana Letícia por estarem ao meu lado nesses mais de 10 anos de amizade. Obrigada por deixarem a vida mais feliz.

Agradeço à grande amiga que a engenharia elétrica me deu, Ilaneide, por todas as conversas e desabafos sobre as dificuldades e anseios do futuro, e por comemorar as conquistas comigo. Sou grata por estarmos juntas apoiando uma a outra em cada nova fase da vida.

Agradeço à Carine pela amizade sincera, e por deixar esses anos de mestrado mais leves e divertidos.

Agradeço a toda equipe do CPQD pelo apoio e contribuições neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para que este trabalho se tornasse possível.

# Resumo

Os sistemas de comunicação óptica sem repetição proporcionam transmissão de alta capacidade com boa relação custo-benefício para enlaces de longas distâncias, nos quais a amplificação intermediária do sinal é inviável ou extremamente cara. Como exemplos desses cenários, podem-se mencionar sistemas submarinos interconectando plataformas de petróleo, ou sistemas subfluviais de longa distância na região amazônica. Dessa forma, observa-se a constante busca por tecnologias e métodos de projetar tais sistemas objetivando um aumento no desempenho do sistema em termos de taxa de transmissão ou alcance. Dentre tais tecnologias, destacam-se a utilização de técnicas avançadas de amplificação, como o amplificador Raman distribuído e o amplificador remoto opticamente bombeado. Tais métodos de amplificação devem ser implementados no sistema de forma a otimizar o desempenho, respeitando as limitações de potência máxima do enlace, e encontrando a melhor relação de compromisso entre efeitos não lineares e o ruído aditivo de amplificação. Adicionalmente, a formatação probabilística vem ganhando espaço como uma técnica de modulação codificada que maximiza a taxa alcançável do canal, aproximando-a do limite de Shannon.

Sendo assim, dada a importância de projetar os sistemas visando máximo desempenho, este trabalho explora a utilização de um algoritmo de otimização para determinar os parâmetros sistêmicos de transmissão, recepção e dos amplificadores ópticos do sistema sem repetição, em enlaces empregando a formatação probabilística. A métrica de desempenho considerada nas otimizações é maximizar a informação mútua. Dessa forma, após o projeto do sistema sem repetição por meio do algoritmo de rede neural (*Neural Network Algorithm* – NNA), adotam-se diferentes distribuições de probabilidade para o sinal transmitido, a saber a distribuição de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana, em que seus parâmetros são também otimizados pelo NNA. A capacidade do sistema de transmissão é obtida por meio do algoritmo de Blahut-Arimoto, que considera uma distribuição de probabilidade ótima. Como resultado, observa-se que as distribuições de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana obtêm desempenho similar em termos de informação mútua, com um ganho de 0,1 bit/símbolo e 0,08 bit/símbolo, respectivamente, em relação à distribuição uniforme, considerando as duas polarizações do sinal óptico. O re-

sultado do algoritmo de Blahut-Arimoto proporciona um ganho de aproximadamente 0,26 bit/símbolo para as duas polarizações.

**Palavras-chaves:** comunicações ópticas; sistemas ópticos sem repetição; otimização sistêmica; formatação probabilística; algoritmo de Blahut-Arimoto.

# Abstract

Unrepeated optical communication systems provide cost-effective high-capacity long-distance transmission systems for which intermediate signal amplification is unfeasible or extremely expensive. As examples of these scenarios, we can mention submarine systems interconnecting oil platforms or long-distance subfluvial systems in the Amazon region. Thus, there is a constant search for technologies and methods of designing such systems aiming to increase the performance or range of the system. Among such technologies, the use of advanced amplification techniques stands out, such as the distributed Raman amplifier and the optically pumped remote amplifier. Such amplification methods must be implemented in the system in order to optimize the performance, respecting the limitations of the maximum power of the link, to avoid non-linear effects, and the insertion of noise, to guarantee a minimum optical signal-to-noise ratio so that the received signal can be treated correctly. Additionally, probabilistic shaping has been gaining ground as a coded modulation technique that maximizes the channel's achievable rate, bringing it closer to the Shannon limit.

Therefore, given the importance of designing systems for maximum performance, this work explores the use of an optimization algorithm to determine the systemic parameters of transmission, reception, and optical amplifiers of the unrepeated system employing probabilistic shaping (PS). The figure of merit considered in the optimizations is the maximized mutual information. Thus, after designing the unrepeated system using the neural network algorithm (NNA), different probability distributions are adopted for the transmitted signal, namely the Maxwell-Boltzmann and Supergaussian distributions, in that its parameters are also optimized by NNA. The capacity of the transmission system is obtained using the Blahut-Arimoto algorithm, which considers an optimal probability distribution. As a result, it is observed that the Maxwell-Boltzmann and SuperGaussian distributions obtain similar performance in terms of mutual information, with a gain of 0.1 bit/symbol and 0.08 bit/symbol, respectively, in relation to uniform distribution considering the two polarizations of the optical signal. The result of the Blahut-Arimoto algorithm also provides a gain of approximately 0.26 bit/symbol for both polarizations.

**Keywords:** optical communication; unrepeated optical systems; systemic optimization; probabilistic shaping; Blahut-Arimoto algorithm.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquemático de um sistema de comunicação óptica sem repetição com amplificação Raman distribuída e amplificação óptica por bombeio remoto (ROPA) e fibra única para propagação dos sinais de transmissão e de bombeio. . . . .	27
Figura 2 – Espectro do ganho Raman considerando fibra óptica monomodo padrão.	29
Figura 3 – Espectro do ganho e absorção de um EDFA. . . . .	30
Figura 4 – Esquemático dos níveis de energia dos íons de érbio de uma fibra dopada com érbio. . . . .	31
Figura 5 – Arquitetura de um EDFA. . . . .	31
Figura 6 – Esquemático de um ROPA considerando que o sinal e o bombeio propagam pela mesma fibra. . . . .	32
Figura 7 – Esquemático de um ROPA considerando que o bombeio propaga por uma fibra dedicada. . . . .	33
Figura 8 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicação digital.	35
Figura 9 – Otimização do $\lambda$ na distribuição de Maxwell-Boltzmann para a modulação de DP-16QAM (adaptado de [1]). . . . .	37
Figura 10 – Otimização do $\lambda$ na distribuição de Maxwell-Boltzmann para a modulação de DP-64QAM. . . . .	38
Figura 11 – Conjunto de valores ótimos de $\lambda$ para a modulação de DP-16QAM (adaptado de [1]). . . . .	39
Figura 12 – Conjunto de valores ótimos de $\lambda$ para a modulação de DP-64QAM. . .	39
Figura 13 – Constelações 16-QAM empregando PS com (a) $\lambda = 0,01$ e (b) $\lambda = 0,1$ .	40
Figura 14 – Constelações 64-QAM empregando PS com (a) $\lambda = 0,01$ e (b) $\lambda = 0,1$ .	40
Figura 15 – Capacidade teórica de uma modulação 16QAM e 64QAM. . . . .	41
Figura 16 – Diagrama de blocos que descreve o processo de geração das constelações não uniformes. . . . .	42
Figura 17 – Informação mútua para transmissão óptica DP-64QAM em <i>back-to-back</i> .	44
Figura 18 – Diagrama da implementação do algoritmo de Blahut-Arimoto. . . . .	47

Figura 19 – Comparação entre curvas de informação mútua supracitadas e a resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto em função da SNR de um canal AWGN. . . . .	49
Figura 20 – Diagrama de blocos do modelo de simulação simplificado a ser empregado nas simulações de otimização sistêmica empregando o método aqui proposto. . . . .	51
Figura 21 – Diagrama de blocos do modelo de simulação com foco nos elementos considerados na composição do canal óptico para a otimização sistêmica do enlace sem repetição empregando o método aqui proposto. . . . .	51
Figura 22 – Fluxograma da simulação de um sistema óptico sem repetição. . . . .	52
Figura 23 – Perfil de potência de propagação para um sistema sem repetição empregando amplificação Raman distribuída e amplificação remota opticamente bombeada nas duas extremidades do enlace. . . . .	53
Figura 24 – Esquemático do funcionamento do NNA (adaptado de [2]). . . . .	56
Figura 25 – Diagrama de blocos do processo do NNA (adaptado de [2]). . . . .	57
Figura 26 – Esquemático do simulador óptico considerando uma transmissão em um enlace óptico sem repetição, a título de exemplificação, em que os componentes em preto se referem ao domínio óptico, os em vermelho ao domínio digital e em azul ao algoritmo de otimização. . . . .	58
Figura 27 – Constelação de referência 64QAM, apresentando os valores dos símbolos complexos e inteiros após a codificação. . . . .	63
Figura 28 – Informação mútua média entre as duas polarizações em função da iteração do algoritmo de otimização. . . . .	65
Figura 29 – Perfil de potência e OSNR do sistema sem repetição resultante da otimização de seus parâmetros de transmissão, recepção e amplificação pelo NNA, com parâmetros otimizados apresentados na Tabela 6. . . . .	67
Figura 30 – Valores da função custo, informação mútua média entre as duas polarizações, em função da iteração do algoritmo de otimização . . . . .	68
Figura 31 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann. . . . .	69
Figura 32 – Valores da função custo, informação mútua média entre as duas polarizações em função da iteração do algoritmo de otimização . . . . .	70

Figura 33 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição de Supergaussiana.	71
Figura 34 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição genérica resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto . . . . .	72
Figura 35 – Constelações com as distribuições de probabilidade obtidas no presente trabalho. . . . .	74

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos parâmetros para simulação de transmissão óptica em <i>back-to-back</i> . . . . .	43
Tabela 2 – Principais parâmetros do enlace óptico sem repetição. . . . .	54
Tabela 3 – Valores dos parâmetros para simulação do sistema óptico sem repetição para validação. . . . .	55
Tabela 4 – Intervalo de valores dos parâmetros do sistema óptico sem repetição considerados no processo de otimização pelo algoritmo NNA. . . . .	64
Tabela 5 – Valores dos parâmetros de implementação do algoritmo de otimização NNA para a otimização do sistema óptico sem repetição. . . . .	64
Tabela 6 – Valores ótimos após a convergência do algoritmo NNA para os parâmetros do sistema óptico sem repetição otimizados. . . . .	66
Tabela 7 – Valores dos parâmetros do algoritmo NNA para a otimização da distribuição de Maxwell-Boltzmann. . . . .	68
Tabela 8 – Valores dos parâmetros do algoritmo de otimização NNA para a otimização da distribuição Supergaussiana. . . . .	70
Tabela 9 – Valores de informação mútua média entre as polarizações para todos os casos de constelações obtidos neste trabalho. . . . .	74

# Lista de acrônimos, variáveis e unidades

## Acrônimos

AIR	<i>Achievable Information Rates</i> – Taxa de Informação Alcançável
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> – Ruído Aditivo Gaussiano Branco
BER	<i>Bit Error Rate</i> – Taxa de Erro de Bit
BPS	<i>Blind Phase Search</i> – Busca Cega de Fase
CCDM	<i>Constant Composition Distribution Matching</i> – Casamento de Distribuição por Composição Constante
CS	<i>Constellation Shaping</i> – Formatação de Constelação
CW	<i>Continuous Wave</i> – Sinal de Onda Contínua
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i> – Conversor Analógico-Digital
DBP	<i>Digital Back-Propagation</i> – Algoritmo de Retropropagação Digital
DP	<i>Dual Polarization</i> – Dupla Polarização
DRA	<i>Distributed Raman Amplifier</i> – Amplificador Raman Distribuído
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> – Processamento Digital de Sinais
EDF	<i>Erbium-Doped Fiber</i> – Fibra Dopada com Érbio
FDE	<i>Frequency Domain Equalization</i> – Equalização no Domínio da Frequência
FEC	<i>Forward Error Correction</i> – Códigos Corretores de Erro
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> – Mistura de Quatro Ondas
GCS	<i>Geometric Constellation Shaping</i> – Formatação de Constelação Geométrica
OPC	<i>Optical Phase Conjugation</i> – Conjugação de Fase Óptica
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> – Relação Sinal-Ruído Óptica

PON	<i>Passive Optical Network</i> – Rede Óptica Passiva
ROPA	<i>Remote Optically Pumped Amplifier</i> – Amplificador Óptico de Bombeio Remoto
RPU	<i>Remote Pump Unit</i> – Unidade de Bombeio Remoto
SPM	<i>Self Phase Modulation</i> - Auto-modulação de Fase
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i> – Espalhamento Raman Estimulado
SSFM	<i>Split-Step Fourier Method</i> – Método de Fourier de Passo Dividido
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i> – Fibra Monomodo Padrão
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i> – Modulação Cruzada de Fase

# Sumário

<b>Resumo</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>Lista de ilustrações</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>Lista de tabelas</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>Lista de acrônimos, variáveis e unidades</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>19</b>
1.1 Motivação . . . . .	19
1.2 Estado da arte . . . . .	21
1.3 Contribuição . . . . .	24
<b>2 Sistemas ópticos sem repetição</b> . . . . .	<b>26</b>
2.1 Arquitetura . . . . .	26
2.2 Amplificação Raman distribuída . . . . .	28
2.3 Amplificação a fibra dopada com érbio . . . . .	29
2.4 Amplificação com bombeio remoto . . . . .	32
<b>3 Fundamentos de formatação de constelação</b> . . . . .	<b>34</b>
3.1 Formatação probabilística e geométrica . . . . .	34
3.2 Geração da formatação probabilística . . . . .	42
3.3 Cálculo de capacidade em canais ópticos sem repetição . . . . .	45
<b>4 Otimização de um sistema óptico sem repetição considerando a formatação probabilística</b> . . . . .	<b>50</b>
4.1 Heurística de otimização . . . . .	55
<b>5 Resultados</b> . . . . .	<b>62</b>
5.1 Otimização do enlace sem repetição considerando modulação 64QAM uniformente . . . . .	62
5.2 Otimização das probabilidades a-priori considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann . . . . .	66
5.2.1 Otimização das probabilidades a-priori considerando a distribuição Supergaussiana . . . . .	69

5.2.2	Otimização das probabilidades a-priori considerando o algoritmo Blahut-Arimoto modificado . . . . .	71
5.3	Comparação entre os resultados . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>76</b>
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	77
6.2	Lista de publicações . . . . .	78
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>79</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Atualmente, observa-se um aumento exponencial do volume de dados transmitidos para atender a infraestrutura das redes de telecomunicações. Em especial, tal tendência é suportada por sistemas de comunicações com crescente capacidade de transmissão, permitindo o desenvolvimento de redes 6G, cidades inteligentes, indústria 4.0, entre outros novos paradigmas tecnológicos. Neste cenário, as comunicações ópticas são uma das tecnologias essenciais para prover a capacidade necessária de dados em diversas aplicações. Dentre tais sistemas, podem-se destacar os ditos sistemas de comunicação óptica sem repetição, os quais são caracterizados pela ausência de elementos ativos ao longo do enlace, explorando, para tanto, técnicas de amplificação avançadas combinadas de forma a transmitir o sinal com alta potência e permitindo, em última instância, o aumento do alcance do sistema [3]. Tais sistemas englobam enlaces de comunicação submarinos e enlaces ópticos que necessitam ser instalados em áreas de difícil acesso e instalação. Entretanto, a propagação de sinais com potências elevadas ao longo do enlace gera efeitos não lineares, os quais degradam significativamente a qualidade de transmissão do canal óptico, especialmente em sistemas de longo alcance. Dessa forma, de modo a evitar tal degradação não linear, usualmente realiza-se o projeto do enlace limitando a potência máxima de propagação dos canais transmitidos, a qual será resultado da sua potência de lançamento e do ganho dos amplificadores ópticos de transmissão. Alternativamente, pode-se também fazer uso de técnicas para compensação de tais efeitos não lineares no domínio óptico ou digital, acarretando um aumento significativo na complexidade dos sistemas propostos.

Em específico, tais efeitos induzem variações na fase do canal, incluindo a sua auto-modulação de fase (*Self Phase Modulation* – SPM), ou a modulação cruzada de fase entre canais adjacentes (*Cross-Phase Modulation* – XPM). Além destes, em cenários mais críticos, existe ainda a mistura de quatro ondas (*Four Wave Mixing* – FWM), a qual gera novas portadoras ópticas como resultado da interação não linear entre os sinais

transmitidos. Na literatura são apresentados diversos algoritmos de processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing* – DSP) que podem ser utilizados para compensar tais efeitos, como o algoritmo de retropropagação digital (*Digital Back-Propagation* – DBP) e suas variações. Contudo, a implementação prática de tais algoritmos é complexa e demanda alto poder computacional. Neste contexto, no que tange os sistemas ópticos sem repetição, há trabalhos que exploram a compensação de não linearidades no domínio óptico, por exemplo através da conjugação de fase óptica (*Optical Phase Conjugation* – OPC) [4] e um módulo de pré-compensação óptico baseado na simetria da propagação por um enlace sem repetição [5]. Dessa forma, dada a alta complexidade de tais técnicas, na literatura, encontram-se trabalhos explorando o projeto de tais sistemas baseado na otimização conjunta dos seus parâmetros sistêmicos e de amplificação, de forma a projetar o sistema maximizando sua taxa de transmissão ou alcance, além de respeitar os limites de potência para evitar a geração dos efeitos não lineares.

Em tal contexto, mais especificamente na geração e recepção dos sinais ópticos, ganhos de desempenho podem ser alcançados por meio do desenvolvimento da formatação probabilística de constelação [6, 7]. Nela, ocorre a geração dos símbolos com distribuição geométrica uniforme e probabilidade de transmissão de símbolos não uniforme, de forma a maximizar a informação mútua. Em sistemas com modulação M-QAM e canal com ruído Gaussiano aditivo branco (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN), a distribuição de Maxwell-Boltzmann maximiza a informação mútua. Entretanto, esta distribuição é subótima considerando os demais efeitos deletérios intrínsecos ao canal de comunicação óptica, especialmente aqueles decorrentes da não linearidade da fibra óptica. Alternativamente à formatação probabilística, os símbolos transmitidos podem possuir um mapeamento não equidistante na constelação, resultando na implementação da técnica conhecida como formatação geométrica de constelações, também bastante explorada como uma alternativa para deixar o sinal transmitido mais robusto à ação dos efeitos de ruído aditivo e não lineares no decorrer de sua propagação pelo enlace óptico [8]. Em específico para os sistemas sem repetição aqui explorados, o uso de tais técnicas permite a adoção de maiores potências de propagação do canal ao longo do enlace, em última instância podendo resultar em ganhos em termos de alcance e/ou taxa agregada de transmissão. Entretanto, a formatação probabilística ou geométrica ainda não foram bem exploradas no contexto das comunicações ópticas sem repetição, cenário especialmente limitado pela ocorrência

de efeitos não lineares, especialmente se otimizadas considerando uma visão holística do enlace óptico completo [9].

Usualmente, tais sistemas ópticos são simulados considerando a propagação de sinais de onda contínua (*Continuous Wave* – CW), objetivando avaliar os seus níveis de potência e inserção de ruído ao longo do enlace, sem permitir mensurar o impacto dos efeitos não lineares. Sendo assim, do ponto de vista sistêmico, no projeto de um sistema de comunicação óptica sem repetição empregando tal abordagem, a escolha dos parâmetros operacionais, principalmente os relacionados aos amplificadores ópticos, é realizada visando maximizar a relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal-to-Noise Ratio* – OSNR) na recepção, respeitando limites pré-definidos de potência de propagação relacionados a ocorrência de efeitos não lineares. Nestes sistemas, de modo a maximizar o seu alcance e capacidade, é comum a combinação de amplificadores Raman distribuídos (*Distributed Raman Amplifier* – DRA) com amplificadores remotos opticamente bombeados (*Remote Optically Pumped Amplifier* – ROPA) baseados no uso de trechos de fibras dopadas com érbio (*Erbium-Doped Fiber* – EDF) posicionados estrategicamente ao longo do enlace. Adicionalmente, é comum que tais subsistemas de amplificação sejam implementados no lado do transmissor (usualmente com bombeio co-propagante) e no lado do receptor (usualmente com bombeio contra-propagante). Em específico, para o DRA, existe a necessidade de determinar os parâmetros de potência e comprimento de onda dos bombeios de forma a maximizar o seu ganho e minimizar a sua figura de ruído. Para o ROPA, além dos mesmos parâmetros do primeiro, pode-se também otimizar o comprimento da fibra dopada e seu posicionamento no enlace de forma também a maximizar o seu ganho e a OSNR na recepção.

## 1.2 Estado da arte

Neste contexto, um sistema óptico sem repetição foi reportado em [9], o qual transmite uma taxa de 400 Gb/s e, em seu projeto, a escolha dos parâmetros dos ROPAs do lado do transmissor (Tx) foi realizada de forma a maximizar o ganho considerando um limite de potência de propagação, o qual foi determinado de forma a evitar que os efeitos deletérios não lineares degradassem o canal óptico transmitido. Já do lado do receptor (Rx) o amplificador remoto foi projetado de forma a maximizar a OSNR recebida. Além disso,

as potências de lançamento ótimas também foram determinadas por meio de simulações sistêmicas. Todavia, este método de projeto é computacionalmente custoso, visto que o projetista deve manualmente simular diferentes cenários de lançamento de potência e dos parâmetros dos ROPAs até chegar a solução subótima, uma vez que não se considerou a otimização conjunta para mitigação dos efeitos deletérios lineares e não lineares.

Neste contexto, [10] propõe técnicas de otimização multiparamétricas no projeto dos ROPAs. São otimizados os seguintes parâmetros: posição do ROPA Tx em relação ao transmissor e seu tamanho de fibra dopada e, de modo equivalente, a posição do ROPA Rx e seu tamanho de fibra dopada. No primeiro caso, novamente, os parâmetros são otimizados de forma a maximizar o ganho, sem que a potência do sinal exceda o limite não linear. Já no segundo caso, a otimização é feita de forma a maximizar a OSNR no receptor. Entretanto, no método proposto, considera-se somente a propagação de sinais CW, além de não serem considerados os algoritmos de processamento digital de sinais no processo de otimização, resultando também em uma solução subótima.

Adicionalmente, na literatura são apresentados estudos que exploram diversas técnicas de amplificação, objetivando o aumento na taxa de transmissão ou alcance destes sistemas sem repetição. Em [11], são avaliadas diversas técnicas de amplificação para tais sistemas, comparando o desempenho de EDFAs, amplificadores Raman discretos, amplificadores híbridos EDFA/Raman e DRAs de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> ordem. O resultado aponta que DRA de 1<sup>a</sup> ordem obtém um melhor desempenho em termos de taxa de erro de bit. Ainda neste âmbito, em [12] são analisadas técnicas de amplificação Raman de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem, e seus desempenhos são comparados levando-se em consideração os efeitos deletérios não lineares de auto-modulação de fase, entre outros. Nestas análises o comprimento da fibra dopada e a posição no enlace dos ROPA presentes no sistema são otimizados. Foi demonstrado que o DRA de 2<sup>a</sup> ordem apresenta um melhor desempenho obtendo a melhor OSNR e menor impacto devido ao ruído de intensidade (*Relative Intensity Noise* – RIN) do bombeio. Adicionalmente, na literatura é possível encontrar outros trabalhos explorando o uso de amplificação Raman de 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem, conforme reportado em [13], [14], [15] e [16]. Além destes, outros trabalhos também exploram o uso do amplificador Raman distribuído em diferentes cenários, como pode ser encontrado nos trabalhos [17] e [18].

De modo complementar, conforme já discutido anteriormente, além das técni-

cas de amplificação, os algoritmos de formatação de constelação e de compensação de não linearidades também são elementos chave para atingir taxas e alcances cada vez maiores nos sistemas ópticos sem repetição. Nesse contexto, em [19] é realizada uma investigação das formatações de constelação considerando os efeitos lineares e não lineares na transmissão. Esta investigação consiste na avaliação do impacto de diferentes fontes de ruído na transmissão do sinal óptico empregando técnica de pré-compensação da dispersão cromática. Neste trabalho, a análise de não linearidade é realizada considerando um modelo de canal AWGN, em que o impacto na OSNR total do sistema irá depender de componentes considerando a inserção de ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE), ruídos deletérios causados pelo transceptor e uma componente não linear [20]. Os resultados apontam que, considerando uma transmissão monocanal, o orçamento de potência do sistema diminuiu considerando a pré-compensação da dispersão cromática em uma constelação uniforme. Já, considerando a formatação probabilística, a potência ótima de propagação permaneceu aproximadamente a mesma, dessa forma aumentando o orçamento de potência do sistema. Além deste, há outro trabalho no qual são realizadas comparações entre diferentes distribuições de probabilidade em um sistema de comunicação óptica sem repetição [21] adotando a formatação probabilística. Neste trabalho em específico, verifica-se um aumento na taxa de informação alcançável (*Achievable Information Rates* – AIR) em decorrência do uso da formatação probabilística em relação à distribuição uniforme. Além disso, observa-se uma diferença no desempenho entre as distribuições de probabilidade avaliadas.

Neste mesmo contexto, em [22] os conceitos de formatação probabilística são explorados, considerando que o ganho de modelagem permite uma maior granularidade da eficiência espectral ou alcance em sinais resultantes do ganho de formatação. Dessa forma, adotando modelo de ruído Gaussiano (*Gaussian Noise* – GN) aditivo para canais ópticos [23], é possível estimar a capacidade, possibilitando o desenvolvimento de redes ópticas com auto-otimização da sua capacidade. Em [24], a formatação probabilística conjuntamente com a geométrica é explorada considerando uma rede óptica passiva (*Passive Optical Network* – PON), neste caso uma rede neural artificial foi treinada para que ela consiga estimar formatos de modulação otimizados para cada sistema PON. Outros trabalhos relativos às formatações de constelações em outros cenários são apresentados em [25], [26] e [27].

Um trabalho interessante apresentado em [28] analisa a taxa de informação alcançável de um sistema de comunicação óptica considerando diferentes topologias de amplificação (EDFA e Raman), formatação probabilística e compensação de não linearidades. Entretanto, tais sistemas de transmissão avaliados possuem estágios de amplificação ativos distribuídos ao longo do enlace, sendo fundamentalmente diferentes do sistema sem repetição aqui proposto.

Diante do exposto, verifica-se a importância de um método de projeto de sistemas ópticos sem repetição que abranja todos os parâmetros de forma conjunta, visando aumentar a taxa de transmissão ou alcance do sistema. Além disso, observa-se que a formatação probabilística demonstra ser uma técnica chave para o aumento do alcance dos sistemas ópticos. Assim, este trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho de sistemas ópticos sem repetição empregando a formatação probabilística. Para tanto, é proposto um método para o projeto de tais sistemas sem repetição utilizando algoritmo de otimização baseado nas redes neurais artificiais. Na otimização são considerados os parâmetros sistêmicos do enlace de transmissão e de amplificação óptica, tendo como função objetivo a maximização da informação mútua. Posteriormente, diferentes distribuições de probabilidade adotadas na formatação probabilística são comparativamente avaliadas.

### 1.3 Contribuição

Considerando a otimização conjunta dos algoritmos de geração dos sinais ópticos e dos subsistemas de amplificação, observa-se uma quantidade significativa de parâmetros que devem ser determinados no projeto de sistemas ópticos sem repetição. Além disso, principalmente nos amplificadores ópticos, tais parâmetros possuem interdependência entre si, de forma que devem ser ajustados de forma conjunta. De tal forma que o presente trabalho contribui com a proposição de um método de otimização multi-parâmetro para o projeto destes sistemas ópticos, no qual são otimizados simultaneamente parâmetros de algoritmos de transmissão e/ou recepção dos sinais ópticos e parâmetros referentes aos estágios de amplificação adotados, de modo a maximizar a informação mútua do canal. Dessa forma, torna-se possível projetar o sistema de comunicação óptica sem repetição avaliando o seu desempenho considerando a degradação dos sinais ópticos tanto por ruído aditivo quanto por efeitos não lineares e, em consequência, evitando que o mesmo opere

em uma condição subótima.

Além disso, após o projeto do sistema óptico sem repetição, este trabalho aborda a formatação probabilística, realizando a otimização de parâmetros de duas diferentes distribuições de probabilidade: Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana. A primeira consiste na distribuição ótima para canais AWGN e a segunda se torna uma variação da primeira com um parâmetro adicional para ser explorado, sendo adequada para canais com diferentes modelagens. Adicionalmente, o algoritmo de Blahut-Arimoto é aplicado ao canal óptico sem repetição, de modo a obter sua capacidade e a distribuição a-priori que alcança tal a capacidade. Tais resultados são comparados em termos de taxa de transmissão.

## 2 Sistemas ópticos sem repetição

### 2.1 Arquitetura

Os sistemas de comunicação óptica sem repetição são uma solução para atender a demanda por alta capacidade de transmissão de dados em enlaces ópticos de longo alcance em regiões isoladas, ou em cenários específicos em que a ausência de elementos ativos em trechos do enlace se torna uma alternativa de melhor relação custo-benefício na instalação e manutenção do sistema [29]. Entretanto, além dos efeitos deletérios intrínsecos à propagação do sinal pela fibra, como atenuação e dispersão, em cenários em que o canal óptico possui alta potência durante sua propagação, verificam-se efeitos não lineares, especialmente aqueles derivados do efeito Kerr. Tais efeitos impõem um valor limitante de potência para propagação do sinal em regime linear, permitindo garantir a transmissão bem-sucedida do sinal óptico por meio da otimização da relação de compromisso entre o ruído aditivo e a interferência não linear. Neste contexto, são exploradas diversas alternativas para aumentar o alcance do sistema respeitando o limite de potência sem a adoção de elementos ativos no enlace. Dentre elas, usualmente tem-se o uso de técnicas de amplificação utilizando o DRA e o ROPA [30]. Um esquemático de exemplificação de um sistema óptico empregando tais técnicas é apresentado na Figura 1, o qual, especificamente, faz uso de uma única fibra óptica para propagação dos sinais de transmissão e de bombeio. Nesta arquitetura, os lasers de bombeio são instalados nas unidades de bombeio remoto (*Remote Pump Unit* – RPU), as quais são localizadas próximas à unidade de transmissão (Tx), em que os bombeios são co-propagantes com o sinal, e à unidade de recepção (Rx), onde os bombeios são contra-propagantes ao sinal. Dessa forma, os sinais de bombeio se propagam pelo enlace de modo que os amplificadores DRA e ROPA proporcionem ganho ao sinal.

Durante o projeto de tais sistemas, além dos parâmetros referentes ao canal óptico (potência de lançamento e comprimento de onda), há uma série de parâmetros dos amplificadores a serem determinados, como as potências de bombeio e seus respectivos

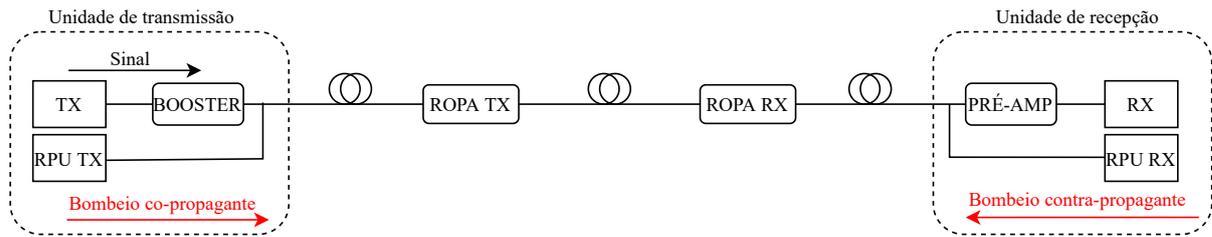


Figura 1 – Esquemático de um sistema de comunicação óptica sem repetição com amplificação Raman distribuída e amplificação óptica por bombeio remoto (ROPA) e fibra única para propagação dos sinais de transmissão e de bombeio.

comprimentos de onda, e, no caso do amplificador com bombeio remoto, o comprimento da fibra dopada e sua posição no enlace. Portanto, verifica-se que determinar tantos parâmetros se torna uma tarefa complexa, principalmente considerando que tais parâmetros têm influência entre si. Dessa forma, a literatura na área propõe diferentes técnicas de otimização para o projeto de tais amplificadores. Como um exemplo notável, em [9], os parâmetros do ROPA são otimizados de forma a maximizar o ganho respeitando o limite de potência no lado do transmissor, e maximizando a OSNR no lado do receptor. Dando continuidade ao trabalho, em [10] propõe-se um modelo de otimização formado pela combinação dos algoritmos de gradiente descendente convencional e com momento. Dessa forma, os parâmetros de posição do ROPA e tamanho da fibra dopada com érbio (*Erbium-Doped Fiber* – EDF) são otimizados por meio dos algoritmos propostos, obtendo-se um método para projeto de tais sistemas ópticos sem repetição adotando técnicas de otimização.

Entretanto, nos métodos supracitados o projeto do sistema permanece limitado, visto que não são consideradas técnicas que permitam a melhora no desempenho do sistema levando-se em consideração o impacto dos efeitos não lineares. Dito isto, uma possível solução é a utilização de algoritmos de processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing* – DSP), como o algoritmo de retropropagação digital (*Digital Back-Propagation* – DBP) e suas derivações, para a compensação de tais efeitos. Todavia, tais algoritmos necessitam de um alto poder de computação devido a sua complexidade. Alternativamente, o uso da formatação probabilística vem ganhando destaque no desenvolvimento de técnicas para o aumento na capacidade de informação transmitida nos sistemas de comunicação. Em tal contexto, este trabalho objetiva avaliar o impacto da

formatação probabilística em sistemas de comunicação óptica sem repetição.

## 2.2 Amplificação Raman distribuída

O espalhamento Raman espontâneo é um efeito primeiramente observado pelo físico indiano Sir Chandrasekhara Venkata Raman em 1928 [31], o que o proporcionou o Prêmio Nobel em Física no ano de 1930. Em tal descoberta, verifica-se que parte da luz monocromática que atravessava materiais transparentes e sem impurezas era espalhada e emergia em direções diferentes, em que a maioria dos raios era da mesma cor, entretanto alguns raios apresentavam cores diferentes. Dessa forma, concluiu a presença de um efeito não linear (espalhamento Raman) no qual uma parte do sinal óptico incidente em um meio é convertida para uma frequência mais baixa.

Tal efeito de espalhamento Raman também pode ser estimulado (*Stimulated Raman Scattering* – SRS) por meio de um sinal óptico de bombeio deslocado de uma certa frequência do sinal. Nesse processo, o bombeio e o sinal estão acoplados de forma coerente pelo processo Raman. No processo, um fóton de bombeio gera um segundo fóton com energia reduzida na frequência do sinal óptico, e a energia restante é absorvida pela sílica na forma de vibrações moleculares (fônons ópticos). A energia é transferida de forma contínua do bombeio para o sinal por meio do SRS conforme os dois feixes se propagam pela fibra [32]. O sinal propagante, portanto, é amplificado graças a transferência de energia do sinal de bombeio. Dessa forma, tem-se as seguintes propriedades da amplificação Raman distribuída [33]:

- O ganho Raman possui um espectro que depende fundamentalmente da diferença entre as frequências de bombeio e do sinal, podendo ser empregado nas bandas típicas de operação em sistemas ópticos;
- O ganho Raman ocorre independentemente da direção relativa entre sinal e bombeio;
- O ganho Raman depende da polarização do sinal e do bombeio.

Assim, o amplificador Raman distribuído utiliza da própria estrutura cristalina da fibra óptica para gerar um ganho por meio de um sinal de bombeio com frequência de aproximadamente 13,2 THz maior que a frequência do canal para uma fibra óptica

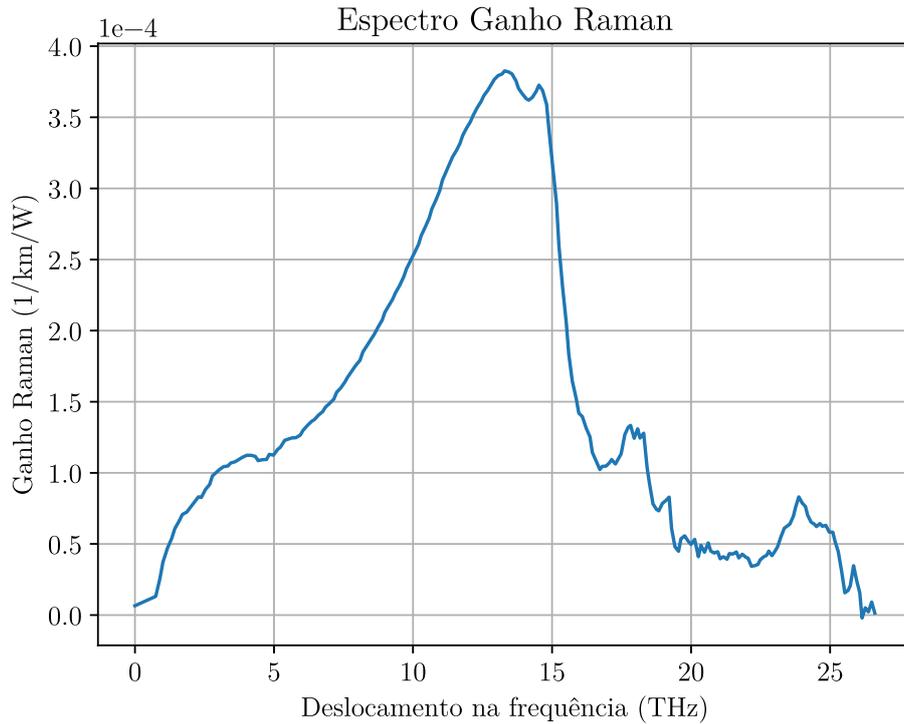


Figura 2 – Espectro do ganho Raman considerando fibra óptica monomodo padrão.

monomodo padrão (*Standard Single Mode Fiber* – SSMF), conforme o espectro de ganho apresentado na Figura 2.

## 2.3 Amplificação a fibra dopada com érbio

O amplificador a fibra dopada com érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier* – EDFA) é uma das tecnologias responsáveis por revolucionar os sistemas ópticos de comunicação, permitindo a amplificação transparente em termos de taxa e formato de modulação de conjuntos de canais ópticos, e, dessa forma, aumentando consideravelmente o produto alcance-capacidade de tais sistemas.

O princípio de funcionamento de tais amplificadores é baseado na dopagem da fibra óptica por íons de um elemento terra-rara, sendo este o érbio (Er). Tais íons de érbio têm a propriedade de absorver luz em um determinado comprimento de onda, e então emitir essa energia absorvida em comprimentos de onda mais altos [32, 34]. Na Figura 3 são apresentados os espectros de absorção e emissão em função do comprimento de onda para uma fibra dopada com érbio (modelo MP980 fabricada pela OFS Optics) obtidos

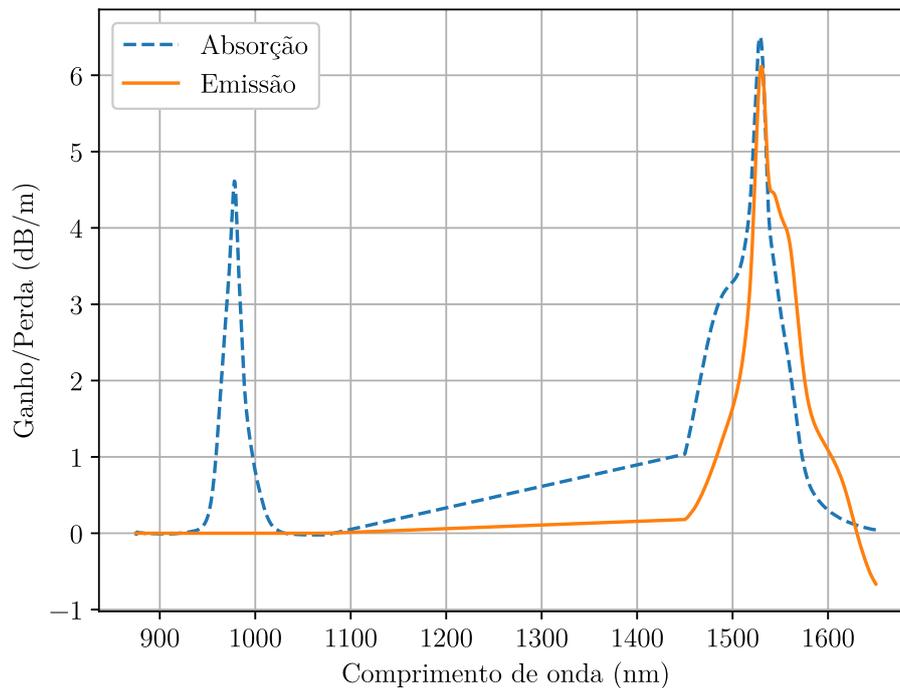


Figura 3 – Espectro do ganho e absorção de um EDFA.

experimentalmente.

Tais comportamentos de absorção e emissão são explicados através do modelo de níveis de energia de uma fibra de sílica dopada com érbio. Na Figura 4 são retratadas as bandas de energia do elemento érbio. Quando um sinal óptico com um comprimento de onda igual a 980 nm é propagado pela fibra, seus fótons interagem com os íons de érbio, fazendo com que os mesmos saiam do seu nível fundamental ( $4I\ 15/2$ ) e sejam estimulados a ir para o nível  $4I\ 11/2$ , um nível metaestável, visto que há uma alta absorção para tal comprimento de onda. Entretanto, por ser um nível metaestável, o íon rapidamente decai para o nível  $4I\ 13/2$ , gerando um fônon. Dessa forma, no momento em que um sinal óptico com comprimento de onda de 1550 nm propaga pela fibra dopada, seus fótons interagem com os íons no nível metaestável, o qual cai para o nível  $4I\ 15/2$  pela emissão estimulada, na qual resulta-se um fóton com a mesma direção, fase e frequência do sinal óptico, produzindo o efeito de amplificação. Porém, os íons restantes no nível  $4I\ 13/2$  serão espontaneamente emitidos em forma de fótons, os quais podem estimular outros íons a decaírem para o nível  $4I\ 15/2$ , resultando em um ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE) [32].

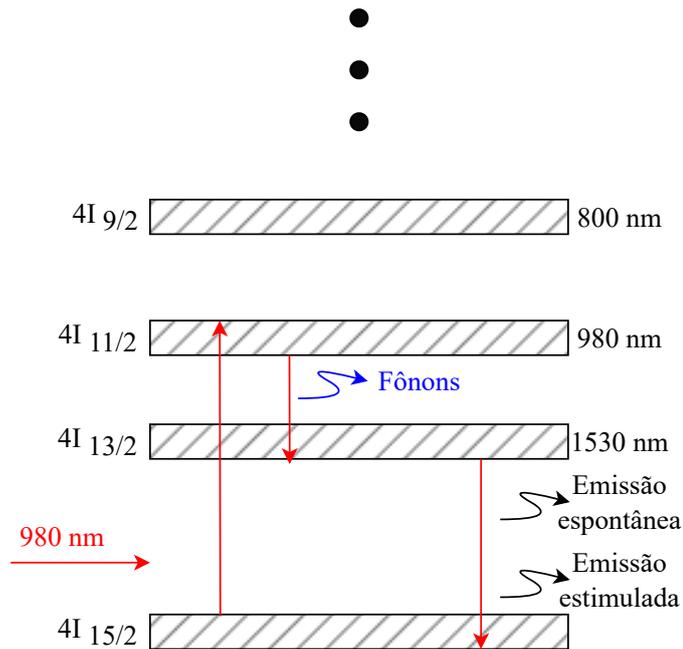


Figura 4 – Esquemático dos níveis de energia dos íons de érbio de uma fibra dopada com érbio.

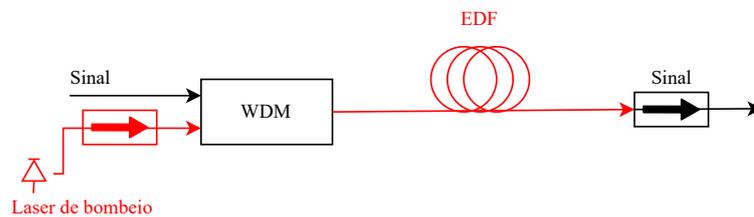


Figura 5 – Arquitetura de um EDFA.

A arquitetura básica de implementação de um amplificador a fibra dopada com érbio pode ser observada na Figura 5 considerando o bombeamento co-propagante, na qual observa-se que o sinal óptico e o sinal de bombeio são multiplexados por comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) e propagam pela fibra dopada com érbio, onde o bombeio proporciona o ganho ao sinal. Posteriormente, um isolador é adicionado a fim de evitar a retropropagação de sinais indesejados que possam afetar o ganho do amplificador.

Usualmente, para amplificação empregando EDFA convencionais, os canais ópticos são alocados na banda C (de 1530 nm a 1565 nm) e, considerando as propriedades do érbio, para que o canal esteja presente na região de alto ganho, conforme observado na

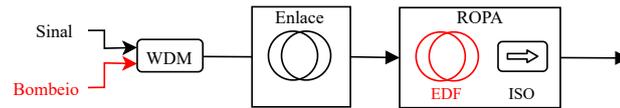


Figura 6 – Esquemático de um ROPA considerando que o sinal e o bombeio propagam pela mesma fibra.

Figura 3, utilizam-se sinais de bombeio com comprimento de onda de 980 nm, visto que para tal comprimento de onda há um pico de absorção de fótons do sinal conforme demonstrado na Figura 3. Alternativamente, para amplificadores remotamente bombeados, como será discutido na seção subsequente, pode-se também empregar sinais de bombeio com comprimento de onda em 1480 nm.

## 2.4 Amplificação com bombeio remoto

Os amplificadores remotos opticamente bombeados são constituídos por fibras dopadas com érbio posicionadas estrategicamente na região do enlace em que se deseja amplificar o sinal. O sinal de bombeio remoto é gerado na unidade transmissora ou receptora, e tal sinal é propagado até o trecho de fibra dopada através de fibra dedicada ou na mesma fibra de transmissão do canal, com distâncias típicas de algumas dezenas de quilômetros da unidade de transmissão (ou recepção). Dessa forma, tendo princípio de funcionamento análogo aos amplificadores a fibra dopada com érbio convencionais, nos sistemas ópticos sem repetição adota-se o comprimento de onda de 1480 nm para os sinais de bombeio devido ao fato de que neste comprimento de onda a fibra possui uma atenuação menor que para 980 nm. Adicionalmente, em fibras monomodo padrão SSMF o bombeio em 980 nm se propaga em regime multimodal, inviabilizando de serem implementados na topologia em que os bombeios propagam na mesma fibra que o sinal.

A amplificação com bombeio remoto pode ser implementada considerando que o sinal óptico e o sinal de bombeio são propagados pela mesma fibra, representada na Figura 6, ou utilizando uma fibra dedicada para a propagação do sinal de bombeio até o ponto de multiplexação entre os sinais óptico e de bombeio, apresentada na Figura 7, em ambos os casos para sinais co-propagantes.

Neste trabalho, a arquitetura de amplificação com bombeio remoto adotada

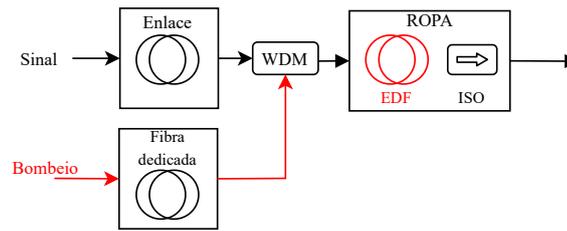


Figura 7 – Esquemático de um ROPA considerando que o bombeio propaga por uma fibra dedicada.

considera que o sinal e o bombeio propagam pela mesma fibra, arquitetura de menor complexidade de implementação, entretanto maior complexidade de projeto dada a interação entre sinais ópticos modulados e de bombeio por longos trechos de fibra. Adicionalmente, em tal arquitetura, faz-se possível que o bombeio do ROPA também seja amplificado por um ganho residual do amplificador Raman distribuído projetado no início ou final do enlace (considerando, respectivamente, bombeios co-propagantes e contra-propagantes).

# 3 Fundamentos de formatação de constelação

## 3.1 Formatação probabilística e geométrica

Em 1948 foi publicado por Claude Shannon um trabalho evidenciando que uma fonte de entrada de um canal de comunicação com uma distribuição definida por uma gaussiana contínua atinge a capacidade de um canal com ruído aditivo gaussiano branco (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN) considerando um código corretor de erro (*Forward Error Correction* – FEC) ideal [35]. Desde então, são demandados esforços objetivando desenvolver técnicas de modulação discreta que se aproximem de uma distribuição gaussiana contínua [36, 37], sendo tal processo denominado formatação de constelação (*Constellation Shaping* – CS). As técnicas de CS são comumente divididas em duas modalidades. Na técnica conhecida como formatação geométrica (*Geometric Shaping* – GS), a probabilidade de transmissão a-priori dos símbolos é uniforme, mas suas posições no plano complexo são formatadas. Já na formatação probabilística (*Probabilistic Shaping* – PS), a posição dos símbolos no plano complexo segue um padrão regular, mas sua distribuição de probabilidade é formatada [38]. Também é possível fazer uso de uma combinação de ambas as técnicas, aumentando os graus de liberdade para a otimização do sinal transmitido.

Tais técnicas vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas, de modo que atualmente existem vários trabalhos na literatura que exploram o aumento da taxa de transmissão ou alcance dos sistemas ópticos ao adotá-las. Em [39], verifica-se o impacto da PS na degradação do sinal pelos efeitos não lineares presentes na transmissão via fibra óptica em um cenário WDM, e o resultado demonstra que apesar de um aumento de 6,6% na componente não linear do cálculo da relação sinal-ruído efetiva  $SNR_{eff}$ , obteve-se um aumento de 47,6% no alcance do sistema de transmissão, estimado pela taxa de erro de símbolo. Outros trabalhos avaliando o impacto da PS na degradação por efeitos não lineares em sistemas ópticos são demonstrados em [19, 27, 40]. Entretanto, há poucos trabalhos na literatura que exploram o impacto da formatação probabilística em sistemas de comu-

nicação óptica sem repetição, especialmente em regimes com potencial degradação por efeitos não lineares. Dessa forma, este trabalho realiza tal análise considerando diferentes distribuições de probabilidade da PS em tais sistemas. Em tal contexto, esta seção descreve de forma mais detalhada os principais conceitos básicos da teoria da informação e da formatação de constelação.

Inicialmente, são descritos alguns conceitos básicos da teoria da informação e codificação. Um sistema de comunicação digital é formado por um transmissor, responsável por gerar a informação, um receptor, cuja função é tratar a informação recebida, e um meio físico por onde a informação é transmitida, nomeado de canal, conforme é apresentado na Figura 8.

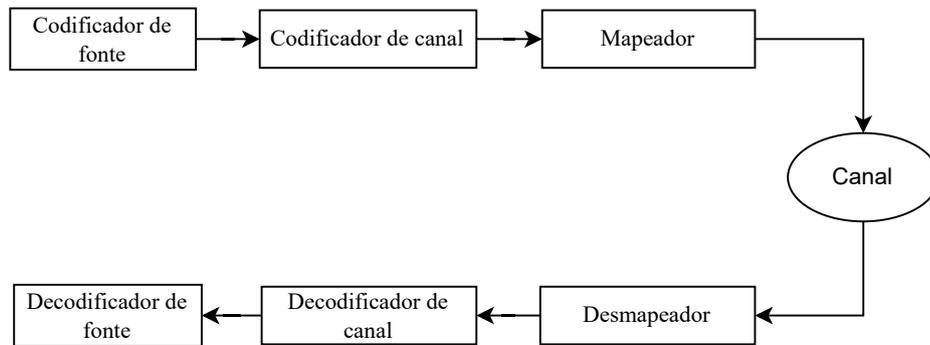


Figura 8 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicação digital.

O transmissor é composto por um codificador de fonte, um codificador de canal e o mapeador. O primeiro possui a função de realizar uma compressão nos dados, respeitando a função taxa-distorção do canal. Já o segundo, adiciona informação redundante de modo que algoritmos de correção de erros presentes no receptor consigam reconstruir a mensagem enviada. Por fim, objetivando realizar a transmissão da informação pelo canal, as palavras-códigos devem ser mapeadas em símbolos de uma determinada constelação pelo mapeador.

O receptor é composto por um desmapeador, também conhecido como demodulador digital, o qual é responsável por converter os símbolos da constelação em palavras-códigos, as quais serão decodificadas pelo decodificador de canal, reconstruindo a informação enviada. Por último, aparece o decodificador de fonte, que extrai a informação transmitida dos dados recebidos com base no método de compressão utilizado na transmissão.

De acordo com a teoria de Shannon, a informação mútua do canal de comunicação, em bit/símbolo, supondo um alfabeto discreto de entrada com  $M$  elementos  $A_k$ , sendo  $X$  a entrada do canal e  $Y$  a saída, é dada por [41]:

$$I(X; Y) = \sum_{k=0}^{M-1} Pr(A_k) \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{Y|A_k}(y|A_k) \cdot \log_2 \left[ \frac{\rho_{Y|A_k}(y|A_k)}{\sum_{l=0}^{M-1} Pr(A_l) \rho_{Y|A_l}(y|A_l)} \right] dy \quad (3.1)$$

em que  $Pr(A_k)$  é a probabilidade do símbolo  $A_k$  e  $\rho_{Y|A_k}(y|A_k)$  é a função de densidade de probabilidade da saída do canal sabendo que o símbolo  $A_k$  é transmitido. Considerando um canal com ruído AWGN com variância  $\sigma^2$ , a função de densidade de probabilidade da saída  $y$  condicionada à transmissão do símbolo  $A_k$  é:

$$\rho_{Y|A_l}(y|A_l) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{|y-A_l|^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

Comumente, no sistema de transmissão óptica convencional os símbolos são enviados com a mesma probabilidade. Dessa forma, este sistema de comunicação possui uma capacidade restrita, que consiste na máxima informação mútua proporcionada por um formato de modulação, determinada por:

$$C = \max_{Pr(A_k)} I(X; Y) \quad (3.3)$$

A maior capacidade permitida por um canal AWGN, conhecida como limite de Shannon, conforme citado anteriormente, é obtida quando a distribuição de probabilidade dos símbolos é definida como uma distribuição gaussiana contínua. Dessa maneira, conforme discutido anteriormente, para fazer com que a capacidade atinja o limite de Shannon, foram propostas as formatações de constelação probabilística e geométrica, sendo a primeira abordada neste trabalho. Dessa forma, em sistemas de comunicação com canal AWGN e constelações M-QAM, a informação mútua é maximizada quando a constelação transmitida segue uma distribuição de Maxwell-Boltzmann, dada por [42]:

$$Pr(A_k) = \frac{1}{\sum_{A_l} e^{-\lambda|A_l|^2}} e^{-\lambda|A_k|^2}, k \geq 0 \quad (3.4)$$

em que  $A_k$  é a amplitude dos símbolos e  $\lambda$  é um fator constante. Percebe-se pela Equação 3.4 que para o valor de  $\lambda = 0$  a constelação é uniforme, ou seja, todos os símbolos possuem a mesma probabilidade de transmissão. Já para valores de  $\lambda > 0$ , a constelação resultante não é uniforme, de modo que os símbolos de raio mais interno apresentam maior probabilidade de serem transmitidos, enquanto aqueles de raio mais externo têm menor probabilidade. A constante  $\lambda$  pode ser otimizada para uma determinada relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) do canal AWGN. Tal otimização pode ser realizada numericamente. Este processo consiste em variar o valor de  $\lambda$  para uma determinada SNR e determinar o ponto em que a informação mútua chega ao seu valor máximo, conforme apresentado na Figura 9 para a constelação 16QAM com polarização dupla (*Dual Polarization* – DP), e na Figura 10 para o formato de modulação DP – 64QAM. Além disso, observa-se que a informação mútua diminui à medida que o  $\lambda$  atinge valores mais altos [1].

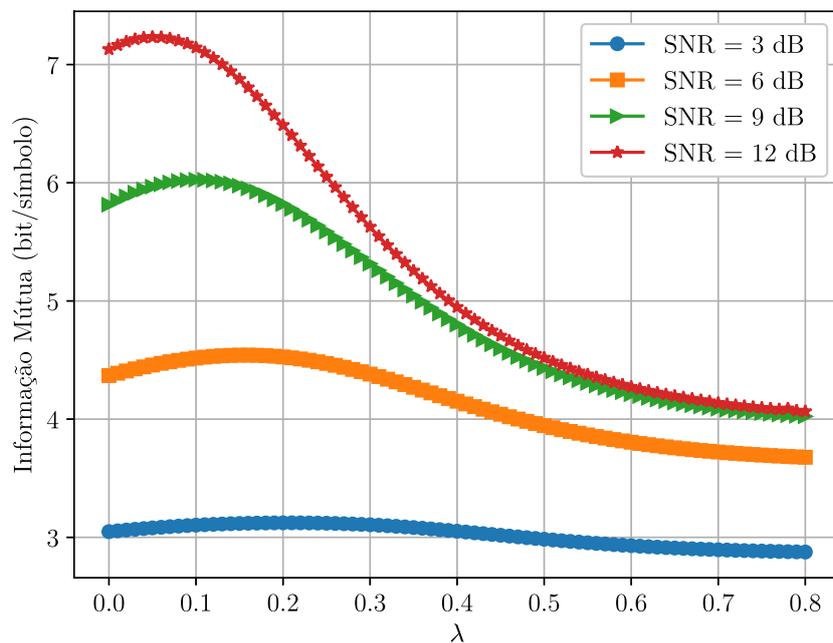


Figura 9 – Otimização do  $\lambda$  na distribuição de Maxwell-Boltzmann para a modulação de DP-16QAM (adaptado de [1]).

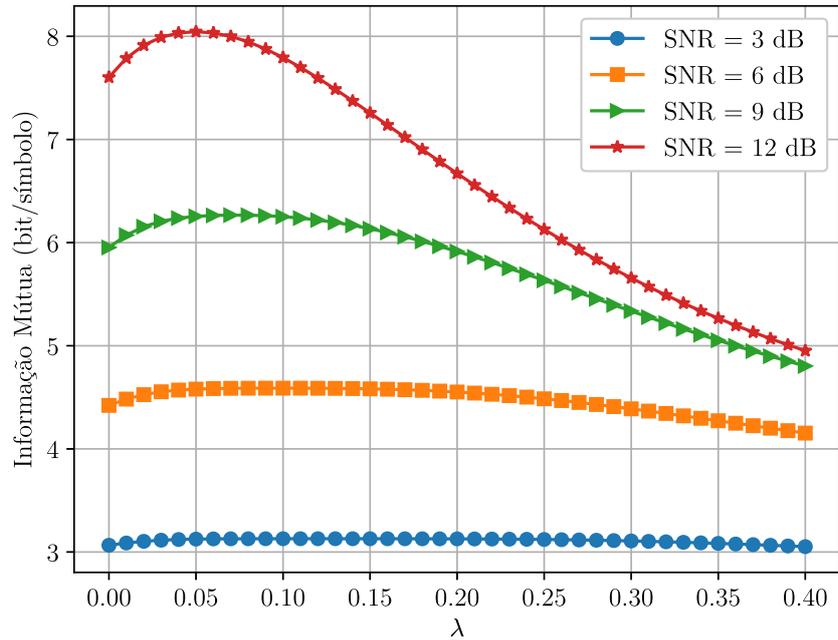


Figura 10 – Otimização do  $\lambda$  na distribuição de Maxwell-Boltzmann para a modulação de DP-64QAM.

Na Figura 11 e na Figura 12 mostra-se o valor ótimo de  $\lambda$  em função da SNR para as modulações 16QAM e 64QAM, respectivamente. Adicionalmente, observa-se um comportamento decrescente de  $\lambda$  em relação ao aumento da SNR, ou seja, para uma SNR suficientemente alta, a constelação ótima se aproxima da uniforme, em que os símbolos são equiprováveis. O mesmo ocorre para SNRs muito baixas. Com isso, é possível determinar um intervalo de ganho da PS para cada formato de modulação [1].

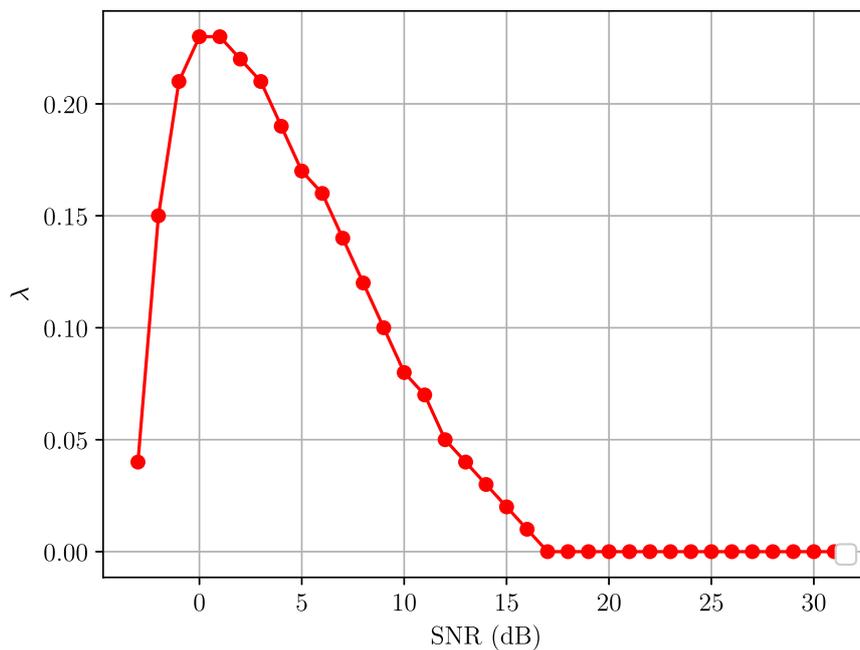


Figura 11 – Conjunto de valores ótimos de  $\lambda$  para a modulação de DP-16QAM (adaptado de [1]).

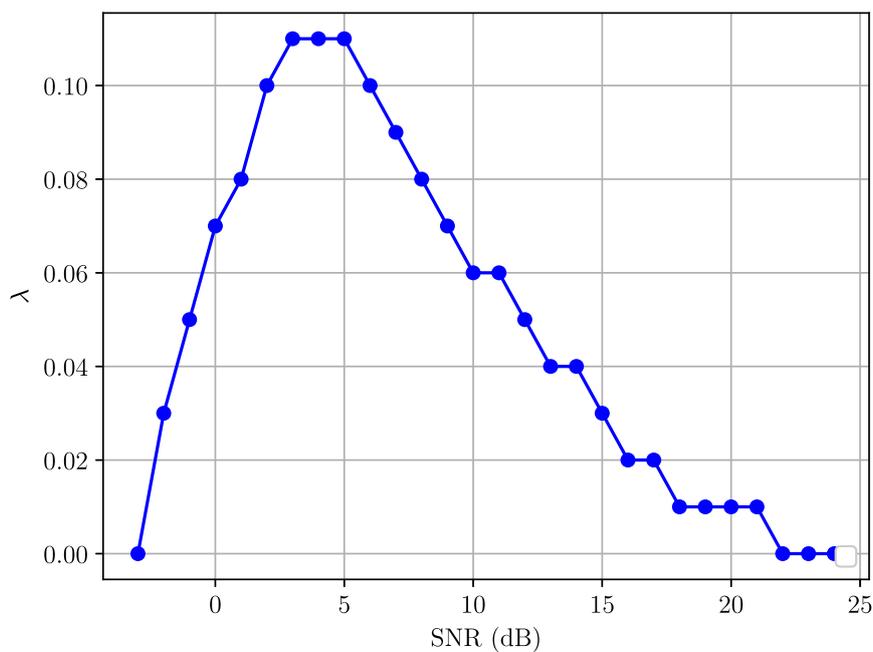


Figura 12 – Conjunto de valores ótimos de  $\lambda$  para a modulação de DP-64QAM.

Na Figura 13 são apresentadas constelações 16QAM empregando a formatação

probabilística com diferentes valores de  $\lambda$ . Na Figura 13a o  $\lambda$  adotado é 0,01, o qual, por ser próximo de 0, resulta em uma distribuição próxima da uniforme. Já na Figura 13b o  $\lambda$  é igual a 0,1, resultando em uma distribuição com probabilidades mais variadas, em que os símbolos com maior energia possuem uma probabilidade significativamente menor que os símbolos de menor energia.

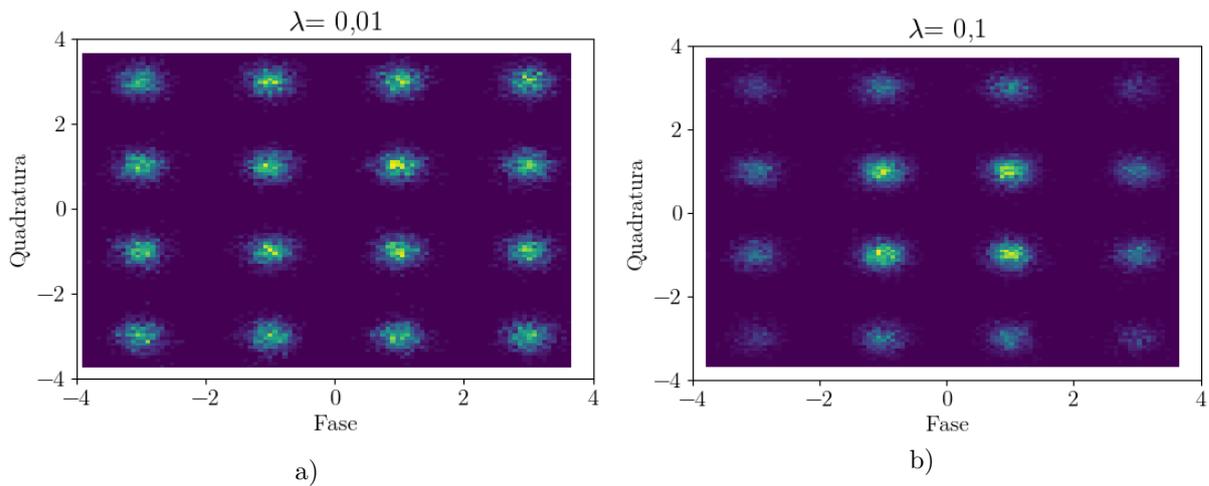


Figura 13 – Constelações 16-QAM empregando PS com (a)  $\lambda = 0,01$  e (b)  $\lambda = 0,1$ .

O mesmo pode ser observado para a constelação 64QAM na Figura 14.

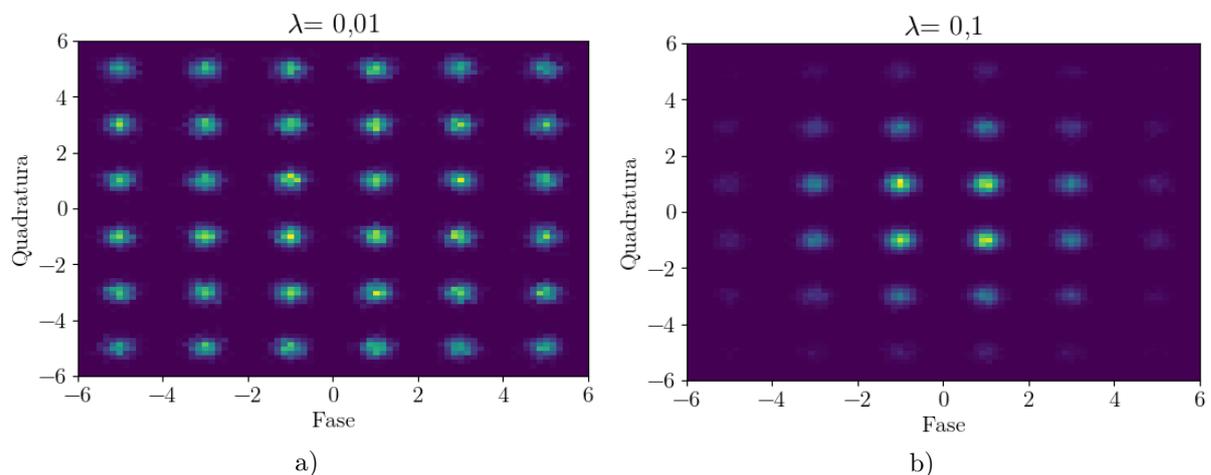


Figura 14 – Constelações 64-QAM empregando PS com (a)  $\lambda = 0,01$  e (b)  $\lambda = 0,1$ .

Por fim, a informação mútua teórica para as constelações 16QAM e 64QAM em função da SNR é apresentada na Figura 15, na qual verifica-se que o valor de capacidade, referente à máxima informação mútua obtida, é de 8 bit/símbolo para DP-16QAM e 12 bit/símbolo para a modulação DP-64QAM [1].

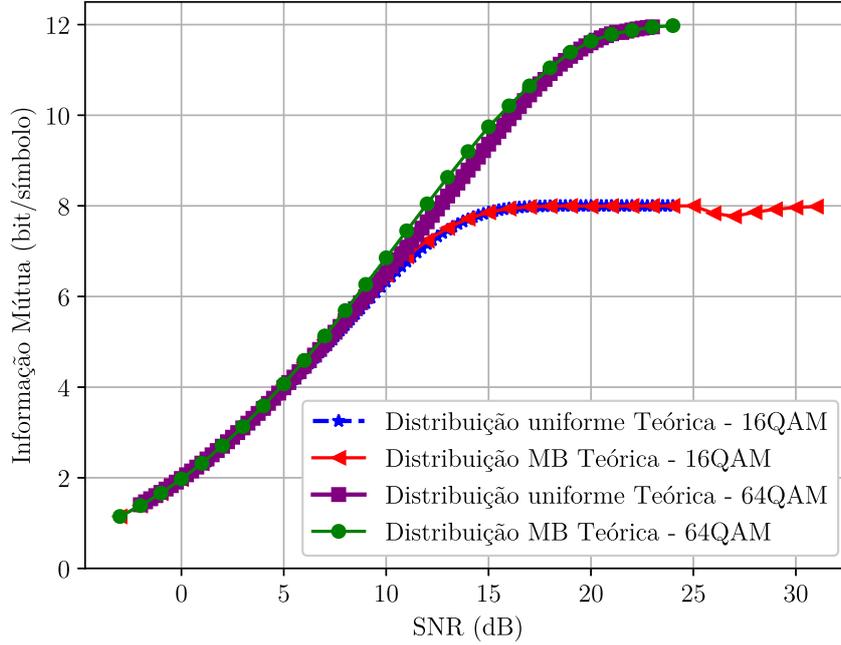


Figura 15 – Capacidade teórica de uma modulação 16QAM e 64QAM.

Neste trabalho, é avaliada a PS em sistemas ópticos sem repetição considerando, adicionalmente a distribuição de Maxwell-Boltzmann, a distribuição Supergaussiana, a qual consiste em uma distribuição com um fator constante  $N$  adicional em relação à distribuição de que Maxwell-Boltzmann, conforme apresentado na Equação 3.5 [43]. A motivação para contemplar a distribuição Supergaussiana é prover um grau de liberdade adicional em situações eventuais nas quais o canal não é AWGN, por exemplo, na presença de não linearidades, como esperado para o canal sem repetição a ser otimizado. Dessa forma, assim como o  $\lambda$ , tal constante  $N$  também pode ser otimizada para cada condição de canal. A distribuição Supergaussiana é dada por:

$$Pr(A_k) = \frac{1}{\sum_{A_k} e^{-\lambda|A_k|^N}} e^{-\lambda|A_k|^N}, k \geq 0 \quad (3.5)$$

Neste contexto, a metodologia aqui proposta inicialmente adota a distribuição de Maxwell-Boltzmann como referência a fim de validar a implementação da formatação probabilística no simulador óptico. Posteriormente, serão realizadas simulações do enlace sem repetição com PS adotando a distribuição de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana, com suas respectivas constantes atualizadas por um algoritmo de otimização. Tal meto-

dologia é descrita com mais detalhes na Seção 4.1.

## 3.2 Geração da formatação probabilística

Diante do que foi exposto, nesta seção é detalhado o processo de geração das constelações não uniformes descritas anteriormente. Na Figura 16 é apresentado um diagrama de blocos com as principais etapas do processo. O primeiro passo consiste na otimização dos valores de  $\lambda$  e  $N$ , considerando a Supergaussiana, ou apenas do  $\lambda$ , considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann, para cada valor de SNR ou OSNR. Com os valores encontrados, calcula-se a probabilidade a-priori de cada símbolo seguindo a Equação 3.5. Por fim, os símbolos serão gerados de acordo com sua probabilidade anteriormente determinada. A geração da constelação não uniforme pode ser realizada através de um casamento de distribuição (*Distribution Matching – DM*), no qual mapeia-se um conjunto de bits em um bloco de símbolos inteiros não uniformes, para, posteriormente, realizar o mapeamento de constelação.

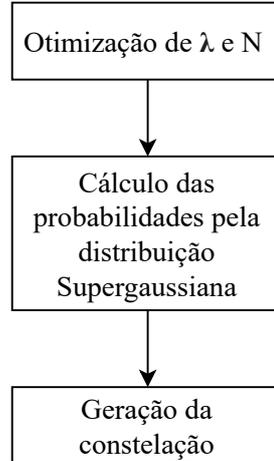


Figura 16 – Diagrama de blocos que descreve o processo de geração das constelações não uniformes.

A geração de sinais com formatação probabilística baseia-se em uma distribuição empírica para os símbolos gerados, em que tendo um vetor  $c$  de tamanho  $n$  possui  $n_a(c)$  símbolos  $a$ .

$$P_{A,c}(a) := \frac{n_a(c)}{n} \quad (3.6)$$

A técnica utilizada para gerar uma certa distribuição empírica neste trabalho é o casamento de distribuição por composição constante (*Constant Composition Distribution Matching* – CCDM) [44]. O CCDM objetiva fixar a ocorrência de determinado símbolo  $a$  no vetor  $c$  de tamanho  $n$ , dessa forma, aproximando a sequência de símbolos a uma distribuição de probabilidade de massa desejada. O CCDM recebe uma sequência de símbolos com distribuição uniforme e a mapeia em outra com a distribuição desejada. Como etapa inicial, utilizou-se a distribuição de probabilidade de Maxwell-Boltzmann [45] considerando os valores ótimos de  $\lambda$  para o canal AWGN (conforme previamente apresentado nas Figuras 11 e 12 para, respectivamente, modulação 16-QAM e 64-QAM). Para validação da técnica, foram realizadas simulações em cenários com carregamento de ruído e sem propagação de sinais por enlace óptico (*back-to-back*). Para tanto, foram considerados os parâmetros descritos na Tabela 1, assumindo o formato de modulação DP-16QAM. Como referência, são considerados os parâmetros utilizados em [42], em que são avaliados resultados teóricos do sistema óptico com o  $\lambda$  da distribuição de Maxwell-Boltzmann otimizado.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros para simulação de transmissão óptica em *back-to-back*.

Componente	Parâmetro	Símbolo	Valor
Sinal	Fator de <i>roll-off</i> do pulso de Nyquist	$r_{off}$	0.1
	Taxa de símbolos	$R_s$	32 GBd
DAC e ADC	Quantização	$N_{DAC/ADC}$	8 bits
	Largura de banda de -3 dB	$B_{DAC/ADC}$	19.2 GHz
	Taxa de amostragem	$R_{DAC/ADC}$	64 GSa/s
Transmissor	Comprimento de onda do canal	$\lambda_{ch}$	1550 nm
	Largura de linha do laser	$\Delta\nu$	0 kHz
	Largura de banda de -3 dB do modulador	$B_{mod}$	32 GHz
	Razão de extinção do modulador (IQ)	$ER_{mod}$	0 dB
	Potência de lançamento	$P_L$	3 dBm
Receptor	Largura de banda de -3 dB do Demux	$B_{demux}$	32 GHz
	Largura de banda de -3 dB do fotodetector	$B_{pd}$	32 GHz

Adicionalmente, foi variada a relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal-to-Noise Ratio* – OSNR) dentro do intervalo de 20 dB até 35 dB com o passo de 1 dB.

Para cada valor de OSNR é determinada a informação mútua média entre as duas polarizações. O cálculo da informação mútua é realizado por meio do algoritmo desenvolvido por Gabriella Bosco e Dario Piloni [46] em Matlab <sup>®</sup> e adaptado para a linguagem Python. Este processo é realizado cinco vezes e a média é utilizada como resultado final. Na Figura 17 apresenta-se a MI em função da OSNR, empregando, como referência, os parâmetros presentes em [42]. É possível observar que, como esperado, a informação mútua encontrada a partir da simulação é levemente menor que a curva teórica reportada na Seção 3, resultado das distorções geradas pelo transmissor e receptor e limitações do DSP-Rx. Além disso, observa-se que, para uma OSNR de 22 dB, a formatação probabilística apresenta um ganho de informação mútua comparada a constelação uniforme de 0,12 bit/símbolo que, para uma taxa de símbolo de 32 GBd, equivale a um ganho de taxa de transmissão igual a 3,84 Gb/s.

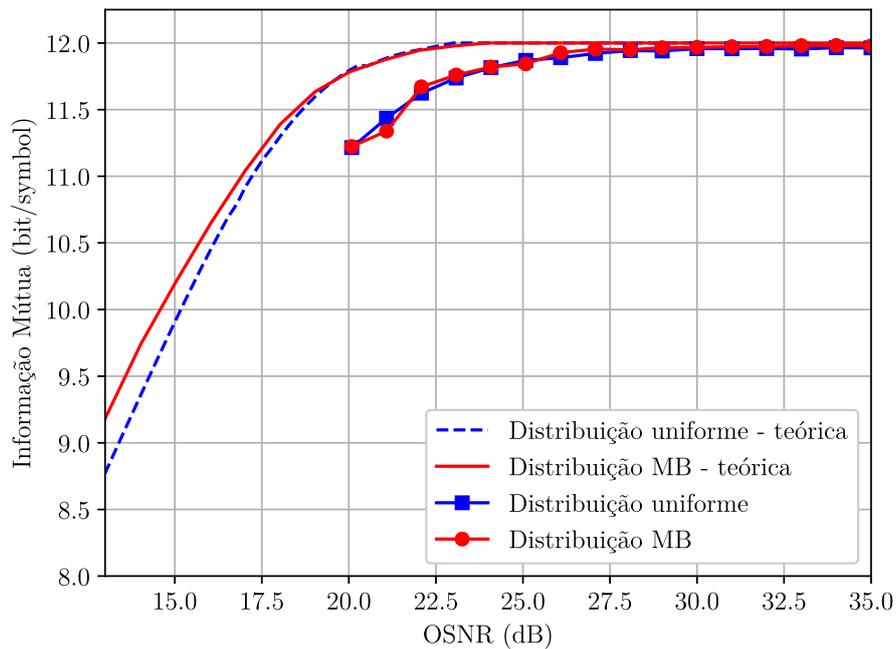


Figura 17 – Informação mútua para transmissão óptica DP-64QAM em *back-to-back*.

Dessa forma, comprova-se que a formatação probabilística foi implementada corretamente e que esta possui um ganho em relação à formatação com distribuição uniforme.

### 3.3 Cálculo de capacidade em canais ópticos sem repetição

Até o momento, discutimos a formatação da constelação no contexto de um canal AWGN. Contudo, os sistemas ópticos sem repetição, objeto deste trabalho, podem apresentar propriedades não gaussianas, em especial na presença de não linearidades. Nesses casos, não há uma fórmula exata para o cálculo da capacidade máxima do canal proposta por Shannon [47, 48]. Assim, faz-se necessário um outro limitante para a taxa máxima de transmissão pelo canal. Tal limitante pode ser fornecido pela técnica numérica de Blahut-Arimoto [49, 50]. Conforme foi mencionado anteriormente, Shannon introduziu o conceito de capacidade de canais de comunicação, conforme a Equação 3.3. Neste contexto, há estudos e avanços na determinação da capacidade de diversos canais de comunicação, assim como a função taxa-distorção, a qual é um limite inferior a taxa de codificação da fonte presente no codificador da Figura 8. Sendo assim, ela delimita um desempenho possível do sistema codificado para uma medida de distorção determinada [51]. A estimativa da capacidade e taxa-distorção resulta na resolução de um problema de otimização convexa, cuja solução numérica demandava um alto poder computacional, principalmente considerando os recursos disponíveis na época de desenvolvimento da técnica pelos pesquisadores R. Blahut e S. Arimoto. Dessa forma, em 1972, Blahut propõe a resolução de tal problema sob uma nova perspectiva [49] por meio das seguintes definições de informação mútua:

$$I(p, Q) = \max_P \sum_j \sum_k p_j Q_{k|j} \log \frac{P_{j|k}}{p_j}, \quad (3.7)$$

$$I(p, Q) = \min_q \sum_j \sum_k p_j Q_{k|j} \log \frac{Q_{k|j}}{q_k}, \quad (3.8)$$

em que  $I(p, Q)$  é a informação mútua entre a entrada e saída do canal,  $P$  é a matriz de transição do alfabeto de saída para o alfabeto de entrada do canal, e  $q$  é uma distribuição de probabilidade do alfabeto de saída do canal. A base do log depende do tipo do alfabeto, sendo normalmente 2 e resultando, dessa forma, em uma resposta em bit/símbolo.

Verifica-se que a Equação 3.7 é utilizada por Arimoto [50] na investigação da estimativa da capacidade do canal de comunicação, resultando em teoremas que são considerados por Blahut [49] na sua análise. Ele conseguiu, dessa maneira, propor algoritmos para determinação da capacidade e função taxa-distorção por meio de mapeamentos de

vetores de probabilidade para vetores de probabilidade. Na abordagem em questão, a sequência de médias de informações mútuas associadas aos sucessivos vetores de probabilidade de entrada do canal aumenta monotonicamente para a capacidade do canal. O outro mapeamento produz uma sequência de pares (informação, distorção)  $(I, D)$  que converge para um ponto na curva da função taxa-distorção  $(R(D))$ . A convergência é monotônica no plano  $(I, D)$  na direção perpendicular à inclinação de  $R(D)$  no ponto de limite. A demonstração matemática presente nos trabalhos de Arimoto [50] e Blahut [49] é extensa e necessita de vários conceitos presentes na teoria da informação. Dito isto, neste trabalho será apresentado o algoritmo proposto, e aqui empregado, de forma sucinta.

Desde então, desenvolveram-se avanços e aprimoramentos aos algoritmos de Blahut-Arimoto. Em [52], é proposta uma modificação do algoritmo para o canal AWGN considerando um alfabeto de entrada limitado em potência considerando constelações de tamanho fixo. Em [53], tal algoritmo é adotado a um canal de transmissão óptica com multiplexação por comprimento de onda densa (*Dense Wavelength-division Multiplexing* – DWDM). O canal óptico é representado pela solução das equações não lineares de Shrödinger (*Non-Linear Shrödinger Equation* – NLSE) implementadas pelo método de Fourier de passo dividido (*Split-Step Fourier Method* – SSFM), em que a matriz de probabilidade a-posteriori é representada por uma distribuição gaussiana de duas dimensões, em que a matriz de covariância e média são estimadas a partir da saída do canal óptico.

Alternativamente, neste trabalho implementou-se uma versão adaptada do algoritmo Blahut-Arimoto proposta em [52]. A Figura 18 apresenta um diagrama descrevendo o algoritmo implementado neste trabalho. Na adaptação proposta em [52], considera-se a restrição de que o alfabeto de entrada é finito, limitado aos símbolos de uma determinada constelação, por exemplo, modulada em amplitude e quadratura (QAM). Além disso, tem-se que a esperança da entrada esteja limitada em potência ( $E_X(|X|^2) \leq P_\alpha$ ). Para tanto, a constelação é multiplicada por um parâmetro de escala ( $\alpha > 0$ ).

Dadas tais considerações, o algoritmo é iniciado pelo primeiro laço, no qual é considerado um intervalo de interesse do parâmetro  $\alpha$ , o qual deve pertencer ao intervalo  $[1/\max(|X|); 1/\min(|X|)]$  e incrementado por um  $\Delta$  correspondente a  $(\max(|X|) - \min(|X|))/N$ , em que  $N$  é o número de símbolos do alfabeto  $X$ . Tal laço é inicializado com

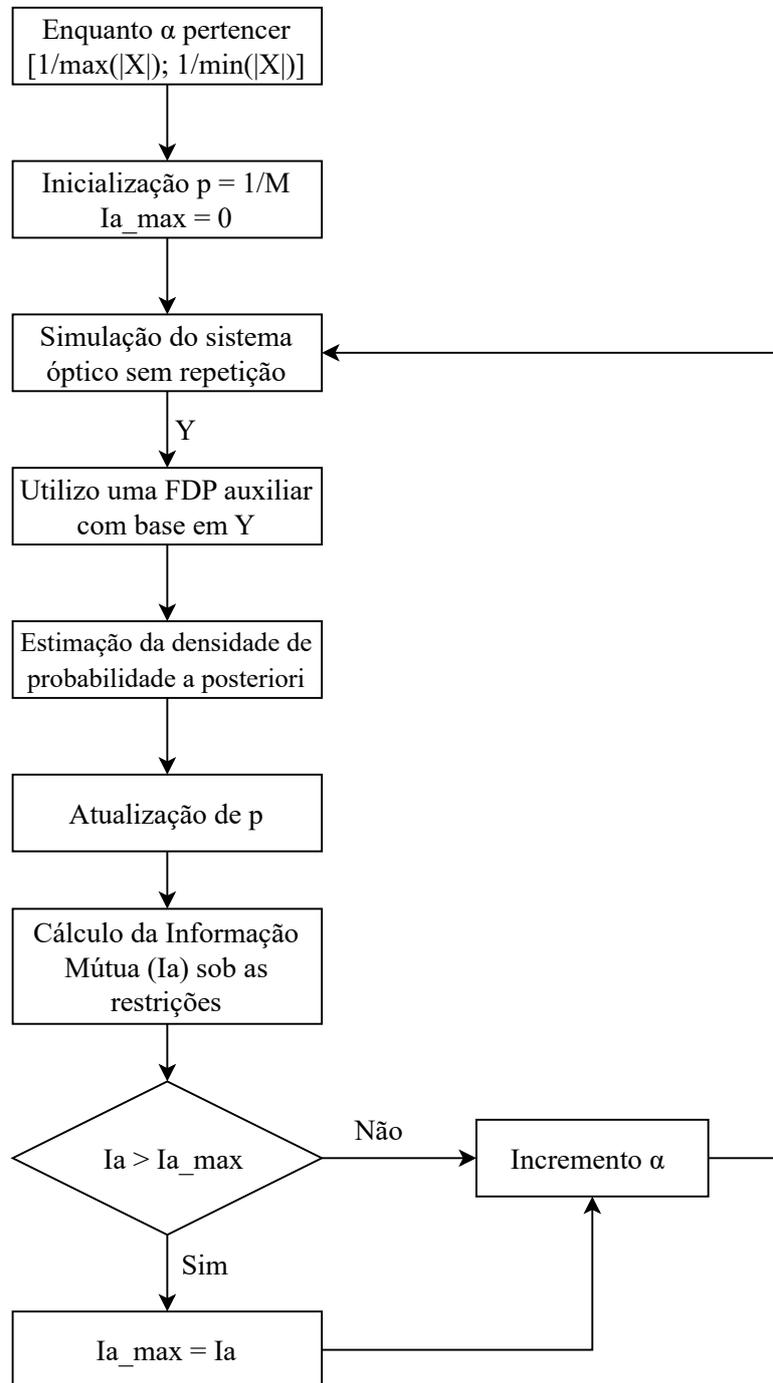


Figura 18 – Diagrama da implementação do algoritmo de Blahut-Arimoto.

o vetor de probabilidades uniforme  $p$  e a variável de informação mútua máxima ( $I_{a\_max}$ ) igual a 0. Sendo assim, considerando o vetor de probabilidades  $p$ , o sistema óptico sem repetição é simulado através do simulador óptico gerando a saída  $Y$ .

Em posse desta saída, utiliza-se uma função distribuição de probabilidade auxiliar, a qual corresponde a uma função gaussiana de 2 dimensões (representando a componente real e imaginária de  $Y$ ), com variância e média obtidas a partir de  $Y$ , em que cada símbolo do alfabeto de entrada  $X$  (que representa os símbolos complexos da constelação) terá sua probabilidade a-posteriori determinada por meio da distribuição de probabilidades auxiliar. Logo após, é realizada a atualização de  $p$  e o cálculo da informação mútua, por meio dos métodos apresentados em [52], nos quais consideram-se as restrições:

$$\sum_i p_i = 1 \quad (3.9)$$

e

$$\sum_i p_i \alpha^2 \|x_i\|^2 = P_\alpha. \quad (3.10)$$

A partir de um vetor de probabilidade  $p$  inicial, calcula-se a esperança, expressa na Equação 3.11:

$$T_i = E_Y \left[ \frac{Pr(X = x_i|Y) \log_2(Pr(X = x_i|Y))}{p_i} \right], \quad (3.11)$$

em que  $Pr(X = x_i|Y = y)$  é a probabilidade *a posteriori*. A seguir, obtém-se a maximização de  $p$ , conforme Equação 3.12, a qual é realizada por meio dos multiplicadores de Lagrange:

$$p = \underset{r}{\operatorname{argmax}} \left[ \sum_{i=1}^M r_i \left[ \log_2 \left( \frac{1}{r_i} \right) + T_i \right] \right], \quad (3.12)$$

considerando que  $\sum_i r_i = 1$  e  $\sum_i r_i \alpha^2 \|x_i\|^2 = P$ , em que  $P$  é a potência do sinal a ser considerada, e  $\|\cdot\|$  é a distância euclidiana.

Finalmente, após a convergência de  $p$ , a informação mútua  $I_a$  pode ser calculada como:

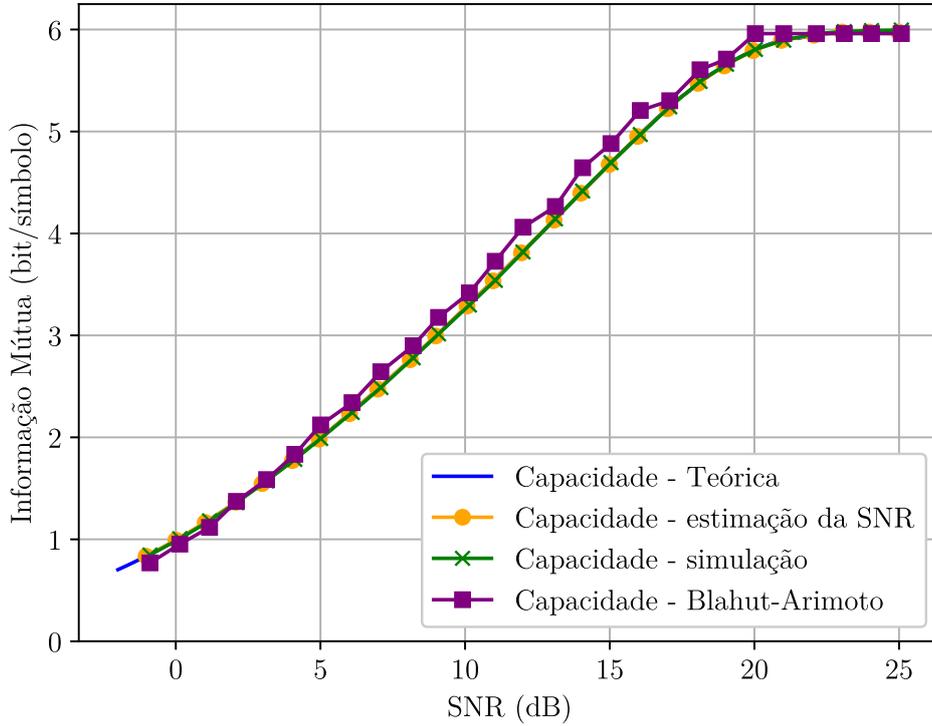


Figura 19 – Comparação entre curvas de informação mútua supracitadas e a resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto em função da SNR de um canal AWGN.

$$I_a = \sum_i p_i \left[ \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right) + T_i \right]. \quad (3.13)$$

Após a determinação de  $I_a$ , verifica-se se ela é maior que a variável  $I_{a\_max}$ . Caso verdadeiro, a variável  $I_{a\_max}$  recebe o valor de  $I_a$ . Caso contrário, o valor de  $I_{a\_max}$  não é alterado. De qualquer forma,  $\alpha$  é incrementado, e em posse dos valores atualizados de  $p$ , é realizada uma nova simulação do sistema óptico sem repetição e uma nova iteração do laço principal é iniciada.

Objetivando validar a implementação, considera-se o mesmo canal AWGN utilizado para validar a implementação da informação mútua apresentada anteriormente. O resultado é apresentado na Figura 19, na qual verifica-se que a curva obtida pelo algoritmo de Blahut-Arimoto se aproxima da curva teórica e da curva simulada apresentadas anteriormente na Seção 3.1.

## 4 Otimização de um sistema óptico sem repetição considerando a formatação probabilística

Neste capítulo propõe-se um método de projeto de sistemas ópticos sem repetição que incorpora a otimização da formatação probabilística da constelação a ser transmitida. Para tanto, foram integrados blocos para implementação da formatação probabilística e simulação de um sistema óptico sem repetição a um simulador óptico, intitulado Optrapy, previamente desenvolvido e validado experimentalmente pela equipe técnica do CPQD. Assim, avaliou-se o desempenho de sistemas ópticos sem repetição empregando diferentes distribuições de probabilidade para geração dos símbolos complexos das constelações.

A Figura 20 apresenta o esquemático básico do sistema considerado nas simulações da camada óptica. Verifica-se que no lado do transmissor, além dos blocos da cadeia digital de transmissão (DSP-Tx) e do *front-end* eletro-óptico convencional, são também considerados lasers de bombeio responsáveis por gerar o ganho Raman distribuído e energizar o ROPA de transmissão. Em seguida o sinal óptico é propagado pelo canal, o qual é formado por trechos de fibras ópticas e amplificadores remotos opticamente bombeados, conforme esquemático detalhado na Figura 21. Por fim, o sinal é recebido pela unidade de recepção, na qual estão presentes o *front-end* eletro-óptico e a cadeia digital de recepção (DSP-Rx), responsável por tratar o sinal recebido utilizando algoritmos que realizam a compensação de efeitos intrínsecos da fibra e eventuais efeitos deletérios oriundos do *front-end*. Na unidade de recepção, mais uma vez são também considerados lasers de bombeio responsáveis por prover ganho óptico distribuído e remoto ao sinal propagado pelo enlace. Tal ganho ocorre ao longo do canal óptico, o qual é apresentado com maiores detalhes na Figura 21, na qual se observa que ele é formado por um enlace único de fibra óptica, em que o sinal propagado é amplificado pelo ganho Raman seguido por um ROPA de transmissão. Posteriormente, o sinal continua sua propagação pela fibra óptica até que é novamente amplificado por um segundo ROPA. Entretanto, este bombeio é

contra-propagante, visto que o laser de bombeio está presente do lado do receptor (Rx). No último trecho do enlace, o canal é novamente amplificado por um ganho Raman por meio da unidade de bombeio remoto contra-propagante presente na unidade de recepção.

Dessa forma, tais sistemas possuem características próprias em comparação aos sistemas de comunicações ópticas convencionais. No caso específico considerado neste trabalho, os amplificadores ópticos com bombeio remoto não possuem fibras dedicadas para a inserção do bombeio, sendo alimentados por potência óptica propagada pelo trecho de fibra que antecede seu posicionamento. Adicionalmente, em tais trechos, há também ganho na potência do sinal óptico e dos próprios sinais de bombeio proporcionado pelo amplificador Raman distribuído.

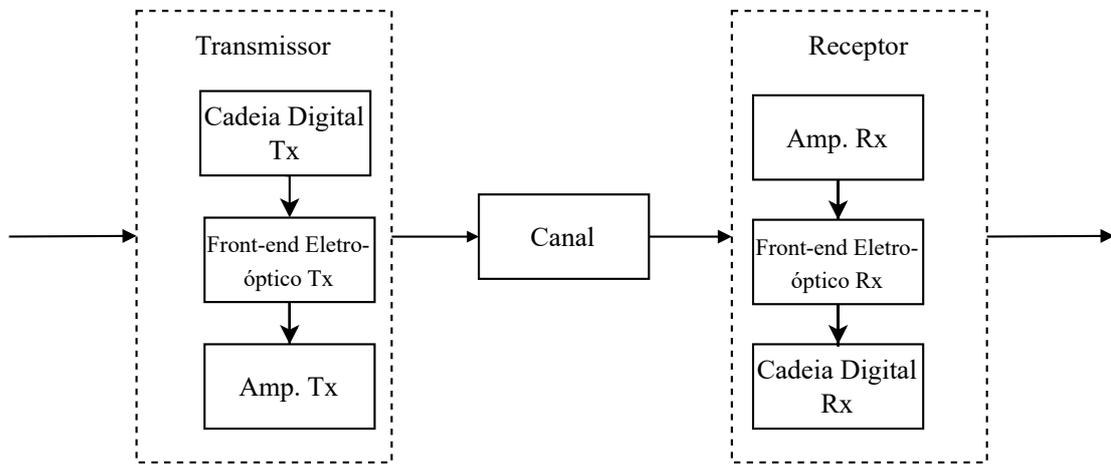


Figura 20 – Diagrama de blocos do modelo de simulação simplificado a ser empregado nas simulações de otimização sistêmica empregando o método aqui proposto.

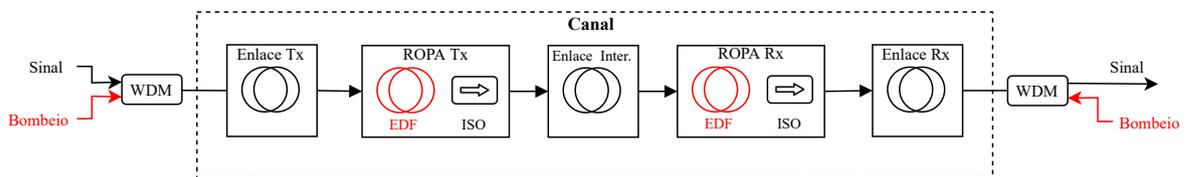


Figura 21 – Diagrama de blocos do modelo de simulação com foco nos elementos considerados na composição do canal óptico para a otimização sistêmica do enlace sem repetição empregando o método aqui proposto.

Em específico, para o ROPA-Rx e DRA-Rx, considera-se bombeios contra-propagante, sendo assim foi necessário implementar um laço de convergência para as

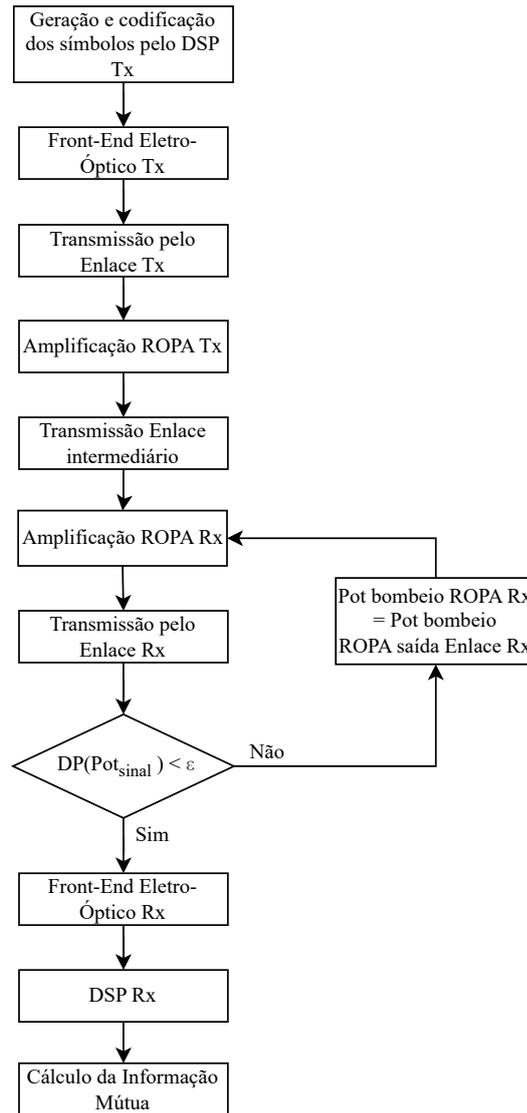


Figura 22 – Fluxograma da simulação de um sistema óptico sem repetição.

potências de sinal de entrada e de bombeio do ROPA-Rx. Para tanto, a simulação do enlace óptico sem repetição é implementada considerando um algoritmo no qual o trecho contra-propagante é simulado repetidas vezes até que as potências de bombeio e do sinal converjam, ou seja, que tenha um valor de desvio padrão menor que  $\epsilon$  entre iterações consecutivas, conforme apresentado na Figura 22.

Objetivando a validação da implementação proposta para a simulação do sistema óptico sem repetição supracitado, é realizada a simulação de uma transmissão óptica sem repetição considerando a propagação de sinal em onda contínua (ou seja, sem modulação). Neste sistema são combinadas técnicas de amplificação Raman de primeira ordem

e ROPA, ambas com bombeios nas direções co- e contra-propagante (para o lado do transmissor e receptor, respectivamente), com alcance de 300 km e parâmetros do sistema apresentados nas Tabela 2. Na tabela são expostos os comprimentos de cada trecho do enlace e das fibras dopadas com érbio utilizadas na amplificação remota opticamente bombeada, além disso são destacadas as principais informações e valores de potência considerando o perfil de potência. Como resultado, obteve-se o perfil de potência apresentado na Figura 23, o qual apresenta o comportamento esperado para a arquitetura de sistema aqui proposta. Dessa forma, e considerando validações experimentais prévias [9], conclui-se que o algoritmo implementado possui o comportamento esperado, visto a continuidade dos perfis de potência avaliados, com apenas descontinuidades da potência do sinal nas posições em que estão presentes os ROPAs co- e contra-propagantes. Adicionalmente, na mesma figura, é possível perceber a depleção das potências de bombeio nos trechos inicial e final do enlace, cuja energia é progressivamente transferida para o sinal óptico através do processo de amplificação Raman distribuída.

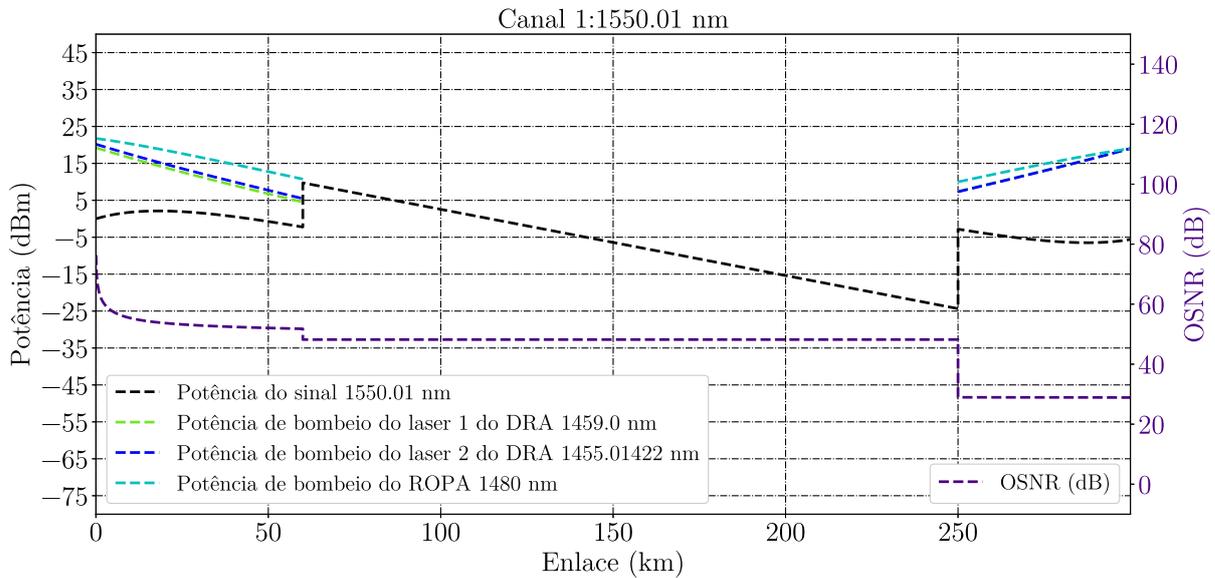


Figura 23 – Perfil de potência de propagação para um sistema sem repetição empregando amplificação Raman distribuída e amplificação remota opticamente bombeada nas duas extremidades do enlace.

Entretanto, para a proposta do presente trabalho, o ambiente de simulação deve ser complementado com a simulação dos efeitos lineares e não lineares da propagação do sinal óptico modulado pela fibra. Sendo assim, de forma a validar tal implementação adicional, realiza-se a simulação do mesmo sistema óptico supracitado com a modulação

Tabela 2 – Principais parâmetros do enlace óptico sem repetição.

<b>Parâmetros do sistema</b>	
Potência de lançamento	0 dBm
Comprimento de onda do sinal	1550 nm
Potência no receptor	-5,5848 dBm
Atenuação da fibra óptica	0,17918 dB/km
OSNR no receptor	28,8719 dB
Comprimento DRA co-propagante	60 km
Comprimento DRA contra-propagante	50 km
Comprimento enlace intermediário	190 km
Comprimento ROPA co-propagante	15 m
Comprimento ROPA contra-propagante	11 m
Comprimento de onda do laser de bombeio 1 do DRA	1455,01 nm
Comprimento de onda do laser de bombeio 2 do DRA	1459 nm
Comprimento de onda do laser de bombeio do ROPA	1480 nm

DP-64QAM, em que os demais parâmetros referentes à configuração do sistema óptico estão descritos na Tabela 3. Sendo assim, no resultado apresentado na Tabela 2 é verificado que o valor de OSNR e potência no receptor são os mesmos obtidos anteriormente considerando o perfil de potência resultante da simulação adotando o sinal em onda contínua, dessa forma concluindo que a implementação da simulação do sistema óptico sem repetição foi bem-sucedida.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros para simulação do sistema óptico sem repetição para validação.

Componente	Parâmetro	Símbolo	Valor
Sinal	Fator de <i>roll-off</i> do pulso de Nyquist	$r_{off}$	0.1
	Taxa de símbolos	$R_s$	32 GBd
DAC e ADC	Quantização	$N_{DAC/ADC}$	8 bits
	Largura de banda de -3 dB	$B_{DAC/ADC}$	35 GHz
	Taxa de amostragem	$R_{DAC/ADC}$	64 GSa/s
Transmissor	Comprimento de onda do canal	$\lambda_{ch}$	1550 nm
	Largura de linha do laser	$\Delta\nu$	0 kHz
	Largura de banda de -3 dB do modulador	$B_{mod}$	29 GHz
	Razão de extinção do modulador (IQ)	$ER_{mod}$	0 dB
	Potência do laser	$P_L$	3 dBm
Receptor	Largura de banda de -3 dB do Demux	$B_{demux}$	35.2 GHz
	Largura de banda de -3 dB do fotodetector	$B_{pd}$	40 GHz

## 4.1 Heurística de otimização

Após a implementação dos algoritmos necessários para as análises propostas para este trabalho, apresenta-se a metodologia de otimização. Tendo em vista o desempenho e fácil implementação, optou-se por considerar como algoritmo de otimização o algoritmo de rede neural (*Neural Network Algorithm* – NNA) [2], o qual é baseado em redes neurais artificiais. No algoritmo, os pesos possuem a função de gerar combinações de entradas para que seja obtida a solução que maximiza ou minimiza a função custo desejada, conforme apresentado no esquemático da Figura 24. No diagrama,  $X$  representa as variáveis do sistema que se deseja otimizar, enquanto  $W$  são os pesos que relacionam combinações das variáveis  $X$ .

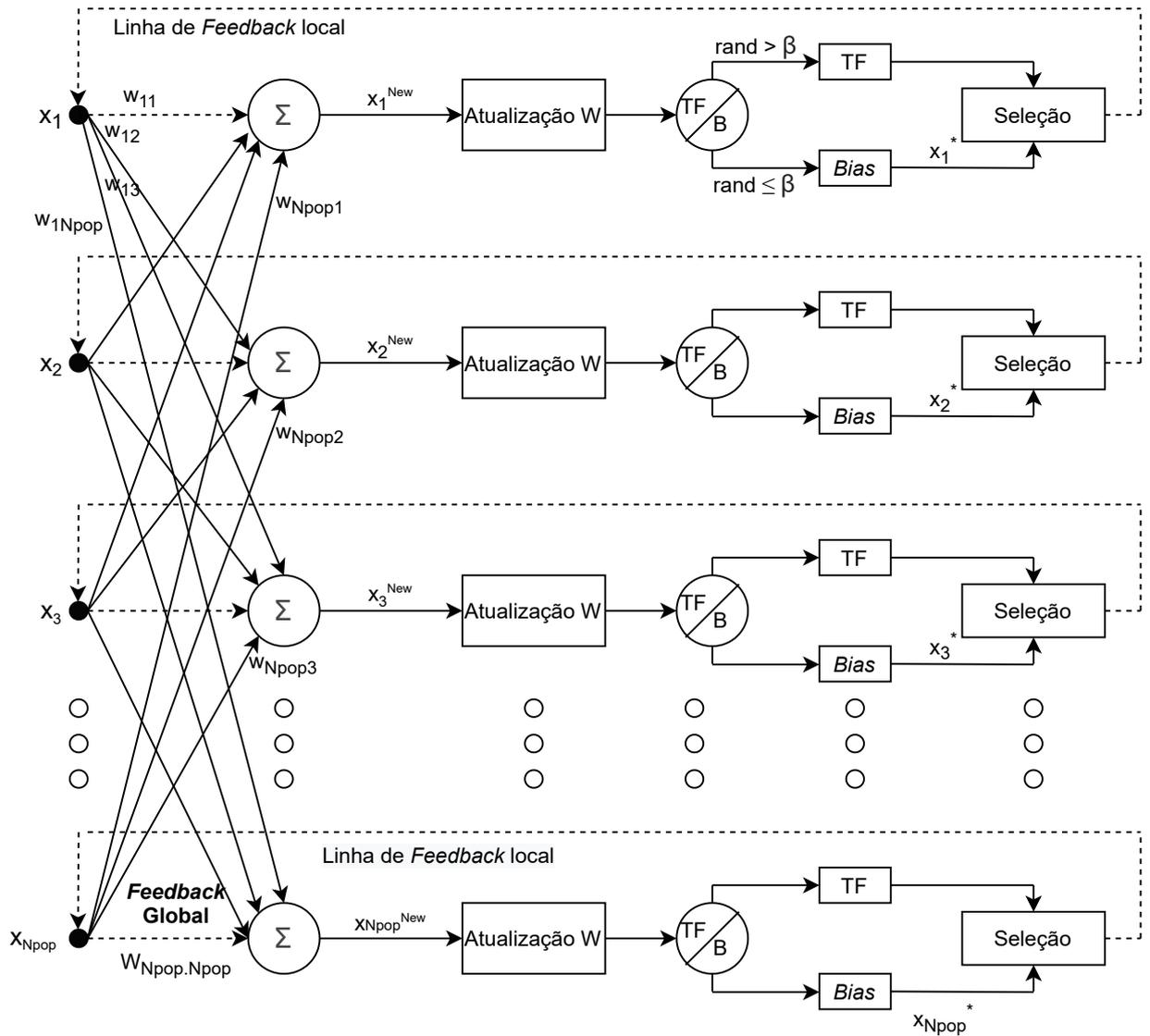


Figura 24 – Esquemático do funcionamento do NNA (adaptado de [2]).

Observa-se na Figura 24 a presença dos blocos *TF* e *B*, os quais indicam etapas do processo de otimização, sendo nomeadas como função de transferência e operador *bias*, respectivamente. Tais métodos são implementados de forma a explorar melhor o espaço de busca e evitar uma estagnação em um mínimo local. O operador *bias* é similar ao operador de mutação no algoritmo genético (*Genetic Algorithm – GA*) [54], atuando como uma forma de ruído, a fim de explorar mais valores para possíveis soluções ótimas e impedindo que haja uma convergência prematura. Já a função de transferência faz uma alteração nas novas soluções padrões para que sejam cada vez mais próximas das soluções ótimas obtidas até então. Dessa forma, novos valores de função custo são obtidos a partir dos

valores de  $X$  atualizados após a aplicação do operador *bias* ou da função de transferência. Eles são comparados com os valores da função custo alvo atual a fim de verificar se foi atingido um novo mínimo. Caso o valor encontrado seja maior do que o valor alvo, não haverá atualização dos valores alvos. Caso contrário, os valores alvos são atualizados. Esse processo é realizado durante um número de iterações predeterminado ou através de uma condição de parada levando em consideração um erro desejado. Na Figura 25 apresenta-se o diagrama de blocos que demonstra o funcionamento do algoritmo acima detalhado.

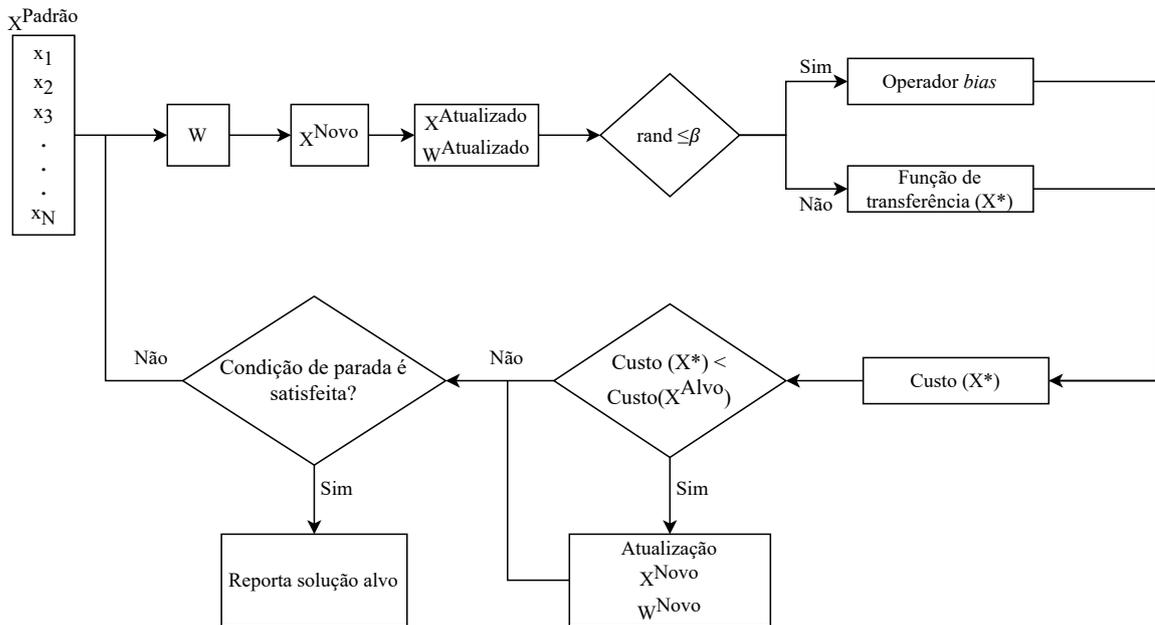


Figura 25 – Diagrama de blocos do processo do NNA (adaptado de [2]).

Sendo assim, após a determinação do algoritmo de otimização adotado, a função custo é determinada. Levando-se em consideração que a análise proposta consiste em verificar o desempenho do sistema óptico sem repetição empregando a formatação probabilística, constata-se que a métrica de desempenho de capacidade mais adequada para o sistema é a informação mútua. Esta métrica foi determinada visto que é relevante para avaliar o desempenho do sistema antes dos algoritmos de correção de erros (*Forward Error Correction* – FEC) não binários e decodificadores com decisão suave. De fato, a taxa de erro de bits (*Bit Error Rate* – BER) pré-FEC é insuficiente para prever a BER pós-FEC considerando os esquemas de codificação utilizados na formatação de constelação [55].

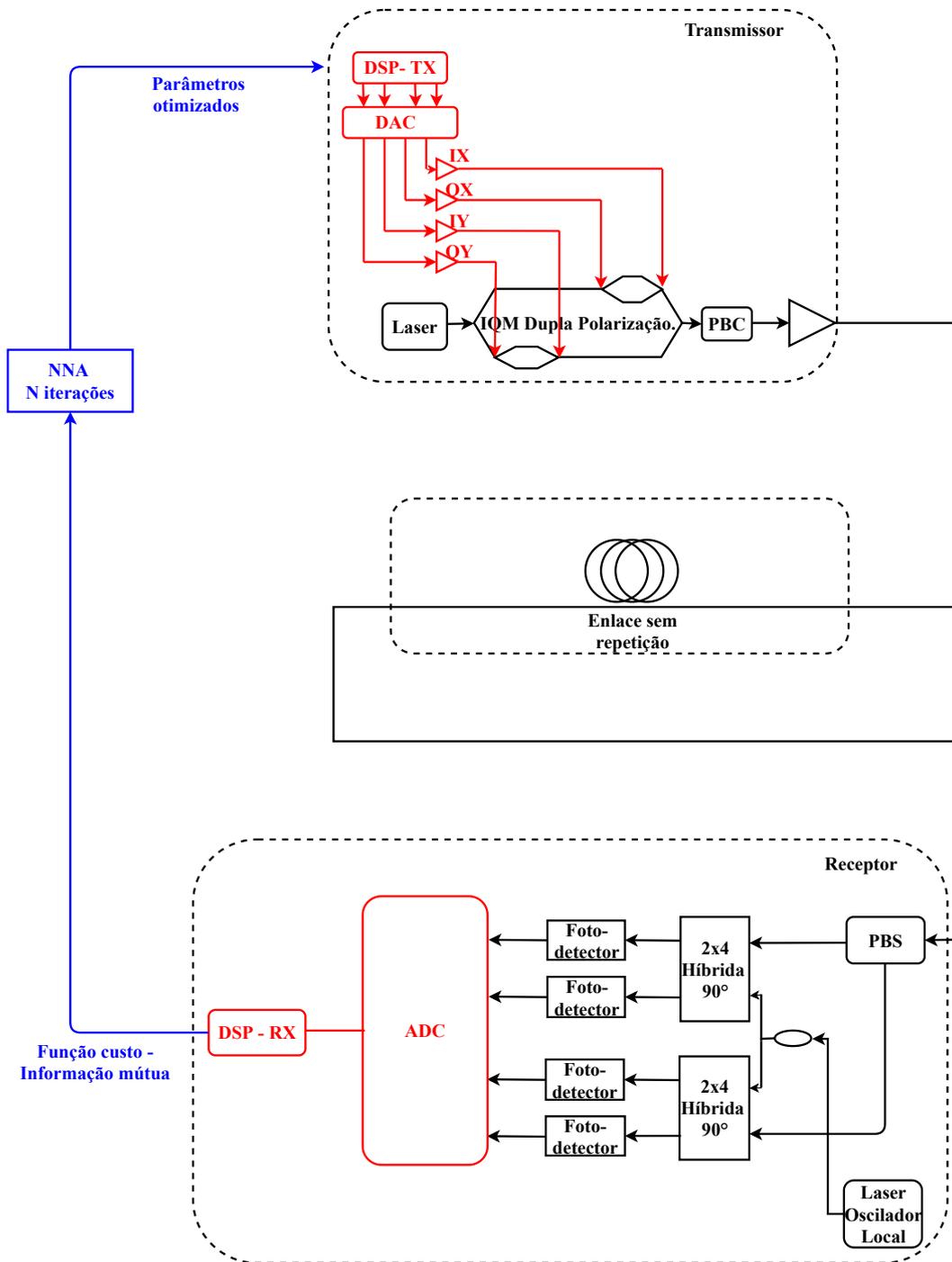


Figura 26 – Esquemático do simulador óptico considerando uma transmissão em um enlace óptico sem repetição, a título de exemplificação, em que os componentes em preto se referem ao domínio óptico, os em vermelho ao domínio digital e em azul ao algoritmo de otimização.

Objetivando ilustrar o processo de otimização implementado, na Figura 26 é apresentado um diagrama do sistema óptico sem repetição com o algoritmo de otimização NNA. Nela, inicialmente a cadeia de DSP do lado do transmissor gera uma sequência de bits uniformemente distribuídos, a qual é codificada pelo codificador CCDM gerando símbolos inteiros distribuídos de acordo com a distribuição de probabilidade implementada. Posteriormente, os símbolos inteiros são mapeados em símbolos complexos de uma constelação desejada, os quais são filtrados pelo filtro formatador de pulso do tipo cosseno levantado com fator de *roll-off* igual a 0,1. Em seguida, o sinal filtrado é convertido para a representação analógica por meio de um conversor digital-analógico (*Digital-to-Analog Converter* – DAC) levando-se em consideração uma determinada taxa de amostragem. O sinal elétrico resultante é utilizado no modulador eletro-óptico para modular uma portadora óptica, a qual é encaminhada para o modelo de canal implementado no simulador.

Os modelos de canais desenvolvidos consistem em modelos numéricos, os quais envolvem a propagação do sinal óptico pela fibra com o método de *Split-step Fourier* (SSF), incluindo também os efeitos de dispersão cromática. Adicionalmente, os efeitos não lineares, especificamente auto-modulação de fase (*Self-Phase Modulation* – SPM) e modulação cruzada de fase (*Cross-Phase Modulation* – XPM), são considerados no modelo de simulação implementado, permitindo avaliar a degradação conjunta do sinal óptico por efeitos lineares e não lineares. Conforme apresentado na Figura 21, o canal é composto, inicialmente, por um trecho de fibra, no qual o canal é amplificado pelos bombeios co-propagantes do amplificador DRA-Tx. Em seguida, o canal é novamente amplificado, nessa oportunidade pelo ROPA-Tx, com bombeio co-propagante ao sinal. Logo após, o sinal é transmitido através de um enlace intermediário até ser amplificado por um ROPA-Rx com bombeio contra-propagante. Na primeira iteração, as potências de bombeio do ROPA-Rx são definidas como as potências de saída do enlace intermediário. Após a propagação do sinal pelo enlace Rx, o qual por sua vez é responsável por amplificar o sinal por meio do DRA-Rx contra-propagante com potências de bombeio iniciais recebidas do ROPA-Rx, é feita uma verificação se a potência de bombeio do ROPA-Rx convergiu para um valor de erro (diferença) menor que  $\epsilon$ . Caso não seja, a potência de bombeio do ROPA-Rx para a próxima iteração será igual à potência de saída do enlace Rx, visto que a direção do bombeio é contra-propagante.

Após a convergência do sinal de bombeio, o sinal óptico é recebido pelo *front-*

end eletro-óptico, o qual é formado pela a híbrida de 90°, o oscilador local e os fotodetectores. O sinal elétrico resultante é convertido para a representação digital pelo conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter* – ADC), o qual também é implementado considerando as limitações usualmente presentes em dispositivos práticos. Posteriormente, o sinal digital resultante é tratado pela cadeia de algoritmos de DSP-Rx. Nela, inicialmente é realizado de superamostragem a duas amostras por símbolo seguido pelo processo de ortonormalização. Logo após, tem-se a compensação da dispersão cromática por meio do algoritmo de equalização no domínio da frequência (*Frequency Domain Equalization* – FDE). Posteriormente, a recuperação de relógio é realizada. Em seguida, tem-se a equalização dinâmica, em que o algoritmo de Decisão Direta dos Mínimos Quadrados (*Decision-Directed Least Mean Square* – DD-LMS) é implementado. Por fim, é realizada a recuperação da portadora, incluindo a recuperação de frequência, a partir do algoritmo de estimação de frequência de n-ésima potência, e de fase, na qual utiliza-se o algoritmo busca cega de fase (*Blind Phase Search* – BPS).

Em posse dos dados tratados, é realizada a etapa de desmapeamento, na qual os símbolos complexos são desmapeados para os símbolos inteiros de forma a calcular a informação mútua por meio do algoritmo desenvolvido por Gabriella Bosco e Dario Piloni [46] em Matlab ®e adaptado para a linguagem Python. A informação mútua é a função custo do algoritmo NNA, que por sua vez, retorna os valores de parâmetros otimizados. Tais parâmetros podem ser sistêmicos ou referentes à distribuição de probabilidade adotada na formatação probabilística. Além disso, há a decodificação pelo decodificador CCDM de símbolos inteiros para binários de forma a calcular a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* – BER).

O objetivo do algoritmo NNA, cujo laço permite otimizar os parâmetros de interesse, é maximizar a informação mútua para diferentes distribuições de probabilidade. A primeira rodada de otimização avaliada objetiva o projeto do sistema óptico sem repetição considerando a distribuição uniforme e um alcance de 300 km com a transmissão de um sinal óptico com modulação DP-64QAM. Nesse caso, o esquema de simulação considera os demais parâmetros listados na Tabela 3, com exceção do comprimento de onda do sinal óptico modulado que aqui passa a ser variado. Dessa forma, o processo de otimização considera como variáveis os parâmetros do sinal e amplificação do sistema listados a seguir:

- Potência de lançamento do canal;
- Comprimento de onda do canal;
- Comprimento de onda dos lasers de bombeio dos DRAs e ROPAs das unidades Tx e Rx de forma independente;
- Potências dos lasers de bombeio dos DRAs e ROPAs, as quais podem resultar em valores independentes para os lasers da unidade de Tx e Rx;
- Posição do ROPA-Tx em relação ao transmissor;
- Posição do ROPA-Rx em relação ao receptor;
- Comprimento da fibra dopada com érbio dos ROPAs das unidades Tx e Rx de forma independente.

Posteriormente, em posse dos parâmetros que maximizam a informação mútua do sistema proposto, o enlace resultante é considerado como referência para as demais otimizações, as quais englobam a otimização de distribuições de probabilidade para maximização da informação mútua. Para tanto, é considerada a seguinte metodologia: otimização do  $\lambda$  da distribuição de Maxwell-Boltzmann utilizando o NNA, apresentada na Equação 3.4; otimização do  $\lambda$  e  $N$  da distribuição Supergaussiana utilizando o NNA, apresentada na Equação 3.5; e por último, otimização de uma distribuição de probabilidade variável determinada pelo algoritmo de Blahut-Arimoto, descrito na Seção 3.3. Tais otimizações são detalhadas e têm seus respectivos resultados discutidos no capítulo subsequente.

## 5 Resultados

Neste capítulo são apresentados e detalhados os resultados obtidos nas otimizações do enlace óptico sem repetição empregando a metodologia proposta no presente trabalho. Inicialmente, é descrita a otimização dos parâmetros do enlace sem repetição, de forma a maximizar a sua informação mútua para uma distribuição uniforme da modulação 64QAM. Em posse da configuração otimizada do sistema, ele é considerado nas otimizações das distribuições de probabilidade dos símbolos considerando as distribuições de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana. Além destas, também é avaliada uma distribuição genérica otimizada numericamente pelo algoritmo de Blahut-Arimoto modificado para atender o cenário de transmissão óptica sem repetição.

### 5.1 Otimização do enlace sem repetição considerando modulação 64QAM uniforme

Conforme apresentado na Seção 2, os sistemas ópticos sem repetição são essenciais para prover conectividade em regiões de difícil acesso e que possuem um alto custo de manutenção dos amplificadores de linha, permitindo o projeto de sistemas de transmissão óptica com ausência de elementos ativos ao longo do enlace. Entretanto, para atingir longos alcances são implementadas técnicas avançadas de amplificação, são estas o amplificador Raman Distribuído (*Distributed Raman Amplifier* – DRA) e os amplificadores remotos opticamente bombeados (*Remote Optically Pumped Amplifier* – ROPA). Dessa forma, ao projetar tais sistemas depara-se com uma grande quantidade de parâmetros interdependentes que devem ser determinados. Em específico, no presente trabalho, propõe-se a otimização conjunta da potência de lançamento e comprimento de onda do sinal modulado, da potência e comprimento de onda dos lasers de bombeio, da posição do ROPA-Tx em relação ao transmissor, da posição do ROPA-Rx em relação ao receptor e do comprimento da fibra dopada com érbio para ambos. Em específico, também objetiva-se maximizar o ganho do ROPA-Tx de modo que a potência de saída não exceda o limite que gera não linearidades, procurando minimizar o impacto do ROPA-Rx na relação sinal-

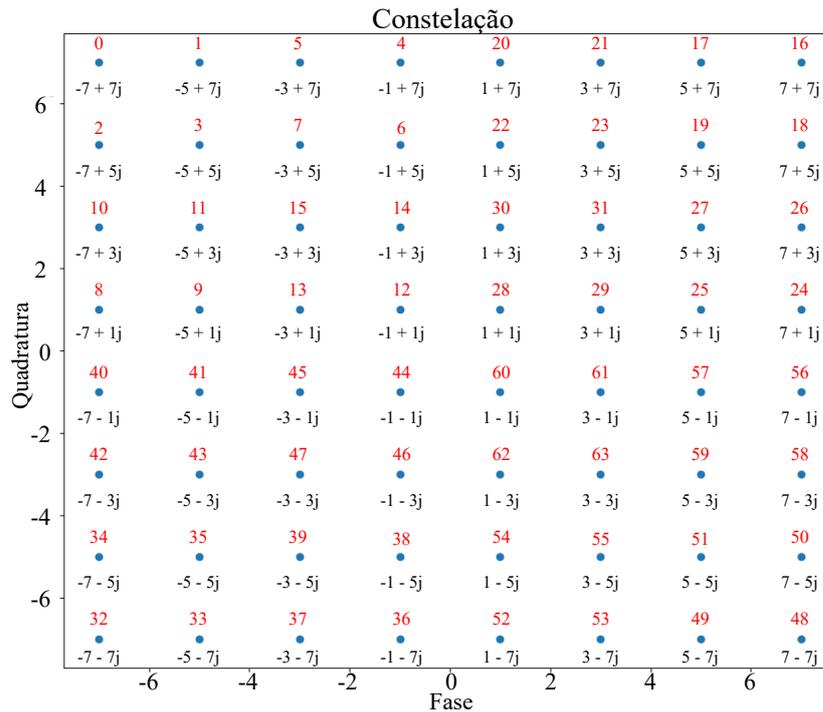


Figura 27 – Constelação de referência 64QAM, apresentando os valores dos símbolos complexos e inteiros após a codificação.

ruído óptica (*Optical Signal-to-Noise Ratio* – OSNR) do sinal transmitido. Na Figura 27 é apresentada a constelação 64QAM considerada nas simulações do sistema sem repetição, expondo seus respectivos símbolos complexos e inteiros após a codificação.

Sendo assim, conforme detalhado na Seção 4.1, é utilizado o algoritmo de otimização de rede neural (*Neural Network Algorithm* – NNA) [2], o qual baseia-se nas redes neurais artificiais (*Artificial Neural Networks* – ANN). Seu papel é otimizar variáveis de entrada de forma a maximizar/minimizar uma determinada função custo, que neste caso, conforme detalhado anteriormente, é a maximização da informação mútua em uma transmissão óptica sem repetição.

As variáveis de entrada para a função custo e seus intervalos, os quais foram obtidos empiricamente, para o espaço de busca são listados na Tabela 4, enquanto os parâmetros referentes ao algoritmo de otimização estão expostos na Tabela 5. Tais valores foram determinados de forma a obter uma convergência de otimização dentro dos limites computacionais disponíveis. Tal metodologia é aplicada para todas as otimizações realizadas ao longo do trabalho.

Tabela 4 – Intervalo de valores dos parâmetros do sistema óptico sem repetição considerados no processo de otimização pelo algoritmo NNA.

<b>Componente</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Intervalo</b>
Sinal	Potência de lançamento do canal	-5 – 5 dBm
	Comprimento de onda do canal	1550 – 1560 nm
Transmissor	Potência do 1º laser de bombeio Raman	50 – 150 mW
	Potência do 2º laser de bombeio Raman	50 – 150 mW
	Potência do laser de bombeio ROPA	50 – 150 mW
	Posição do ROPA em relação ao Tx	50 – 100 km
	Comprimento da fibra dopada com érbio	10 – 20 m
Receptor	Potência do 1º laser de bombeio Raman	100 – 300 mW
	Potência do 2º laser de bombeio Raman	100 – 300 mW
	Potência do laser de bombeio ROPA	100 – 300 mW
	Posição do ROPA em relação ao Rx	50 – 150 km
	Comprimento da fibra dopada com érbio	10 – 20 m
Amplificação	Comprimento de onda do 1º laser de bombeio Raman	1420 – 1460 nm
	Comprimento de onda do 2º laser de bombeio Raman	1420 – 1460 nm
	Comprimento de onda do laser de bombeio ROPA	1475 – 1490 nm

Tabela 5 – Valores dos parâmetros de implementação do algoritmo de otimização NNA para a otimização do sistema óptico sem repetição.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Número de variáveis	15
População	$3 \times 15$
Valor máximo de iterações	10

O gráfico de convergência da informação mútua resultante do processo de otimização é apresentado na Figura 28. Verifica-se que a convergência foi atingida a partir da sexta iteração. Após a convergência, o código de otimização apresentou os valores apresentados na Tabela 6 para as variáveis otimizadas, resultando em uma informação mútua média entre as duas polarizações igual a 5,57 bit/símbolo. Observa-se também que os valores de comprimento de onda e posição dos ROPAs foram aproximados para números

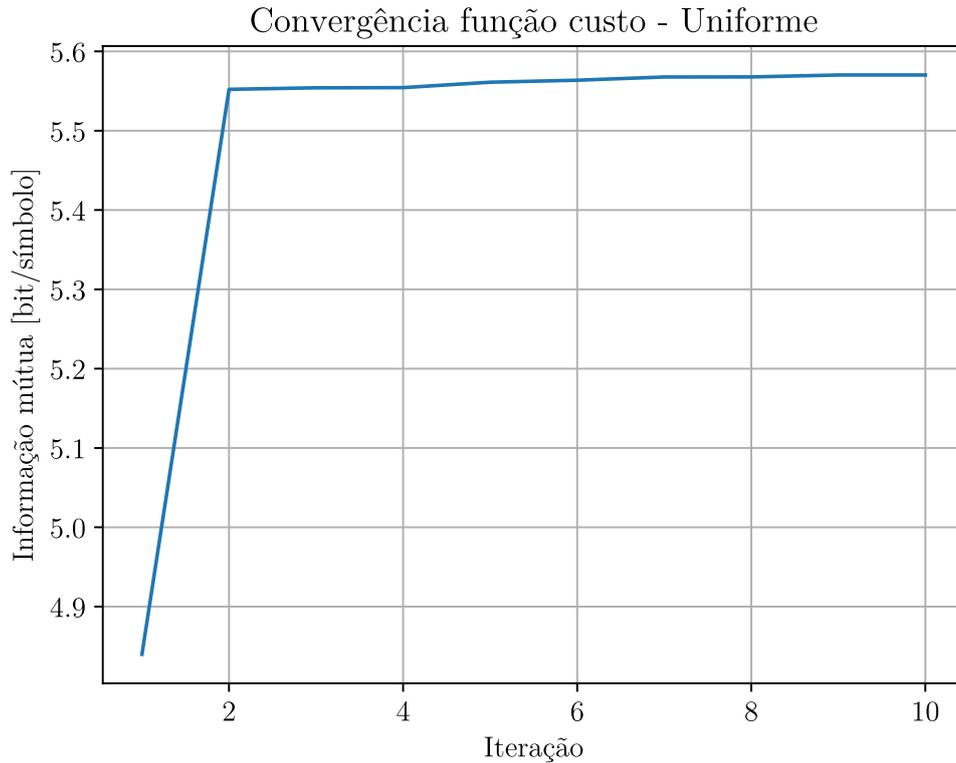


Figura 28 – Informação mútua média entre as duas polarizações em função da iteração do algoritmo de otimização.

inteiros, de forma a facilitar a sua implementação em sistemas práticos. Na Figura 29 é apresentado o perfil de potência resultante para o sistema sem repetição em questão e os valores de OSNR do sinal para cada ponto do enlace. Verifica-se que a potência máxima de propagação corresponde a 4,95 dBm, a OSNR no receptor é igual a 25,39 dB e taxa de erro de bits (*Bit Error Rate* – BER) pré-FEC correspondente é  $0,020063 (2 \cdot 10^{-2})$ .

Tabela 6 – Valores ótimos após a convergência do algoritmo NNA para os parâmetros do sistema óptico sem repetição otimizados.

Componente	Parâmetro	Valor otimizado
Sinal	Potência de lançamento do canal	-3,54 dBm
	Comprimento de onda do canal	1550 nm
Transmissor	Potência do 1° laser de bombeio Raman	63,89 mW
	Potência do 2° laser de bombeio Raman	75,63 mW
	Potência do laser de bombeio ROPA	135,26 mW
	Posição do ROPA em relação ao Tx	65 km
	Comprimento da fibra dopada com érbio	11 m
Receptor	Potência do 1° laser de bombeio Raman	173,62 mW
	Potência do 2° laser de bombeio Raman	114 mW
	Potência do laser de bombeio ROPA	250,12 mW
	Posição do ROPA em relação ao Rx	55 km
	Comprimento da fibra dopada com érbio	14 m
Amplificação	Comprimento de onda do 1° laser de bombeio Raman	1455 nm
	Comprimento de onda do 2° laser de bombeio Raman	1460 nm
	Comprimento de onda do laser de bombeio ROPA	1480 nm

Após ter a configuração do enlace determinada, é aplicada a distribuição probabilística na geração do sinal a ser transmitido, por meio do CCDM. Dessa forma, torna-se possível realizar a análise do desempenho do sistema considerando as diferentes distribuições de probabilidades que foram anteriormente propostas. Sendo assim, as próximas seções descrevem o processo de otimização e os resultados obtidos para cada distribuição de probabilidade. Posteriormente, os resultados são comparados entre si.

## 5.2 Otimização das probabilidades a-priori considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann

Conforme detalhado no Capítulo 3, a distribuição de probabilidade de Maxwell-Boltzmann, apresentada na Equação 3.4, maximiza a capacidade de um canal com ruído aditivo gaussiano branco (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN), tornando-a próxima

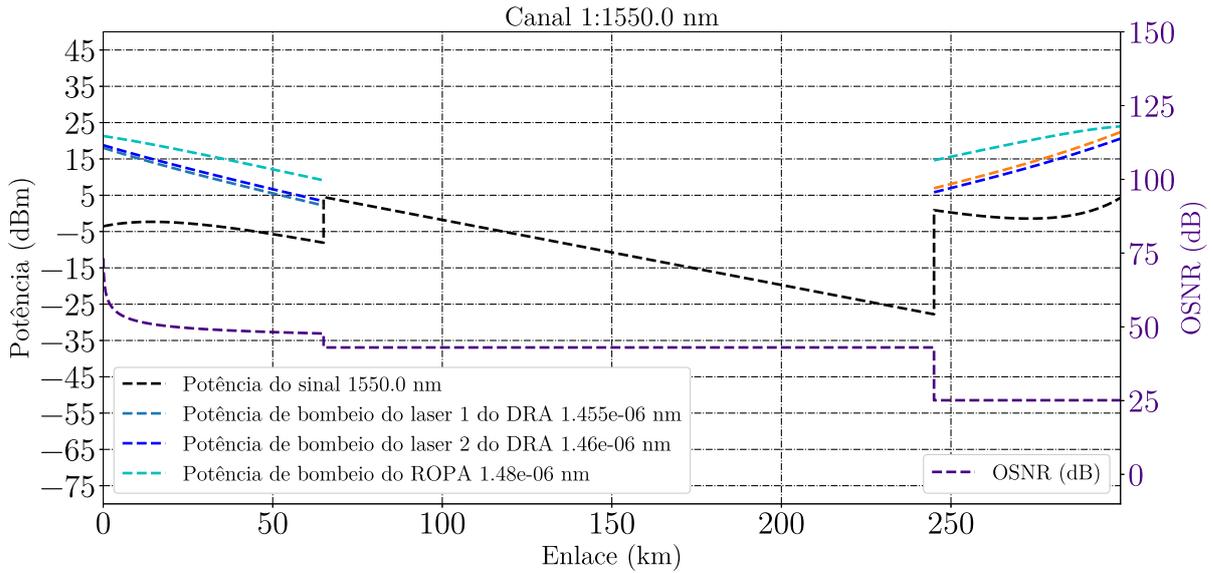


Figura 29 – Perfil de potência e OSNR do sistema sem repetição resultante da otimização de seus parâmetros de transmissão, recepção e amplificação pelo NNA, com parâmetros otimizados apresentados na Tabela 6.

ao limite de Shannon. Ela também é amplamente utilizada em sistemas ópticos de transmissão, visto que, considerando os limiares de potência para que não haja ocorrências de efeitos não lineares, o comportamento do canal óptico pode ser modelado como próximo ao de um canal AWGN. Dessa forma, tal distribuição é adotada como uma das possíveis distribuições a serem avaliadas no presente trabalho. Verificando a Equação 3.4, tem-se que o fator  $\lambda$  deve ser otimizado para cada valor de SNR do sistema. Dessa forma, torna-se necessária a busca pelo fator  $\lambda$  que maximize a informação mútua para um determinado canal. Tal processo é realizado no sistema de transmissão sem repetição supracitado. Nesse caso,  $\lambda$  é considerada como a variável a ser otimizada pelo NNA, enquanto mantém-se a configuração do sistema fixa conforme otimização anterior com parâmetros apresentados na Tabela 6. Os parâmetros referentes ao algoritmo de otimização estão expostos na Tabela 7, em que a população é determinada como 5 vezes a quantidade de variáveis que são otimizadas, neste caso sendo apenas o  $\lambda$ . O resultado ótimo apresenta o valor de  $\lambda$  igual a 0,00985165, resultando em uma informação mútua média entre as polarizações igual a 5,615 bit/símbolo e BER pré-FEC igual a  $1,5 \cdot 10^{-2}$ . O gráfico de convergência da função custo considerada, correspondendo à informação mútua média entre as duas polarizações, é apresentado na Figura 30.

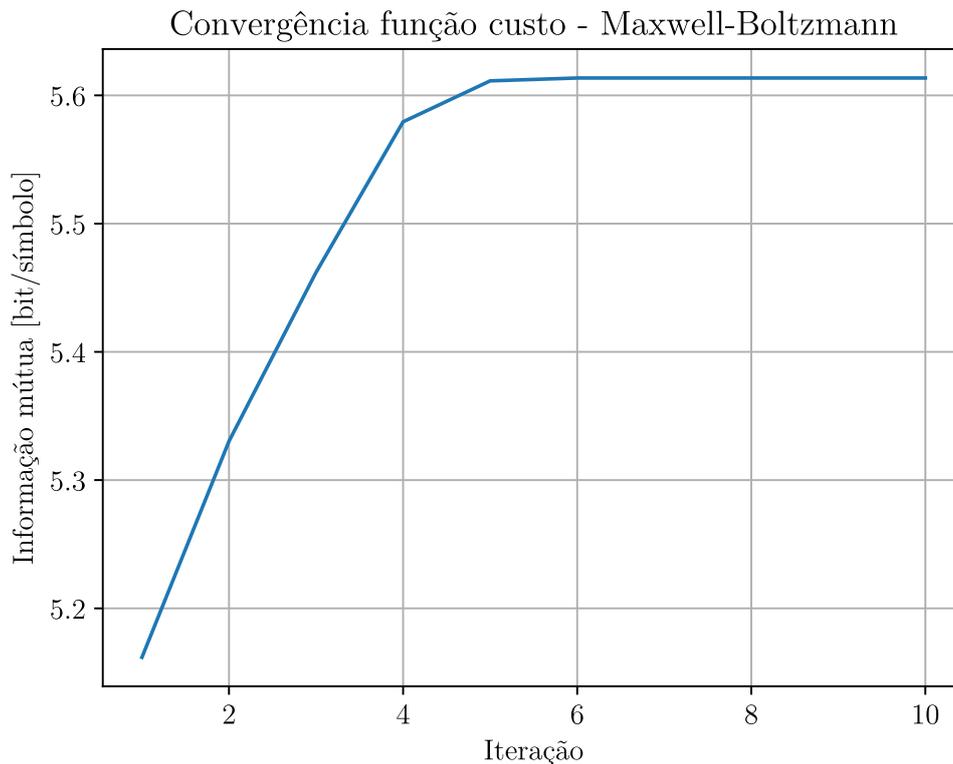


Figura 30 – Valores da função custo, informação mútua média entre as duas polarizações, em função da iteração do algoritmo de otimização

Tabela 7 – Valores dos parâmetros do algoritmo NNA para a otimização da distribuição de Maxwell-Boltzmann.

Parâmetro	Valor
Número de variáveis	1
Valor máximo de $\lambda$	0,1
Valor mínimo de $\lambda$	0
População	5
Valor máximo de iterações	10

Objetivando uma melhor visualização da formatação de constelação resultante do algoritmo de otimização considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann, na Figura 31(a) é apresentada a constelação resultante da geração de 64.000 símbolos pelo CCDM, a título de exemplificação. Observa-se que, conforme esperado, os símbolos com menor energia são gerados em maior quantidade do que os símbolos com maior energia. Já os símbolos de mesma energia são gerados na mesma quantidade, como demonstrado

no histograma presente na Figura 31(b).

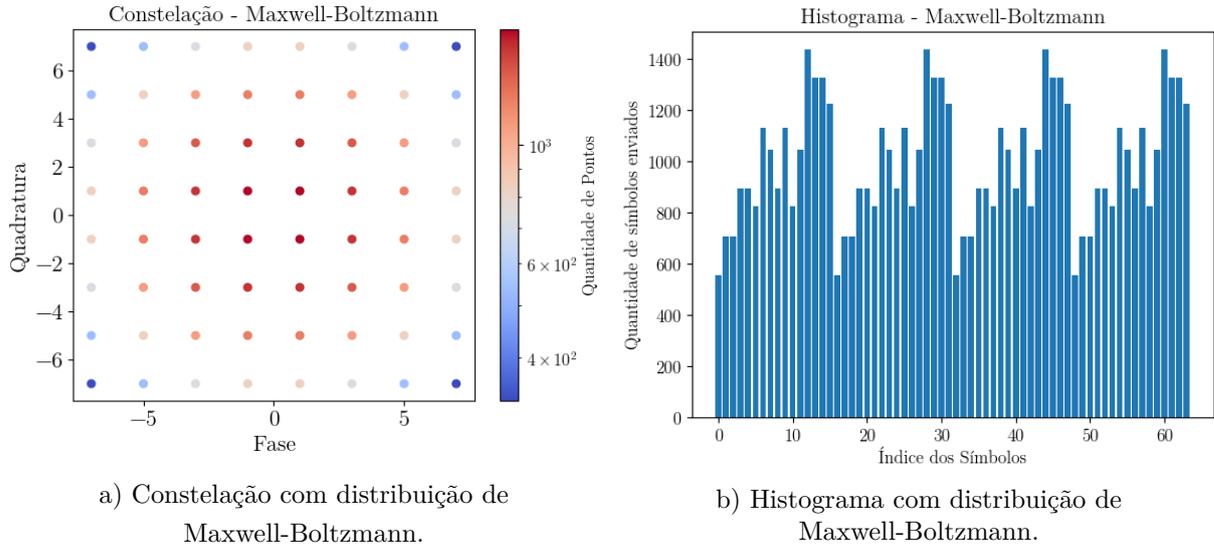


Figura 31 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição de Maxwell-Boltzmann.

### 5.2.1 Otimização das probabilidades a-priori considerando a distribuição Supergaussiana

A distribuição Supergaussiana [43] se assemelha à distribuição de Maxwell-Boltzmann. Entretanto possui um parâmetro a mais a ser otimizado,  $N$ , permitindo um grau a mais de liberdade para definir a distribuição de probabilidade considerando a modelagem do canal óptico. Tal parâmetro, assim como o  $\lambda$ , é considerado como uma variável do algoritmo NNA. Objetiva-se novamente maximizar a informação mútua da transmissão óptica do sistema descrito anteriormente, com seus parâmetros sistêmicos apresentados na Tabela 6. Os valores dos parâmetros considerados no algoritmo NNA estão presentes na Tabela 8.

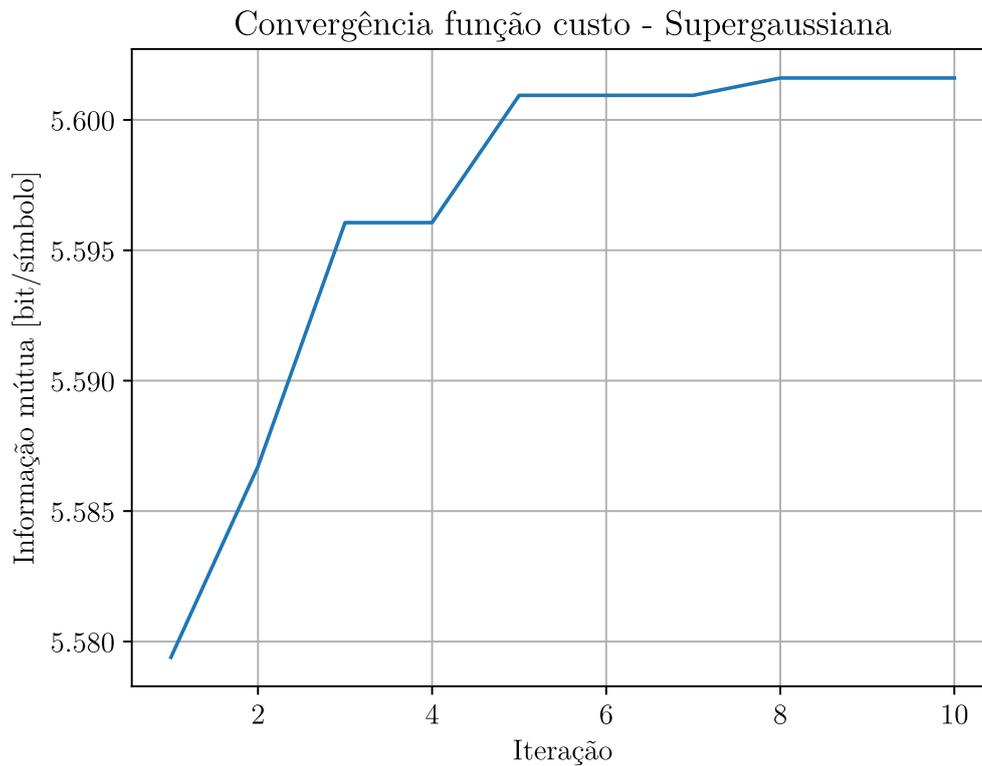


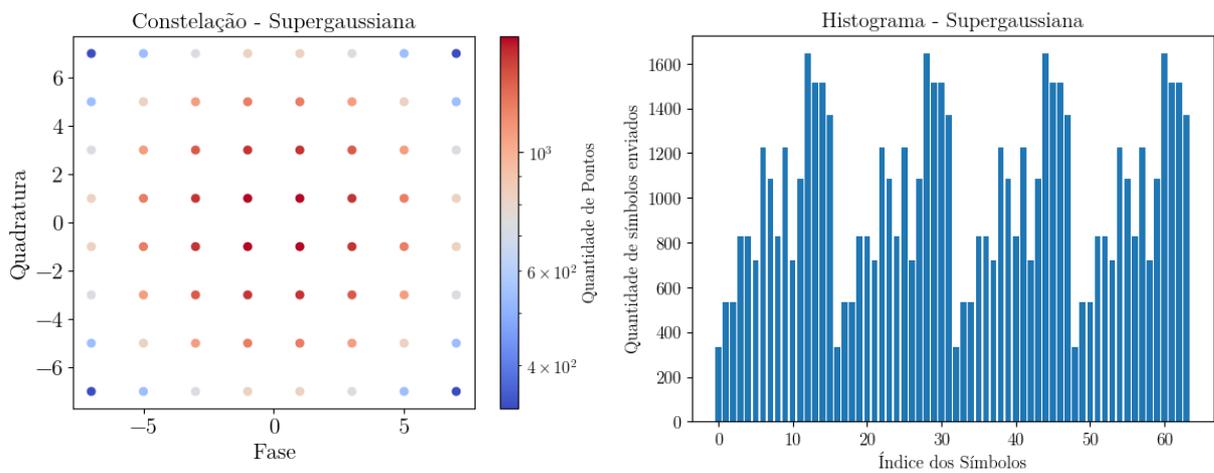
Figura 32 – Valores da função custo, informação mútua média entre as duas polarizações em função da iteração do algoritmo de otimização

Tabela 8 – Valores dos parâmetros do algoritmo de otimização NNA para a otimização da distribuição Supergaussiana.

Parâmetro	Valor
Número de variáveis	2
Valor máximo de $\lambda$	0,1
Valor mínimo de $\lambda$	0
Valor máximo de $N$	3,5
Valor mínimo de $N$	2
População	10
Valor máximo de iterações	10

Assim como nas demais otimizações, o gráfico de convergência da função custo considerada, sendo esta a informação mútua média entre as duas polarizações, é apresentado na Figura 32. O sistema de transmissão óptica sem repetição resultante da otimização obteve como parâmetros otimizados  $N = 3,5$  e  $\lambda = 0,005229749$ , resultando em uma in-

formação mútua média entre as polarizações igual a 5,61 bit/símbolo, BER pré-FEC igual a  $1,2 \cdot 10^{-2}$ . A título de exemplificação, na Figura 33 são apresentados a constelação e o histograma resultante da geração de 64.000 símbolos pelo CCDDM considerando a distribuição Supergaussiana com seus parâmetros otimizados pelo NNA. Observa-se que seu comportamento foi parecido com os resultados de Maxwell-Boltzmann apresentados na Figura 31. Entretanto, a Supergaussiana obtém uma disparidade maior entre a quantidade de símbolos com menor energia em relação aos símbolos de maior energia que a distribuição de Maxwell-Boltzmann.



a) Constelação com distribuição Supergaussiana.      b) Histograma com distribuição Supergaussiana.

Figura 33 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição de Supergaussiana.

## 5.2.2 Otimização das probabilidades a-priori considerando o algoritmo Blahut-Arimoto modificado

Conforme apresentado na Seção 3.3, o algoritmo de Blahut-Arimoto [49, 50] propõe uma forma analítica de obter a capacidade e a taxa-distorção de um canal de comunicação. Em [52], é apresentada uma versão modificada do algoritmo de Blahut-Arimoto considerando canais AWGN com limitações de potência empregando constelações de tamanho fixo. Em [53], tal algoritmo é aplicado a um canal de transmissão óptica com multiplexação por comprimento de onda densa (*Dense Wavelength-division Multiplexing* – DWDM). Este canal óptico é representado pela solução da equação não linear de Schrödinger (*Non-Linear Schrödinger Equation* – NLSE) resolvida numericamente pela técnica de Fourier de passo dividido (*Split-Step Fourier Method*– SSFM), em que a matriz de

probabilidade *a posteriori* é representada por uma função gaussiana de duas dimensões, em que a matriz de covariância e média são estimadas a partir da saída do canal óptico.

Assim, neste trabalho foi implementado o algoritmo de Blahut-Arimoto baseado na demonstração de [53], sendo utilizado o simulador óptico com a transmissão do sistema sem repetição descrito anteriormente, em que os parâmetros sistêmicos são apresentados na Tabela 6. A lógica do algoritmo é apresentada na Figura 18, e sua validação foi apresentada na Seção 3.3. Verificou-se que o valor de capacidade calculado foi de 5,70 bit/símbolo para uma polarização e 11,40 bit/símbolo considerando as duas polarizações. Observa-se uma distribuição de probabilidades com diversas assimetrias, possivelmente resultante dos efeitos não lineares gerados durante a propagação do sinal óptico, conforme pode ser visualizado na Figura 34.

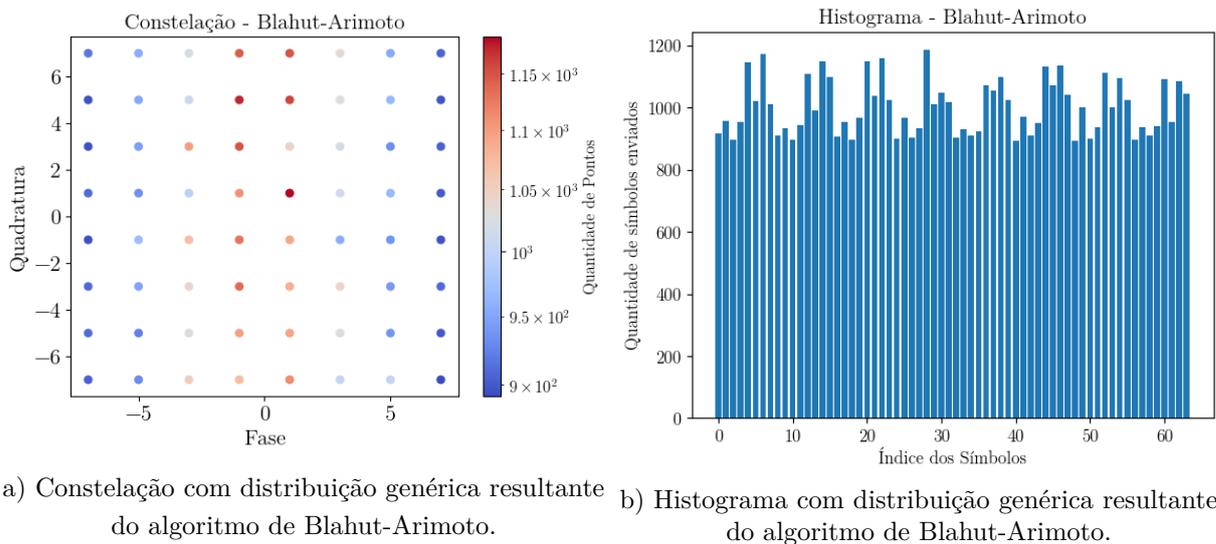


Figura 34 – Exemplificação da constelação (a) e histograma (b) resultantes da geração de 64.000 símbolos considerando a distribuição genérica resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto

Além disso, observa-se que a distribuição de probabilidade assimétrica resultante pode ser resultado de um comportamento não gaussiano devido ao cálculo numérico do sistema sem repetição específico. Entretanto, este resultado não inviabiliza a convergência para uma distribuição gaussiana considerando outro sistema de enlace sem repetição. Em específico, no trabalho aqui proposto, o principal objetivo do cálculo da capacidade através do algoritmo de Blahut-Arimoto é determinar um valor de informação mútua limitante de referência máxima de desempenho, e não necessariamente uma distribuição

otimizada para sua implementação.

### 5.3 Comparação entre os resultados

Após as simulações do sistema óptico sem repetição descrito na Seção 5.1 considerando a formatação probabilística com as distribuições de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana, e o resultado de capacidade obtido pelo algoritmo de Blahut-Arimoto, verifica-se as seguintes distribuições apresentadas na Figura 35, em que nos eixos X e Y são representadas a fase e quadratura das modulações, e no eixo Z o valor da função de densidade de probabilidade para cada símbolo em uma escala  $10^{-2}$ .

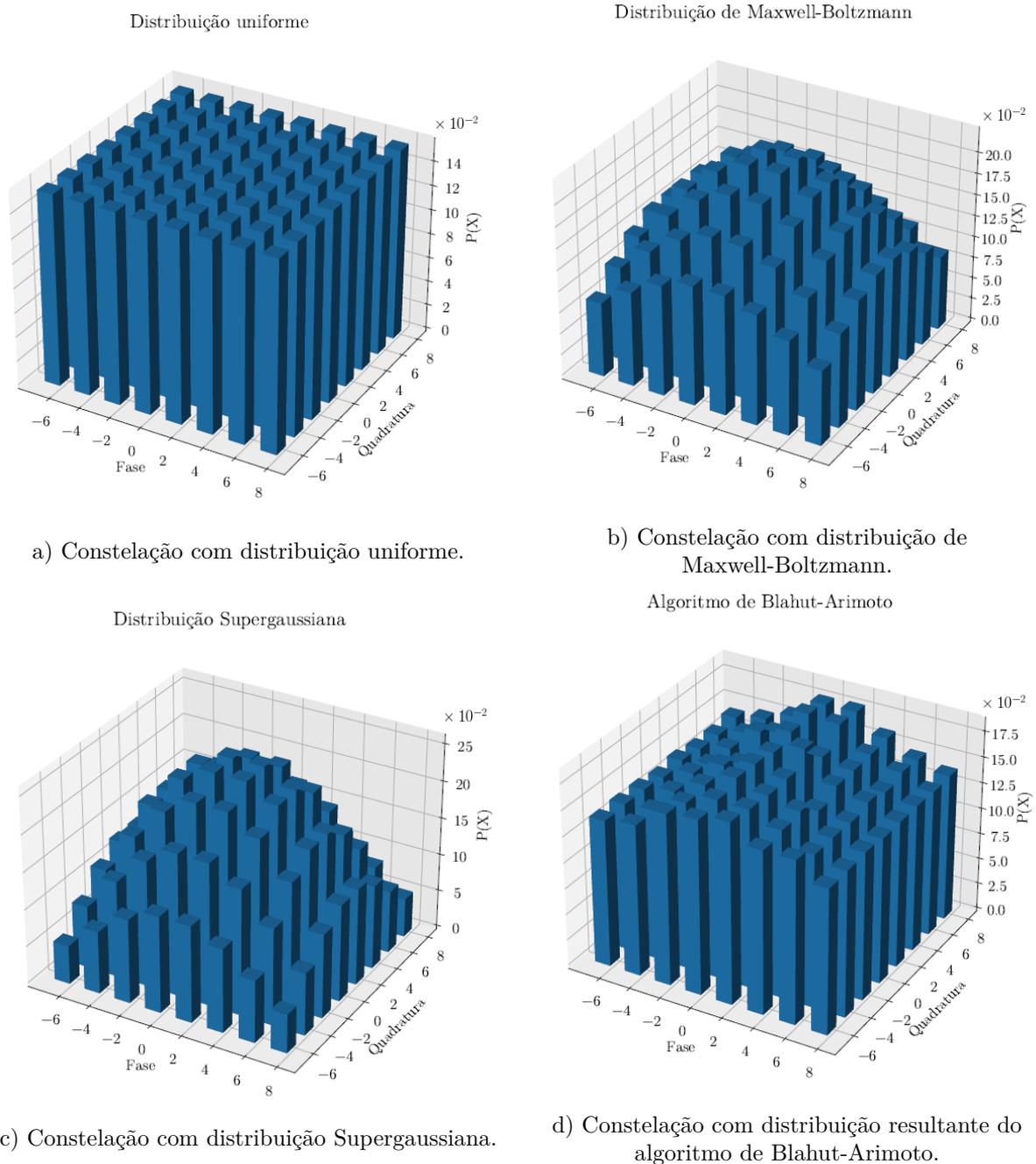


Figura 35 – Constelações com as distribuições de probabilidade obtidas no presente trabalho.

Tabela 9 – Valores de informação mútua média entre as polarizações para todos os casos de constelações obtidos neste trabalho.

Informação mútua média entre as polarizações (bit/símbolo)			
Uniforme	Maxwell-Boltzmann	Supergaussiana	Blahut-Arimoto
5,57	5,62	5,61	5,70

Adicionalmente, os seus respectivos resultados de informação mútua média entre as polarizações são apresentados na Tabela 9. Observando os resultados obtidos, conclui-se que a distribuição de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana obtiveram valores parecidos. A primeira proporcionou um ganho de 0,05 bit/símbolo por polarização, ou seja 0,1 bit/símbolo se considerarmos ambas as polarizações. Considerando a taxa de símbolos de 32 GBd, há um aumento correspondente a 3,2 Gb/s, o qual corresponde a um ganho de aproximadamente 1,80% em relação a taxa de transmissão resultante da distribuição uniforme, que possui o valor de 178,24 Gb/s. Já para Supergaussiana, o aumento foi de 0,08 bit/símbolo, o que corresponde a um aumento de 2,56 Gb/s, que corresponde a um aumento de 1,44% na taxa de dados do sistema. Por último, a distribuição resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto atingiu o maior ganho, sendo este de 0,26 bit/símbolo, resultando em um aumento de 8,32 Gb/s na taxa de transmissão, sendo este igual a 4,67% em relação a taxa obtida com a distribuição uniforme. Sendo assim, verifica-se que em sistemas ópticos monocanal, tem-se um aumento na taxa de transmissão de 4,67% considerando o algoritmo de Blahut-Arimoto. Verifica-se que tal ganho pode ser ainda maior ao se considerar cenários multi-canais multiplexados em comprimento de onda ou formatos de constelação de ordem maior, como 256QAM. Além disso, deve-se levar em consideração a complexidade de implementação do casamento de distribuição na análise dos ganhos pela formatação probabilística. Dessa forma, deve-se avaliar a relação de compromisso entre taxa e complexidade de implementação.

## 6 Conclusão

Os sistemas de comunicação óptica sem repetição são soluções com relação custo-benefício interessante para atender à demanda de sistemas com alta capacidade de transmissão de dados atingindo longos alcances. Dessa forma, novas técnicas para evoluir a taxa de transmissão ou alcance dos sistemas são exploradas. Dentre elas, tem-se a utilização de técnicas de amplificação óptica avançada, como o amplificador Raman distribuído e o amplificador remoto opticamente bombeado, permitindo enlaces com centenas de quilômetros de alcance sem componentes ativos ao longo do enlace. Além disso, considerando os sistemas de comunicação óptica, a formatação probabilística vem ganhando destaque permitindo o aumento na taxa de informação alcançável ou, alternativamente, no alcance do sistema. Dessa forma, este trabalho avalia o desempenho de um sistema de comunicação óptica sem repetição empregando diferentes distribuições de probabilidade na formatação probabilística, buscando ainda a otimização dos seus parâmetros de forma integrada.

Sendo assim, inicialmente foi observado que na literatura existem poucos trabalhos envolvendo os sistemas ópticos sem repetição conjuntamente com a formatação probabilística. Neste contexto, este trabalho propõe um método de projeto de tais sistemas de transmissão por meio de um algoritmo de otimização baseado em redes neurais (*Neural Network Algorithm – NNA*). Considerando um sistema previamente otimizado para uma distribuição uniforme, formatações probabilísticas com as distribuições de Maxwell-Boltzmann e Supergaussiana, com seus respectivos parâmetros otimizados pelo mesmo algoritmo NNA, foram avaliadas. Além disso, foi implementado o algoritmo de Blahut-Arimoto, obtendo-se a capacidade do sistema óptico sem repetição e a respectiva distribuição de probabilidade genérica.

Para tanto, foi implementado o codificador de casamento de distribuição por composição constante (*Constant Composition Distribution Matching – CCDM*) na geração dos símbolos de acordo com a distribuição de probabilidade desejada. As simulações do sistema óptico sem repetição são realizadas adotando um simulador óptico, desenvolvido pela equipe técnica do CPQD e validado experimentalmente, que modela numericamente

o comportamento do sinal. Dessa forma, inicialmente os parâmetros do sistema óptico sem repetição (potência de lançamento e comprimento de onda do canal, potência e comprimento de onda dos bombeios dos amplificadores Raman distribuído e com bombeio remoto, posição dos amplificadores com bombeio remoto e os comprimentos das fibras dopadas com érbio) são otimizados pelo NNA, considerando a distribuição uniforme, objetivando maximizar a informação mútua média entre as duas polarizações. Após o projeto do sistema óptico sem repetição, o desempenho do mesmo é avaliado empregando a formatação probabilística com diferentes distribuições de probabilidade, em que os parâmetros de tais distribuições são otimizados pelo NNA.

Em específico, para a otimização da distribuição de Maxwell-Boltzmann, obteve-se um ganho de 0,1 bit/símbolo de informação mútua em relação à distribuição uniforme, resultando em um ganho de 3,2 Gb/s de taxa de transmissão. Já para a distribuição Supergaussiana, também considerando como referência a distribuição uniforme, teve-se um ganho de 0,08 bit/símbolo em informação mútua, resultando em um aumento de 2,56 Gb/s na taxa de transmissão. Por fim, a capacidade resultante do algoritmo de Blahut-Arimoto foi de 11,40 bit/símbolo, que resultou em um aumento de 8,32 Gb/s de taxa em relação à distribuição uniforme.

## 6.1 Trabalhos futuros

Diante dos resultados e conclusões obtidas, observa-se que existem atividades a serem exploradas como continuidade do trabalho realizado. Uma delas é a validação experimental do sistema sem repetição abordado neste trabalho, empregando as distribuições de probabilidade otimizadas pelo algoritmo de otimização NNA discutidas. Além disso, pode-se ainda avaliar a otimização conjunta das probabilidades e da posição dos símbolos da constelação, dessa forma, implementando também a formatação geométrica, novamente objetivando avaliar o desempenho de tal formatação em sistemas ópticos sem repetição.

## 6.2 Lista de publicações

### Artigos em Conferências Científicas

MACIEL, J. A. S.; DA CRUZ Jr., J. H; SUTILI, T. Otimização da Formatação Probabilística Empregando Algoritmo de Rede Neural em Sistemas Ópticos Coerentes. *XI Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*, 2021, Evento remoto. (Situação: artigo apresentado em apresentação oral)

MACIEL, J. A. S.; ROSA, E. S; SUTILI, T.; FIGUEIREDO, R. C.; DA CRUZ Jr., J. H; MELLO, D. A. A. Desempenho de Código Corretor de Erros LPDC Espacialmente Acoplado em Sistema Óptico Sem Repetição. *20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, 2022, Natal-RN. (Situação: artigo apresentado em apresentação oral)

MACIEL, J. A. S.; SUTILI, T.; FIGUEIREDO, R. C.; DA CRUZ Jr., J. H; MELLO, D. A. A. Impacto de Códigos Polares no Desempenho de Sistemas Ópticos Sem Repetição. *20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, 2022, Natal-RN. (Situação: artigo apresentado em apresentação oral)

MACIEL, J. A. S.; SUTILI, T.; FIGUEIREDO, R. C.; MELLO, D. A. A. Optimization of Unrepeated Optical Links with Probabilistic Shaping for Heterogeneous Propagation Regimes. *SBFoton International Optics and Photonics Conference*, 2023, Evento presencial. (Situação: artigo apresentado em apresentação oral)

# Referências

- 1 JUNIOR, J. H. da C. *Avaliação Experimental da Formatação Probabilística aplicada a Sistemas Ópticos DP-16QAM a 200 Gb/s*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 11, 37, 38, 39 e 40.
- 2 SADOLLAH, A.; SAYYAADI, H.; YADAV, A. A dynamic metaheuristic optimization model inspired by biological nervous systems: Neural network algorithm. *Applied Soft Computing*, v. 71, p. 747–782, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 12, 55, 56, 57 e 63.
- 3 BISSESSUR, H. State of the art in non repeatered optical transmission. In: *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. Citado na página 19.
- 4 KAMINSKI, P. M.; ROS, F. D.; YANKOV, M. P.; HANSEN, H. E.; ULVENBERG, J. B.; SCHOU, C. K.; SILVA, E. P. da; SUTILI, T.; JUNIOR, J. H. d. C.; SIMÕES, G. C.; CLAUSEN, A. T.; FORCHHAMMER, S.; FIGUEIREDO, R. C.; OXENLOWE, L. K.; GALILI, M. Lumped compensation of nonlinearities based on optical phase conjugation. *Journal of Lightwave Technology*, v. 40, n. 3, p. 681–691, 2022. Citado na página 20.
- 5 KAMINSKI, P. M.; SUTILI, T.; JÚNIOR, J. H. da C.; SIMÕES, G. C. C. P.; ROS, F. D.; YANKOV, M. P.; HANSEN, H. E.; CLAUSEN, A. T.; FORCHHAMMER, S.; OXENLOWE, L. K.; FIGUEIREDO, R. C.; GALILI, M. All-optical nonlinear pre-compensation of long-reach unrepeatered systems. In: *2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado na página 20.
- 6 CALDERBANK, A.; OZAROW, L. Nonequiprobable Signaling on the Gaussian Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 36, n. 4, p. 726–740, 1990. Citado na página 20.
- 7 KSCHISCHANG, F.; PASUPATHY, S. Optimal Nonuniform Signaling for Gaussian Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 39, n. 3, p. 913–929, 1993. Citado na página 20.
- 8 DJORDJEVIC, I. B.; BATSHON, H. G.; XU, L.; WANG, T. Coded Polarization-Multiplexed Iterative Polar Modulation (pm-ipm) for Beyond 400 Gb/s Serial Optical Transmission. In: *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–3. Citado na página 20.
- 9 JANUÁRIO, J. C. S. S.; CHIUCHIARELLI, A.; ROSSI, S. M.; CRUZ, J. H.; REIS, J. D.; MORNATTA, C.; FESTA, A.; BORDONALLI, A. C. System Design for High-Capacity Unrepeatered Optical Transmission. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 4, p. 1246–1253, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 21, 27 e 53.
- 10 JÚNIOR, J. H. C.; LUCIA, F. L. D.; SUTILI, T.; MELLOY, D. A. A.; FIGUEIREDO, R. C. Gradient-based Optimization for Unrepeatered Optical Systems. In: *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

- 11 TAN, M.; IQBAL, M. A.; KRZCZANOWICZ, L.; PHILLIPS, I. D.; HARPER, P.; FORYSIAK, W. Optimization of Raman Amplification Schemes for Single-Span High Data Rate Coherent Transmission Systems. In: *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–2. Citado na página 22.
- 12 CHENG, J.; TANG, M.; FU, S.; SHUM, P. P.; LIU, D. Characterization and Optimization of Unrepeated Coherent Transmission Systems Using DRA and ROPA. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 10, p. 1830–1836, 2017. Citado na página 22.
- 13 CHI, R.; LI, L. Low cost high-order Raman amplifier assisted enhanced remotely pump amplifier technology for ultra-long span OTN system. *Results in Physics*, v. 22, p. 103866, 2021. ISSN 2211-3797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379721000498>>. Citado na página 22.
- 14 BISSESSUR, H.; BASTIDE, C.; BUSSON, A.; KRAVCHENKO, D.; HEDARALY, F.; ESPARZA, J. Real-Time Unrepeated C-Band Transmission of 30.5 Tb/s over 276.4 km and 29.45 Tb/s over 292.5 km. In: *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página 22.
- 15 BISSESSUR, H.; BASTIDE, C.; DUBOST, S.; ETIENNE, S.; HEDARALY, F.; DUVAL, M. Record single fibre unrepeated transmission of  $2 \times 500$  Gb/s over 405.7 km. In: *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. Citado na página 22.
- 16 ZHU, B.; BOREL, P. I.; GEISLER, T.; LENG, L.; JENSEN, R.; STEGMAIER, M.; PÁLSDÓTTIR, B.; PECKHAM, D. W.; MCCURDY, A. H.; LINGLE, R. L.; VAIDYA, D. S.; YAN, M. F.; WISK, P. W.; DIGIOVANNI, D. J. Ultra-Long Reach  $4 \times 100$  Gb/s Unrepeated Transmissions With Real-Time Signal Processing Using Large Aeff Ultra-Low Loss Fiber. *J. Lightwave Technol.*, Optica Publishing Group, v. 37, n. 24, p. 6072–6079, Dec 2019. Disponível em: <<https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-37-24-6072>>. Citado na página 22.
- 17 RIZZELLI, G.; ROSA, P.; CORREDERA, P.; ANIA-CASTAÑÓN, J. D. Transmission span optimization in fiber systems with cavity and random distributed feedback ultralong Raman laser amplification. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 22, p. 4967–4972, 2017. Citado na página 22.
- 18 CHI, R. Experimental optimization of the scheme of second-order Raman amplifiers based on ultra-long span systems. *Results in Physics*, v. 18, p. 103195, 2020. ISSN 2211-3797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379720316624>>. Citado na página 22.
- 19 BISSESSUR, H.; BUSSON, A.; ESPARZA, J.; QUINTANA, A.; HEDARALY, F.; KRAVCHENKO, D. Optical Nonlinear Distortions of Probabilistically Shaped and Uniform Constellations in Unrepeated systems. In: *2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- 20 POGGIOLINI, P.; JIANG, Y. Recent advances in the modeling of the impact of nonlinear fiber propagation effects on uncompensated coherent transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 3, p. 458–480, 2017. Citado na página 23.

- 21 RENNER, J.; FEHENBERGER, T.; YANKOV, M. P.; ROS, F. D.; FORCHHAMMER, S.; BÖCHERER, G.; HANIK, N. Experimental Comparison of Probabilistic Shaping Methods for Unrepeated Fiber Transmission. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 22, p. 4871–4879, 2017. Citado na página 23.
- 22 BERTOLINI, M.; LAVIGNE, B.; ZAMI, T.; KAO, Y.-H. C.; BERTRAN-PARDO, O. Application of Probabilistic Constellation Shaping and Gaussian Model for Network Self-Optimization. In: *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–3. Citado na página 23.
- 23 CARENA, A.; CURRI, V.; BOSCO, G.; POGGIOLINI, P.; FORGHIERI, F. Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 10, p. 1524–1539, 2012. Citado na página 23.
- 24 YAO, S.; MAHADEVAN, A.; LEFEVRE, Y.; KANEDA, N.; HOUTSMA, V.; VEEN, D. van. ANN-based Optimization of Probabilistic and Geometric Shaping for Flexible Rate 50G and beyond PON. In: *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 01–03. Citado na página 23.
- 25 IP, E.; HUANG, Y.-K.; ZHANG, S.; XIA, T. J.; PETERSON, D. L.; WELLBROCK, G.; MILIONE, G.; WANG, T.; AONO, Y.; TAJIMA, T. Optimization of Probabilistic Shaping Enabled Transceivers with Large Constellation Sizes for High Capacity Transmission. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 23.
- 26 VASSILIEVA, O.; KIM, I.; PALACHARLA, P. Probabilistic vs. Geometric Constellation Shaping: What are the keys to ultimate optical reach and capacity? In: *2021 IEEE Photonics Conference (IPC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–2. Citado na página 23.
- 27 ALUF, O.; DEREVYANKO, S. Shaping Gain for Optical Fiber Communication Systems Employing the Nonlinear Fourier Transform. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 34, n. 7, p. 383–386, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- 28 XU, T.; SHEVCHENKO, N. A.; LI, Z.; LIU, T.; BAYVEL, P. Limit of Achievable Information Rates in EDFA and Raman Amplified Transmission Systems Using Nonlinearity Compensation. In: *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. Citado na página 24.
- 29 CHANG, D. il; PELOUCH, W.; BURTSEV, S.; PERRIER, P.; FEVRIER, H. Unrepeated high-speed transmission systems. In: *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3. Citado na página 26.
- 30 CHANG, D.-i.; PELOUCH, W.; BURTSEV, S.; CLESCA, B.; PERRIER, P.; FEVRIER, H. Advanced Technologies for Unrepeated Transmission Systems and their Applications. In: *2014 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–3. Citado na página 26.
- 31 RAMAN, C. V. A Change of Wave-length in Light Scattering. *Nature*, v. 121, p. 619, 1928. Citado na página 28.
- 32 AGRAWAL, G. P. *Fiber-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS*. [S.l.]: WILEY, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

- 33 BROMAGE, J. Raman amplification for fiber communications systems. *Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 1, p. 79–93, 2004. Citado na página 28.
- 34 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 29.
- 35 SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948. Citado na página 34.
- 36 FORNEY, G.; GALLAGER, R.; LANG, G.; LONGSTAFF, F.; QURESHI, S. Efficient Modulation for Band-Limited Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 2, n. 5, p. 632–647, 1984. Citado na página 34.
- 37 SUN, F.-W.; TILBORG, H. van. Approaching capacity by equiprobable signaling on the Gaussian channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 39, n. 5, p. 1714–1716, 1993. Citado na página 34.
- 38 CHO, J.; WINZER, P. J. Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 6, p. 1590–1607, 2019. Citado na página 34.
- 39 TANHA, A.; RABBANI, H.; BEYGI, L. On the Impact of Probabilistic Shaping on Fiber Nonlinearities. In: *2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 421–425. Citado na página 34.
- 40 FEHENBERGER, T.; ALVARADO, A.; BÖCHERER, G.; HANIK, N. On Probabilistic Shaping of Quadrature Amplitude Modulation for the Nonlinear Fiber Channel. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 21, p. 5063–5073, 2016. Citado na página 34.
- 41 UNGERBOECK, G. Channel coding with multilevel/phase signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 28, n. 1, p. 55–67, 1982. Citado na página 36.
- 42 DINIZ, C. A. S.; HELIO, C. J.; SOUZA, A. L. N.; LIMA, T. C.; LOPES, R. R.; ROSSI, S. M.; GARRICH, A. M.; REIS, J. D.; ARANTES, D. S.; OLIVEIRA, J. R. F.; MELLO, D. A. A. Network cost savings enabled by probabilistic shaping in DP-16QAM 200-Gb/s systems. In: *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3. Citado 3 vezes nas páginas 36, 43 e 44.
- 43 TEHRANI, M. N.; TORBATIAN, M.; SUN, H.; MERTZ, P.; WU, K. T. A Novel Nonlinearity Tolerant Super-Gaussian Distribution for Probabilistically Shaped Modulation. In: *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 69.
- 44 SCHULTE, P.; BÖCHERER, G. Constant Composition Distribution Matching. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 62, n. 1, p. 430–434, 2016. Citado na página 43.
- 45 WACHSMANN, U.; FISCHER, R. F. H.; HUBER, J. Multilevel codes: theoretical concepts and practical design rules. *IEEE Transactions on Information Theory*, IEEE, v. 45, p. 1361–1391, 1999. Citado na página 43.

- 46 PILORI, D. *Advanced Digital Signal Processing Techniques for High-Speed Optical Communications Links*. Tese (Doutorado) — Politecnico di Torino, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 60.
- 47 GALLAGER, R. G. *Information Theory and Reliable Communication*. [S.l.]: WILEY, 1968. Citado na página 45.
- 48 COVER, T. M.; THOMAS, J. A. *Elements of Information Theory*. [S.l.]: WILEY, 1991. Citado na página 45.
- 49 BLAHUT, R. Computation of channel capacity and rate-distortion functions. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 18, n. 4, p. 460–473, 1972. Citado 3 vezes nas páginas 45, 46 e 71.
- 50 ARIMOTO, S. An algorithm for computing the capacity of arbitrary discrete memoryless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 18, n. 1, p. 14–20, 1972. Citado 3 vezes nas páginas 45, 46 e 71.
- 51 RIOUL, O. *Teoria da Informação e da Codificação*. [S.l.]: Editora Unicamp, 2018. Citado na página 45.
- 52 VARNICA, N.; MA, X.; KAVCIC, A. Capacity of power constrained memoryless AWGN channels with fixed input constellations. In: *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 1339–1343 vol.2. Citado 3 vezes nas páginas 46, 48 e 71.
- 53 YANKOV, M. P.; ROS, F. D.; SILVA, E. P. da; FORCHHAMMER, S.; LARSEN, K. J.; OXENLØWE, L. K.; GALILI, M.; ZIBAR, D. Constellation Shaping for WDM Systems Using 256QAM/1024QAM with Probabilistic Optimization. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 22, p. 5146–5156, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 46, 71 e 72.
- 54 GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in machine learning and optimization. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989. Citado na página 56.
- 55 MELLO, D. A. de A.; BARBOSA, F. A. *Digital Coherent Optical Systems: Architecture and Algorithms*. [S.l.]: Springer, 2021. Citado na página 57.