



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

VALENTINA ALESSANDRA CARVALHO DO VALE

**PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ATRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA DE
LANÇAMENTO CONSIDERANDO PENALIDADES FÍSICAS EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS TRANSPARENTES**

Recife

2021

VALENTINA ALESSANDRA CARVALHO DO VALE

**PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ATRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA DE
LANÇAMENTO CONSIDERANDO PENALIDADES FÍSICAS EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS TRANSPARENTES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Orientador: Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

V149p Vale, Valentina Alessandra Carvalho do.
Proposição de estratégias de atribuição da potência de lançamento considerando penalidades físicas em redes ópticas elásticas transparentes / Valentina Alessandra Carvalho do Vale. - 2021.
198 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2021.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Atribuição de potência. 3. Redes ópticas elásticas. 4. Ruídos não lineares. 5. PRMLSA. 6. Modelos adaptativos. 7. Modelos evolutivos. I. Almeida Júnior, Raul Camelo de Andrade (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-170

VALENTINA ALESSANDRA CARVALHO DO VALE

**PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ATRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA DE
LANÇAMENTO CONSIDERANDO PENALIDADES FÍSICAS EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS TRANSPARENTES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Comunicações.

Aprovada em: 20/12/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho (Examinador Interno)
Universidade Estadual de Pernambuco

Prof. Dr. Leonardo Didier Coelho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel Augusto Ribeiro Chaves (Examinador Externo)
Universidade Estadual de Pernambuco

Prof. Dr. Helder Alves Pereira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

"Dedico aos meus pais, Frederico e Geysa."

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Frederico e Geysa, e meu esposo, Elmo, por todo suporte e amor.

Aos meus amigos e familiares que me incentivaram incansavelmente.

À secretária Andrea pela paciência e dedicação desempenhadas aos alunos do PPGEE.

Ao professor Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior, pela amizade, atenção, orientação e contribuições para elaboração desta pesquisa.

Ao professor Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo, pela orientação enquanto estive no Instituto Superior Técnico – IST em Lisboa e contribuições para elaboração desta pesquisa.

Aos professores da banca avaliadora, Dr. Helder Alves Pereira, Dr. Daniel Augusto Ribeiro Chaves, Dr. Carmelo Jose Albanez Bastos Filho, Dr. Leonardo Didier Coelho, Dr. Karcus Day Rosario Assis e Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho, pelas colaborações e contribuições para desenvolvimento desta pesquisa.

A todos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, pela compreensão nos momentos em que necessitei de ajuda.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro total para realização da pesquisa, tanto no Brasil como no Exterior, sem a qual não teria conseguido desenvolver a pesquisa.

Sobretudo a Deus, por me fortalecer durante toda a jornada.

Perguntaram outro dia se eu era otimista. Eu disse 'eu não sou'. Considero os otimistas ingênuos, e os pessimistas amargos. Então eu me considero um realista esperançoso. Eu sou meio fraco na fé, meio fraco na caridade, de maneira que me resta a esperança. Eu me considero um homem da esperança. Eu acho que, entre a indignação e a resignação, a gente conta com a esperança, para lutar sempre (SUASSUNA, 2014).

RESUMO

As Redes Ópticas Elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) têm se mostrado a solução para o crescente tráfego de dados e para as conexões heterogêneas com diferentes larguras de banda acarretadas pela diversificação dos serviços ofertados. Neste contexto, esta pesquisa contribuiu com a mitigação de lacunas no problema inerente em EON, o PRMLSA (*Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), sobretudo a atribuição de potência de lançamento. O PRMLSA foi abordado através de simulações de EON transparente com tráfego dinâmico e com fidelidade na reprodução de efeitos de camada física por modelos matemáticos de propagação não-linear com baixa complexidade computacional. Assim, foi inicialmente realizado um estudo sobre a importância da potência de lançamento na Qualidade de Transmissão (QoT - *Quality of Transmission*), seguido do desenvolvimento de técnicas de atribuição de potência de lançamento: (i) máxima; (ii) mínima; (iii) acrescida de margem; (iv) adaptativa; (v) evolutiva. As técnicas de máxima, mínima e acrescida de margem formam a base das técnicas adaptativa e evolutiva, nas quais a função para a potência de lançamento é definida pelo valor mínimo de potência acrescido de um percentual da diferença entre o máximo de potência e o mínimo de potência (margem de potência). Entretanto, a técnica adaptativa utilizou um algoritmo que parte de um percentual fixo para a margem de potência e, caso necessário, ajusta o valor de potência somando e/ou subtraindo um percentual de seu valor para atender a sua QoT e das demais conexões da rede. Enquanto, a estratégia evolutiva utilizou uma representação por Série de Potências através da meta-heurística PSO (*Particle Swarm Optimization*) para encontrar valores adequados a serem atribuídos à margem de potência. Como resultado para a probabilidade de bloqueio (BP - *Blocking Probability*), índice de desempenho de rede considerado nesta pesquisa, é possível observar melhorias significativas com a utilização das novas técnicas de atribuição de potência de lançamento, especificamente adaptativa e evolutiva, comparadas às difundidas na literatura.

Palavras-chave: atribuição de potência; redes ópticas elásticas; ruídos não lineares; PRMLSA; modelos adaptativos; modelos evolutivos.

ABSTRACT

Elastic Optical Networks (EON) have been chosen as the prominent solution for supporting the growing data traffic with heterogeneous bandwidth requirements, caused by the diversification of offered services. In this context, this research contributed to the mitigation of gaps in the inherent problem of the Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (PRMLSA) in EONs, especially the launch power assignment. PRMLSA was addressed in this work by the evaluation of transparent EONs under dynamic traffic and fidelity in the reproduction of physical layer effects through mathematical models of non-linear propagation with low computational complexity. Thus, initially, a study of the importance of appropriate launch power in Quality of Transmission (QoT) was undertaken, followed by the development of launch power assignment techniques: (i) maximum; (ii) minimum; (iii) added margin; (iv) adaptive; (v) evolutive. The techniques of maximum, minimum and added margin form the basis of adaptive and evolutive techniques, in which the launching power function was defined as the minimum power value plus a percentage of the difference between the maximum power and the minimum power (power margin). The adaptive technique used an algorithm that starts from a fixed percentage for the power margin and, if necessary, adjusts the power value by adding and/or subtracting a percentage to meet the QoT of the presumed connection and any other active in the network. On the other hand, the evolutive technique used the Power Series technique through the use of the Particle Swarm Optimization (PSO) meta-heuristic to find adequate values to be assigned to the power margin. Significant reductions in the path request blocking probability (BP), network performance index considered in this research, are observed when the proposed launching power assignment techniques, specifically adaptive and evolutive ones, are compared to disseminated techniques in the literature.

Keywords: power assignment; elastic optical networks; non-linear noises; PRMLSA; adaptive models; evolutive models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grades de tamanho fixo e flexível.	34
Figura 2 – Arquitetura de redes ópticas elásticas.	35
Figura 3 – Funcionamento de um BVT e de um SBVT: (a) funcionamento do BVT; (b) funcionamento do SBVT.	36
Figura 4 – Esboço do funcionamento do BV-WSS	37
Figura 5 – Arquitetura <i>Broadcast and Select</i> para um BV-WXC.	38
Figura 6 – Arquitetura para um enlace.	39
Figura 7 – Canais heterogêneos em um enlace de uma rede com supercanais Nyquist WDM.	43
Figura 8 – Exemplo do problema de atribuição de espectro	56
Figura 9 – Comportamento da OSNR em relação à potência de lançamento.	65
Figura 10 – Comportamento da OSNR em relação à adição de canais em uma rota.	66
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo ECPA.	70
Figura 12 – Interpolação linear.	71
Figura 13 – Fluxograma para interpolação linear.	72
Figura 14 – Esboço dos valores para interpolação (encontrando P_{Min}).	73
Figura 15 – Fluxograma para o EnPA+Mg, aplicado para os cenários e padrões da Tabela 2.	78
Figura 16 – Fluxograma do algoritmo APAmem.	87
Figura 17 – Fluxograma do algoritmo APAoMem.	89
Figura 18 – Fluxograma LOGON.	96
Figura 19 – Topologias de rede para simulações: (a) <i>Pacific Bell</i> modificada (PB); (b) <i>Deutsche Telekom</i> modificada (DT); (c) Regular (RG). (Obs.: distâncias indicadas em km.)	97
Figura 20 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da potência de lançamento para CPA.	102
Figura 21 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da densidade es- pectral de potência para CPSDA.	103

Figura 22 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para CPA e CPSDA com valores independentes e dependentes da carga nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	104
Figura 23 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para CPA e CPSDA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	106
Figura 24 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para LOGON, em conjunto com CPA e CPSDA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	108
Figura 25 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para LOGON nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	110
Figura 26 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para EPA, ECPA e EnPA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	112
Figura 27 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para EPA, ECPA e EnPA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	115
Figura 28 – Comportamento das aptidões (probabilidade de bloqueio) de duas partículas obtidas por PSO ao longo das iterações para uma carga de 60 erlang na topologia DT sob as estratégias: (a) EnPA+MgMedPondRota; (b) EnPA+MgMinPondRota.	117
Figura 29 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o EnPA+Mg nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	119
Figura 30 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função do valor de τ para a margem de potência do APA sem memória e com ajustes (APAnoMem) na topologia DT.	122
Figura 31 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o APA sob as respectivas condições de memória nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	123
Figura 32 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para o algoritmo APA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	125
Figura 33 – Exemplo de subdivisão do espectro em 1, 2 e 4 grupos.	126
Figura 34 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede conforme agrupamento de <i>slots</i> no DB para o APAmem _x na topologia DT.	127

Figura 35 – Comportamento das aptidões (probabilidade de bloqueio) de duas partículas obtidas por PSO ao longo das iterações para uma carga de 60 erlang na topologia DT sob a estratégia: (a) EvPA-S; (b) EvPA-D; (c) EvPA-D-C.	129
Figura 36 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o EvPA: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	131
Figura 37 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para EvPA-S, EvPA-D e EvPA-D-C nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.	134
Figura 38 – Representação de uma rota com um enlace e dois <i>spans</i>	151
Figura 39 – Representação de um <i>span</i>	151
Figura 40 – Representação de uma rota com dois enlaces, totalizando quatro <i>spans</i>	153
Figura 41 – Representação do fluxograma do ambiente computacional desenvolvido.	161
Figura 42 – Exemplo de topologias de enxames: (a) topologia global; (b) topologia em anel.	181
Figura 43 – Fluxograma PSO.	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – SNR_{th} para $BER= 10^{-3}$ e respectivos formatos de modulação.	49
Tabela 2 – Combinações adotadas entre padrões e cenários para o EnPA+Mg	75
Tabela 3 – Características das topologias adotadas.	98
Tabela 4 – Taxas de transmissão de <i>bits</i> , formatos de modulação, larguras de banda e números de <i>slots</i>	99
Tabela 5 – Limiares de OSNR para o cenário adotado ($BER= 10^{-3}$).	100
Tabela 6 – Valores utilizados nas simulações.	100
Tabela 7 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDAdif em relação ao CPA, CPSDA e CPAdif.	105
Tabela 8 – Dados de Entrada para a Estratégia LOGON.	107
Tabela 9 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDA em relação ao LOGON.	109
Tabela 10 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDAdif em relação ao EPA, ECPA e EnPA.	113
Tabela 11 – Redução máxima da BP alcançada pelo EnPA+Mg em relação ao CPSDAdif.	120
Tabela 12 – Redução máxima da BP alcançada pelo APA em relação ao CPSD.	124
Tabela 13 – Redução máxima da BP alcançada pelo EvPA-S, EvPA-D e EvPA-D-C em relação ao CPSDA.	132
Tabela 14 – Valores utilizados no PSO.	184
Tabela 15 – Melhores posições de partículas encontradas de formas independentes pelo PSO para o EnPA+MgMedPondRota.	194
Tabela 16 – Melhores posições de partículas encontradas de formas independentes pelo PSO para o EnPA+MgMinPondRota.	195
Tabela 17 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-S.	196
Tabela 18 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-D.	197
Tabela 19 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-D-C.	198

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGN	Additive GN
APA	Adaptive Power Assignmen
APACnoMem	APA Conscious with no Memory and no Adjustments
APAmem	APA with Memory and Adjustments
APAmemFactor	APAmem with factor constant
APAmemPre	APA with Previous Memory and Adjustments
APAmemPreLong	APAmemPre Long
APAmemPreShort	APAmemPre Short
APAnoMem	APA No Memory
ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWGN	Additive White GN
BER	Bit Error Rate
BP	Blocking Probability
BVT	Bandwidth-Variable Transponder
BV-WSS	Bandwidth-Variable WSS
BV-WXC	Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects
CAC	Call Admission Control
Co-OFDM	OFDM Coerente
CoWDM	WDM Coerente
CPA	Constant Power Assignment
CPAdif	CPA com variação em função da carga da rede
CPSDA	Constant Power Spectral Density Assignment
CPSDAdif	CPSDA com variação em função da carga da rede
DB	Database
DT	Deutsche Telekom
ECC	Error Correcting Code
ECPA	Egoistic and Conscious Power Assignment
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EF	Exact-Fit
EnPA	Enough Power Assignment
EnPA+Mg	EnPA plus Margin
EnPA+MgMedNet	EnPA+Mg igual à média da margem de OSNR da rede
EnPA+MgMedPondRota	EnPA+Mg igual à média ponderada da margem de OSNR da rota
EnPA+MgMedRota	EnPA+Mg igual à média da margem de OSNR da rota

EnPA+MgMinNet	EnPA+Mg igual à margem mínima de OSNR da rede
EnPA+MgMinPondRota	EnPA+Mg igual à margem mínima ponderada de OSNR da rota
EnPA+MgMinRota	EnPA+Mg igual à margem mínima de OSNR da rota
EON	Elastic Optical Network
EPA	Egoistic Power Assignment
erfc	Complementary Error Function
EvPA	Evolutionary Power Assignment
EvPA-D	Dynamic EvPA
EvPA-D-C	EvPA-D consciente
EvPA-S	Static EvPA
FEC	Forward Error Correction
FF	First-Fit
FLF	First-Last-Fit
FWM	Four-Wave Mixing
GB	Guard Band
GN	Gauss-Noise
HD-FEC	Hard Decision FEC
HDTV	High Definition Television
HSO	Hurricane Search Optimization
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
LCoS	Liquid-Crystal-On-Silicon
LF	Last-Fit
LOGON	Local Optimization Leads to Global Optimization
LU	Least Used
MEMS	Microelectromechanical Systems
MH	Minimum Hop
MSCL	Min Slot-Continuity Capacity Loss
MU	Most Used
NLI	Non Linear Interference
NP	Non-Deterministic Polynomial Time
ODM	Optical Dispersion Management
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexed
OOOFDM	Optical OFDM
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
osnr	OSNR em escala linear
OSNR _{th}	OSNR threshold

OTN	Optical Transport Network
PAB	Power Assignment Block
PAPS	Power Assignment by Power Series
PB	Pacific Bell
PRMLSA	Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment
PSD	Power Spectral Density
PSO	Particle Swarm Optimization
PSR	Power Series Routing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoT	Quality of Transmission
RF	Random-Fit
RG	Regular
RMLSA	Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment
RSA	Routing and Spectrum Assignment
SBVT	Sliceable BVT
SCI	Self-Channel Interference
SLICE	Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network
snr	SNR em escala linear
snr_{th}	limiar de SNR em escala linear
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SNR_{th}	SNR threshold
SP	Shortest Path
UT	Uncompensated Transmission
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switches
XCI	Cross-Channel Interference

LISTA DE SÍMBOLOS

α	coeficiente de perda na fibra em escala linear
β_2	coeficiente de dispersão da fibra
β_3	derivada da dispersão
β_{DCU}	dispersão acumulada
χ	função que contabiliza o <i>NLI</i> em enlaces com múltiplos <i>spans</i>
$\bar{\chi}$	função dos pesos c_1 e c_2
δ	precisão para interpolação
Δf_m	largura de banda de um canal
ϵ_x	valor aleatório de uma distribuição uniforme
γ	coeficiente de não linearidade da fibra
Γ	ganho de potência do amplificador
$\frac{1}{\mu}$	média de intervalo de tempo entre chamadas
$\omega_{i,j}$	custo do enlace (i,j)
Ω_{rede}	carga da rede
π	constante matemática ($\pi = 3,14$)
$\psi_{bloqueadas}$	número de requisições bloqueadas
$\psi_{requisitadas}$	número total de requisições (bloqueadas e aceitas)
$\rho(f_1, f_2, f)$	fator de integração da eficiência FWM não degenerada de batimento
τ	percentual para a potência para atribuição inicial do APA
Υ	valor constante e positivo
φ	soma dos pesos
ϱ	grau médio dos nós da rede

a	coeficiente da função $OSNR$ relacionado ao fator SCI da NLI
A	perda de potência no $span$
b	coeficiente da função $OSNR$ relacionado ao fator XCI da NLI
b_{n_1, \dots, n_x}	coeficientes que relacionam as grandezas L_N e D_N
B_o	largura de banda de referência
b_{symbol}	número de $bits$ por símbolo
c	coeficiente da função $OSNR$ relacionado ao ruído ASE e de entrada
Ca	características de requisição
c_x	constante que remete ao peso da experiência individual e global
d	densidade da rede
$d_{i,j}$	comprimento do enlace (i,j)
Dim	dimensão de uma partícula
D_N	distância normalizada da frequência central do canal ao centro do espectro
e	erro de interpolação
f	frequência
F	figura de ruído do amplificador
f_m	frequência central de um canal
f_{mn}	distância entre as frequências centrais de dois canais
G	PSD de um sinal
$G_{e_{best}}$	experiência geral
G_{span}^{ASE}	densidade espectral de potência de ruído ASE em um $span$
G_{span}^{NLI}	densidade espectral de potência de NLI em um $span$
$g(z)$	coeficiente de ganho do campo na fibra

$g(x_i)$	aptidão da partícula i na posição \vec{x}_i
h	constante de Planck
H	média de duração de uma chamada
i	identidade de uma partícula
j	parte imaginária de uma representação trigonométrica ($j = \sqrt{-1}$)
k	número de rotas alternativas para o roteamento
l	número de enlaces da rede
L_e	comprimentos dos enlaces que formam a rota (ou que compõem a rede)
L_{eff}	comprimento efetivo do <i>span</i>
L_N	comprimento normalizado da rota atribuída à requisição
L_p	número total de simulações por partícula
L_s	comprimento de fibra do <i>span</i>
M	nível do formato de modulação
n	número de nós da rede
n'	valor que determina o grau da Série de Taylor
N_{part}	número de partículas
N_s	número de <i>spans</i> de uma rota
N_l	número de enlaces de uma rota
O_e	ocupação de um enlace
$O_{max,e}$	ocupação máxima de um enlace
O_N	ocupação de uma rota normalizada
p	número de modos de polarização
P_{APA}	potência para atribuição inicial do APA

P_{ASE}	potência de ruído <i>ASE</i> em uma rota
$P_{e_{best}}$	experiência pessoal
P_{ch}	potência do sinal do canal
$\vec{\mathbf{p}}_i$	vetor melhor posição para partícula <i>i</i>
$\bar{p}_{i,d}$	melhor posição que a partícula <i>i</i> já esteve
P_m	potência de um canal
P_{min}	potência mínima requerida
$P_{m,max}$	potência máxima admitida
$P_{m,OSNR_{max}}$	potência que resulta na máxima <i>OSNR</i>
$\bar{p}_{n(i),d}$	posição da melhor aptidão dentro de um grupo de partículas
P_{NLI}	potência de <i>NLI</i> em uma rota
$P_{ruído}$	potência relativa aos ruídos
$P_{ruídoIn}$	potência de ruído de entrada
P_{span}^{ASE}	potência de ruído <i>ASE</i> em um <i>span</i>
P_{span}^{NLI}	potência de <i>NLI</i> em um <i>span</i>
P_t	ponto em uma curva
P_{th}	potência referente à $OSNR_{th}$
P_{EvPA}	potência para atribuição do EvPA
R	distância entre as frequências central e de borda de um canal
R'	rede com <i>n</i> nós, <i>l</i> enlaces com comprimentos $d_{i,j}$
R_b	taxa de transmissão de <i>bits</i>
t	coeficiente da função <i>OSNR</i> relacionado ao cascadeamento de perdas e ganhos

u	número de canais ativos em determinado enlace
v	frequência central do sinal
$\vec{\mathbf{v}}_i$	vetor velocidade atual para partícula i
$\bar{v}_{i,d}$	última velocidade atual da partícula i
$\vec{\mathbf{x}}_i$	vetor posição atual da partícula i
$\bar{x}_{i,d}$	última posição da partícula i
x, y	coordenadas cartesianas
z	coordenada espacial longitudinal ao longo do enlace

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	MOTIVAÇÃO	28
1.2	OBJETIVOS	29
1.2.1	Objetivo Geral	29
1.2.2	Objetivos Específicos	29
1.3	METODOLOGIA	30
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS: CONCEITOS, MODELOS MATE- MÁTICOS DE PROPAGAÇÃO E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO	33
2.1	CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	33
2.1.1	Arquitetura das EONs	34
2.1.1.1	Elementos Transponders	35
2.1.1.2	Elementos Comutadores	37
2.1.1.3	Enlaces Ópticos (Links)	39
2.2	MODELO PARA NÃO LINEARIDADES EM EON	39
2.3	MODELO PARA RUÍDO ASE EM EON	44
2.4	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE TRANSMISSÃO	45
2.4.1	Taxa de Erro de Bit	47
2.5	MÉTRICA DE AVALIAÇÃO DE REDE	50
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
3	PROBLEMAS RSA, RMLSA E PRMLSA	52
3.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA RSA	52
3.1.1	Roteamento	52
3.1.2	Atribuição de Espectro	55
3.2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA RMLSA	56
3.3	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA PRMLSA	57
3.3.1	Estado da Arte para a Atribuição de Potência de Lançamento	58
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
4	ALGORITMOS PARA O PROBLEMA PRMLSA	63
4.1	COMPORTAMENTO DA OSNR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA	63

4.2	ALGORITMOS DESENVOLVIDOS PARA A ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO	67
4.2.1	Atribuição de Potência Egoísta	68
4.2.2	Atribuição de Potência Egoísta e Consciente	69
4.2.3	Atribuição de Potência Suficiente	70
4.2.4	Atribuição de Potência Suficiente Acrescida de Margem	74
4.2.5	Atribuição de Potência Adaptativa	81
4.2.5.1	APA com Memória e Ajustes	84
4.2.5.2	APA com Memória Inicializada e Ajustes	88
4.2.5.3	APA sem Memória e com Ajustes	88
4.2.5.4	APA sem Memória e sem Ajustes Consciente	89
4.2.6	Atribuição de Potência Evolutiva Estática	90
4.2.7	Atribuição de Potência Evolutiva Dinâmica	91
4.2.8	Atribuição de Potência Evolutiva Dinâmica Consciente	93
4.3	ALGORITMOS BASES PARA A ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO	94
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ALGORITMOS APLICADOS AO PROBLEMA DE PRMLSA	97
5.1	CENÁRIOS E CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES	97
5.2	RESULTADOS PARA ESTRATÉGIAS BASES DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO	101
5.2.1	Estratégias de Atribuição de Potência Constante e Atribuição de Densidade Espectral de Potência Constante	101
5.2.2	Estratégia de Atribuição de Potência por LOGON	107
5.3	RESULTADOS PARA ESTRATÉGIAS DESENVOLVIDAS DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO	111
5.3.1	Atribuição de Potência Egoísta, Atribuição de Potência Consciente Egoísta, Atribuição de Potência Suficiente	111
5.3.2	Atribuição de Potência Suficiente Acrescida de Margem (EnPA+Mg)	116
5.3.3	Atribuição de Potência Adaptativa	121
5.3.4	Atribuição de Potência Evolutiva	127
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
	REFERÊNCIAS	141
	APÊNDICE A – RELAÇÃO PARA OSNR EM UMA ROTA	151
	APÊNDICE B – AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA AS SI- MULAÇÕES	159
	APÊNDICE C – RELAÇÃO PARA POTÊNCIA DE LANÇAMENTO QUE RESULTA NA OSNR MÁXIMA	164
	APÊNDICE D – ALGORITMO ECPA	168
	APÊNDICE E – MÉTODO DE CARDANO-TARTAGLIA PARA EQUA- ÇÃO DE TERCEIRO GRAU	172
	APÊNDICE F – ALGORITMO ENPA+MG	178
	APÊNDICE G – META-HEURÍSTICA PSO	181
	APÊNDICE H – ALGORITMO APA COM MEMÓRIA E COM AJUS- TES	187
	APÊNDICE I – ALGORITMO APA SEM MEMÓRIA E COM AJUS- TES	190
	APÊNDICE J – ALGORITMO PARA O LOGON	192
	APÊNDICE K – RESULTADOS DAS MELHORES PARTÍCULAS DO PSO	194

1 INTRODUÇÃO

Apesar da alta capacidade e da importância das redes ópticas atuais no cenário de telecomunicações, as redes ópticas multiplexadas por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) possuem limitações a depender da tecnologia empregada, da qualidade dos dispositivos e da forma de distribuir seus recursos. Somado a isso, nos últimos anos, o tráfego de rede de dados tem crescido, não existindo qualquer indicação de que essa tendência cessará (SHARIATI et al., 2016). Isso ocorre sobretudo quando o *e-commerce* é vital para empresas, o entretenimento alavanca as plataformas de vídeos sob demanda e a *Internet das coisas* (IoT - *Internet of Things*) impõe o rumo da conectividade para praticamente tudo (SENA, 2018). Além disso, espera-se que conexões heterogêneas através da rede (por exemplo, com demandas diferentes para largura de banda) possam coexistir sem comprometer o uso eficiente do espectro óptico.

Nesse contexto, os serviços de telecomunicações emergentes exigem cada vez mais volume de dados transmitidos e, conseqüentemente, sistemas ópticos mais sofisticados, que devem ser suportados pelos núcleos das redes (*Core Networks*), que terão seu dimensionamento um aspecto crucial, caso contrário, elas se tornarão parte do gargalo dos serviços.

Cada vez mais, as redes ópticas vão requerer flexibilidade para reconfigurar suas características em resposta aos serviços requisitados (JINNO; MIYAMOTO; HIBINO, 2007). Essa flexibilidade é alcançada com o uso de redes em malha transparentes (*all-optical networks*) combinadas com *transponder* de largura de banda variável (BVT - *Bandwidth-Variable Transponder*) e com chave seletora de comprimento de onda de largura de banda variável (BV-WSS - *Bandwidth Variable – Wavelength Selective Switch*), que possibilitam comprimentos de onda ou larguras de banda flexíveis e reconfiguráveis, baseado na requisição, o que ocasionaria um menor desperdício de banda. Em consequência desses fatos, o conceito de redes ópticas elásticas (EON - *Elastic Optical Network*) tem sido amplamente estudado na literatura (GERSTEL et al., 2012) e se apresenta como uma solução para a crescente demanda de tráfego de rede (SILVA; ABBADE; BONANI, 2013). Em que, os termos elasticidade, flexibilidade e *gridless* são frequentemente utilizados como sinônimos e se referem à capacidade da rede de ajustar dinamicamente seus recursos, tais como, largura de banda óptica, taxa de transmissão de *bits* e formato de modulação conforme os requisitos de cada demanda.

Os estudos das EONs foram iniciados pela rede de caminho óptico elástico de espectro

fatiado (SLICE - *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) (JINNO et al., 2009), que utiliza tecnologia de multiplexação por divisão de frequência ortogonal óptica (OOFDM - *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexed*), ou seja, fatias de espectro com múltiplas subportadoras ortogonais entre si para formar um canal (supercanal¹). Entretanto, existem estudos que utilizam múltiplas subportadoras com largura e espaçamento iguais à taxa de transmissão de símbolo, formando supercanais perfeitamente retangulares sem sobreposição espectral de subportadoras, conhecido como Nyquist WDM ideal. Nessa técnica, o canal se comporta como uma única portadora com largura de banda proveniente das somas das larguras de banda individuais das subportadoras que formam o canal (POGGIOLINI, 2012).

Entretanto, a dinamicidade nas EONs aumenta o número de parâmetros ajustáveis e, conseqüentemente, o número de configurações possíveis e a complexidade do gerenciamento de rede. Um exemplo de novo desafio é o problema da atribuição de rota e espectro (RSA - *Routing and Spectrum Assignment*), em que é necessário encontrar uma rota e atribuir à mesma uma quantidade contígua e contínua de *slots* espectrais, condição essa conhecida como *contiguity and continuity constraint* (JINNO et al., 2009). Observa-se que, *slot* é um intervalo de frequência (fatia do espectro) para transmissão em uma rede elástica, sendo sua dimensão limitada pelos filtros ópticos. Valores como 12,5 GHz e 6,25 GHz são comumente utilizados na literatura. Assim, taxas de transmissões podem ser atendidas ocupando menos largura de faixa do que um comprimento de onda ou até superando por concatenação de unidades de *slots* a largura de faixa do comprimento de onda utilizado nas redes ópticas do tipo WDM (WANG, 2019). Uma evolução do problema de RSA é a atribuição de rota, nível de formato de modulação e espectro (RMLSA - *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), que adiciona a atribuição do nível do formato de modulação, garantindo que uma mesma taxa de transmissão ocupe diferentes larguras de banda a depender do formato de modulação utilizado (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; LI et al., 2020).

Os problemas de RSA e RMLSA podem ser estudados sob tráfegos estático e dinâmico (JANSON, 1991). No caso estático (*off-line*), todo o conjunto de requisições de conexões é previamente conhecido, sendo o objetivo principal encontrar a quantidade mínima de recursos capazes de atender a toda demanda ou encontrar o máximo de tráfego que pode ser transportado na rede para uma determinada quantidade de recursos. No caso dinâmico (*on-line*), as

¹ Supercanal é um conjunto de subportadoras adjacentes eficientes para altas taxas de transmissão, podendo chegar a ordem de Tbps em redes com enlaces de mais de 200 km (LOBATO, 2019). Por esse motivo, neste trabalho, são utilizados supercanais, ou seja, quando mencionado "canal", na verdade, se trata de um "supercanal", salvo quando explicitado.

requisições de conexões chegam aleatoriamente e não há conhecimento sobre as requisições futuras, sendo o objetivo principal a redução da probabilidade de bloqueio das requisições, pois normalmente não é possível (ou muito custoso) prover recursos suficientes para atender a demanda de tráfego sem haver bloqueio.

Além disso, como em qualquer sistema de telecomunicação, as EONs, durante a transmissão de sinais ópticos, tanto pelo meio de transmissão quanto pelos dispositivos pertencentes à rede, degradam a qualidade de transmissão (QoT - *Quality of Transmission*). Essas degradações são denominadas penalidades (*impairments*), as quais envolvem atenuação, alargamento temporal do pulso, interferência, adição de ruído, além de efeitos não lineares. O conhecimento prévio e adequado das degradações durante transmissões de sinais possibilita aprimorar mecanismos de detecção e correção, além de melhorias na tecnologia do segmento de redes de telecomunicações, especificamente as EONs, por exemplo:

- Nos amplificadores de fibra dopado a érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*), por exemplo, o ruído no sinal é inserido por meio da emissão espontânea, que leva à adição do que se conhece por ruído de emissão espontânea amplificado (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) (BASTOS FILHO, 2005). Qualquer ruído adicionado ao sinal permanece com ele desde o momento da sua adição até a chegada ao receptor, sendo inclusive amplificado em conjunto com o sinal por qualquer amplificador subsequente, ou seja, a escolha da rota exerce influência em seu valor. Assim, por diminuir significativamente a qualidade do sinal e por possuir modelos matemáticos consolidados, o ruído ASE é um dos principais fatores limitantes de alcance de transmissão considerados na literatura.
- Nas fibras ópticas, as mudanças no índice de refração do material em resposta à intensidade de um campo elétrico devido à própria luz (quanto maior sua intensidade, maiores as implicações) geram efeitos não lineares, o efeito Kerr (WEINBERGER, 2008). Esse efeito manifesta-se através de ruído aditivo intra e inter canal das portadoras ópticas, e seus efeitos são acumulativos e amplificados ao longo da transmissão. Como os canais influenciam uns nos outros (efeito inter canais), o posicionamento espectral relativo entre canais também é uma característica importante. Assim, conexões alocadas no centro espectral (frequências centrais) tendem a sofrer exposição bilateral dos canais vizinhos, enquanto conexões alocadas nos extremos do espectro tendem a sofrer menores interferências e, conseqüentemente, menores penalidades de não-linearidades (NAKASHIMA et

al., 2015; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022). Além disso, uma pequena mudança na potência do sinal gera uma alteração em cascata desses efeitos intra e inter canais, o que faz a potência ser também um fator essencial nas redes ópticas, independentemente de sua tecnologia, podendo ser encontrados estudos para: (i) WDM com tráfego estático (ALI; RAMAMURTHY; DEOGUN, 2000; HAMAD; KAMAL, 2010; ROBERTS; KAHN, 2017); (ii) WDM com tráfego dinâmico (DENG; SUBRAMANIAM, 2004; DURAND; ABRAO, 2016); (iii) elásticas com tráfego estático (SENA, 2018; SANTOS; ABRAO, 2020b; POGGIOLINI et al., 2013b; SAVORY; VINCENT; IVES, 2019); (iv) elásticas com tráfego dinâmico (VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022; VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; PASTORELLI et al., 2015; FONTINELE et al., 2020).

Nesse contexto e a partir de um modelo para a propagação do sinal óptico com penalidades de camada física, este trabalho analisou penalidades de ruído ASE e de não linearidades durante a propagação nas fibras ópticas em uma rede transparente e elástica com supercanais Nyquist e com tráfego dinâmico, em conjunto com estudos relacionados ao problema RMLSA e ao recente problema em redes elásticas que engloba atribuição de potência de lançamento, rota, nível de formato de modulação e espectro (PRMLSA - *Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019). O PRMLSA torna a atribuição de potência de lançamento mais uma flexibilidade possível para as EONs.

Por fim, os resultados obtidos para os cenários considerados de EONs com técnicas apresentadas neste trabalho para atribuição de potência de lançamento, especificamente a atribuição de potência adaptativa e a atribuição de potência evolutiva, mostram uma melhora na probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparados a técnicas consolidadas na literatura passíveis de aplicação ao cenário de tráfego dinâmico para EON, como a atribuição de potência constante (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014), a atribuição de densidade espectral de potência constante (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015) e a estratégia de otimização local que leva à otimização global (LOGON - *Local Optimization Leads to Global Optimization*) (POGGIOLINI et al., 2013b).

1.1 MOTIVAÇÃO

Este trabalho envolve redes ópticas transparentes e elásticas com tráfego dinâmico com supercanais de Nyquist, considerando penalidades da camada física (ASE e não linearidades). Apesar de o cenário de transmissão elástica melhorar a utilização dos recursos das redes, suas características levam a mais restrições e condições. Entre as características estão:

- Quanto à transparência: as transmissões de sinais são fim-a-fim exclusivamente no domínio óptico, não sendo convertidas para o domínio elétrico em pontos intermediários do caminho para regeneração do sinal, conseqüentemente, cada largura de banda atribuída é destinada a uma transmissão responsável pelo transporte de tráfego entre dois nós da rede (origem e destino). Neste trabalho as degradações dos sinais ópticos são medidas pela relação sinal-ruído óptico (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) para cada canal.
- Quanto à elasticidade: essas redes possuem uma maior quantidade de variáveis envolvidas quando comparadas a redes WDM tradicionais, por exemplo, o novo problema da flexibilidade da atribuição da potência de lançamento, a largura de banda e, conseqüentemente, inúmeras combinações para atribuição de espectro. Assim, uma análise das influências dessas variáveis é necessária para considerar algumas condições de contorno, um exemplo seria os limites dos valores de potências de lançamento a serem atribuídos. Isso tem por objetivo facilitar os estudos e a simulação computacional, tendo em vista, por exemplo, as limitações do processador.
- Quanto ao dinamismo: o tráfego permitirá que conexões sejam adicionadas e removidas aleatoriamente no tempo, além de ocorrerem entre qualquer par origem-destino e com taxas de transmissão de *bits* e formatos de modulações diferentes. Conseqüentemente, o estado de ocupação da rede é mutável e imprevisível a cada instante de tempo.

Assim, algoritmos de PRMLSA podem ser elaborados para minimizar o percentual de chamadas bloqueadas, seja devido à falta de largura de banda no espectro ou devido à degradação do sinal. Isso porque, além de encontrar uma rota adequada e atribuir *slots* no espectro contíguos e contínuos diante do estado da rede, a potência de lançamento para cada sinal de conexão pode ser atribuída de modo a influenciar o menos possível nas não linearidades na rede. Além disso, um modelo simples e eficaz para qualificar a degradação de sinal, que considere uma transmissão fim-a-fim no domínio óptico e inclua ruído ASE e não linearidades,

é necessário para prever a qualidade de sinais que atravessam uma variedade de rotas e interação com outros sinais de conexões que estão presentes na rede. Consequentemente, a motivação principal desta pesquisa é preencher lacunas no problema de atribuição de potência de lançamento no cenário de PRMLSA.

Deve-se destacar a importância da pesquisa, visto que o tema é atual em virtude da crescente demanda por serviços de telecomunicações e existem várias lacunas a serem preenchidas em decorrência do cenário de redes elásticas ser relativamente novo. Consequentemente, a pesquisa possui um caráter socioeconômico, pois traz uma forma de satisfazer a crescente demanda por largura de banda, sobretudo nas aplicações multimídia e no tráfego da Internet, melhorando a qualidade de serviços e garantindo maior aproveitamento e eficiência das redes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Como apresentado anteriormente nesta seção, a demanda por dados vem crescendo ao longo dos anos, sobrecarregando o tráfego nas redes atuais. Por essa razão e diante das vantagens de EON, o objetivo geral deste trabalho foi um projeto que vise aumentar a eficiência do uso dos recursos de redes de fibras ópticas pela utilização da tecnologia das EONs.

Assim, foi realizado um estudo sobre as variáveis de uma EON transparente com supercanais do tipo Nyquist e com tráfego dinâmico e penalidades de camada física (ASE e não linearidades). As variáveis consideradas resultam nos problemas de: (i) atribuição de potência de lançamento; (ii) roteamento; (iii) nível do formato de modulação; e (iv) atribuição de espectro. Esses problemas, que compõem o RSA, RMLSA e PRMLSA, buscam diminuir as degradações dos sinais ópticos, priorizando a atribuição de potência de lançamento, o roteamento, a escolha do nível do formato de modulação e a atribuição de espectro. Consequentemente, o objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de estratégias de atribuição de potência de lançamento para o problema de PRMLSA.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar as tecnologias e os elementos para as EONs com os respectivos e os mais relevantes efeitos de camada física, além de averiguar a possibilidade com ou sem ade-

quação de aplicação das tecnologias atuais ao cenário desenvolvido.

- Escolher um modelo matemático de propagação de sinal em rede de fibras óptica que considere efeitos de camada física e seja adequado ao cenário de um ambiente computacional, considerando as possíveis limitações de processador.
- Discutir métricas adequadas para o cenário de redes ópticas elásticas para avaliação da qualidade dos sinais e para avaliação da rede que consideram todas as flexibilidades desse cenário (potência de lançamento, rotas, níveis de formatos de modulação e largura de banda).
- Desenvolver estratégias de atribuição de potência de lançamento do problema PRMLSA, objetivando a diminuição das penalidades de camada física e a melhor distribuição das conexões na rede, além de discutir as estratégias existentes de atribuição de potência de lançamento no estado da arte, sobretudo ao cenário de EON transparente, com tráfego dinâmico e penalidades de camada física.
- Elaborar um ambiente computacional para avaliar o modelo de camada física, as métricas e os algoritmos, para representar adequadamente os cenários de redes ópticas elástica transparente com supercanais de Nyquist e com tráfego dinâmico.

1.3 METODOLOGIA

Nesta tese, uma metodologia de provisionamento dinâmico foi proposta para resolver de forma independente o problema de atribuição de potência de lançamento em PRMLSA, considerando penalidades de camada física e fixando os demais problemas (roteamento, atribuição de nível de formato de modulação e espectro).

Sob o cenário de redes ópticas elásticas transparentes com tráfego dinâmico, foi inicialmente levantada a fundamentação teórica para os elementos que compõem e respectivas penalidades, resultando em um modelo matemático de propagação para sinal e ruídos em fibras ópticas, seguida da obtenção de métricas de avaliações. O modelo matemático adotado mostrou que, além das penalidades serem definidas em razão do meio de propagação, as mesmas sofrem influências em decorrência dos canais presentes e das características do próprio canal.

Em seguida, foi realizado um levantamento de trabalhos na literatura para o problema de atribuição de potência de lançamento, dentre os quais foram selecionadas as estratégias suscetíveis de aplicação ao cenário adotado nesta pesquisa, denominadas estratégias base, utilizadas como parâmetros para uma análise quantitativa a partir das métricas de avaliação de redes definidas.

Então, em posse do modelo matemático de propagação de sinal e de métricas adequadas, foi analisado e definido o comportamento da qualidade de transmissão em função da potência de lançamento dos sinais, que serviu como base para o desenvolvimento das novas estratégias de atribuição de potência de lançamento.

As estratégias de atribuição de potência de lançamento desenvolvidas nesta pesquisa se basearam em valores de potência de: (i) máximo; (ii) mínimo; (iii) acrescido de margem; (iv) adaptativo; (v) evolutivo. As versões de máximo e mínimo foram definidas pelos pontos de extremos do comportamento da potência diante da qualidade de transmissão. As versões de acréscimo de margem, adaptativa e evolutiva se basearam na busca de um ponto ótimo entre os valores de máximo e mínimo. A versão de acréscimo de margem aumentava gradualmente a margem atribuída a partir de um ponto mínimo até estabelecer uma equipotencialidade (previamente definida) entre todas as conexões da rede, em razão dos efeitos entre canais. A versão adaptativa buscou atribuir valores mínimos acrescido de uma margem que se altera com o estado da rede de forma dinâmica e automatizada. Enquanto a versão evolutiva buscou a atribuição de uma margem definida através de algoritmos evolutivos.

Assim, a metodologia empregada nesta pesquisa para a atribuição de potência de lançamento partiu de coleção de teorias, conceitos e ideias para o cenário de redes elásticas transparentes e com tráfego dinâmico, realizando um estudo quantitativo por métricas definidas na literatura em comparação com modelos amplamente adotados. Todo o estudo se baseou no comportamento da qualidade de transmissão do sinal em função da potência.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1, foi apresentada uma introdução das redes ópticas no cenário atual das telecomunicações, em que as redes elásticas foram expostas como uma solução para as limitações das redes ópticas WDM. Por fim, nesse capítulo, foram detalhados os objetivos e a estrutura deste trabalho.

No Capítulo 2, foram expostos os conceitos e as características de redes ópticas elásticas,

seguido do detalhamento do modelamento matemático para a propagação em fibras ópticas com respectivas condições e/ou limitações, além de métricas de avaliação da QoT dos canais e de métricas de avaliação da rede na totalidade.

No Capítulo 3, foi apresentado o problema RSA, bem como suas evoluções (RMLSA e PRMLSA), concluído com o estado da arte especificamente para o problema de atribuição de potência de lançamento, foco desta pesquisa.

No Capítulo 4, foram delineados e justificados os algoritmos e heurísticas para a atribuição de potência de lançamento do PRMLSA utilizados e/ou desenvolvidos neste trabalho.

No Capítulo 5, foram apresentados os cenários de simulações com respectivas condições, seguidos dos resultados em forma de gráficos e tabelas para as métricas e os algoritmos definidos, com as respectivas análises de resultados e as devidas comparações.

No Capítulo 6, seguiram as conclusões, as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros no âmbito desta pesquisa, atribuição de potência para EON.

2 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS: CONCEITOS, MODELOS MATEMÁTICOS DE PROPAGAÇÃO E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Atualmente, as EON são vistas como uma tecnologia de telecomunicação propícia, em vista da crescente e heterogênea demanda em serviços, como televisão de alta definição (HDTV - *High Definition Television*), videoconferências, *e-commerce*, IoT, dentre outros. Assim, o estudo da tecnologia EON hoje é essencial para o desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações. Neste contexto, neste capítulo foi conduzida uma breve apresentação sobre as características e conceitos básicos que regem o funcionamento de um sistema de telecomunicação de EON. Também são expostos modelos matemáticos para caracterizar a propagação da luz em fibra para EON, incluindo as penalidades de camada física, provenientes das não linearidades e dos ruídos ASE, fatores impactantes na QoT. Por fim, são apresentadas as técnicas de avaliação da QoT, além das métricas utilizadas neste trabalho.

2.1 CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

As redes ópticas WDM formam a espinha dorsal das redes de telecomunicações modernas e da Internet atualmente e se baseiam no uso de grades de frequência de tamanho fixo, operando geralmente com granularidades de 50 GHz por comprimento de onda para a acomodação das conexões (TOMKOS et al., 2014). Nesse padrão, para cada demanda de tráfego, uma unidade de granularidade inteira precisa ser alocada para sua acomodação, mesmo que a demanda exija menos que a capacidade do canal, provocando o desperdício dos recursos espectrais.

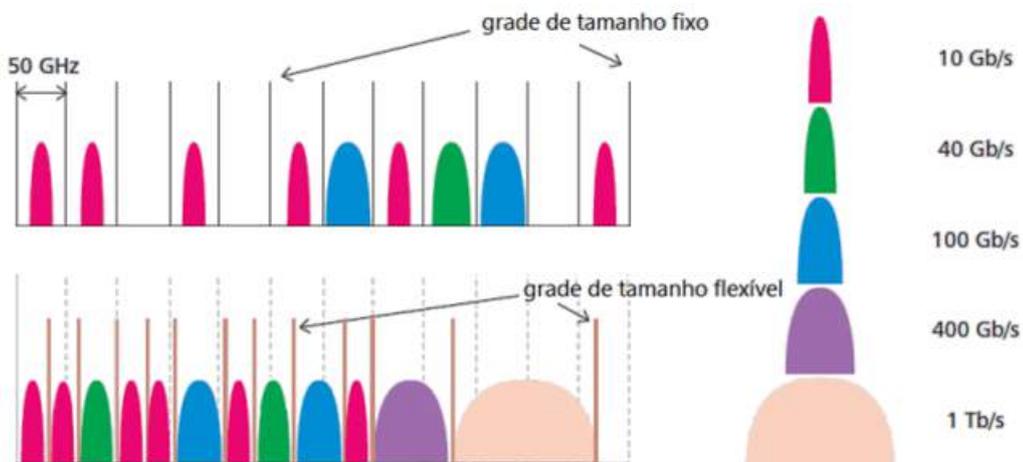
Nessa conjuntura, observou-se que a rigidez espectral é um problema que pode resultar ociosidade ou complexidade de atribuições de larguras de banda superiores à granularidade da grade. Obstante a esse fato, a transmissão óptica e as tecnologias de rede estão evoluindo para se tornarem mais eficientes, flexíveis e redimensionáveis com as EONs.

As EONs introduzem elasticidade e adaptação no domínio óptico, assegurando recursos da rede conforme a disponibilidade e o estado da rede através de uma grade espectral flexível. Nas EONs, a faixa de frequência atribuída à requisição é flexível com a demanda, o que possibilita a utilização mais eficiente do espectro.

Assim, uma EON é uma rede de transporte óptica (OTN - *Optical Transport Network*) em que todos os equipamentos e o plano de controle podem lidar com canais ópticos de largura de banda variável. A Figura 1 apresenta as diferenças entre os canais ópticos com grade fixa

e flexível. O espectro para grade fixa é dividido em intervalos de frequência (normalmente) de 50 GHz. Isso faz com que, caso haja uma requisição que tenha uma largura de banda de 10 GHz, a rede desperdice 40 GHz. Enquanto, na grade flexível, a menor unidade de transmissão é de 1 *slot* de 12,5 GHz, podendo ser menores, por exemplo, 6,25 (JINNO et al., 2010), o que faz com que a ociosidade espectral diminua, e mais canais consigam ser alocados. Além de que, um canal pode ocupar múltiplas unidades de *slots* sem a necessidade de ser particionado (e agrupado no receptor), suportando canais além do limite da granularidade da grade fixa.

Figura 1 – Grades de tamanho fixo e flexível.

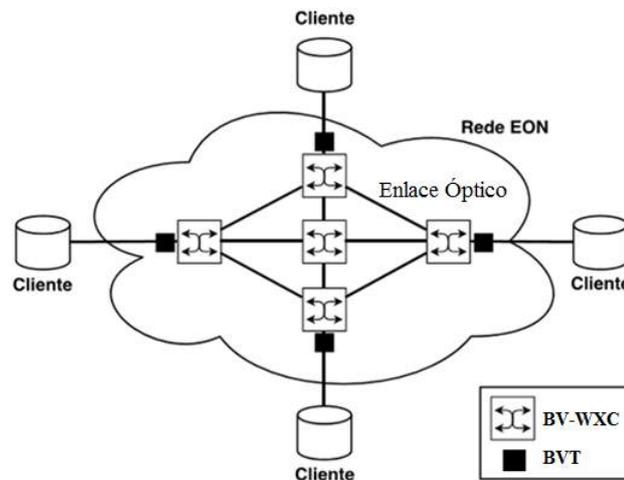


Fonte: Adaptado de GERSTEL et al. (2012).

2.1.1 Arquitetura das EONs

A EON tem como objetivo principal prover o transporte eficiente de dados através de caminhos ópticos estabelecidos. A arquitetura EON é composta por enlaces ópticos (*links*), BVT e por comutadores de comprimento de onda de largura de banda variável (BV-WXC - *Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects*), que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível. Sua arquitetura pode ser observada na Figura 2, em que os enlaces ópticos interligam os BV-WXCs, enquanto os BVTs localizam-se nas bordas da rede. Os BVTs têm a responsabilidade de gerar os sinais ópticos conforme a demanda requisitada, e os BV-WXCs encontram-se no núcleo da rede sendo responsáveis por estabelecer o caminho óptico por comutação (JINNO et al., 2009).

Figura 2 – Arquitetura de redes ópticas elásticas.



Fonte: Adaptado de JINNO et al. (2009).

Na prática, todos os elementos que compõem a EON penalizam o sinal que trafega, existindo estudos individualizados para cada um deles. A degradação de cada BV-WXC nos nós de roteamento pelos processos de filtragens e *crossstalk* entre diferentes canais (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) não é considerada neste trabalho de forma detalhada, o que faz com que seja utilizado um valor fixo de perda para esses elementos, compensado por um amplificador *booster* (pós comutadores). Para os BVTs, também é considerado um valor constante de ruído de entrada do sinal na rede. Enquanto, para os enlaces ópticos, é concentrada a maior parte da discussão sobre penalidades deste trabalho, as não linearidades (fibras) e o ruído ASE (amplificadores).

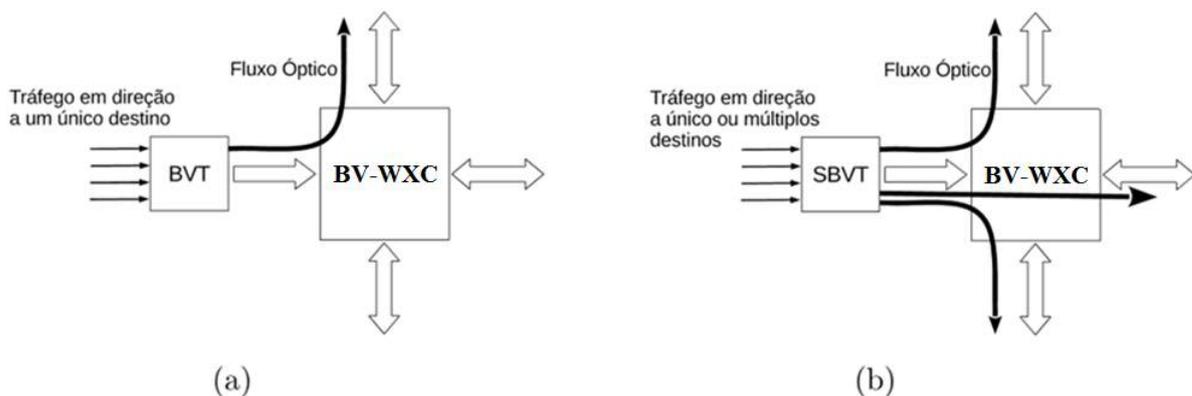
2.1.1.1 Elementos Transponders

Visando satisfazer diferentes demandas de tráfego sob diferentes degradações pelo meio de transmissão, os BVTs possibilitam a configuração dinâmica de diferentes características do canal, como: (i) taxas de transmissão. (ii) formatos de modulação; (iii) números de subportadoras; (iv) potências ópticas de lançamento; (v) esquemas de correção de erros antecipada (FEC - *Forward Error Correction*); e (vi) comprimentos de onda do sinal.

No entanto, a capacidade máxima dos BVTs é fixa, ou seja, é limitada pelo número de subportadoras a serem geradas, pela velocidade dos osciladores que a implementam, pelos formatos de modulação disponíveis na sua arquitetura. Além disso, nos modelos mais rudimentares, apenas um único sinal pode ser transmitido por vez. Portanto, se um canal com capacidade inferior à máxima permitida é transmitido, parte da capacidade do *transponder*

está sendo desperdiçada. Para resolver essa limitação, quando um canal óptico de baixa capacidade é gerado, a capacidade restante pode ser utilizada para transmitir outros fluxos de dados independentes. Essa arquitetura foi chamada de BVT fatiado (SBVT - *Sliceable BVT*) (JINNO et al., 2012). Ou seja, um BVT pode ser dividido em vários *transponders* virtuais, de forma a atender a diferentes aplicações em paralelo. Por exemplo, um BVT de 500 Gbps pode ser dividido em 4 *transponders* virtuais, sendo 3x100 Gbps e 1x200 Gbps. Assim, os SBVTs são tecnologias chaves para a virtualização das redes ópticas (OU et al., 2015). Na Figura 3 é apresentado o funcionamento de um BVT com perda de capacidade quanto ao número de subportadoras e um SBVT com oferta de diferentes aplicações e melhor utilização de sua capacidade.

Figura 3 – Funcionamento de um BVT e de um SBVT: (a) funcionamento do BVT; (b) funcionamento do SBVT.



Fonte: Adaptado de LÓPEZ et al. (2013).

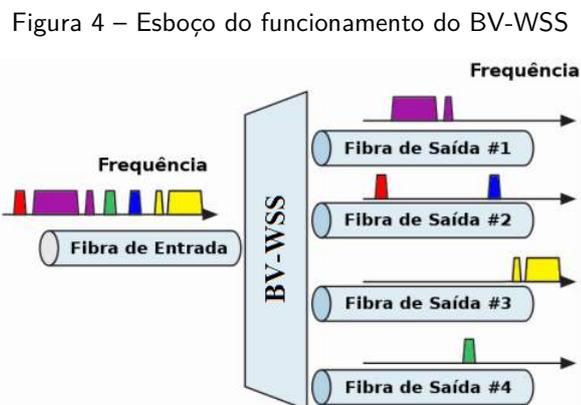
O SBVT pode ser implementado com foco em técnicas de transmissões específicas de multi transporte, o que lhe permite ser adequado para diferentes cenários, apresentando diferentes níveis de eficiência espectral e complexidade. Dentre as soluções de multi transporte que foram propostas como possíveis implementações de *transponder* para EONs estão: WDM coerente (CoWDM - *Coherent WDM*), OFDM coerente (Co-OFDM - *Coherent OFDM*) e Nyquist WDM (GERSTEL et al., 2012).

Neste trabalho, os *transponders* SBVTs são elementos responsáveis pela inserção do ruído de entrada, definido por uma relação sinal-ruído de entrada fixa, independente das características do sinal.

2.1.1.2 Elementos Comutadores

Os WXC's são comutadores ópticos com habilidade de remotamente e dinamicamente comutarem tráfego em sistemas WDM através dos elementos denominados chaves seletoras de comprimento de onda (WSS - *Wavelength Selective Switches*). Quando os WXC's utilizam dispositivos do tipo WSS com largura de banda variável (BV-WSS), passam a ser chamados de BV-WXC's e se tornam capazes de suportar canais ópticos de largura de banda variável, provendo flexibilidade à rede. Assim, o BV-WXC atribui uma conexão cruzada de tamanho apropriado conforme o requisitado para oferecer suporte a uma conexão óptica elástica, sendo necessário configurar sua janela de comutação de uma forma flexível que corresponda à largura espectral do sinal óptico de entrada (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011).

O BV-WSS é uma chave que fornece um espectro de transmissão contínuo, ajustável e variável. A representação de um BV-WSS é dada na Figura 4, em que o dispositivo apresenta em um lado uma fibra de entrada com grade espectral comum e no outro lado uma quantidade inteira de fibras de saída com grades espectrais distintas.



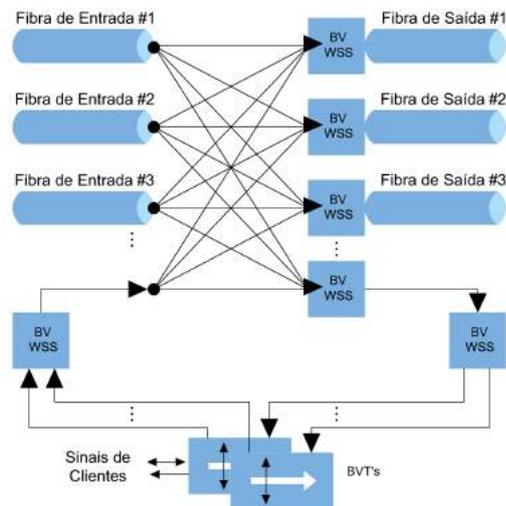
Fonte: Adaptado de JINNO et al. (2009).

Como elemento chave do comutador de uma rede WDM, o WSS com tecnologia de sistemas micro eletro-mecânico (MEMS - *Microelectromechanical Systems*) tem a função de direcionar os comprimentos de onda para qualquer número de saídas de fibra sem quaisquer restrições, ou seja, qualquer combinação dos comprimentos de onda de entrada pode ser redirecionada para qualquer uma das saídas de fibra. Entretanto, as EONs requerem maior flexibilidade pelo controle de largura de banda, resolução espectral mais fina e filtragem. As tecnologias baseadas em cristais líquidos em silício (LCoS - *Liquid-Crystal-On-Silicon*) e princípios holográficos (técnica de registro de padrões de interferência de luz) são duas possíveis

soluções para filtragens de bandas flexíveis em conjunto com funcionalidades de comutação e roteamento de grade flexível (JINNO et al., 2009).

Um BV-WXC é normalmente construído a partir de vários BV-WSS, a arquitetura mais simplificada presente na literatura é denominada arquitetura de difusão e seleção (*Broadcast and Select*) (JINNO et al., 2009) e apresentada na Figura 5. Nessa arquitetura, os sinais das diferentes fibras que chegam ao BV-WXC são repetidos em cada BV-WSS de saída. Os BV-WSSs têm suas portas de grades espectrais distintas utilizadas como entradas e sua porta de grade espectral comum utilizada como saída. Assim, réplicas de sinais de entradas podem ser comutados individualmente em cada BV-WSS.

Figura 5 – Arquitetura *Broadcast and Select* para um BV-WXC.



Fonte: Adaptado de JINNO et al. (2009) e AMAYA et al. (2011).

Observa-se que, para a configuração do BV-WXC da Figura 5, o número de fibras de entrada não necessariamente é igual ao de saída, isso ocorre apenas para redes com enlaces bidirecionais. Além disso, há a possibilidade de adicionar e/ou remover canais no BV-WXC, o que possibilita a inserção e a derivação de caminhos ópticos localmente, podendo ter três funcionalidades atreladas a essa capacidade (SHEN; LI; PENG, 2012):

- *Colorless*, que remete a capacidade das portas de adicionar ou remover em um nó independente do comprimento de onda, ou seja, qualquer comprimento de onda pode ser adicionado ou removido em qualquer porta.
- *Directionless*, que remete a capacidade das portas de adicionar ou remover em um nó independente do comprimento de onda para qualquer direção (demais portas), ou seja,

um canal em uma porta de entrada pode ser direcionado para qualquer saída.

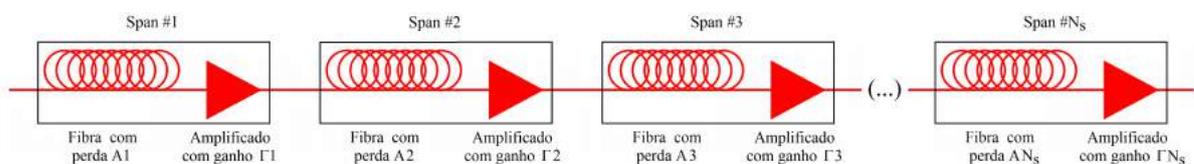
- *Contentionless*, que possibilita a adição e remoção de uma mesma frequência do espectro para diferentes direções, desde que sejam correspondentes a conexões cruzadas, ou seja, caso haja uma porta livre e um comprimento de onda livre em uma porta de saída, uma conexão cruzada sempre pode ser estabelecida dentro do nó.

Neste trabalho, os BV-WXCs adotados possuem essas três funcionalidades, além de inserirem uma perda constante, compensada por um amplificador *booster*.

2.1.1.3 Enlaces Ópticos (Links)

Os enlaces ópticos interligam os BV-WXCs, podendo se estender por longas distâncias. Apesar de existirem tecnologias que permitem a transmissão óptica sem fio, é sabido das limitações das mesmas (MEI et al., 2020). Portanto, majoritariamente, esses enlaces são realizados através de fibras ópticas e amplificadores ópticos, por denominado por *span*. Conseqüentemente, uma arquitetura assumida para um enlace é mostrada na Figura 6, em que são representados N -*spans* (N_s) sucessivos, podendo cada um possuir características distintas, tanto para as fibras (coeficiente de não linearidade, coeficiente de perda, coeficiente de dispersão, comprimento), quanto para os amplificadores (figura de ruído, ganho).

Figura 6 – Arquitetura para um enlace.



Fonte: a autora.

Na fibra óptica, são gerados os ruídos não lineares. Enquanto, nos amplificadores, são gerados os ruídos ASEs. Essas duas penalidades terão seus modelos matemáticos abordados a seguir.

2.2 MODELO PARA NÃO LINEARIDADES EM EON

O advento de sistemas com detecção coerente suportado por processamento digital de sinal tornou factível a execução eletrônica de compensação de dispersão cromática na fibra. Esse

fato possibilitou a transmissão óptica sem compensação da dispersão (UT - *Uncompensated Transmission*), ou seja, a não utilização de um gerenciador de dispersão óptica (ODM - *Optical Dispersion Management*). Somado a isso, certos modelos perturbativos de propagação não linear em fibras, como o modelo de ruído gaussiano (GN - *Gauss-Noise*), fornecem uma previsão precisa de desempenho para sistemas UT, enquanto não funcionavam de forma satisfatória com ODM. Entretanto, para a aplicação do modelo GN, é assumido dois pressupostos (POGGIOLINI et al., 2013a):

- O sinal transmitido se comporta como um ruído gaussiano estacionário. Apesar de essa suposição não ser verificada na saída do transmissor, à medida que o sinal se propaga em um enlace de UT e fica disperso, ele tende a assumir uma distribuição como ruído gaussiano estacionário.
- A perturbação do sinal gerada pela não-linearidade, denominada interferência não-linear (NLI - *Non Linear Interference*), se manifesta como ruído gaussiano aditivo (AGN - *Additive GN*).

Nesse sentido, e considerando que cada *span* é composto por um único tipo de fibra (*spans* diferentes podem ter fibras diferentes), a fórmula de referência do modelo GN para N_s *spans* e *dual-polarization* resulta na densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) de NLI, $G_{NLI}(f)$, (2.1) (POGGIOLINI et al., 2013a):

$$\begin{aligned}
 G_{NLI}(f) = & \frac{16}{27} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(f_1)G(f_2)G(f_1 + f_2 - f) \\
 & \left[\sum_{n=1}^{N_s} \gamma_n \left[\prod_{k=1}^{n-1} \exp\left(\int_0^{L_{s,k}} 3g_k(\zeta)d\zeta\right) \exp(-3\alpha_k L_{s,k}) \Gamma_k^{3/2} \right] \right. \\
 & \left[\prod_{k=n}^{N_s} \exp\left(\int_0^{L_{s,k}} g_k(\zeta)d\zeta\right) \exp(-\alpha_k L_{s,k}) \Gamma_k^{1/2} \right] \\
 & \left. \exp\left\{ j4\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f) \sum_{k=1}^{n-1} \left[\beta_{2,k} L_{s,k} + \pi(f_1 + f_2) \beta_{3,k} L_{s,k} + \beta_{DCU,k} \right] \right\} \right. \\
 & \left. \int_0^{L_{s,k}} \left\{ \exp\left(\int_0^z 2g_n(\zeta)d\zeta - 2\alpha_n z\right) \right. \right. \\
 & \left. \left. \exp\left\{ j4\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f) \left[\beta_{2,n} + \pi \beta_{3,n}(f_1 + f_2) \right] z \right\} \right\} dz \right|^2 df_1 df_2,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

em que: G é a PSD de um sinal transmitido; f é a frequência de análise; N_s é a quantidade de *spans*; γ é o coeficiente de não linearidade da fibra; L_s é o comprimento do *span*; z é a coordenada espacial longitudinal ao longo do enlace; $g(z)$ é o coeficiente de ganho do campo na fibra, possivelmente dependente de z ; α é o coeficiente de perda na fibra em escala linear; Γ é o ganho de potência do amplificador; β_2 é o coeficiente de dispersão da fibra; β_3 é a derivada da dispersão; β_{DCU} é a dispersão acumulada; π é a constante matemática ($\pi = 3,14$); j é parte imaginária de uma representação trigonométrica ($\sqrt{-1}$).

Além disso, algumas simplificações para G_{NLI} na equação (2.1) podem ser realizadas, como: (i) transmissão sem compensação ($\beta_{DCU} = 0$); (ii) enlaces homogêneos (enlaces com *spans* idênticos); (iii) perda de cada *span* ($A = \alpha L_s$) é compensada por um amplificador óptico; e (iv) coeficiente de dispersão da fibra (β_2) ser constante ($\beta_3 = 0$). Essas simplificações resultam em (2.2) (POGGIOLINI et al., 2013a):

$$G_{NLI}(f) = \frac{16}{27} \gamma^2 L_{eff}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[G(f_1) G(f_2) G(f_1 + f_2 - f) \rho(f_1, f_2, f) \chi(f_1, f_2, f) \right] df_1 df_2. \quad (2.2)$$

Essa fórmula pode receber a seguinte interpretação física: a densidade espectral de potência de NLI gerada em uma frequência f ($G_{NLI}(f)$) é o resultado integrado de todos os produtos de mistura de quatro ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*) não degenerados infinitesimais ocorrendo entre quaisquer três componentes espectrais do sinal transmitido, localizado em f_1 , f_2 e $f_3 = (f_1 + f_2 - f)$ (POGGIOLINI et al., 2013a). O fator de integração $\rho(f_1, f_2, f)$ pode ser apresentado como a eficiência FWM não degenerada de seu batimento, assumida como normalizada de forma que seu máximo seja 1 (um). A forma específica assumida por $\rho(f_1, f_2, f)$ depende do tipo de amplificador utilizado, por exemplo, assumindo um amplificador EDFA, tem-se (2.3) (POGGIOLINI et al., 2013a)

$$\rho(f_1, f_2, f) = \left| \frac{1 - \exp(-2\alpha L_s) \exp\{j4\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f)[\beta_2 + \pi\beta_3(f_1 + f_2)]L_s\}}{2\alpha - j4\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f)[\beta_2 + \pi\beta_3(f_1 + f_2)]} \right|^2 L_{eff}^{-2}, \quad (2.3)$$

com L_{eff} sendo o comprimento efetivo do *span* definido por (2.4) (POGGIOLINI et al., 2013a)

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-2\alpha L_s)}{2\alpha}. \quad (2.4)$$

Enquanto o fator χ tem a função de contabilizar o acúmulo de NLI em enlaces com múltiplos *spans*, considerando a interferência coerente em cada *span*, sendo igual a 1 (um) para $N_s = 1$, (2.5) (POGGIOLINI et al., 2013a)

$$\chi(f_1, f_2, f) = \frac{\text{sen}^2\{2N_s\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f)[\beta_2 + \pi\beta_3(f_1 + f_2)]L_s\}}{\text{sen}^2\{2\pi^2(f_1 - f)(f_2 - f)[\beta_2 + \pi\beta_3(f_1 + f_2)]L_s\}}. \quad (2.5)$$

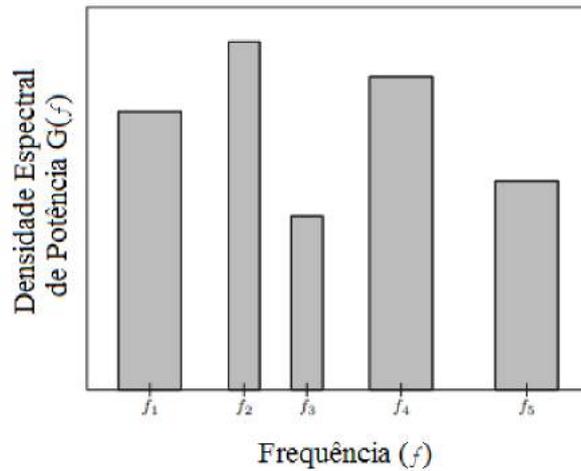
Observa-se que, a interpretação física que atribui NLI ao FWM é analisada detalhadamente em pesquisas específicas (POGGIOLINI, 2012; POGGIOLINI et al., 2013a; BONONI; SERENA, 2012; JOHANNISSON; KARLSSON, 2013).

Entretanto, o modelo simplificado para G_{NLI} (2.2) continua a ser complexo devido aos fatores infinitesimais da equação, sobretudo para o ambiente computacional. Nessa conjuntura, um modelo de baixa complexidade para predição da qualidade do sinal em uma rede de fibra óptica não linear, que se baseia no modelo de ruído gaussiano, é desejada para um grande número de canais (possivelmente heterogêneos) entre os elementos BV-WXCs de uma rede.

Analisando os sinais, tem-se que as técnicas como Nyquist WDM e OFDM podem apresentar espectros de sinais ópticos muito próximos de retangulares, o que ocasiona a necessidade de bandas de guarda muito estreitas e também leva a uma interferência de canal mínima (JOHANNISSON; AGRELL, 2014), possibilitando a transmissão de elevadas taxas de dados (LOBATO, 2019). Consequentemente, ambas as técnicas (Nyquist WDM e OFDM) desempenham alta eficiência espectral (SCHMOGROW et al., 2012; BAYVEL; KILMURRAY; KILLEY, 2012; YU; CHI, 2020). Entretanto, a tecnologia óptica OFDM ainda sofre com elevado custo (YU; CHI, 2020), sobretudo no que diz respeito a limitação dos componentes eletrônicos que sofrem com a larga faixa de operação do transmissor e receptor (LOBATO, 2019). Diante desses fatos, a multiplexação com supercanais de Nyquist WDM vem sendo a mais propícia para utilização em EON (GERSTEL et al., 2012), sendo a escolhida neste trabalho. Outras comparações para Nyquist WDM e OFDM podem ser encontradas em BOSCO et al. (2010).

Na Figura 7, são exemplificados cinco canais que trafegam em um enlace de uma rede multiplexada por Nyquist WDM, em que cada supercanal possui uma frequência central (f_m), uma largura de banda (Δf_m), uma densidade espectral de potência ($G(f_m)$) e uma potência (P_m).

Figura 7 – Canais heterogêneos em um enlace de uma rede com supercanais Nyquist WDM.



Fonte: Adaptado de JOHANNISSON; AGRELL (2014).

Observa-se que, a potência de um sinal é definida como a integral da densidade espectral ao longo da faixa de frequência de interesse ($[-R/2, R/2]$) (2.6) (POGGIOLINI et al., 2015):

$$P_m = \int_{-R/2}^{R/2} G(f_m) df_m, \quad (2.6)$$

o que implica que, para canais retangulares ou localmente branco, a densidade espectral de potência é dada pela razão entre a potência e a largura de banda (2.7) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$G(f_m) = \frac{P_m}{\Delta f_m}. \quad (2.7)$$

Assim, para o cenário de canais retangulares, Nyquist WDM, uma versão simplificada da equação (2.1) pode ser obtida de forma satisfatória, resultando no modelo de baixa complexidade para a saída de um *span* (2.8) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$G_{span}^{NLI}(f_m) = \frac{1,5 \cdot \gamma^2}{\pi \alpha \beta_2} G(f_m) \left[G^2(f_m) \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_2 (\Delta f_m)^2}{\alpha} \right| + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u G^2(f_n) \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right], \quad (2.8)$$

em que $G_{span}^{NLI}(f_m)$ se relaciona com a densidade espectral do próprio sinal ($G(f_m)$) por efeito intra canal e com as densidades espectrais referentes aos respectivos canais ativos u no enlace ao qual está o *span* ($G(f_n)$) por efeito inter canais, além das distâncias entre as frequências centrais dos canais (f_{mn}) (2.9) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014)

$$f_{mn} = |f_m - f_n|, \quad (2.9)$$

e das respectivas larguras de banda (Δf_m e Δf_n) dos canais ativos (2.10) (ESSIAMBRE et al., 2010)

$$\Delta f = \frac{R_b}{p \cdot b_{symbol}}. \quad (2.10)$$

As larguras de banda (2.10) dependem da taxa de transmissão de *bits* (R_b), número de modos de polarização (p) e do número de *bits* por símbolo (b_{symbol}) definido para o sistema binário como (2.11) (ESSIAMBRE et al., 2010):

$$b_{symbol} = \log_2 M, \quad (2.11)$$

em que M remete ao nível do formato de modulação, por exemplo, para a modulação de amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*), tem-se o M -QAM.

Esse modelo simplificado para não linearidades (2.8) em sistemas com supercanais Nyquist WDM foi obtido através de algumas suposições e aproximações, que incluem a perda por *span* igual ou superior a 10 dB, a largura de banda do sinal ser suficientemente grande (igual ou maior que 25 GHz) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014).

Por fim, estudos para modelos de não linearidades em redes ópticas com tecnologia OFDM podem ser vistos em outras pesquisas, como em GAO et al. (2014), CHEN; SHIEH (2010) e SHIEH; CHEN (2011).

2.3 MODELO PARA RUÍDO ASE EM EON

Durante a transmissão em um cenário sem a presença de amplificadores, o sinal óptico vai atenuando conforme trafega na rede, de forma que, quanto maior a distância percorrida na fibra, maior é a atenuação da potência de sinal, podendo inclusive se tornar abaixo do limiar de detecção dos receptores. Isso ocorre de tal forma que gera a necessidade de amplificar o sinal óptico para ser restabelecida sua potência.

Entretanto, os amplificadores ópticos inserem penalidades aos sinais, uma das mais significativas é o ruído ASE, que adiciona flutuações ao sinal amplificado. A densidade espectral de potência do ruído ASE é relativamente constante, sobretudo em uma estreita faixa de frequência (por exemplo, uma largura de banda de referência estreita), comportando-se como

um ruído branco (POGGIOLINI et al., 2013a). Assim, a partir da sua relação de PSD (2.7), tem-se para sua potência em um *span* (2.12) (POGGIOLINI et al., 2013a):

$$P_{span}^{ASE} = G_{span}^{ASE} B_o, \quad (2.12)$$

em que: G_{span}^{ASE} é a densidade espectral de potência do ruído ASE em um *span*, e B_o é a largura de banda de referência.

Usualmente, o amplificador de fibra mais comum é o EDFA, que se baseia na dopagem com érbio de uma fibra Óptica. Para um amplificador de um *span* ou um amplificador *booster* do compensador do comutador, a potência de ruído gerada na saída é dada por (2.13) (POGGIOLINI et al., 2013a; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009)

$$P_{span}^{ASE} = h \cdot v \cdot F \cdot (\Gamma - 1) \cdot B_o, \quad (2.13)$$

em que: h é a constante de Planck, v é a frequência central do sinal, F é a figura de ruído do amplificador em escala linear, e Γ é o ganho do amplificador em escala linear. A frequência central v poderá ser definida como a frequência central do espectro, independentemente da posição espectral do canal, pois a ordem de grandeza dessa frequência (para a banda C em torno de THz) torna mínima a diferença entre as frequências.

Observa-se que, existem outras fontes de ruídos provenientes de amplificadores ópticos (BASTOS FILHO, 2005), entretanto, por simplicidade, neste trabalho é considerado apenas o ruído ASE na zona de operação linear, não sendo considerada a influência da frequência e da saturação no ganho.

2.4 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE TRANSMISSÃO

Em redes transparentes, o sinal permanece no domínio óptico desde o nó origem até o nó destino, não sendo convertido em nenhum trecho intermediário para o domínio elétrico para possíveis correções de erros. Desse modo, é necessário avaliar a rota completa de modo a garantir a QoT da chamada (TOMKOS et al., 2004; MEDINA, 2002).

Nesse sentido, para assegurar que seja possível ter uma transmissão livre de erros através de uma rede de telecomunicação, torna-se importante considerar as limitações de camada física que afetam a QoT. Com a finalidade de mensurar essa qualidade na transmissão, a métrica

OSNR torna-se adequada, pois mede a relação entre a potência do sinal (P_{ch}) e as potências de ruído ($P_{ruído}$) (2.14) (POGGIOLINI et al., 2013a)

$$OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ch}}{P_{ruído}} \right), \quad (2.14)$$

em que: P_{ch} é a potência do sinal do canal, e $P_{ruído}$ é a potência relativa aos ruídos. Essas potências são medidas no ponto de interesse da rota do sinal em análise, desde a saída do transmissor até a entrada do receptor, de forma que a OSNR degrada-se (i.e. diminui) ao longo da rota devido aos efeitos acumulativos de ruídos. Assim, quanto maior o valor da OSNR, melhor a qualidade do sinal.

Como o ruído das não linearidades é assumido ser ruído gaussiano branco aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*), sobretudo para uma estreita faixa de frequência (por exemplo, uma largura de banda de referência estreita), pela equação (2.7), sua potência é dada por (2.15) (POGGIOLINI et al., 2013a)

$$P_{span}^{NLI} = G_{span}^{NLI} B_o, \quad (2.15)$$

em que: G_{span}^{NLI} é a densidade espectral de potência das não linearidades na saída de um *span* (2.8); e B_o é a largura de banda de referência. Consequentemente, tomando por base o modelo simplificado para PSD das não linearidades (2.8) e que os sinais são retangulares para esse modelo, tem-se para a potência de não linearidades em um *span* a relação (P_{span}^{NLI}) (2.16) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$P_{span}^{NLI}(f_m) = \frac{1,5 \cdot \gamma^2 \cdot B_o}{\pi \alpha \beta_2} \frac{P_m}{\Delta f_m} \left[\frac{P_m^2}{\Delta f_m^2} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_2 (\Delta f_m)^2}{\alpha} \right| + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n / 2}{f_{mn} - \Delta f_n / 2} \right) \right], \quad (2.16)$$

em que P_n são as potências dos canais ativos da rede. Nesse sentido, como as não linearidades e os ruídos ASE possuem comportamentos similares (ruídos brancos), além de poderem ser considerados decorrelacionados, obtém-se que a potência do ruído ($P_{ruído}$) pode ser dada como a soma das duas potências (P_{ASE} e P_{NLI}) em uma mesma faixa de frequência (largura de banda de referência), resultando para a OSNR (2.17) (POGGIOLINI et al., 2013a):

$$OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}} \right), \quad (2.17)$$

em que P_{ch} , P_{ASE} e P_{NLI} são, respectivamente, as potências do sinal do canal, de ruído ASE e das não linearidades em um dado ponto de uma rota que um sinal trafega. Para uma rota com N_l enlaces que totalizam N_s spans, os valores das potências dos ruídos ASE e NLI devem ser acumulativos. Além de, assim como a potência do sinal de entrada (P_m), sofrem com as perdas e ganhos a cada span ou comutador, conforme obtido no Apêndice A, (2.18), (2.19) e (2.20) (POGGIOLINI et al., 2013a; JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$P_{ch} = P_m \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (2.18)$$

$$P_{ASE} = \left[\sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left(P_k^{ASE} \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right) \right] + \left(P_{N_s+N_l}^{ASE} \right), \quad (2.19)$$

$$P_{NLI} = \left[\sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left(P_k^{NLI} \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right) \right] + \left(P_{N_s+N_l}^{NLI} \right) + \left(P_{ruídoIn} \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right), \quad (2.20)$$

em que: k é um contador de elementos da rota (nó seguido de *booster* ou *span*); A_p é referente à perda no *span* ou no comutador que, em escala linear, é menor que um; e Γ_p é referente ao ganho do amplificador do *span* ou do amplificador *booster* compensador do comutador que, em escala linear, é maior que um. Observa-se que, o ruído de entrada ($P_{ruídoIn}$) proveniente do *transponder* foi adicionado ao ruído das não linearidades para simplificação da representação do modelo matemático de propagação. Além disso, P_k^{NLI} , quando k for referente a um elemento de nó seguido de *booster*, é nulo (salvo pelo ruído de entrada), pois as não linearidades foram consideradas apenas nas fibras dos *spans*.

Mesmo com o valor de OSNR obtido, é necessário um parâmetro para saber se seu valor é grande o suficiente para cumprir a QoT necessária. Esse parâmetro é a OSNR limiar (OSNR_{th} - OSNR *threshold*), que é obtido para cada formato de modulação e taxa de erro de *bit* (BER - *Bit Error Rate*) almejados.

2.4.1 Taxa de Erro de Bit

Nos sistemas de telecomunicações digitais, as informações são codificadas em símbolos (no sistema binário 0 e 1), que então são transmitidos pelo canal de telecomunicação. Na recepção desses símbolos, alguns podem ser trocados em decorrência das penalidades durante a transmissão, os quais são contabilizados. A taxa de erro de *bit*, BER, é um valor que indica

a relação entre a quantidade de *bits* errados pela quantidade total de *bits* transmitidos e é geralmente utilizada para definir QoT. Consequentemente, a BER está diretamente relacionada à OSNR, pois, quanto menor o nível de ruído, menores são as distorções e, consequentemente, menores são as proporções de *bits* com erro.

Análises de desempenho da BER de diferentes formatos de modulação para transmissão de uma portadora corrompida por AWGN resultam em equações e/ou gráficos que relacionam a BER ao formato de modulação (M) e à relação sinal-ruído elétrico (SNR - *Signal to Noise Ratio*) requerida (SNR_{th} - *SNR threshold*), como em (2.21) (ESSIAMBRE et al., 2010; IP et al., 2008)

$$BER = função(M, snr_{th}). \quad (2.21)$$

em que, snr e $osnr$ quando surgirem em letras minúsculas remetem à escala linear.

Para o formato de modulação M -QAM com detecção coerente e $M > 2$, o qual foi adotado neste trabalho, a relação de BER com M e SNR_{th} , é dada por (2.22) (IP et al., 2008; KOGIAS; OVALIADIS; KOGIA, 2006)

$$BER_M = \frac{2}{b_M} \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right) erfc \left(\sqrt{\frac{3b_M \cdot snr_{th}}{2(M - 1)}} \right), \quad (2.22)$$

especificamente para 8-QAM, a equação difere para (2.23) (IP et al., 2008)

$$BER_{M=8} = \frac{11}{16} erfc \left(\sqrt{\frac{3 \cdot snr_{th}}{3 + \sqrt{3}}} \right), \quad (2.23)$$

em que, b_M é o número de *bits* por símbolo (2.24) (IP et al., 2008)

$$b_M = \log_2 M, \quad (2.24)$$

enquanto $erfc$ é a função de erro complementar (*Complementary Error Function*) (2.25) (ANDREWS, 1998)

$$erfc(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (2.25)$$

A escolha de um valor para BER depende: (i) do meio de aplicabilidade, como Ethernet de rede de área local (LAN - *Local Area Network*) e redes de banda larga, de forma que, uma rede mais complexa exige uma BER menor; e (ii) da utilização ou não de códigos corretores

de erros (ECC - *Error Correcting Code*), como o FEC e suas variações (LOBATO, 2019), de forma que, a utilização de FEC possibilita o emprego de valores para BER mais elevados.

Neste trabalho, foi considerada a utilização do FEC com decisão difícil (HD-FEC - *Hard Decision FEC*), sendo possível utilizar um valor de BER relativamente elevado, $BER = 10^{-3}$ (STARK et al., 2012; CHUNG et al., 2012), o qual resulta pelas relações de BER dadas anteriormente (2.22) (2.23) para os respectivos formatos de modulações M -QAM deste trabalho os limiares de SNR apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – SNR_{th} para $BER = 10^{-3}$ e respectivos formatos de modulação.

M	b	SNR_{th}
4	2	6,50
8	3	8,35
16	4	10,25
32	5	12,25

Fonte: Adaptado de IP et al. (2008).

A relação entre SNR_{th} e $OSNR_{th}$ é dada por (2.26) (ESSIAMBRE et al., 2010)

$$OSNR_{th} = 10 \log_{10} \left(\frac{p \cdot R_b}{2B_o} snr_{th} \right), \quad (2.26)$$

em que: p é o número de modos de polarização, B_o é a largura de banda de referência, R_b é a taxa de transmissão de *bit*, e snr_{th} é o limiar da relação sinal-ruído elétrico (SNR_{th}) em escala linear. Observa-se que, para poder comparar a OSNR dos sinais (2.17) com suas respectivas $OSNR_{th}$ (2.26), a largura de banda de referência utilizada na obtenção dos ruídos e do limiar de OSNR deverá ser igual, sendo nessa pesquisa adotado $B_o = 12,5$ GHz. Portanto, é possível relacionar o limiar de OSNR para cada formato de modulação e respectiva BER desejada e taxa de transmissão de *bits* requerida por cada conexão. Normalmente, aos valores obtidos como limiares para OSNR, são adicionados uma margem, em geral, de 3 dB (valor adotado neste trabalho) para compensar outras eventuais penalidades desprezadas (FIDLER et al., 2013).

Por fim, observa-se que, quanto mais eficiente espectralmente o formato de modulação (mais *bits* por símbolo for transferido), maior é o limiar de OSNR, devido a sua maior sensibilidade a ruídos. Assim, como os SBVTs dão suporte a demandas com altas taxas de transmissão, os mesmos, apesar de priorizar formatos de modulação de maior eficiência espectral neste trabalho, ficam limitados pelo limiar de OSNR elevado.

2.5 MÉTRICA DE AVALIAÇÃO DE REDE

A avaliação da QoT individual de canais através da OSNR, além da análise da disponibilidade de recursos na camada de rede, possibilita uma avaliação de desempenho de uma rede sob determinados cenários. Pois, caso a OSNR (2.17) de uma requisição não atenda ao seu limiar ($OSNR_{th}$) (2.26) e/ou não haja recurso de camada de rede necessário, a requisição não é atendida e é contabilizada no número de chamadas bloqueadas da rede. Assim, é possível obter a probabilidade de bloqueio de chamadas (BP - *Blocking Probability*) (2.27) (CHAVES, 2012),

$$BP = \frac{\psi_{bloqueadas}}{\psi_{requisitadas}}, \quad (2.27)$$

em que: $\psi_{bloqueadas}$ é o número de requisições bloqueadas, e $\psi_{requisitadas}$ é o número total de requisições (bloqueadas e aceitas). De modo que, quanto mais requisições são bloqueadas, maior a BP, e pior é considerado o desempenho.

Por se tratar de EON, a probabilidade de bloqueio pode não ser uma métrica adequada, pois não revela a dimensão das chamadas bloqueadas. Não sendo justa a comparação entre bloqueios de chamadas com taxas de transmissão de *bits* elevadas com outras com taxas de transmissões de *bits* baixas. Contabilizar as larguras de banda alocadas, também não dimensiona adequadamente a rede, tendo em vista que podem ser utilizados mais de um tipo de formato de modulação. Nesse sentido, contabilizar as taxas de transmissão de *bits* requeridas ($R_b^{requisitadas}$) e as taxas de transmissão de *bits* bloqueadas ($R_b^{bloqueadas}$) pode ser uma métrica adequada, resultando na probabilidade de bloqueio de taxa de transmissão de *bits* (BP_{bits}) (2.28) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019),

$$BP_{bits} = \frac{R_b^{bloqueadas}}{R_b^{requisitadas}}. \quad (2.28)$$

Porém, quando se utiliza uma taxa de transmissão de *bits* com distribuição uniforme para as requisições de chamadas, o comportamento da probabilidade de bloqueio de chamadas e da probabilidade de bloqueio de taxa de transmissão se assemelham.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trouxe os elementos das redes elásticas com as penalidades consideradas nesta pesquisa. Além disso, foi demonstrado o modelo matemático que descreve o comportamento da potência óptica do sinal e dos ruídos durante a propagação em meio aos elementos da rede. Métricas para a avaliação de qualidade de transmissão das requisições e chamadas (BER e OSNR) foram apresentadas em conjunto com a métrica para avaliação da rede (BP) adequada ao cenário de tráfego dinâmico, que possibilitaram a análise da eficiência entre as diferentes estratégias adotadas, e que serão apresentadas nos capítulos subsequentes.

3 PROBLEMAS RSA, RMLSA E PRMLSA

O problema de RSA é uma questão fundamental no projeto de redes ópticas elásticas (WU et al., 2019; YUAN et al., 2019), pois influencia diretamente na eficiência da utilização dos recursos da rede (tráfego estático) e da probabilidade de bloqueio de requisições (tráfego dinâmico). Com essa importância, este capítulo faz uma apresentação dos problemas RSA, RMLSA e PRMLSA, seguido do estado da arte para o foco principal deste trabalho, a atribuição de potência de lançamento.

3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA RSA

Para que as demandas de tráfego sejam efetivamente atendidas, em uma arquitetura EON, algum mecanismo deve ser aplicado à rede para que tais solicitações sejam encaminhadas. O mecanismo mais sucinto em EON é o problema RSA, que consiste em definir uma rota para um par de nós (origem-destino), seguida da escolha de uma faixa de espectro livre com tamanho suficiente (conjunto de *slots* de frequência) para cada demanda, resultando em um caminho óptico (*lightpath*) (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). Para a definição da rota, dá-se o nome de roteamento, enquanto a escolha da faixa de espectro, dá-se o nome de atribuição de espectro.

O roteamento e a atribuição de espectro podem ser realizados em conjunto ou separadamente. Embora lidar com essas questões em conjunto possa aumentar o número de soluções possíveis, elas são muito complexas (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010; WU et al., 2017; WU et al., 2018). Consequentemente, RSAs são comumente tratados como dois problemas independentes: (i) roteamento; e (ii) atribuição de espectro (LOPEZ; VELASCO, 2016).

3.1.1 Roteamento

O roteamento consiste em encontrar um conjunto de enlaces distintos pertencentes à rede interligando dois de seus nós e estabelecendo uma ligação entre esses nós. O número de rotas alternativas para uma rede com n nós e l enlaces está relacionado a três características da topologia da rede:

- Grau dos nós, que é definido como o número de enlaces conectados ao nó (XAVIER, 2016).
- Grau médio dos nós da rede, que é definido como a soma do grau de todos os nós dividido pelo número de nós, que equivale à quantidade de enlaces total da rede dividida pelo número de nós. Para redes com enlaces bidirecionais, como neste trabalho, a relação é dada por (3.1) (XAVIER, 2016)

$$\rho = \frac{2l}{n}. \quad (3.1)$$

- Densidade da rede, que é definida como a relação do número de enlaces da rede pelo número de enlaces de uma rede completamente conectada com o mesmo número de nós. Para redes com enlaces bidirecionais, como neste trabalho, a relação é dada por (3.2) (XAVIER, 2016)

$$d = \frac{2l}{n(n-1)}. \quad (3.2)$$

Todas essas características dizem respeito ao fato de que, quanto mais conectada estiverem os nós da rede, maior é o grau médio dos nós e a densidade da rede, conseqüentemente maior é o número de possíveis combinações de enlaces para formar uma rota. Independentemente do número de rotas possíveis para uma topologia de rede, a escolha de uma rota pode se dar por roteamento fixo ou adaptativo.

No roteamento fixo, as escolhas das rotas entre qualquer par de nós origem-destino são pré-estabelecidas segundo critérios de construção e/ou dimensionamento da rede, como disponibilidade de roteadores, número de elementos a ser atravessado, estimativas *a priori* (ou de experiências anteriores) de congestionamentos, distância física percorrida, número total de *slots* por enlace (quando distintos), custos, entre outros. Caso o objetivo seja encontrar uma única rota possível para cada par origem-destino, o roteamento é dito fixo (BHATT; PRIYADARSHNI; SARSODIA, 2019). Caso o objetivo seja encontrar mais de uma rota possível, o roteamento é dito fixo-alternativo (VINCENT; IVES; SAVORY, 2018; ALYATAMA; ALRASHED; ALHUSAINI, 2017; LOBATO et al., 2019), em que a ordenação da priorização das rotas obtidas segue algum critério prévio, ou seja, em tempo de projeto. A maioria dos estudos em EON é baseada em roteamento fixo ou fixo-alternativo, que têm uma resposta mais rápida (LOBATO

et al., 2019; KYRIAKOPOULOS et al., 2019), sobretudo as baseadas em caminho mais curto (SP - *Shortest Path*) ou menor número de saltos (MH - *Minimum Hop*).

No roteamento adaptativo ou dinâmico, as escolhas das rotas variam com o estado da rede, sobretudo com as características das chamadas ativas, como potências alocadas, número de canais ativos, número de *slots* disponíveis, distância entre canais, potência mínima requerida, além de outras. Apesar do maior esforço computacional em simulações em decorrência do número elevado de cenários possíveis para cada uma das características dadas, esse tipo de roteamento é mais adequado para redes com tráfego dinâmico, pois evitará bloqueios por falta de recurso em uma rota pré-estabelecida em um dado estado. Analogamente ao roteamento fixo, também pode encontrar mais de uma rota, que denota ao adaptativo-alternativo. A maioria dos estudos para roteamento adaptativo focam na ocupação dos enlaces (ALYATAMA; ALRASHED; ALHUSAINI, 2017; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; VINCENT; IVES; SAVORY, 2018).

Independentemente se o roteamento é fixo ou adaptativo, é possível utilizar os mesmos algoritmos de buscas por rotas, como o de DIJKSTRA (1959) ou de BELLMAN (1958). Esses dois algoritmos se baseiam em custos (também denominado peso) atribuídos aos enlaces, que podem ter custos estáticos (fixos) ou dinâmicos (adaptativo), de forma que a rota escolhida terá o menor somatório dos custos individuais dos enlaces que a formam entre todas as rotas possíveis. Os pesos para os enlaces ($\omega_{i,j}$) nos algoritmos SP e MH são dados, respectivamente, por (3.3) (BHIDE; SIVALINGAM; FABRY-ASZTALOS, 2001) e (3.4) (WEN; SHENAI; SIVALINGAM, 2005):

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} d_{i,j}, & \text{caso exista enlace entre nós } i \text{ e } j \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} \Upsilon, & \text{caso exista enlace entre nós } i \text{ e } j \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.4)$$

em que, $d_{i,j}$ é o comprimento do enlace (i,j) e Υ é um valor constante e positivo (normalmente igual a um).

O algoritmo de DIJKSTRA (1959), apesar de solucionar o roteamento em um menor tempo comparado com o método de BELLMAN (1958) (SANTOS; BRITO; BARBOSA, 2019), só pode ser utilizado quando os critérios de peso (custo) dos enlaces resultam exclusivamente em valores positivos, como o critério de rota mais curta, que utiliza o peso sempre positivo já que se refere ao comprimento do enlace. Para encontrar um conjunto de rotas com os menores

custos, é aplicado o algoritmo de YEN (1971), que se baseia no algoritmo de DIJKSTRA (1959) e, conseqüentemente, também só pode ser utilizado para custos positivos.

3.1.2 Atribuição de Espectro

A atribuição de espectro é responsável por escolher a faixa de *slots* contínuo (buraco¹) e com tamanho adequado para o estabelecimento do circuito óptico requisitado. A escolha dos *slots* deve atender a três condições:

- Continuidade de espectro (*continuity constraint*) (JINNO et al., 2009): durante todo seu percurso em uma rede transparente, o tráfego deve usar a mesma faixa de espectro para uma rede *all-optical*;
- Contigüidade de espectro (*contiguity constraint*) (JINNO et al., 2009): uma requisição com mais de um *slot* de frequência deve ser alocada em *slots* adjacentes;
- Não sobreposição do espectro (JINNO et al., 2009): uma faixa de espectro escolhida para uma conexão não pode sobrepor à de outra, ou seja, deve haver disponibilidades distintas de espectro para as solicitações.

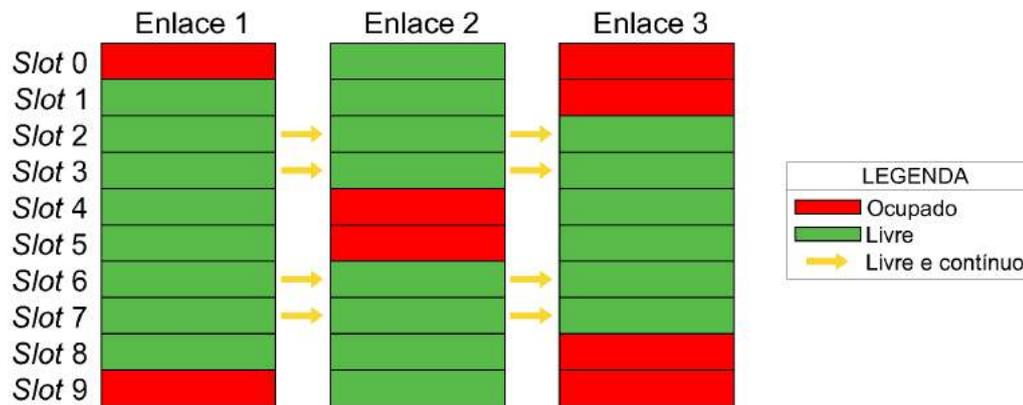
Essas restrições (*contiguity and continuity constraints* e não sobreposição de espectro) aliadas às larguras de banda diferentes para as conexões em EON normalmente provocam a fragmentação do espectro durante a alocação de *slots* e/ou sua liberação após o término das transmissões. Assim, normalmente a atribuição de espectro concentra-se em fornecer a compactação do espectro.

Um exemplo de aplicação da atribuição de espectro é apresentado na Figura 8, em que é possível observar o problema da fragmentação em três enlaces que formam uma rota, cujas disponibilidades dos 10 (dez) *slots* em cada enlace são indicadas na legenda, em que vermelho remete a ocupado, verde remete a disponível, e a seta amarela indica *slots* livres de início ao fim na rota. Ao tentar estabelecer um circuito nessa rota de três enlaces com três *slots* de frequência, é observado que não terá como a requisição ser atendida, pois não há conjunto de três *slots* adjacentes idênticos nos três enlaces sem sobreposição, em decorrência da fragmentação da rede. A fragmentação vertical impede o estabelecimento de circuitos devido à

¹ Buraco é uma fatia de espectro formada por *slots* contínuos disponíveis, ou seja, vazios e passíveis de ocupação (SOUZA FILHO, 2018).

restrição de contiguidade de espectro, enquanto a fragmentação horizontal impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de continuidade de espectro (TALEBI et al., 2014). Assim, o problema da fragmentação do espectro influencia diretamente na eficiência das redes ópticas elásticas (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Figura 8 – Exemplo do problema de atribuição de espectro



Fonte: a autora.

Alguns trabalhos tentam lidar com a atribuição de espectro diretamente atrelada ao problema de desfragmentação, como em: ALMEIDA JUNIOR et al. (2013), WRIGHT; PARKER; LORD (2014), BA; CHATTERJEE; OKI (2017), CHATTERJEE; BA; OKI (2017), ZHANG et al. (2012) e ZHANG; YOU; ZHU (2016). Entretanto, a maioria dos trabalhos lida indiretamente com a desfragmentação, utilizando para a atribuição de espectro os algoritmos: primeiro ajuste (FF - *First-Fit*) (BHATT; PRIYADARSHNI; SARSODIA, 2019), último ajuste (LF - *Last-Fit*) (SAMBO et al., 2007), primeiro e último ajuste (FLF - *First-Last-Fit*) (YUAN et al., 2019), ajuste aleatório (RF - *Random-Fit*) (ZHAO et al., 2012), ajuste exato (EF - *Exact-Fit*) (ROSA et al., 2012), perda mínima de capacidade de *slots* contínuos (MSCL - *Min Slot-Continuity Capacity Loss*) (ALMEIDA JUNIOR et al., 2013), mais utilizado (MU - *Most Used*) (QIU; XU, 2017), menos utilizado (LU - *Least Used*) (QIU; XU, 2017), entre outros.

3.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA RMLSA

Uma variação do problema RSA bastante difundida na literatura com uma maior flexibilidade é o RMLSA, em que, além da busca por um caminho óptico e *slots* de frequência suficientes para uma dada conexão, também é possível escolher a quantidade de *bits* a serem modulados por símbolo, visto que a eficiência espectral é diretamente proporcional ao nível

do formato de modulação. Observa-se que, o nível do formato de modulação é diretamente relacionado ao número de *bits* por símbolo da técnica, para o M -QAM, o nível do formato de modulação é o valor de M (LI et al., 2020).

Entretanto, quando consideradas as mesmas condições de transmissões, tem-se que, quanto maior o nível do formato de modulação, maior é a exigência de QoT devido a maior suscetibilidade (sensibilidade ao ruído), o que faz atrelar formatos de modulações mais eficientes espectralmente a distâncias de transmissão mais curtas (ABKENAR; RAHBAR, 2017). Contudo, ao se considerar as não linearidades, também devem ser consideradas as influências de conexões previamente alocadas na rede, que influencia na QoT.

Nesse contexto, pensando sobretudo na eficiência espectral, em abordagens RMLSA, larguras de banda podem ser salvas priorizando um nível de formato de modulação mais alto, desde que os requisitos de distância de transmissão e QoT sejam satisfeitos (CAVALCANTE et al., 2015).

3.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA PRMLSA

O problema PRMLSA é ainda mais flexível e completo que o RMLSA, pois adiciona mais uma variável a ser atribuída ao sinal da conexão, a potência de lançamento.

Apesar de a maioria dos estudos de redes ópticas atribuir a mesma potência de lançamento para todos os canais (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014) ou a mesma densidade espectral de potência (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015; HABIBI; BEYRANVAND, 2019; POGGIOLINI et al., 2013b), o conhecimento de modelos de propagação não-linear demonstra a importância e capacita a investigação de diferentes formas de atribuição de potência de lançamento (SENA, 2018), inclusive o de forma individualizada para cada conexão que entra na rede.

Essa individualização para atribuição de potência de lançamento é possível por presumir que os transmissores (SBVTs) tenham fontes de potência ajustáveis entre valores de potência mínima ($P_{BVT_{min}}$) e máxima ($P_{BVT_{max}}$). As fontes de potências ajustáveis podem ser obtidas através de transmissores de potência fixa combinados com atenuadores controláveis nas saídas do transmissor (DENG; SUBRAMANIAM, 2004). No trabalho de PASTORELLI et al. (2015), foi utilizada a individualização da atribuição de potência.

A potência da fonte óptica é um dos parâmetros mais importantes que determinam o de-

sempenho de BER de um determinado *lightpath* em uma rede. Quando não consideradas as não linearidades, fontes com intensidades de potências mais altas não apenas produzem melhores BERs na extremidade do receptor, mas também ocasionam uma menor necessidade da adição de amplificadores nos enlaces. No entanto, nem sempre é desejável tornar as potências de origem dos *lightpaths* estabelecidos a maior possível, seja pelo alto consumo energético ou pela alta geração de não linearidades provocadas pelas fibras ópticas que degradam a QoT geral da rede. Portanto, o problema de atribuição de potência é um objeto de estudo recorrente, que visa encontrar a solução mais eficiente em termos de potência, que satisfaça os principais limites de desempenho da camada física no receptor.

3.3.1 Estado da Arte para a Atribuição de Potência de Lançamento

Inicialmente, problemas de potência em redes ópticas foram tratados para configurações de redes WDM transparentes com tráfego estático do tipo *broadcast*, em que o problema investigado era alocação de amplificadores ópticos nos enlaces, de modo que todos os sinais pudessem ser transportados com QoT suficiente, garantida pelos ganhos de potências dos amplificadores, além do objetivo de minimizar os custos pela utilização dos amplificadores (RAMAMURTHY; INESS, 1998; RAMAMURTHY; INESS; MUKHERJEE, 1998). Outros estudos seguiram com a alocação de amplificadores em redes WDM transparentes com tráfego estático, entretanto considerando *multicast* (HAMAD; KAMAL, 2004; HAMAD; KAMAL, 2008; HAMAD, 2008).

ALI; RAMAMURTHY; DEOGUN (2000) propuseram um algoritmo de atribuição de potência para uma rede WDM transparente com tráfego estático do tipo *multicast*, em que o nível de potência adequado para um sinal individual era definido a partir da soma das potências individuais de canais que compartilham os mesmos enlaces, de modo que não ultrapassasse o limite de saturação dos amplificadores.

DENG; SUBRAMANIAM (2004) desenvolveram um algoritmo cujo objetivo era diminuir ao máximo a potência de lançamento dos canais em uma rede WDM transparente com tráfego dinâmico. Nesse algoritmo, é inicialmente tentada a alocação de um valor de potência mínima para uma requisição, a qual é aumentada progressivamente até ser suficiente para a transmissão. Caso a requisição seja impossibilitada de ser alocada em decorrência do(s) limiar(es) de alguma(s) das demais conexões previamente alocadas, é realizado um incremento de potência baseado na granularidade do transmissor admitido do nó de origem dessa(s) conexão(ões).

Esse incremento continua até o limite do transmissor ou até a requisição ser passível de alocação. Em caso de atingir o limite dos respectivos transmissores, a requisição é descartada, retornando a(s) conexão(ões) alterada(s) para o cenário anterior à chegada da requisição. HAMAD; KAMAL (2010) foram além da atribuição de potência mínima e também consideraram a alocação dos amplificadores e seus efeitos de saturação, entretanto para uma rede WDM transparente com tráfego estático do tipo *multicast*.

Visando otimizar a capacidade de transmissão de taxas de transmissões da redes WDM transparente com tráfego estático, sendo um problema de tempo polinomial não determinístico difícil (NP-Hard - *Non-Deterministic Polynomial Time-Hard*), ROBERTS; KAHN (2017) utilizaram de heurísticas para encontrar taxas de transmissão em função da posição da frequência, sendo os ajustes de potências realizados em função da taxa de transmissão (quanto maior a taxa de transmissão, maior a potência). Enquanto RABBANI et al. (2019) buscaram entre opções de combinações de rota e formato de modulação a melhor posição de frequência (formando um *lightpath*), que resultasse na máxima margem de OSNR, atribuindo à potência de lançamento valores proporcionais aos ruídos dos *lightpaths* obtidos para uma rede WDM transparente com tráfego estático.

Encontram-se na literatura inúmeras tentativas de parametrizar modelos analíticos de perfis de potência. PAVEL (2004, 2006) desenvolveu um modelo analítico de perfil de potência em função da frequência, especificamente uma curva parabólica, para canais WDM transparentes em uma rede de pequena escala com tráfego estático, concluindo que esse artifício provocava atenuação de efeitos não-lineares de forma satisfatória. IVES; SAVORY (2013) testaram outros perfis de potência de lançamento em função da frequência para uma rede WDM transparente de pequena escala com tráfego estático. Outros perfis de potência de lançamento foram testados para redes de grande escala (NSFNet, Google B4, DTAG/T-Systems) transparente com tráfego estático totalmente carregada (banda C completa) com canais WDM (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2014; IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015; IVES, 2015).

DURAND; ABRAO (2016) utilizou perfis de potência de lançamento em função da alocação de frequência, definidos através da meta-heurística de otimização por enxame de partícula (PSO - *Particle Swarm Optimization*), buscando minimizar o número de bloqueios em uma rede WDM transparente com tráfego dinâmico. Estudos de obtenção de perfis de potência em função da alocação da frequência por PSO e algoritmos genéticos foram continuados para uma rede com três nós elásticas transparentes com tráfego estático (SENA, 2018).

SANTOS; ABRAO (2020b, 2020a) apresentaram estratégias de atribuição de potência para o

cenário de redes elásticas transparentes com conhecimento prévio de todas as conexões (rota, taxa de transmissão de *bits* e formato de modulação), que totalizam no pior cenário 240 canais. A potência atribuída é definida por perfis de potência em função da frequência obtidos por estratégia evolutiva de otimização por busca furacão (HSO - *Hurricane Search Optimization*), além de algumas variações dessa estratégia. Assim, apesar de os autores mostrarem ser possível atualizações nas potências dos sinais em virtudes de esporádicas flutuações (queda de um sinal e envelhecimento do equipamento) e, conseqüentemente, alterações do QoT das conexões, a estratégia é inviável para um cenário dinâmico com elevado número de requisições, em que a cada instante de tempo o estado da rede se altera, seja por adição de conexão ou remoção.

POGGIOLINI et al. (2013b) trouxeram uma técnica de atribuição de potência para o cenário de redes elásticas transparentes com tráfego estático, que parte de uma densidade espectral de potência fixa e pré-estabelecida para todos os canais da rede. Então, sob o pior cenário, utiliza como base um domínio espectral completamente carregado com canais estreitos e sem espaçamento entre os mesmos (limite de Nyquist), em que é calculado para um único *span* a OSNR no canal central ($OSNR_{span}$), que passa a ser um valor fixo e um parâmetro base. Assim, para uma dada rota com N_s *spans*, somam-se suas influências sob o pior cenário ($OSNR_{span}$), encontrando a $OSNR_{rota}$. Por fim, é encontrado o formato de modulação que seja possível para essa $OSNR_{rota}$, que, em conjunto com a taxa de transmissão desejada e a densidade espectral de potência definida, é encontrada a largura de banda e a potência. Como observado, a inserção de um ou mais canais em um enlace não causa nenhuma interrupção dos canais presentes. Porque as NLI inseridas já foram contabilizadas pela consideração do pior caso (*full-load* e limite de Nyquist). Entretanto, isso também é uma limitação, pois assumir uma carga total e o limite de Nyquist, sobretudo para um cenário com cargas de rede baixas, pode acarretar formatos de modulações com menor eficiência espectral e, conseqüentemente para manter a densidade espectral de potência constante, potências de lançamentos mais altas, que aumentam a ocupação do espectro e o consumo energético, respectivamente, o que acarreta um desempenho subestimado. Essa estratégia foi nomeada de LOGON e pode ser utilizada no cenário dinâmico.

PASTORELLI et al. (2015) apresentaram duas formas de atribuição de potência para redes elásticas transparentes com tráfego dinâmico, uma denominada maximização de margem de OSNR e outra denominada minimização de BER. Ambas as estratégias partem da análise gráfica do comportamento da BER em relação a OSNR, em que, por derivação em relação à variável que deseja maximizar ou minimizar, como utilizado em teoremas matemáticos para

obtenção de pontos críticos (THOMAS, 2002), obtêm-se os pontos (as relações para as potências) de máximo ou mínimo. Entretanto, apesar do mesmo ponto de partida, a minimização da BER obteve os melhores resultados em todos os cenários dinâmicos considerados pelo autor, tanto considerando mudanças de formatos de modulações de canais, como em caso de flutuações na rede (envelhecimento dos componentes, por exemplo). A técnica de minimização da BER resultou na mesma relação que a estratégia que atribui a potência máxima de lançamento denominada de atribuição de potência egoísta (EPA - *Egoistic Power Assignment*) desenvolvida a partir da análise da OSNR em relação à potência por VALE; ALMEIDA JUNIOR (2019), que, por derivação em relação à variável que deseja maximizar (potência), obteve a relação para atribuição de potência de lançamento máxima. Entretanto, o EPA não obteve os melhores resultados entre as estratégias de atribuição de potência de lançamento exploradas pelos autores.

As demais estratégias desenvolvidas por VALE; ALMEIDA JUNIOR (2019) para redes elásticas transparentes com tráfego dinâmico também partiram da análise do comportamento da OSNR em relação à potência, em que foi apresentada, além do EPA, uma técnica de atribuição de potência mínima denominada de atribuição de potência suficiente (EnPA - *Enough Power Assignment*) obtida por interpolação da função do gráfico no ponto de limiar de OSNR, além de uma técnica denominada de atribuição de potência adaptativa (APA - *Adaptive Power Assignment*), que se baseava no conhecimento sobre conexões passadas, estado atual da rede e margem para conexões futuras. VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS (2022) continuaram o estudo sobre potência aplicado para roteamento e atribuição de espectro, além de desenvolverem uma versão simplificada do APA, que não utilizava de informações passadas, diminuindo a necessidade de memória, que foi o APA sem memória (APAnoMem - *APA No Memory*).

SAVORY; VINCENT; IVES (2019) posteriormente também realizaram um estudo sobre o comportamento da OSNR em relação à potência, para obtenção de perfis de potência em função da frequência, entretanto se restringiu a redes elásticas com tráfego estático.

É possível observar através das pesquisas mencionadas que o estudo de atribuição de potência de lançamento é algo primordial no desempenho do cenário de redes ópticas e vem sempre evoluindo. Entretanto, existem várias lacunas a serem estudadas, sobretudo no cenário atual de redes ópticas elásticas e com penalidades de camada física e tráfego dinâmico, em que este trabalho se insere.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo expôs uma breve apresentação dos problemas relacionados ao RSA, RMLSA e PRMLSA, além das diferenças entre os mesmos. Ao final, foi focado no estado da arte no problema de atribuição de potência de lançamento inerente ao PRMLSA para diferentes cenários de tipo de rede e de tráfego. Especificamente, o levantamento dos trabalhos de atribuição de potência de lançamento em redes elásticas com tráfego dinâmico serão detalhados no capítulo subsequente e serão utilizados como estratégias de base para comparação com as estratégias desenvolvidas nesta pesquisa.

4 ALGORITMOS PARA O PROBLEMA PRMLSA

Diante da importância do problema de atribuição de potência, este capítulo inicialmente apresenta uma análise do comportamento da OSNR em função da potência dos sinais envolvidos, seguido dos algoritmos desenvolvidos para a atribuição de potência de lançamento do problema PRMLSA utilizados no ambiente computacional desenvolvido (Apêndice B). Por fim, também são apresentadas as estratégias encontradas nas pesquisas atuais passíveis de aplicação ao cenário de redes ópticas elásticas transparentes e com penalidades de camada física e tráfego dinâmico (POGGIOLINI et al., 2013b; XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014; BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015). Em todas as estratégias de atribuição de potência de lançamento abordadas (salvo quando mencionado), são considerados: (i) roteamento fixo-alternativo SP, em que as k rotas são obtidas pelo algoritmo de YEN (1971); (ii) atribuição de espectro por FF; e (iii) escolha do formato de modulação pelo critério de eficiência espectral, sendo as tentativas do nível de formato de modulação do mais para o menos eficiente espectralmente.

4.1 COMPORTAMENTO DA OSNR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA

Pelo modelo adotado neste trabalho e apresentado no Capítulo 2, as penalidades envolvidas são: (i) ruído de entrada definido por uma OSNR de entrada constante; (ii) perda (fixa) nos nós de roteamento; (iii) ruído ASE; e (iv) ruídos não lineares na fibra. Para as penalidades variadas, tem-se que, o ruído ASE depende exclusivamente do percurso do próprio sinal (número, dimensões e figuras de ruído dos amplificadores). Entretanto, as não linearidades dependem também das características (potência, largura de banda e posição no espectro) do próprio sinal e dos demais sinais presentes na rede.

Como apresentada no Capítulo 2 (detalhado no Apêndice A), a relação sinal-ruído óptico é dada pela equação (2.17), a qual, substituindo as relações de potências de ruído ASE (2.13) e NLI (2.16) para um sinal de potência de lançamento P_m inserido em uma rota com N_l enlaces, N_s spans no total e u canais ativos no enlace do respectivo span, resulta em (4.1) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{tP_m}{aP_m^3 + bP_m + c} \right), \quad (4.1)$$

em que os coeficientes a , b , c e t dependem das características da rota atribuída e/ou canais ativos, definidos, respectivamente, por (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$a = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m^3} \left[\sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left(\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right) + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2N_s+N_l} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_s+N_l}} \right| \right], \quad (4.2)$$

$$b = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right\} + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (4.3)$$

$$c = h \cdot v \cdot B_o \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[F_k (\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + F_{N_s+N_l} (\Gamma_{N_s+N_l} - 1) \right\}, \quad (4.4)$$

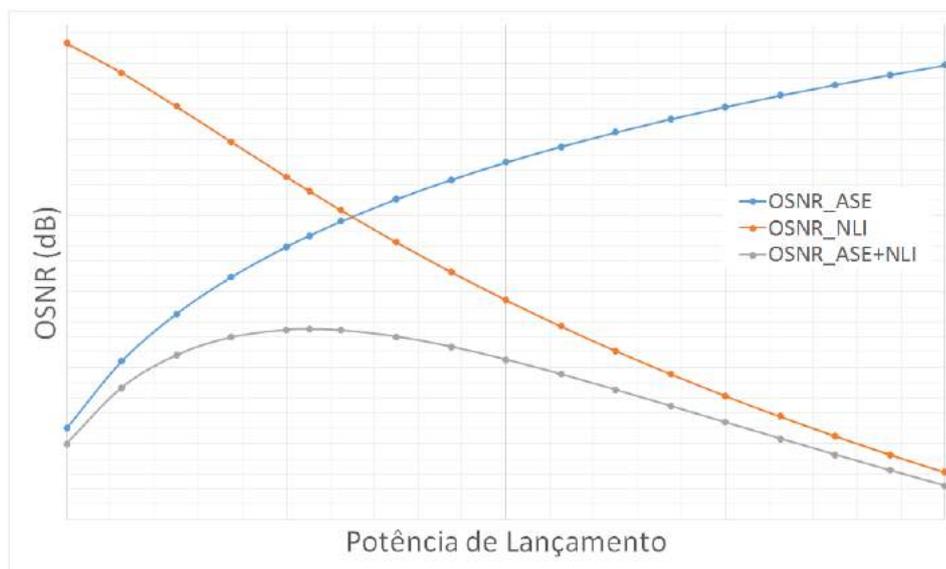
$$t = \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p. \quad (4.5)$$

Note que, para os coeficientes a e b , os valores de P_k^{NLI} são nulos para quando k se refere ao elemento nó seguido de *booster* (não linearidades ocorrem apenas nos *spans*), como mencionado na Seção 2.4, sua adição nessa equação foi apenas para possibilitar a representação dos somatórios e produtórios de forma simples. Além disso, cada um dos coeficientes depende de certas características: (i) a (4.2) depende da rota (número de *spans* e de enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, características das fibras e dos ganhos dos amplificadores) e do próprio canal (largura de banda), e é nomeado de auto-interferência de canal (SCI - *Self-Channel Interference*) (SENA, 2018); (ii) b (4.3) depende da rota (número de *spans* e de enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, características das fibras e dos ganhos dos amplificadores), do próprio canal (largura de banda) e das conexões presentes na rota (potência, largura de banda e posição espectral), e é nomeado de interferência entre canais (XCI - *Cross-Channel Interference*) (SENA, 2018); (iii) c (4.4) depende da rota (número de *spans* e de enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, ganhos dos amplificadores, figuras de ruído dos amplificadores), e se

refere ao ruído ASE; e (iv) t (4.5) depende da rota (número de *spans* e de enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, ganhos dos amplificadores), e é a relação entre todas as perdas e ganhos. Nesse sentido, o estado da rede afeta apenas o coeficiente b , de forma que o aumento de potência de conexões adjacentes à conexão analisada, seja por aumento do número de canais ativos ou aumento do valor da potência de canais ativos, aumenta as não linearidades em b , diminuindo a OSNR.

Se observarmos, a equação de OSNR (4.1) tem o comportamento em relação à potência de lançamento apresentado pela curva cinza no esboço¹ da Figura 9, em que ela cresce até um ponto máximo e decai a partir de então. Essa curva é resultado das influências do ruído ASE e das não linearidades NLI, que se comportam de maneira opostas com o aumento de potência. Analisando apenas ASE (linha azul), ou seja, considerando $a = b = 0$ (relação entre o sinal e o ruído ASE) em (4.1), a $OSNR_{ASE}$ tem seu valor aumentado ao longo do eixo de potência, pois o ruído ASE se mantém constante independentemente da potência de lançamento. Analisando apenas NLI (linha laranja), ou seja, considerando $c = 0$ (relação entre o sinal e o ruído NLI) em (4.1), a $OSNR_{NLI}$ decai com o aumento da potência, pois a NLI cresce com o cubo da potência de lançamento.

Figura 9 – Comportamento da OSNR em relação à potência de lançamento.



Fonte: a autora.

A partir de regras matemáticas, especificamente aplicando a primeira derivada na relação de OSNR (4.1) e a igualando a zero, como detalhado no Apêndice C, é encontrada a potência

¹ Curva obtida para passagem por um *span* de uma conexão de largura 25 GHz, cercada por duas conexões também com 25 GHz de largura, distantes apenas por um *slot* e potências fixadas em 0,2 mW.

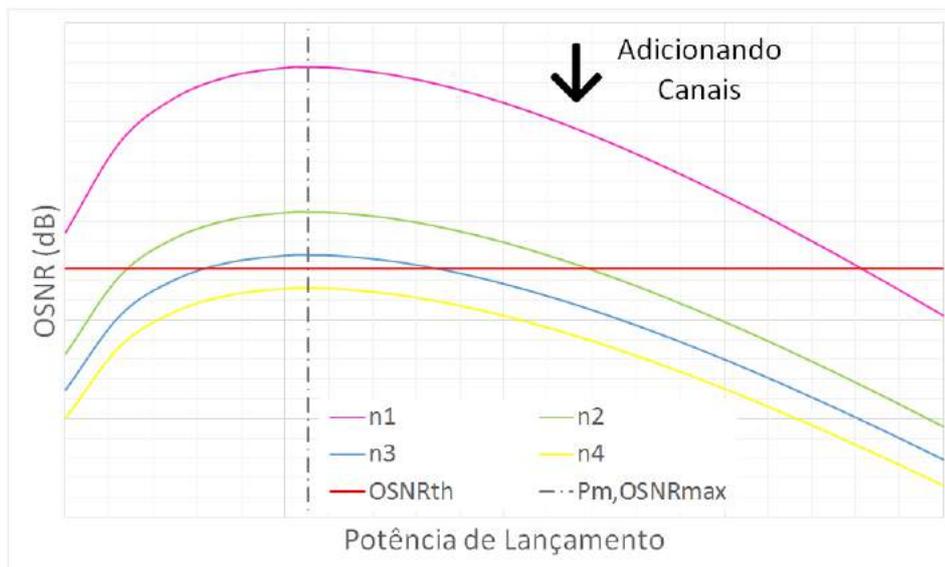
de lançamento que resulta no maior valor de OSNR (4.6) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$P_{m,OSNR_{max}} = \sqrt[3]{\frac{c}{2a}}. \quad (4.6)$$

Como $P_{m,OSNR_{max}}$ não depende do termo b , a potência de lançamento que maximiza a OSNR não é influenciada pelo estado da rede (características dos canais alocados na rede), fato esse apresentado por VALE; ALMEIDA JUNIOR (2019) e confirmado por estudos posteriores de SAVORY; VINCENT; IVES (2019), RAEESI et al. (2020) e VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS (2022). Portanto, a potência que fornece o valor máximo de OSNR para uma conexão é mantida constante, independentemente da quantidade e da posição das conexões ativas na rede.

Contudo, a coexistência da conexão com diferentes números de canais interferentes altera seu valor de OSNR máxima. De forma que, quanto maior (e/ou mais intensas) é o número de conexões interferentes, menor é o valor da OSNR máxima para o sinal. Em outras palavras, adicionar ou remover conexões não muda $P_{m,OSNR_{max}}$, mas move a curva $OSNR \times P_m$ para baixo ou para cima, respectivamente, conforme mostrado no exemplo² da Figura 10, em que a curva em magenta remete à ausência completa de canais na rota analisada, enquanto as demais curvas remetem à adição de canais, o que adiciona ruídos não lineares à nova conexão.

Figura 10 – Comportamento da OSNR em relação à adição de canais em uma rota.



Fonte: a autora.

Sobre a Figura 10, é possível observar também que o limiar de OSNR ($OSNR_{th}$, linha vermelha) se mantém constante, resultando que a inclusão de novos canais faz com que, em

² Curva obtida para passagem por um *span* de uma conexão de largura 25 GHz, cercada por N conexões também com 25 GHz de largura, distantes apenas por um *slot* e potências fixadas em 0,2 mW, em que, n_1 , n_2 , n_3 e n_4 referem-se a 20, 40, 50 e 60 canais, respectivamente.

um dado momento, nenhuma potência atenda às condições de QoT. Ou seja, a potência de lançamento mínima ($P_{th} = P_{min}$) requerida (referente ao limiar de OSNR) se altera com o estado da rede. Quando canais interferentes são introduzidos, seu valor se aproxima da potência para a OSNR máxima, podendo inclusive não encontrar mais valores possíveis para atender ao limiar (curva amarela, por exemplo). Além disso, é possível observar que, para potências superiores à potência de OSNR máxima, ocorre desperdício de energia de transmissão, visto que é possível obter os respectivos valores de OSNR para potências inferiores à de máxima OSNR, somado ao fato de que potências elevadas geram maiores não linearidades. Assim, é conveniente nomear a potência de OSNR máxima de potência máxima ($P_{m,max}$), a qual deve ser o maior valor de potência atribuído ao sinal (4.7) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$P_{m,max} = \sqrt[3]{\frac{c}{2a}}. \quad (4.7)$$

Então, pode-se concluir que o intervalo de atribuição de potência de transmissão deve ser entre a potência que assegura o limiar de OSNR (potência mínima, P_{min}) e a potência que resulta na máxima OSNR (potência máxima, P_{max}), intervalo esse que varia com o estado da rede pelo crescimento/diminuição do valor da potência mínima requerida. Além disso, observa-se que, o conhecimento do valor da potência máxima como função da topologia, rota e largura de banda das conexões auxilia na questão de projeto de redes, por exemplo, o dimensionamento das potências máximas dos *transponders* e zona de operação dos amplificadores.

4.2 ALGORITMOS DESENVOLVIDOS PARA A ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO

Sabendo da ligação da OSNR dos sinais de uma rede com a QoT e com base no comportamento da OSNR em função da potência de lançamento descrito anteriormente, esta seção apresenta os algoritmos desenvolvidos para a atribuição de potência com a finalidade de diminuir a BP em EONs. Esses algoritmos são comparados no Capítulo 5 com a atribuição de potência constante (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014) e com a densidade espectral de potência do sinal constante (BEYRAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015), em que o termo constante remete a ser igual para todos os canais, além da técnica LOGON (POGGIOLINI et al., 2013b).

A seguir, todas as estratégias de atribuição de potência de lançamento desenvolvidas na pesquisa são apresentadas, as mesmas deverão ser inseridas no bloco de atribuição de potência (PAB – *Power Assignment Block*), no interior do bloco de controle de admissão de chamadas (CAC - *Call Admission Control*), Algoritmo 1 do Apêndice B.

4.2.1 Atribuição de Potência Egoísta

Como observado anteriormente, o valor para a potência de lançamento máxima a ser atribuído a um sinal óptico em uma EON independe do estado da rede, sendo a sua OSNR a máxima possível para qualquer instante de operação da rede.

Nesse sentido, pensando em uma melhor transmissão para o sinal, pode-se atribuir à sua potência de lançamento seu valor máximo (limite superior da atribuição de potência) (4.8) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$P_{EPA} = \sqrt[3]{\frac{c_{rota_r}}{2a_{canal_{ch},rota_r}}}, \quad (4.8)$$

em que, os índices nos termos de c e a remetem ao fato de que o coeficiente c só depende da rota r (número de *spans*, perdas nos *spans*, ganhos dos amplificadores e figuras de ruído dos amplificadores); enquanto o coeficiente a depende da largura de banda do canal ch e da rota r (número de *spans*, perdas nos *spans*, características das fibras e ganhos dos amplificadores).

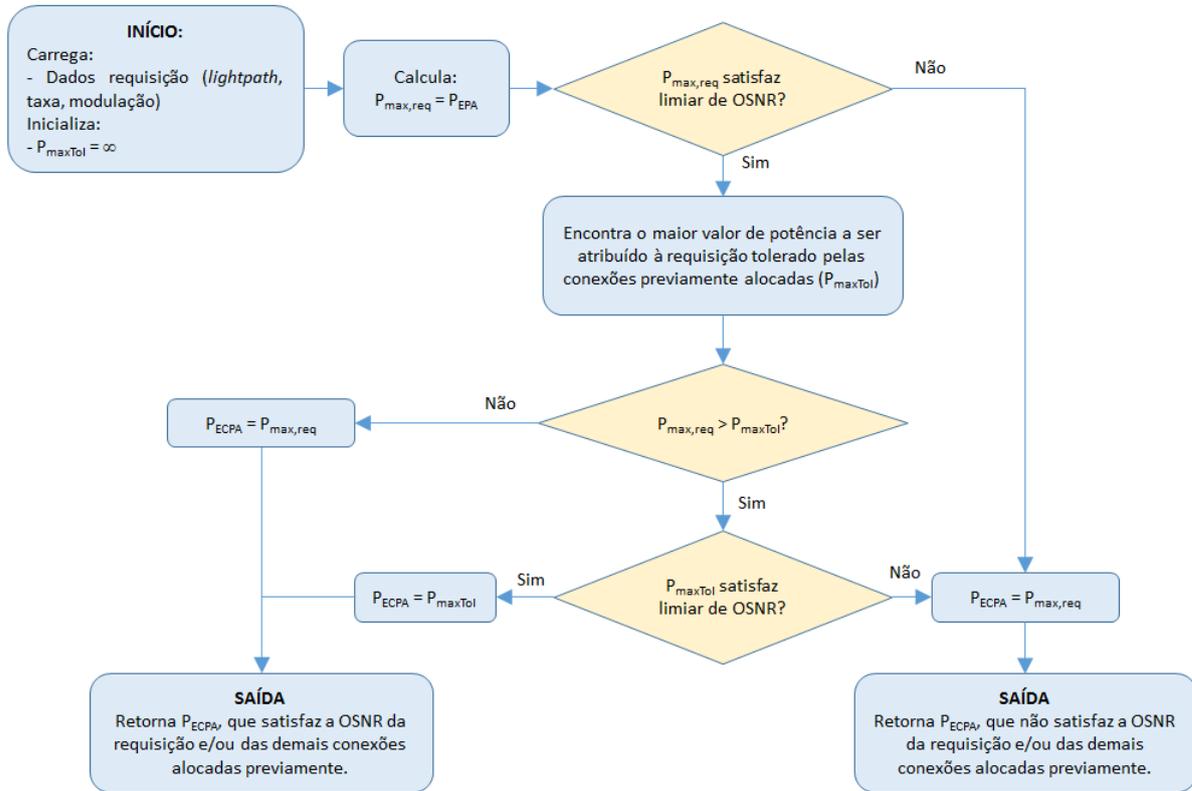
Por não se importar com a QoT dos sinais presentes na rede, sendo atribuída a todas as conexões a potência de OSNR máxima, esse algoritmo foi nomeado de atribuição de potência egoísta (EPA) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022), resultando para esse canal a máxima margem de OSNR possível, independentemente de como isso impacta as conexões atuais, futuras e, conseqüentemente, seu próprio ingresso na rede. Pois, o ingresso na rede da requisição fica condicionado à QoT das demais conexões, caso suportem ou não as altas não linearidades da requisição. Assim, mesmo quando P_{max} não é admissível na rede, ou por ser insuficiente, ou por afetar a QoT dos sinais alocados previamente, seu valor é atribuído, conseqüentemente, neste cenário, a requisição é bloqueada.

4.2.2 Atribuição de Potência Egoísta e Consciente

Uma das limitações do EPA é a de realizar a escolha de potência de lançamento sem observar o estado da rede no instante em que uma requisição solicita ingresso, o que pode ocasionar em alguns casos o bloqueio da própria solicitação por afetar significativamente alguma conexão previamente alocada. Assim, com a intenção de anular esses bloqueios, um algoritmo que atribuisse a máxima potência tolerada possível (P_{maxTol}), observando o estado da rede, para melhor desempenho da requisição foi desenvolvido e nomeado de atribuição de potência egoísta e consciente (ECPA - *Egoistic and Conscious Power Assignment*).

Na estratégia ECPA, descrita no fluxograma da Figura 11 e algoritmo do Apêndice D, são inicialmente carregadas as informações sobre a requisição (*lighpath*, taxa de transmissão de *bits* e formato de modulação). Em seguida é inicializada a potência máxima tolerada pelas conexões ativas com um valor elevado ($P_{maxTol} = \infty$). Então, a potência máxima da requisição é calculada pela relação do EPA (4.8), a qual é testada em relação ao seu limiar de OSNR, sendo denominada $P_{max,req}$. Caso não atenda ao limiar de OSNR da requisição, a estratégia retorna $P_{max,req}$. Caso atenda ao limiar de OSNR da requisição, é obtida a potência máxima tolerada pelas conexões presentes na rota da requisição (P_{maxTol}). Então, o menor valor entre $P_{max,req}$ e P_{maxTol} é o resultado para a potência do ECPA (P_{ECPA}). Entretanto, se P_{maxTol} não atender ao limiar de OSNR, a potência retornada é $P_{max,req}$. O algoritmo é detalhado no Apêndice D).

Figura 11 – Fluxograma do algoritmo ECPA.



Fonte: a autora.

4.2.3 Atribuição de Potência Suficiente

Buscando compensar a limitação de não conhecimento do estado da rede do algoritmo EPA e de analisar o limite inferior de atribuição de potência de lançamento, o algoritmo de atribuição de potência suficiente (EnPA) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022) atribui à potência de lançamento o valor mínimo requerido ($P_{th} = P_{min}$), que varia com o estado da rede. Esse valor mínimo para potência de lançamento é obtido pelo resultado da função de OSNR (4.1) no seu limiar, que em escala linear resulta na relação (4.12)

$$osnr_{th} = \frac{tP_{min}}{aP_{min}^3 + bP_{min} + c}, \quad (4.9)$$

$$(a \cdot osnr_{th})P_{min}^3 + (b \cdot osnr_{th} - t)P_{min} + (c \cdot osnr_{th}) = 0. \quad (4.10)$$

$$P_{min}^3 + \frac{b \cdot osnr_{th} - t}{a \cdot osnr_{th}}P_{min} + \frac{c}{a} = 0. \quad (4.11)$$

$$P_{EnPA}^3 + \frac{b \cdot osnr_{th} - t}{a \cdot osnr_{th}} P_{EnPA} + \frac{c}{a} = 0. \quad (4.12)$$

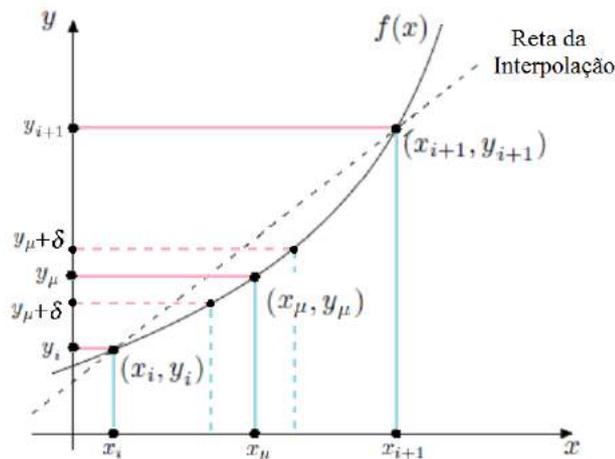
Apesar de existir solução algébrica para equações de terceiro grau, Método de Cardano-Tartaglia (MILIES, 1994), a mesma não é válida para qualquer combinação de coeficientes, ao menos não de forma simples (como apresentado no Apêndice E). Nesse cenário, optou-se por uma solução numérica através da utilização de interpolação linear, sendo um método em que instanciamos um novo conjunto de dados sem grande complexidade computacional (PRACIANO PEREIRA, 2007).

Para a interpolação linear, é necessário conhecer dois pontos da curva de interesse, Pt_i e Pt_{i+1} , para encontrar um terceiro ponto, Pt_μ , cujas coordenadas são definidas por (4.13) (PRACIANO PEREIRA, 2007)

$$\begin{aligned} Pt_i(x, y) &= Pt_i(x_i, y_i), \\ Pt_{i+1}(x, y) &= Pt_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}), \\ Pt_\mu(x, y) &= Pt_\mu(x_\mu, y_\mu), \end{aligned} \quad (4.13)$$

em que, as condições mostradas na Figura 12 de que $x_i < x_\mu < x_{i+1}$ e $y_i < y_\mu < y_{i+1}$ precisam ser satisfeitas para a convergência da interpolação.

Figura 12 – Interpolação linear.



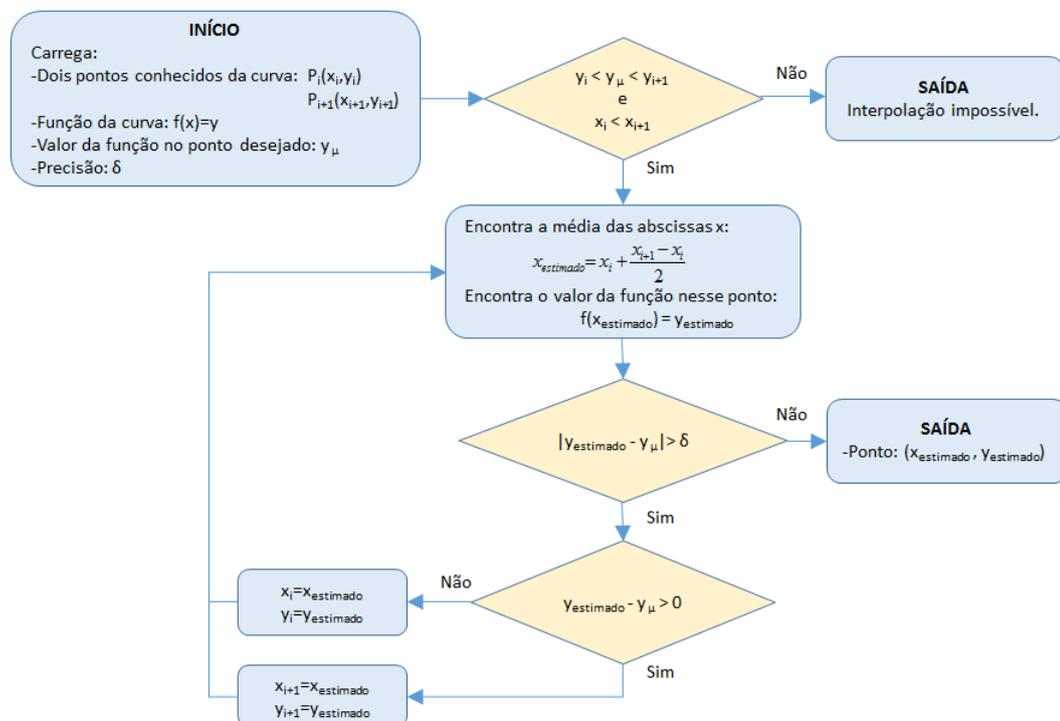
Fonte: Adaptado de PRACIANO PEREIRA (2007).

Além disso, a interpolação precisa de um critério de parada, que no caso é a precisão de $\pm\delta$, ou seja, ao encontrar um $x_{estimado}$ que resulte em um valor de $y_{estimado}$ no intervalo $y_\mu \pm \delta$, as iterações do processo de interpolação são encerradas, e o último valor obtido para $x_{estimado}$ é tido como solução, o qual resulta em um erro (e) menor ou igual à precisão (4.14)

$$e = |y_{\mu} - y_{estimado}| \leq |\delta| \quad (4.14)$$

Assim, o fluxograma para a interpolação linear é dado na Figura 13, em que os dados de entradas são dois pontos conhecidos (pontos base), função da curva, valor da função no ponto desejado e precisão. Caso os pontos de entrada não satisfaçam às condições necessárias da Figura 12, a interpolação linear é dita impossível. Caso os pontos de entrada satisfaçam às condições da Figura 12, os valores das abscissas (x) são atualizados para $x_{estimado}$ pelo ponto médio da reta entre as abscissas dos pontos base (x_i e x_{i+1}), em que é calculado o valor da função ($y_{estimado}$). Caso o valor estimado da função ($y_{estimado}$) atenda à condição de precisão, o algoritmo é finalizado com a solução $x_{estimado}$ e $y_{estimado}$. Caso o valor estimado da função ($y_{estimado}$) não atenda à condição de precisão, um dos pontos bases é atualizado, de forma que o $x_{estimado}$ será uma das abscissas bases, sendo mantida a condição de o ponto desejado continuar entre os dois pontos bases. Os ciclos de obtenção de $x_{estimado}$ continuam até atender ao critério de precisão (parada).

Figura 13 – Fluxograma para interpolação linear.

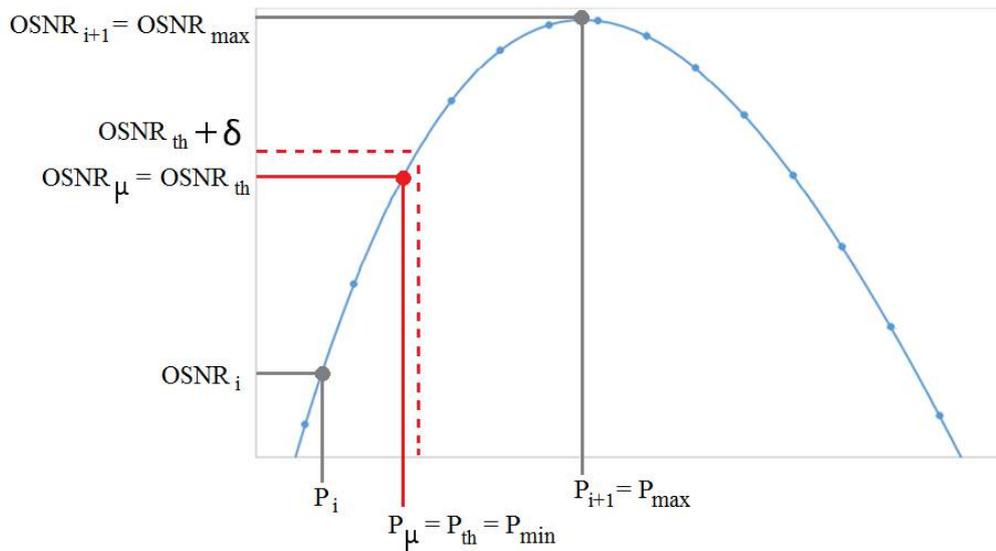


Fonte: a autora.

Para a curva OSNR, é conhecido o ponto de máximo da curva, sendo a potência de lançamento máxima ($P_{i+1} = P_{max}$) e a OSNR máxima ($OSNR_{i+1} = OSNR_{max}$). Para o segundo ponto, é atribuído um valor de potência de lançamento muito baixo (P_i), em que é calculada

a respectiva OSNR ($OSNR_i$). Do terceiro ponto, para o EnPA, conhece-se o valor de OSNR, que é o seu limiar ($OSNR_{th}$), em que se deseja conhecer a potência ($P_{th} = P_{min}$). Esses pontos são apresentados no esboço da função OSNR da Figura 14, em que a precisão poderá apenas ser $+\delta$, pois $-\delta$ cai abaixo do limiar de OSNR, não podendo ser um valor assumido pelo sinal. Observa-se que, quanto menor o valor de precisão, mais próximo o valor encontrado pela interpolação é do valor real, entretanto menor é a margem de OSNR.

Figura 14 – Esboço dos valores para interpolação (encontrando P_{Min}).



Fonte: a autora.

Assim, apesar de o uso de interpolação ser viável computacionalmente (PRACIANO PEREIRA, 2007) para o EnPA, o fluxograma de interpolação precisa de duas adequações:

- Deve-se garantir que o ponto a ser encontrado pela interpolação esteja entre os pontos bases. Conseqüentemente, o valor de OSNR máxima precisa ser maior que o limiar de OSNR, que precisa ser maior que a OSNR de um valor de potência extremamente baixo, garantindo assim a convergência da interpolação. Quando a potência máxima não atende ao limiar de OSNR, a requisição não é passível para o conjunto de solução (rota, posição do espectro, formato de modulação), retornando o algoritmo P_{max} . Essa condição é garantida no primeiro losango do fluxograma de interpolação (Figura 13) da seguinte forma (4.15)

$$OSNR_i < OSNR_{th} < OSNR_{max}. \quad (4.15)$$

- Deve-se garantir que seu resultado (na saída) seja igual ou superior ao limiar para ser possível a atribuição da potência ao sinal. Caso seja encontrado um valor que atenda à precisão, mas que seja inferior ao limiar, a interpolação deve continuar. Nesse sentido, é alterada a condição do segundo losango do fluxograma de interpolação (Figura 13), resultando em (4.16)

$$(| y_{estimado} - y_{\mu} | > \delta) \& (y_{estimado} < y_{\mu}). \quad (4.16)$$

4.2.4 Atribuição de Potência Suficiente Acrescida de Margem

A principal motivação para a proposição dos algoritmos EnPAs acrescidas de margens (EnPA+Mg - EnPA *plus Margin*) apresentados nesta seção surgiu do conhecimento de que, ao se atribuir à nova conexão a potência mínima possível (conforme adotado pelo EnPA), a requisição seria estabelecida com uma margem nula (salvo pela margem em decorrência do erro de interpolação adotado) de OSNR, enquanto as conexões ativas na rede e interferentes com a rota da requisição sofreriam a menor redução possível de OSNR, ficando assim com a maior margem de OSNR possível imediatamente após o estabelecimento da nova conexão. Contrariamente, caso seja atribuída à nova conexão a potência máxima permitida (conforme adotado pelo EPA), a requisição seria estabelecida com a maior margem de OSNR possível, enquanto as conexões ativas na rede e interferentes com a requisição sofreriam a maior redução possível em suas OSNRs. Ambos os casos devem resultar em valores de OSNR significativamente desiguais entre aqueles da nova conexão e os das já estabelecidas na rede, podendo deixar a OSNR de uma ou da outra bastante próxima do limiar. Aumentar a potência progressivamente a partir da mínima permitida para a nova conexão faz sua OSNR sair de uma margem mínima e ganhar folga em margem, e as conexões já estabelecidas na rede perderem possíveis margens. Porém, essa estratégia é capaz de gerar um cenário mais igualitário e propício para o estabelecimento de novas conexões, pois nenhuma das conexões, seja a nova ou as já ativas na rede, tornar-se-ão extremamente críticas por apresentarem margens de OSNR muito baixas ou altas, desde que o aumento progressivo de potência da nova conexão pare seguindo algum critério. Portanto, os algoritmos EnPA+Mg propostos neste trabalho buscam um critério de atribuição de potência que gere um equacionamento entre as margens de OSNR entre as conexões ativas e a nova conexão, resultando para a potência dessa estratégia um

valor que resulte no limiar de OSNR acrescido de uma margem (4.17)

$$P_{EnPA+Mg} = P_{(OSNR_{th}+MgOSNR_{Desejada})}. \quad (4.17)$$

A margem $MgOSNR_{Desejada}$ foi estabelecida de forma que as conexões mantivessem um padrão em um determinado cenário estabelecido. Por exemplo, observando o cenário apenas das conexões ativas na rota da requisição, o padrão de margem adotado poderia ser definido como margem média entre as conexões ativas nesta rota, devendo a requisição ter um valor de potência que resulte em seu limiar de OSNR acrescido dessa margem. Assim, os cenários definidos são: (i) todas as chamadas ativas na rede; (ii) todas as chamadas que compartilham ao menos um enlace com a requisição. Enquanto os padrões de margens são: (i) média aritmética simples; (ii) média aritmética ponderada; (iii) valor mínimo atribuído por pesos iguais; (iv) valor mínimo atribuído por ponderação. Na Tabela 2 são apresentadas todas as combinações de padrões com cenários utilizados com as respectivas nomenclaturas adotadas neste trabalho.

Tabela 2 – Combinações adotadas entre padrões e cenários para o EnPA+Mg

Nomenclatura do Algoritmo	Padrão desejado ($MgOSNR_{Desejada}$)	Cenário desejado
EnPA+MgMedNet	Média das margens de OSNR	rede ^(*)
EnPA+MgMedRota	Média das margens de OSNR	rota ^(**)
EnPA+MgMedPondRota	Média ponderada das margens de OSNR	rota ^(**)
EnPA+MgMinNet	Margem de OSNR mínima	rede ^(*)
EnPA+MgMinRota	Margem de OSNR mínima	rota ^(**)
EnPA+MgMinPondRota	Margem de OSNR mínima ponderada ^(***)	rota ^(**)

(*) Análise de todas as conexões ativas na rede, independentemente se são ou não interferentes com a requisição.

(**) Análise das conexões que compartilham ao menos um enlace com a requisição (conexões interferentes).

(***) A margem escolhida é a que resultar no menor valor de produto entre seu peso e sua margem.

Fonte: a autora.

O motivo da escolha de valores para margem de OSNR a partir do valor mínimo foi uma tentativa de minimizar ao máximo as margens de OSNR na rede e, conseqüentemente, de potência, diminuindo as não linearidades presentes, além de manter a menor das OSNR entre as conexões ativas no cenário de análise (especialmente cenário de rota) a maior possível. Enquanto a média aritmética simples foi escolhida para garantir a mesma vantagem de tolerância a ruído a todas as conexões da rede. Entretanto, como algumas conexões são mais críticas que outras, diante das características de formato de modulação, taxa de transmissão, distân-

cia percorrida e posição no espectro, surgiu a análise de uma média aritmética ponderada, na tentativa de equipotencializar as vantagens sob a tolerância ao ruído para diferentes conexões.

Resumidamente, as estratégias EnPA+Mg propostas nesta seção encontram as margens de OSNR das conexões ativas na rede ou nas conexões que interferem na rota da requisição e, em seguida, escolhem uma formulação (média ou mínimo) para ser aplicada à margem de OSNR da requisição que resulta na $MgOSNR_{R_{Desejada}}$. Assim, partindo da potência mínima para a requisição (P_{min}), são testadas potências até que a margem de OSNR da requisição atinja (ou aproxime o máximo possível) do valor de $MgOSNR_{R_{Desejada}}$. Entretanto, a inclusão da requisição altera as margens de OSNR das conexões ativas e, conseqüentemente, o resultado de $MgOSNR_{R_{Desejada}}$, necessitando a estratégia EnPA+Mg ser um processo iterativo. O algoritmo do EnPA+Mg foi descrito no Apêndice F, cujo fluxograma foi mostrado na Figura 15 e dividido em cinco fases:

- A Fase de inicialização carrega informações sobre o cenário e padrão definidos para toda a simulação, além de informações sobre a requisição (rota, $OSNR_{th}$, P_{max} e $OSNR_{max}$). A $OSNR_{max}$ da requisição é testada em relação ao limiar referente ao formato de modulação adotado ($OSNR_{th}$), podendo atender, seguindo para próxima fase, ou não atender, seguindo para a fase de finalização com a potência $P_{EnPA+Mg}$ igual a P_{max} .
- A Fase de busca inicia com o cálculo de P_{min} para a requisição, depois são encontradas e armazenadas em um vetor ($vetorConect$) as conexões ativas no cenário desejado (rota ou rede). Caso $vetorConect$ seja vazio, segue para a fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual a (4.18)

$$P_{EnPA+Mg} = P_{min} + m \cdot (P_{max} - P_{min}), \quad (4.18)$$

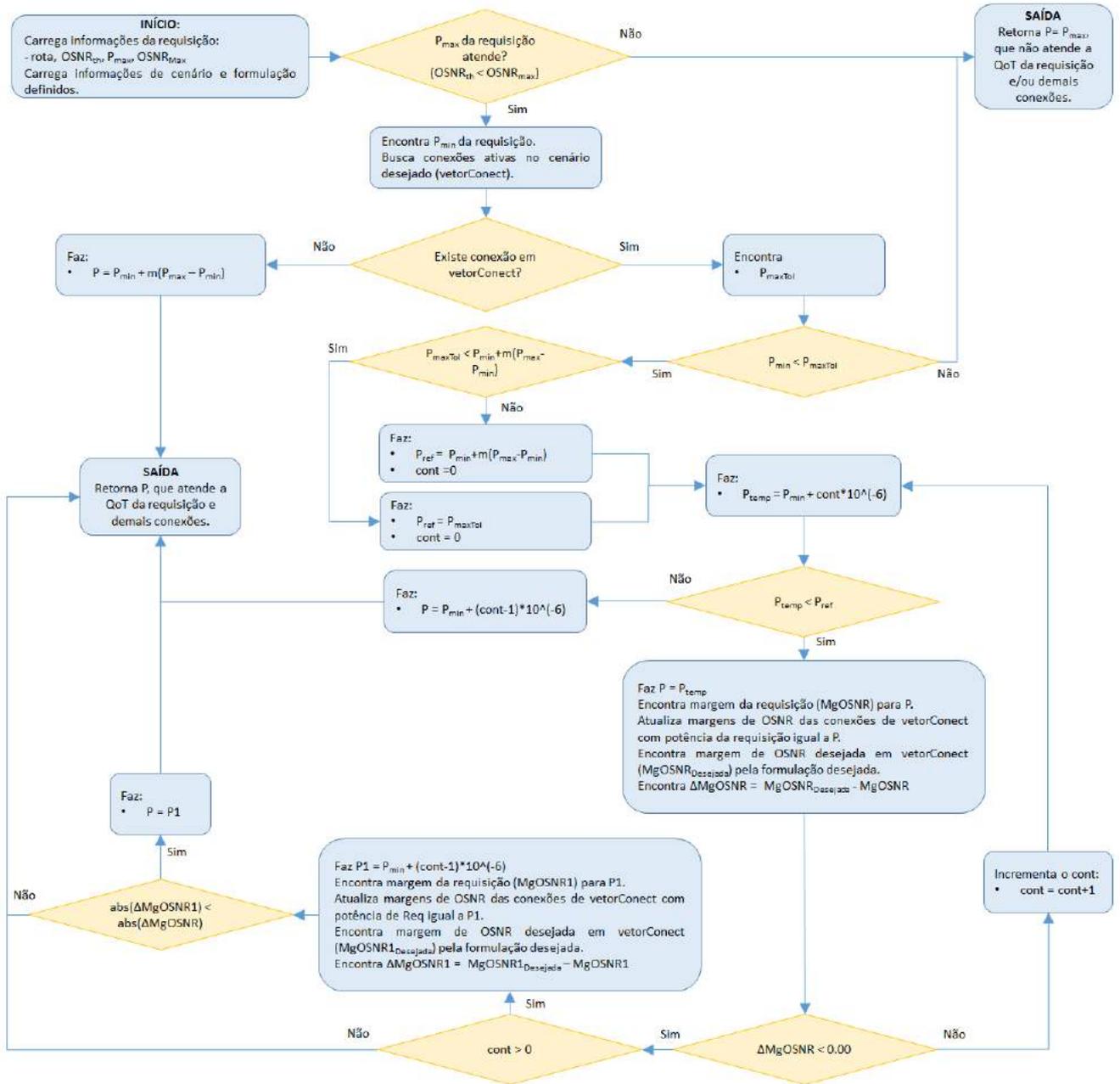
em que m é um valor atribuído à margem que deve ser positivo e no máximo igual a 1 (um). Caso $vetorConect$ não seja vazio, é encontrado P_{maxTol} (similar ao ECPA) das conexões que formam $vetorConect$. Se P_{min} for maior que P_{maxTol} , segue para fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual a P_{max} . Se P_{min} for menor que P_{maxTol} , segue para a próxima fase.

- A Fase de definição de referência é responsável pela obtenção do valor máximo de potência (P_{ref}) a ser atribuído à $P_{EnPA+Mg}$, buscando-se garantir boa margem de OSNR tanto para a nova conexão, quanto para as ativas na rede previamente, adicionalmente,

procura-se evitar o estabelecimento de conexões com potências elevadas. Se P_{maxTol} for menor que a relação (4.18), P_{ref} será igual a P_{maxTol} . Caso contrário, P_{ref} será igual à relação (4.18). Ao final dessa fase, é inicializado um contador inteiro $cont$ ($cont = 0$), utilizado na fase seguinte.

- A Fase de adaptação de potência utiliza a variável P_{temp} , em que serão atribuídos valores a serem testados para $P_{EnPA+Mg}$. Os valores de P_{temp} serão atribuídos crescentemente a partir de P_{min} pela utilização do contador $cont$. Assim, pode ocorrer:
 - P_{temp} ser maior que P_{ref} , seguindo para a fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual ao P_{temp} anteriormente atribuído ($cont - 1$).
 - P_{temp} ser menor que P_{ref} , segue para a análise da diferença entre as margens (desejada e da requisição):
 - * A diferença entre $MgOSNR_{Desejada}$ (mínima ou média) e a margem da requisição com P_{temp} ser menor negativa, sendo então comparada a posição atual ($cont$) com a anterior ($cont - 1$). A posição de P_{temp} (anterior ou atual) que resultar na menor diferença de margem de OSNR (desejada e requisição) será atribuída à $P_{EnPA+Mg}$, seguindo para a fase de finalização.
 - * A diferença entre $MgOSNR_{Desejada}$ (mínima ou média) e a margem da requisição com P_{temp} ser positiva, sendo então incrementado o $cont$ para aumento de P_{temp} e reiniciando a fase de adaptação de potência.
- A Fase de finalização retorna o valor encontrado para a potência $P_{EnPA+Mg}$.

Figura 15 – Fluxograma para o EnPA+Mg, aplicado para os cenários e padrões da Tabela 2.



Fonte: a autora.

Os valores das margens de OSNR ($MgOSNR_{Desejada}$) para as respectivas combinações de cenário e padrão adotados são obtidas de formas distintas:

- Margem média da rede ($MgMedNet$): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas na rede, é então obtida a média aritmética simples dessas margens (4.19)

$$MgOSNR_{MedNet} = \frac{\sum_{n=1}^{|U_N|} MgOSNR_n}{|U_N|}. \quad (4.19)$$

em que, $|U_N|$ remete à cardinalidade do conjunto de conexões ativas na rede (U_N) e $MgOSNR_n$ remete à margem de OSNR da conexão n .

- Margem média da rota (MgMedRota): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas interferentes na rota da requisição, é então obtida a média aritmética simples dessas margens (4.20)

$$MgOSNR_{MedRota} = \frac{\sum_{n=1}^{|U_R|} MgOSNR_n}{|U_R|}. \quad (4.20)$$

em que, $|U_R|$ remete à cardinalidade do conjunto de conexões ativas interferentes na rota da requisição (U_R).

- Margem média ponderada da rota (MgMedPondRota): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas interferentes na rota da requisição, é então obtida a média aritmética ponderada dessas margens (4.21)

$$MgOSNR_{MedPondRota} = \frac{\sum_{n=1}^{|U_R|} peso_n \times MgOSNR_n}{\sum_{n=1}^{|U_R|} peso_n}, \quad (4.21)$$

em que, $peso_n$ remete à ponderação da conexão n , que é definida por uma série de potências em função de suas características de comprimento normalizado da rota (L_N), distância normalizada da frequência central em relação ao centro do espectro (D_N) e formato de modulação normalizado (F_N) (4.22)

$$peso_n = \sum_{n_1=0}^3 \sum_{n_2=0}^3 \sum_{n_3=0}^3 b_{n_1, n_2, n_3} L_N^{n_1} D_N^{n_2} F_N^{n_3}. \quad (4.22)$$

A normalização de uma rota é definida pela razão entre seu comprimento e o comprimento da maior rota possível entre todos os pares de origem-destino da rede para k -Yen. A normalização de uma posição espectral é dada pela razão da distância (módulo) entre a frequência central do canal e a frequência central do espectro pela distância entre a frequência central do espectro e a primeira frequência do espectro. O formato de modulação normalizado é definido pela razão do código referente ao formato de modulação utilizado na conexão pelo maior código de formato de modulação possível, sendo o código de formato de modulação definido por números sequenciais a partir do 1 (um) para o formato de modulação menos eficiente espectralmente, até N_{mod} para a mais eficiente espectralmente, em que N_{mod} é a quantidade de formatos de modulações adotados na

rede. Os coeficientes b_{n_1, n_2, n_3} são definidos em uma fase teste através da meta-heurística PSO, Apêndice G.

- Margem mínima da rede (MgMinNet): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas na rede, é então obtida a menor margem de OSNR entre essas conexões para ser atribuída à $MgOSNR_{MinNet}$.
- Margem mínima da rota (MgMinRota): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas interferentes na rota da requisição, é então obtida a menor margem de OSNR entre essas conexões analisadas para ser atribuída à $MgOSNR_{MinRota}$.
- Margem mínima ponderada da rota (MgMinPondRota): após obter as margens individuais de OSNR de todas as conexões ativas interferentes na rota da requisição e conhecidos os respectivos pesos ($peso_n$) definidos similarmente à MgMedPondRota, é então obtida uma variável auxiliar (4.23)

$$pesoMg_n = peso_n \times MgOSNR_n, \forall n \in U_R. \quad (4.23)$$

A margem desejada $MgOSNR_{MinPondRota}$ terá seu valor igual à margem da conexão n ($MgOSNR_n$) que resultar no menor valor para a variável $pesoMg_n$.

A escolha de série de potências para representar o $peso_n$ deve-se ao fato de que uma forma de cobrir qualquer cenário de mapeamento entre variáveis de entrada e respectivas correlações é a representação por séries de funções (CHOW, 2000). Além disso, estudos para roteamento que utilizam série de potências (PSR - *Power Series Routing*) se mostraram eficientes para o cenário de redes dinâmicas (CHAVES, 2012), sendo então escolhido para obter os pesos das conexões do EnPA+Mg com ponderação nesta pesquisa uma representação por série de potências. Especificamente a série de Taylor foi a escolhida por sua formulação direta e, conseqüentemente, simples em vista de outras séries, como a de Fourier, por exemplo, que utiliza de funções trigonométricas. Portanto, os pesos das conexões foram definidos nesta pesquisa como (4.24)

$$peso_n = \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} b_{n_1, n_2, n_3} L_N^{n_1} D_N^{n_2} F_N^{n_3}, \quad (4.24)$$

Entretanto, a série de potências adotada (4.24) tem elevada complexidade computacional, devido à quantidade infinita de coeficientes b_i a serem determinados. Nessa conjuntura, apesar

de a representação incluir qualquer cenário de correlação possível entre as variáveis de entrada, a mesma não é viável computacionalmente. Buscando a viabilidade computacional do modelo e sabendo que a Série de Taylor tende a convergir ao valor da função com um certo número de termos, optou-se por limitar o número de coeficientes b , passando a dimensão do vetor que o representa a $Dim = (n + 1) \times (n + 1) \times (n + 1) = 4 \times 4 \times 4$ e a relação para os pesos das conexões a (4.22).

4.2.5 Atribuição de Potência Adaptativa

Tanto o EPA (incluso o ECPA) quanto o EnPA atribuem potências sem considerar (supor) futuros efeitos na rede. O EPA pode comprometer a entrada de outros canais e seu próprio ingresso em função de suas altas não linearidades provenientes dos altos valores de potência, que afetam tanto as futuras requisições quanto os canais previamente alocados. O ECPA elimina o problema do ingresso da própria requisição na rede por valores de potências superiores ao tolerado pelas conexões ativas, por observar o valor máximo tolerado pelos canais previamente alocados, porém, para requisições futuras, o problema das altas não linearidades permanece. Enquanto o EnPA, apesar de minimizar o consumo energético e, conseqüentemente, as não linearidades, pode comprometer a entrada de canais futuros em decorrência dos baixos valores de potência, pois não possui reserva de margem de OSNR para qualquer influência que ocorra em instantes futuros à alocação, por menor que seja. Enquanto o EnPA+Mg, apesar de suprir as deficiências das estratégias de máxima e de mínima potência, limita-se a seguir um padrão de margem estabelecido na rede durante instantes passados, que não necessariamente é o melhor, por exemplo, caso a margem adotada (média ou mínima) caia para um valor extremamente baixo, o EnPA+Mg seguirá com o valor baixo.

Nesse contexto, foi desenvolvido um algoritmo capaz de observar o instante atual da rede e se precaver para instantes futuros da rede, denominado atribuição de potência adaptativa (APA) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022). O mesmo é baseado no fato de que um valor de potência inferior à potência máxima pode atender à QoT com uma menor influência de não linearidades sobre os demais canais, desde que esse valor seja superior à potência mínima requerida naquele instante de atribuição. Ou seja, o valor de potência deverá estar entre as potências mínima e máxima, conseqüentemente, é a potência mínima acrescida de uma *margem* de potência que gera uma margem de OSNR para suprir futuras interferências (4.25) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS,

2022)

$$P_{APA} = P_{min} + margem. \quad (4.25)$$

Diferentemente do EnPA+Mg, o APA não analisa as margens de OSNR dos canais ativos do cenário considerado (rede ou rota) diretamente para a atribuição de potência, mas procura identificar valores adequados para uma margem de potência. Assim, para garantir que a OSNR do canal fique entre o limiar e o valor máximo, a *margem* de potência é definida como um percentual da diferença entre os valores de potência de lançamento mínimo e máximo (4.26) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$margem = factor \cdot (P_{max} - P_{min}), \quad (4.26)$$

o que resulta para a potência de lançamento do APA a relação (4.27) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$P_{APA} = P_{min} + factor \cdot (P_{max} - P_{min}), \quad (4.27)$$

em que *factor* é o percentual que, quando zero, resulta na atribuição de potência mínima, quando um, resulta na atribuição de potência máxima, (4.28) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$0 \leq factor \leq 1. \quad (4.28)$$

Para a definição do *factor*, são analisadas as margens de potência necessárias para dois cenários de simulação para uma requisição com características fixas denominadas de *Ca* para rota, posição do espectro, taxa de transmissão de *bits*, formato de modulação e, conseqüentemente, mesmo $P_{m,max}$, que chega a uma rede *R* com cargas de simulação distintas Ω_1 e Ω_2 , com $\Omega_1 < \Omega_2$:

- Cenário 1: uma requisição com características *Ca* chega à rede *R* com carga de simulação relativamente baixa (Ω_1) e passados *T* segundos.
- Cenário 2: uma requisição com características *Ca* chega à rede *R* com carga de simulação relativamente alta (Ω_2) e passados *T* segundos.

Para o Cenário 1, visto que a carga é menor, a potência de lançamento mínima P_{min} exigida tende a ser menor que para o Cenário 2 ($P_{min1} < P_{min2}$) em um dado instante T . Assim, para um mesmo valor de $factor$, tem-se que a *margem* de potência do Cenário 1 tende a ser maior que a do Cenário 2 (4.29)

$$factor \cdot (P_{max} - P_{min1}) > factor \cdot (P_{max} - P_{min2}). \quad (4.29)$$

Consequentemente, para um mesmo valor de $factor$, a margem de OSNR do Cenário 1 é maior que a do Cenário 2. Entretanto, a requisição do Cenário 2, se for atendida, provavelmente deverá estar sujeita a suportar uma carga maior de futuras conexões na rede, visto que se espera no Cenário 2 um número maior de interferências. Consequentemente, a margem de OSNR do Cenário 2 deve ser maior ou, ao menos, equivalente à do Cenário 1, mas não elevada ao ponto de gerar não linearidades que se sobressaiam à vantagem de possuir margem de OSNR, como no Algoritmo EPA. Enquanto o Cenário 1 não requer uma margem de OSNR grande, em vista de sua baixa carga na rede, o que possibilita uma margem de potência menor, o que gera não linearidades de menor intensidade. Contudo, essa margem de OSNR não pode ser tão baixa a ponto que o limiar de OSNR das conexões ativas na rede seja facilmente violado, o que dificulta o atendimento das chamadas, como descrito no Algoritmo EnPA. Nesse ponto, em vista das análises desses cenários e na tentativa de equipotencializar as margens de potência independentemente do cenário de carga da rede, o $factor$ foi definido como uma função da carga da rede (4.30) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$factor = \tau \cdot \Omega_{rede}, \quad (4.30)$$

que, pela limitação de $factor$ em (4.28), resulta para τ (4.31) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$0 \leq \tau \leq \frac{1}{\Omega_{rede}}. \quad (4.31)$$

A relação para $factor$ (4.30) pode ser substituída na relação para potência APA (4.27), resultando na relação para potência adaptativa (4.32) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022)

$$P_{APA} = P_{min} + \tau \cdot \Omega_{rede} \cdot (P_{max} - P_{min}). \quad (4.32)$$

Os valores de P_{max} e P_{min} podem ser obtidos pelas formas descritas para os algoritmos EPA e EnPA, respectivamente. Observa-se que, quando P_{max} não atender ao limiar de OSNR, não existirá valor para P_{APA} que atenda ao cenário de rota, posição do espectro e/ou formato de modulação.

Para o valor de τ , sabe-se que um valor de τ elevado resulta em potências de lançamento e margens de OSNR maiores, podendo comprometer a rede com altas não linearidades. Enquanto um valor de τ baixo, pode não garantir potência de lançamento e, conseqüentemente, margem de OSNR suficiente aos canais. Nesse sentido, o valor para τ pode ser obtido por varredura em um cenário teste (rede e cargas definidas) baseado no domínio de *factor* (4.28), buscando um ponto que resulte na menor probabilidade de bloqueio, que fica entre *margem* de potência insuficiente para futuras conexões e *margem* de potência elevada que incorre em altas não linearidades.

Observa-se que, apesar de ser possível desconsiderar o valor da carga da rede (Ω_{rede}) na relação do APA (4.32), pois o resultado para *factor* (4.30) poderia ser obtido de forma direta através de uma varredura em seu domínio, a utilização de uma constante única (τ), independentemente do cenário de carga da rede, possibilita a extensão do problema para cargas distintas sem a necessidade de nova varredura, sobretudo para regiões próximas aos limites de cargas analisados. Por exemplo, encontra-se o valor para τ por varredura no intervalo de 60 a 130 erlang, para uma carga fora do intervalo analisado, por exemplo, 140 erlang, não seria necessária uma nova varredura, o problema seria estendido de forma direta com o valor de τ para demais cenários de cargas.

A seguir, são apresentadas as variações do algoritmo APA, partindo da definição em (4.32). Essas variações resultam em: (i) APA com memória e ajustes (APAmem - *APA with Memory and Adjustments*); (ii) APA com memória inicializada e ajustes (APAmemPre - *APA with Previous Memory and Adjustments*); (iii) APA sem memória e com ajustes (APAnoMem); e (iv) APA consciente sem memória e sem ajustes (APACnoMem - *APA Conscious with no Memory and no Adjustments*).

4.2.5.1 APA com Memória e Ajustes

Além da atribuição direta pela relação $P_{min} + \textit{margem}$ (4.32), um critério de memória através de um banco de dados (DB - *Database*) surgiu diante de outra característica para as potências de lançamento atribuídas no APA. Conforme a rede sai do estado transiente e entra

no estado estacionário, a potência de lançamento mínima (P_{min}) para uma dada requisição com dadas características de *lightpath* (rota e posição no espectro) e sinal (taxa de transmissão e formato de modulação) tende a ser a mesma, conseqüentemente o valor obtido para P_{APA} (4.32) também tende a ser constante, já que P_{max} é constante.

Conseqüentemente, pode-se utilizar o conhecimento adquirido para a potência de lançamento de outras chamadas previamente alocadas na rede para futuras requisições, passando o APA a observar o estado passado da rede (através do DB), além do presente e considerar margem de OSNR para o futuro.

- *Lightpaths*: par nó origem-destino, conjunto de enlaces que compõem a rota (número da rota correspondente do k -Yen) e frequência central.
- Sinal: taxa de transmissão de *bits* de transmissão e formato de modulação (conseqüentemente largura de banda).
- Potência: potência atribuída ao *lightpath* com respectiva taxa de transmissão de *bits* e formato de modulação no instante de armazenamento no DB ($P_{current_{DB}}$).

Nesse novo algoritmo (APAmem), o DB inicia vazio e, conforme novas conexões chegam à rede e são atendidas, o DB vai se formando. Inicialmente, como a rede se encontra (mais) vazia (estado transiente), os valores armazenados em $P_{current_{DB}}$ podem ser instáveis, devido à grande variação de P_{min} e, conseqüentemente, da *margem* de potência. Nesse sentido, quando uma requisição busca informações do DB em um instante futuro (possivelmente no estado estacionário), esse valor de potência poderá não ser passível de ser utilizado, a menos que o mesmo sofra ajustes. Assim, pensando no dinamismo da rede, a informação sobre a potência atribuída ao sinal seria mutável no DB, a qual tende a se estabilizar (não mudar) conforme a rede deixa o estado transiente e entra no estado estacionário.

Apesar de a atribuição inicial do APA pela sua relação (4.32) observar as condições mínimas para a requisição entrar na rede (P_{min}) e considerar *margem* de potência que gera margem de OSNR para futuras interferências, o valor de potência atribuído à requisição pelo APAmem independe das margens de OSNR das demais chamadas da rede no instante da atribuição, podendo a *margem* de potência da requisição ser maior que a suportada pelas conexões ativas, conseqüentemente a requisição não seria aceita. Sob o aspecto de margem de OSNR para as demais chamadas da rede, foram incluídos ajustes de potência de lançamento, não

apenas para informações colhidas do DB, mas também para uma atribuição direta pela relação (4.32).

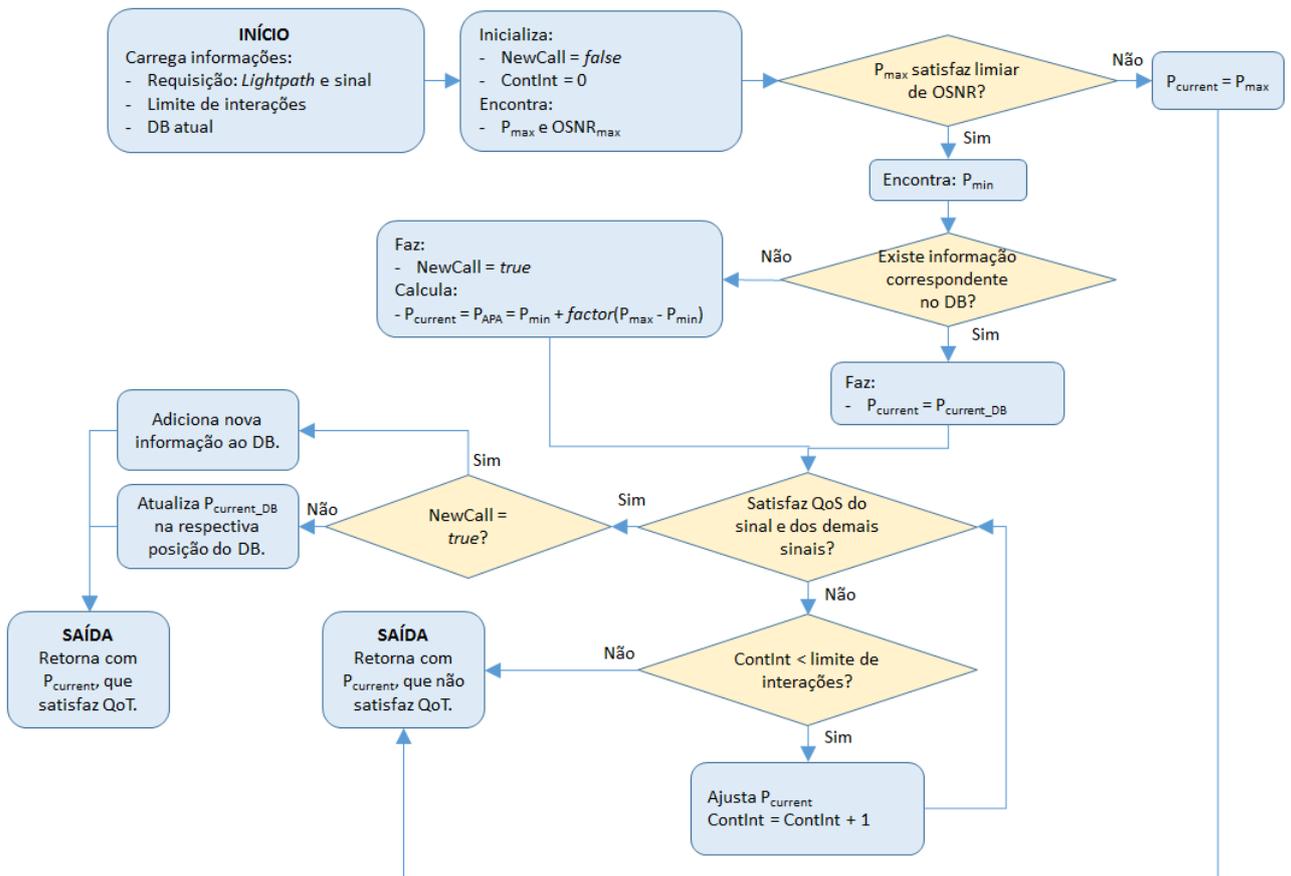
Em vista que o algoritmo APA com memória e com ajustes não é uma atribuição de potência de lançamento de forma direta, seu algoritmo é dado no Apêndice H, cujo fluxograma é mostrado na Figura 16 e explicação pode ser dividida em quatro fases:

- A primeira fase é denominada fase de inicialização do algoritmo. Nessa fase, são obtidas as informações da requisição (*lightpath* e sinal), além do DB e do número de ajustes máximo (*LimInt*). Então, são inicializadas variáveis auxiliares: uma booleana com *false* (*NewCall = false*), que remete a existência de posição do DB com mesmas características de *lightpath* e sinal da requisição, alterada para *true* caso não exista no DB; uma inteira com zero (*ContInt = 0*), que limita o número de ajustes a ser tentado para a potência, evitando entrar em um *loop* muito longo. Ao final da fase de inicialização, são obtidos os valores de P_{max} e $OSNR_{max}$, que são testados em relação ao limiar de OSNR. Caso P_{max} atenda ao limiar, o algoritmo segue para a próxima fase. Caso P_{max} não atenda ao limiar, o algoritmo atribui P_{max} à $P_{current}$ e segue para a fase de finalização.
- A segunda fase é denominada fase de inicialização de Potência. Nessa fase é inicialmente obtido o valor de P_{min} e encontrado valor de potência no DB com características iguais às da requisição (*lightpath* e sinal). Caso exista no DB, é atribuída à potência $P_{current}$ o valor da última potência $P_{current_{DB}}$ armazenado na referente posição do DB. Caso não exista no DB, o marcador de nova chamada no DB *NewCall* se torna *true* sendo atribuído à $P_{current}$ o valor de P_{min} acrescido de uma margem (4.32).
- A terceira fase é denominada fase de testes. Nessa fase, com a atribuição de potência inicial para $P_{current}$, são analisadas as QoS da requisição e dos canais previamente alocados na rede. Se $P_{current}$ não atender à QoS da requisição ou as QoS dos canais alocados, a potência poderá ser ajustada para um valor maior ou menor, desde que *ContInt* não passe do número máximo de tentativas estipulado nem o valor de $P_{current}$ ultrapasse os limites de P_{min} e P_{max} . O algoritmo é finalizado quando: (i) não for mais passível de ajustes, seguindo para fase de finalização, com QoS não atendido; (ii) um ajuste ultrapasse um dos limites (P_{min} e P_{max}), seguindo para fase de finalização, com QoS não atendido; e (iii) atender à QoS da requisição e às QoS dos canais alocados, e, a

depende do marcador *NewCall*, o DB ou é atualizado com novo valor de $P_{current}$ para a respectiva posição ($NewCall = false$) ou sofre uma adição de uma nova posição com as informações da requisição ($NewCall = true$), seguindo para a fase de finalização.

- A quarta fase é denominada de fase de finalização, em que o algoritmo retorna o valor de $P_{Current}$.

Figura 16 – Fluxograma do algoritmo APAmem.



Fonte: a autora.

A fase de testes é melhor detalhada no Apêndice H, em que o ajuste para a potência poderá se dar por: (i) aumento até seu valor de P_{max} , caso não atenda à QoS da própria requisição; e (ii) diminuição até seu limiar de OSNR, caso não atenda à QoS de ao menos uma conexão previamente alocada. O valor estabelecido neste trabalho para o ajuste foi de $\pm 1\%$ sobre o valor atual da potência. Enquanto o limite no número de ajustes por requisição foi definido de forma que a simulação não ficasse demasiadamente longa, atribuído o limite de seis (06) ajustes por requisição. Observa-se que, o número de ajustes para valores de potência tende a diminuir à medida que seus dados passam a ter informações do estado estacionário.

4.2.5.2 APA com Memória Inicializada e Ajustes

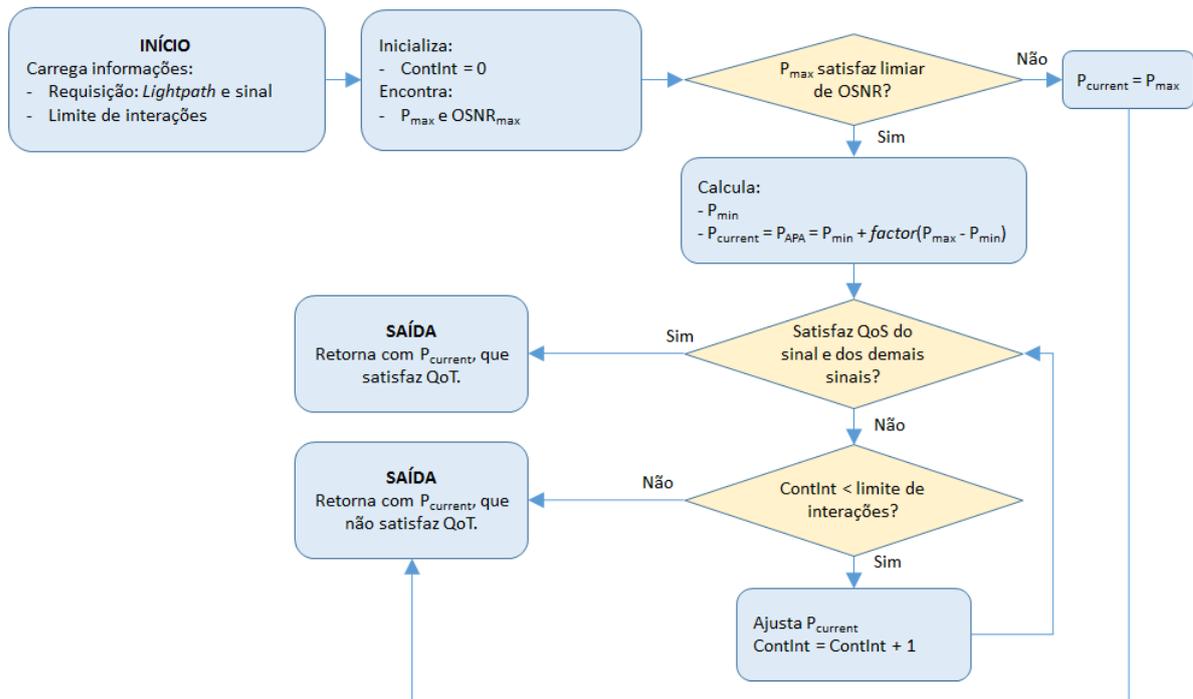
Para o algoritmo APA com memória inicializada e com ajustes (APAmemPre), o DB possui informações previamente obtidas de uma simulação inicial, conseqüentemente, possui valores de potência de lançamento ($P_{current_{DB}}$) mais estáveis provenientes do estado estacionário, que são aplicados diretamente no estado transitório. Nesse sentido, o algoritmo APAmemPre é resultado de duas simulações seguidas, sendo a primeira uma fase treinamento com um número de requisições elevado para formação inicial do DB e a segunda a fase válida para obtenção de seus resultados, diferenciando apenas do APAmem pela não inicialização vazia do DB.

Duas variações serão realizadas para o APAmemPre, uma denominada de APAmemPre curta (APAmemPreShort - APAmemPre *Short*) e outra de APAmemPre longa (APAmemPre-Long - APAmemPre *Long*). As variações *Short* e *Long* remetem ao quão elevado é o número de requisições e bloqueios mínimos utilizados para formação do DB na fase de treinamento.

4.2.5.3 APA sem Memória e com Ajustes

O tempo de simulação (pela busca e/ou acesso à memória) e a possível limitação de memória pelo emprego do DB no APAmem e APAmemPre pode limitar sua utilização. Assim, com base nessas limitações e objetivando uma comparação equiparável, que também observasse as demais conexões da rede, foi desenvolvido o APA sem memória e com ajustes (APAnoMem) (VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022). O APAnoMem, cujo fluxograma é dado na Figura 17, parte sempre da atribuição direta da equação (4.32), não utilizando de DB para atribuição inicial, em seguida são analisadas os limiares de OSNR das conexões ativas. Em um primeiro instante, poderá ser necessário a diminuição do valor de potência, nos ajustes subsequentes, poderá ser necessário aumentar. De toda forma, os ajustes seguem a mesma ideia dos ajustes do APAmem. No Apêndice I, são detalhadas as adaptações a partir do APA com memória e com ajustes (Algoritmo H e Figura 16), bem como o funcionamento dessa nova configuração (APAnoMem), em que a fase de busca, atualização e adição de informação ao DB é suprimida.

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo APAnoMem.



Fonte: a autora.

Observa-se que, os valores provenientes do DB têm maiores probabilidades de gerar um ponto de partida para a potência de lançamento que tende a ser mais próximo do adequado para o estado estacionário. Quando se opta em não utilizar memória (DB), os valores de potências partem de informações apenas sobre a requisição (P_{min} e P_{max}), consequentemente com maior probabilidade de ser mais distante do ponto ideal de operação. Entretanto, a não utilização de DB diminui as possíveis limitações de tempo e, sobretudo, memória (não armazenamento de dados).

4.2.5.4 APA sem Memória e sem Ajustes Consciente

Como o APAnoMem não observa o limite tolerado de potência pelas conexões ativas, nem considera experiências passadas pela ausência do DB, foi desenvolvido um APA sem memória e sem ajustes, similar ao APAnoMem, entretanto consciente das conexões ativas (APACnoMem).

No APACnoMem, o fluxograma e o algoritmo seguem o APAnoMem (Figura 17 e Algoritmo 6), entretanto não há necessidade de ajustes, visto que a equação de potência atribuída não utiliza o valor de potência máxima da requisição (como no EPA), mas o valor máximo de potência possível naquele instante (como no ECPA). Consequentemente, caso $P_{min} < P_{maxTol}$, o algoritmo resulta em um valor passível de ser aceito na rede (entre P_{min} e P_{maxTol}) e definido

por (4.33)

$$P_{APACnoMem} = P_{min} + \tau \cdot \Omega_{rede} \cdot (P_{ECPA} - P_{min}). \quad (4.33)$$

4.2.6 Atribuição de Potência Evolutiva Estática

Conforme os estudos apresentados na Seção 3.3, a atribuição de potência de lançamento para um sinal vem sendo relacionada na maioria dos estudos à posição espectral do sinal (SENA, 2018; DURAND; ABRAO, 2016; SANTOS; ABRAO, 2020a; SANTOS; ABRAO, 2020b; PAVEL, 2004; PAVEL, 2006; IVES; SAVORY, 2013; IVES; BAYVEL; SAVORY, 2014; IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015; IVES, 2015). Entretanto, há estudos que se baseiam na taxa de transmissão (ROBERTS; KAHN, 2017) e na combinação de rota e formato de modulação (RABBANI et al., 2019). Nesse contexto, um algoritmo de atribuição de potência que considera algumas das características mencionadas, como rota e posição espectral, foi desenvolvido em formato de série de potências. O algoritmo se baseia no fato de que, quanto mais longa a rota e quanto menor a distância entre a frequência central do canal ao centro do espectro, maiores as penalidades sofridas.

Assim, pelas vantagens listadas na Subseção 4.2.4 referente ao algoritmo EnPA+Mg, foi utilizada uma série de potências, especificamente a série de Taylor, para o problema de atribuição de potência por série de potência (PAPS - *Power Assignment by Power Series*) neste trabalho. Portanto, a potência de lançamento foi definida neste algoritmo como (4.34)

$$P_{EvPA-S} = \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} b_{n_1, n_2} L_N^{n_1} D_N^{n_2}, \quad (4.34)$$

em que L_N é o comprimento normalizado da rota atribuída à requisição (distância percorrida); D_N é a distância normalizada da frequência central da faixa de espectro atribuída à requisição até o centro do domínio do espectro; b_{n_1, n_2} são os coeficientes que relacionam essas duas grandezas (distância percorrida e posição espectral).

A normalização para a rota se dá pela relação entre o comprimento da rota pelo comprimento da rota mais longa entre todos os pares de nós origem-destino da rede para k -Yen. A normalização da distância espectral se dá pela relação entre o módulo da distância da frequência central da faixa de espectro atribuída à requisição ao centro do espectro (numerador), pela distância da posição espectral máxima possível, que vai do centro do espectro até a frequência central do primeiro *slot* (denominador).

Similarmente à série de potências utilizada no EnPA+Mg, o modelo de atribuição de potência que relaciona distância percorrida e posição espectral (4.34) tem elevada complexidade computacional, devido à quantidade infinita de coeficientes b a serem determinados. Nessa conjuntura, apesar de a representação da atribuição de potência (4.34) incluir qualquer cenário de correlação possível entre distância percorrida e posição espectral, a mesma não é viável computacionalmente. Buscando a viabilidade computacional do modelo e sabendo que a Série de Taylor tende a convergir ao valor da função com um certo número de termos, optou-se por limitar o número de coeficientes b , passando a dimensão do vetor que o representa a $Dim = (n + 1) \times (n + 1)$ e a relação para a atribuição de potência a (4.35)

$$P_{EvPA-S} = \sum_{n_1=0}^n \sum_{n_2=0}^n b_{n_1, n_2} L_N^{n_1} D_N^{n_2}. \quad (4.35)$$

Para encontrar os coeficientes da série de potências da função de atribuição de potência (4.35), foi optado pela meta-heurística PSO (Apêndice G), que é uma técnica evolutiva baseada no comportamento biológico de indivíduos da natureza e pode ser empregada em cenários com um grande conjunto de variáveis contínuas (CHAVES, 2012). Por utilizar uma técnica evolutiva e parâmetros que independem do estado da rede para determinação direta da potência de lançamento, esse algoritmo foi nomeado de atribuição de potência evolutiva estática (EvPA-S - *Static Evolutive Power Assignment*).

Observa-se que, para o algoritmo EvPA-S, pode ocorrer de os coeficientes (b_{n_1, n_2}) resultarem em valores negativos para a potência (4.35). Quando isso ocorrer, o cenário de formato de modulação, rota e posição espectral analisado para uma requisição não é passível de ser aceito, retornando um valor abaixo da potência mínima (P_{min}), o que faz com que as partículas do PSO aprendam que posições que geram potências negativas não são boas.

4.2.7 Atribuição de Potência Evolutiva Dinâmica

Como descrito no EvPA-S, um valor de potência mais alto é requerido para rotas mais longas e canais mais próximos ao centro do espectro, além do que, no APA, foi discutido que, para cargas mais altas, ou seja, uma maior ocupação na rede, uma margem de potência maior é requerida. Assim, agrupando essas características (distância percorrida, posição espectral e ocupação) foi desenvolvida uma estratégia de atribuição de potência que combina características do APA e do EvPA-S, denominada atribuição de potência evolutiva dinâmica (EvPA-D

- *Dynamic Evolutive Power Assignment*), em que a parte dinâmica remete à ocupação e à potência mínima (P_{min}), que compõem a formulação e variam com o estado da rede.

Como apresentado na Subsecção 4.2.5, o termo *factor* da atribuição de potência adaptativa (4.27) é obtido pelo produto da carga da rede pelo termo τ (obtido por varredura dentro de um determinado domínio), o que resulta na equação (4.32) para a potência. Além disso, o DB do APA com memória também traz informações de *lightpath* (distância percorrida e posição espectral), as quais são incorporadas com a ocupação para a determinação de um *factor* mais robusto na nova estratégia de atribuição de potência, EvPA-D, resultando na representação por série de potências para o *factor_{dynamic}* (4.36)

$$factor_{dynamic} = \sum_{n_1=0}^n \sum_{n_2=0}^n \sum_{n_3=0}^n b_{n_1, n_2, n_3} L_N^{n_1} D_N^{n_2} O_N^{n_3}, \quad (4.36)$$

em que: b_{n_1, n_2, n_3} designam os coeficientes determinados pela meta-heurística PSO (Apêndice G); enquanto L_N e D_N foram apresentados no EvPA-S e são, respectivamente, o comprimento da rota normalizado e a distância espectral ao centro do espectro normalizada. O termo O_N é a ocupação normalizada, atribuída neste trabalho à PSD normalizada, definida pela relação entre a ocupação (PSD) média por enlace da rota pela ocupação (PSD) máxima possível em um enlace (4.37)

$$O_N = \frac{\sum_{e \in r} O_e}{N_l}, \quad (4.37)$$

em que N_l é o número de enlaces que formam a rota; O_e é a ocupação (PSD) de um determinado enlace que compõe a rota; e $O_{max,e}$ é obtido considerando o pior cenário possível para um enlace, em que todo espectro é preenchido por canais estreitos e com potências elevadas, que maximizam a PSD.

Para este trabalho, uma potência de 1 mW é considerada um valor elevado (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022). Pela limitação do modelo utilizado, o canal mais estreito possui largura de banda de 25 GHz, 2 (dois) *slots*. Considerando uma banda de guarda (GB - *Guard Band*³) de largura igual a 1 (um) *slot*, tem-se para um espectro com 320 (trezentos e vinte) *slots* (domínio espectral considerado neste trabalho) um total de 106 (cento e seis) canais de 25 GHz. Assim, a ocupação máxima por enlace ($O_{max,e}$) é igual a (4.38)

³ Banda de guarda remete a um espaçamento de espectro entre canais (ou supercanais) adjacentes para diminuição das interferências (LOBATO, 2019).

$$O_{max,e} = 106 \times \left(\frac{1 \text{ mW}}{25 \text{ GHz}} \right) = 4,24 \text{ mW/GHz}. \quad (4.38)$$

Apesar de o $factor_{dynamic}$ ser dinâmico e diferente do $factor$ do APA, a relação para a atribuição de potência do EvPA-D permanece similar àquela empregada para a potência APA (4.32), ou seja, (4.39)

$$P_{EvPA-D} = P_{min} + factor_{dynamic} \cdot (P_{max} - P_{min}). \quad (4.39)$$

Observa-se que, a condição de contorno empregada no PSO para o EvPA-S deve ser adaptada para o EvPA-D. Coeficientes que resultem um $factor_{dynamic}$ negativo resultaria em uma potência menor que a potência mínima requerida, enquanto um $factor_{dynamic}$ maior que 1 (um), resultaria em um valor maior que a potência máxima. Assim, quando $factor_{dynamic}$ for negativo, o valor de potência a ser atribuído é o da potência mínima, e quando $factor_{dynamic}$ for maior que 1 (um) o valor a ser atribuído é o da potência máxima.

4.2.8 Atribuição de Potência Evolutiva Dinâmica Consciente

Analogamente ao APACnoMem, foi adaptada a equação (4.39) do EvPA-D para garantir que a potência atribuída à requisição fosse ciente dos limites da rede no instante da atribuição, surgindo o EvPA-D consciente (EvPA-D-C - EvPA-D *Conscious*). Assim, o EvPA-D-C é análogo ao EvPA-D, utilizando inclusive o PSO (Apêndice G) para a determinação do $factor_{dynamic2}$, resultando para sua relação (4.40)

$$P_{EVPA-D-C} = P_{min} + factor_{dynamic2} \cdot (P_{ECPA} - P_{min}). \quad (4.40)$$

Observa-se que, mesmo que os coeficientes resultem em valores negativos ou maiores que um, a condição de contorno utilizada (coeficiente negativo, P_{min} , coeficiente maior que um, P_{max}) garante valores de potência que atendem à QoT, sendo a requisição bloqueada quando: (i) não há vazios no espectro suficientemente grande para a requisição; (ii) P_{max} não atende ao limiar de OSNR da requisição; (iii) P_{min} é maior que P_{ECPA} (afeta a QoT das demais conexões).

4.3 ALGORITMOS BASES PARA A ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO

Baseado no apresentado no estado da arte para atribuição de potência de lançamento (Subseção 3.3.1), a maioria dos trabalhos utiliza técnicas diretas para o problema de atribuição de potência ou técnicas com complexidade computacional inviável para o cenário de tráfego dinâmico com um número de requisições elevado.

A inviabilidade de algumas das técnicas de atribuição de potência de lançamento para o cenário dinâmico com um número de requisições elevado, como em SANTOS; ABRAO (2020b, 2020a), baseia-se no fato de que a compensação da potência de lançamento dos canais em decorrência de um certo dinamismo na rede por flutuações (envelhecimento dos equipamentos em tempos espaçados e/ou esporádicas quedas de conexões) é realizada com uma estratégia evolutiva de otimização, que possui grande complexidade computacional para realização a cada alteração na rede, ou seja, para o cenário desenvolvido nesta pesquisa, a cada instante.

Assim, para o cenário dinâmico com elevado número de requisições, as escolhas mais comuns são a atribuição de potência de lançamento constante (CPA - *Constant Power Assignment*) (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014) e a atribuição de densidade espectral de potência constante (CPSDA - *Constant Power Spectral Density Assignment*) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015). Na CPA, um valor de potência fixo é atribuído a todas as conexões, independente de suas características de sinal (taxa de transmissão, formato de modulação e largura de banda) e de *lightpath* (posição espectral e rota percorrida). Na CPSDA, um valor de densidade espectral de potência fixo é atribuído a todas as conexões, sendo o valor de potência de lançamento variado segundo a taxa de transmissão de *bits* requerida e o formato de modulação escolhido, ou seja, conforme a largura de banda, que, a partir da equação (2.7), resulta para sinais retangulares em (4.41)

$$P_m = G(f_m) \cdot \Delta f_m. \quad (4.41)$$

Observa-se que, tanto os valores ótimos e fixos de potência do CPA quanto os de densidade espectral de potência do CPSDA, variam com a topologia e dimensão da rede (PEREIRA, 2007).

Uma estratégia que se assemelha com a CPSDA é a LOGON (POGGIOLINI et al., 2013b), em que uma densidade espectral de potência é tomada como fixa e a potência é definida pela relação do CPSDA (4.41). Entretanto, a definição do formato de modulação e, consequente-

mente, da largura de banda não é realizada para otimizar a ocupação espectral, mas de forma que cada conexão aceita na rede tolere qualquer outro canal que entre na rede, a partir da ideia de que otimizar localmente resulta em uma otimização global (LOGON).

Na Figura 18, é apresentado o fluxograma da estratégia LOGON, o qual resulta em um bloco CAC diferente do apresentado no Apêndice B. Nesse fluxograma, são entradas conhecidas: (i) um valor fixo para densidade espectral de potência (G_o); (ii) limiares de OSNR para cada combinação de formato de modulação e taxa de transmissão de *bits* definidos pela equação (2.26); e (iii) um valor base de OSNR por *span* ($OSNR_{span}$), obtido considerando o pior caso, definido para um canal central em um espectro completamente ocupado (*full-load*) com canais os mais estreitos possíveis (25 GHz) e sem espaçamento entre os mesmos (limite de Nyquist)⁴. Assim, após a chegada da requisição com definições de taxa de transmissão de *bits*, nó origem e nó destino, são encontradas as rotas candidatas. Para uma dada rota, é contabilizado o número de *spans* (N_s), os quais têm sua influência de $OSNR_{span}$ acumulados pela relação (4.42) (POGGIOLINI et al., 2013b)

$$osnr_{rota} = \left(\frac{N_s}{OSNR_{span}} \right)^{-1}, \quad (4.42)$$

em que a letra minúscula remete à escala linear da OSNR. (4.43)

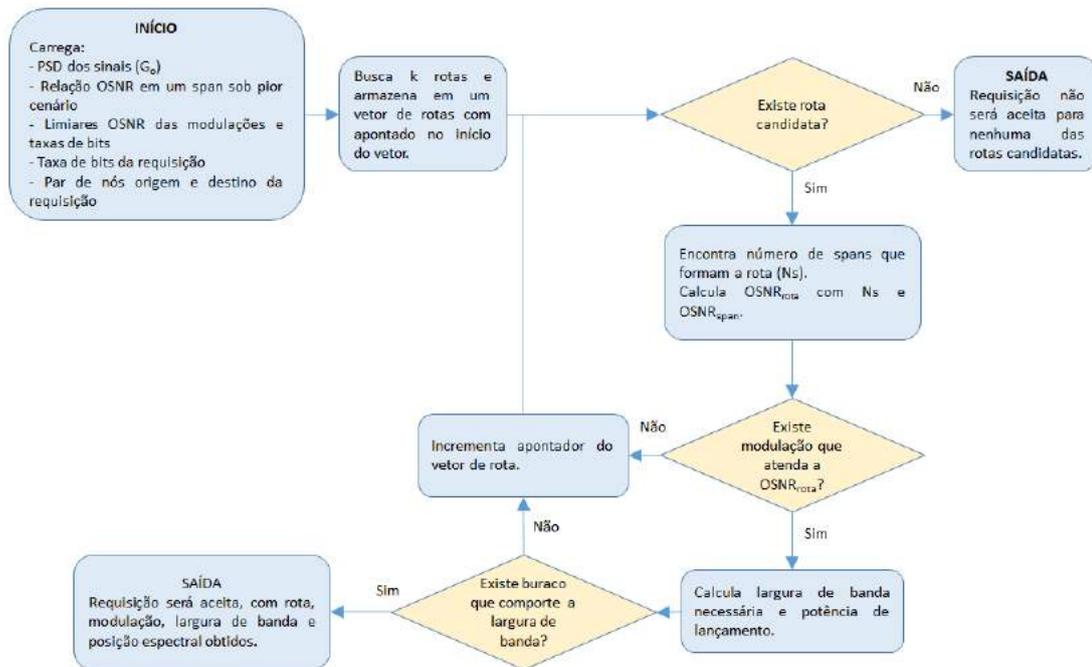
$$osnr = 10^{\frac{OSNR}{10}}. \quad (4.43)$$

Com o valor da $OSNR_{rota}$ e com os limiares de OSNR para cada combinação de formato de modulação e taxa de transmissão de *bits*, é escolhido um formato de modulação que comporte essa $OSNR_{rota}$, conseqüentemente é obtida a largura de banda e a potência de lançamento a partir da densidade espectral de potência fixa (G_o), respectivamente, equações (2.10) e (4.41). Observa-se que, caso não haja formato de modulação que suporte a $OSNR_{rota}$, o algoritmo segue para outra rota. Entretanto, caso suporte, com a largura de banda calculada, é encontrado um buraco de tamanho suficiente para a conexão, sendo a requisição aceita na rede. Caso não exista buraco com largura o suficiente, é feita a mesma análise para outra rota. Caso não existam mais rotas a serem analisadas, a chamada é bloqueada. Observa-se que, uma limitação desse algoritmo é a não consideração do amplificador *booster* na saída do multiplexador, por não ter como conhecer o quantitativo dos mesmos, pois variará com a rota.

⁴ Observa-se que, caso existam diferentes *spans* na rede, o *span* tido como base é o que acarreta maiores penalidades, ou seja, o de maior comprimento.

Além disso, o LOGON superestima os ruídos por considerar no cálculo da $OSNR_{span}$ um cenário *full-load* com canais sem espaçamentos entre si, resultando em formatos de modulações menos eficientes espectralmente e gerando elevada ocupação do espectro de frequência. No Apêndice J é apresentado o algoritmo LOGON.

Figura 18 – Fluxograma LOGON.



Fonte: Adaptado de POGGIOLINI et al. (2013b).

Nesse contexto, as estratégias CPA, CPSDA e LOGON são utilizadas para comparação com as estratégias desenvolvidas neste trabalho, sob os critérios de bloqueios de chamadas e valores de potências médias.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou inicialmente um estudo do comportamento da OSNR em função da potência de lançamento, que foi utilizado como base das estratégias de atribuição de potência de lançamento desenvolvidas, que é o objetivo principal desta pesquisa. Além disso, foram detalhadas as estratégias de atribuição de potência de lançamento presentes na literatura, que servirão de parâmetros de comparação. Essas estratégias serão aplicadas em conjunto com as métricas de avaliação de qualidade de transmissão de chamadas e de avaliação de rede no capítulo subsequente.

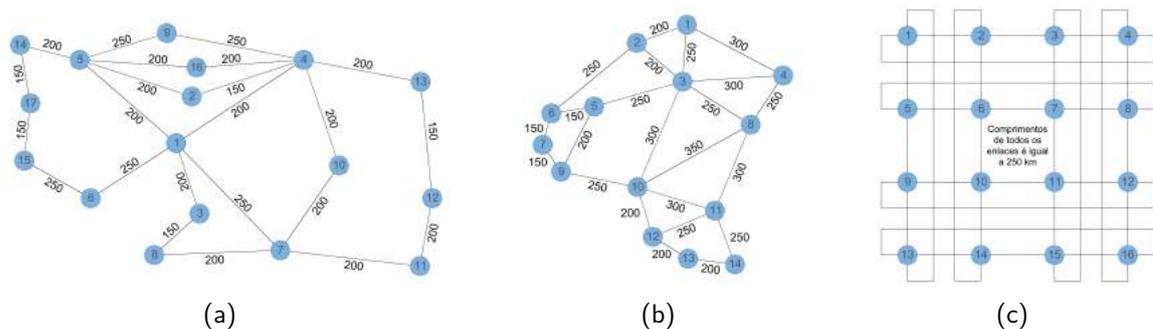
5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ALGORITMOS APLICADOS AO PROBLEMA DE PRMLSA

Neste capítulo, são descritos e justificados os cenários, as topologias e as configurações das simulações empregadas no ambiente computacional descrito no Apêndice B, além dos respectivos resultados em gráficos e tabelas para os algoritmos apresentados no Capítulo 4 para a atribuição de potência do problema PRMLSA. Por fim, os resultados para as novas estratégias de atribuição de potência são analisados e comparados com as estratégias mais abordadas da literatura.

5.1 CENÁRIOS E CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES

Baseado nas limitações apresentadas no Capítulo 2 em conjunto com o modelo para não linearidades utilizado e descrito pela equação (2.8), o número de modos de polarização deve ser igual a dois ($p = 2$) (POGGIOLINI et al., 2013a), e a perda por *span* deve ser igual ou maior que 10 dB (JOHANNISSON; AGRELL, 2014). Consequentemente, para fibras com coeficiente de perda de $\alpha = 0,2$ dB/km, tem-se que os comprimentos individuais de cada seção de fibra de *span* devem ser iguais ou superiores a 50 km. Somado a isso, é conveniente para este trabalho garantir um número médio de elementos *spans* por enlace igual ou maior que 3 (três), para que as não linearidades, penalidades principais deste trabalho, estejam presentes significativamente. Assim, na Figura 19, são apresentadas as topologias de redes utilizadas para as simulações, que serão referidas ao longo deste capítulo como: (i) PB - *Pacific Bell* modificada (XAVIER, 2016); (ii) DT - *Deutsche Telekom* modificada (AZODOLMOLKY et al., 2010); (iii) RG - Regular (XAVIER, 2016).

Figura 19 – Topologias de rede para simulações: (a) *Pacific Bell* modificada (PB); (b) *Deutsche Telekom* modificada (DT); (c) Regular (RG). (Obs.: distâncias indicadas em km.)



Fonte: Adaptado de XAVIER (2016) e AZODOLMOLKY et al. (2010).

As topologias de rede da Figura 19 apresentam características distintas sobre suas malhas, que influenciam nas respostas das simulações, como, por exemplo, o grau médio de conectividade, a densidade da rede e o comprimento médio dos enlaces, definidas na Seção 3.1 e apresentadas na Tabela 3. O grau de conectividade remete ao quão restrito é uma rede em relação à quantidade de rotas alternativas possíveis e recursos (de *slots*, por exemplo). Nesse sentido, como a topologia PB possui o menor grau de conectividade (68% de RG), a mesma leva desvantagem sobre o número de rotas e recursos. Entretanto, como o comprimento das rotas está relacionado diretamente com as penalidades da camada física sob circunstâncias idênticas (quanto maior o comprimento de um enlace, maiores as penalidades de camada física), a topologia PB, que possui enlaces 80% de RG, leva vantagem sobre as penalidades. Enquanto, a topologia DT apresenta características intermediárias entre as topologias PB e RG, tanto no aspecto de rede, quanto de camada física. A topologia DT possui grau de conectividade igual a 121,4% de PB (ou seja, 21,4% maior que PB) e 82,2% de RG (ou seja, 17,8% menor que RG). Para o comprimento médio dos enlaces, DT possui 119,6% de PB (ou seja, 19,6% maior que PB) e 95,7% de RG (ou seja, 4,3% menor que RG).

Tabela 3 – Características das topologias adotadas.

Topologia	#Nós	#Enlaces	Grado médio de conectividade	Densidade	Comprimento médio dos enlaces(km)
PB	17	2×23	2,71	0,17	200,00
DT	14	2×23	3,29	0,25	239,13
RG	16	2×32	4,00	0,27	250,00

Fonte: a autora.

Algumas características assumidas neste trabalho foram em função das considerações para a simplificação do modelo de camada física para não linearidades adotado, como a adoção de um único tipo de fibra por *span* (POGGIOLINI et al., 2013a). Outras características foram assumidas para focar nos efeitos de não linearidades de forma mais simplificada e/ou efetiva, como: (i) todos os comprimentos de *spans* serem iguais a 50 km, limite para o coeficiente de perda da fibra adotado; (ii) comprimentos médios dos enlaces superiores a 150 km (pelo menos 3 *spans* por enlace); (iii) *links* homogêneos (*spans* idênticos em um mesmo enlace); e (v) perdas em cada *span* compensadas pelos respectivos amplificadores. A escolha de 50 km para o comprimento da fibra por *span* é justificada pelo fato de o modelo de não linearidade adotado não considerar o comprimento de fibra do *span*, considerando apenas o número de

elementos *spans* atravessados, por exemplo, para dois *spans* A e B com mesmas características de fibra e amplificador, entretanto com o *span* A com comprimento de 50 km e o *span* B com comprimento de 100 km, tem-se que as não linearidades para o modelo adotado, equação (2.8), seriam as mesmas, as penalidades seriam alteradas apenas em função do ruído ASE que diferenciariam em função do ganho do amplificador de B ser maior que o de A pela limitação das perdas compensadas pelos ganhos.

As altas taxas transmissões de *bits* (250 Gbps, 300 Gbps, 350 Gbps, 400 Gbps) utilizadas neste trabalho também foram definidas a partir da limitação de largura de banda mínima de 25 GHz do modelo de não linearidades adotado, equação (2.8), associada aos formatos de modulação desejados (4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM) (Seção 2.4) (JOHANNISSON; AGRELL, 2014), combinação possível com a utilização de supercanais (LOBATO, 2019). Os valores dessas taxas de transmissões são apresentados na Tabela 4 com as respectivas larguras de banda e formatos de modulação para dupla polarização, conforme a relação entre essas grandezas, equação (2.10). O número de *slots* é definido pelo valor inteiro igual ou maior resultado da relação entre a largura de banda necessária e a largura de banda do *slot* adotada, que neste trabalho é igual a 12,5 GHz. Observa-se que, mesmo que a largura de banda requerida seja menor que a largura de banda total de *slots* correspondente, o número de *slots* total (e inteiro) terá de ser atribuído por questão de limitação dos filtros ópticos, funcionando o excedente de largura de banda como um incremento na banda de guarda (GB), não sendo computado nos cálculos de penalidades. Também não foram computados na Tabela 4 o(s) *slot(s)* para a banda de guarda (GB), adotado como sendo igual a um *slot* neste trabalho.

Tabela 4 – Taxas de transmissão de *bits*, formatos de modulação, larguras de banda e números de *slots*.

R_b (Gbps)	4QAM		8QAM		16QAM		32QAM	
	Δf (GHz)	# <i>slots</i>						
250	62,50	5	41,67	4	31,25	3	25,00	2
300	75,00	6	50,00	4	37,50	3	30,00	3
350	87,50	7	58,33	5	43,75	4	35,00	3
400	100,00	8	66,67	6	50,00	4	40,00	4

Fonte: a autora.

Com as taxas de transmissão de *bits* e os SNR_{th} (Tabela 1) para a referida $BER = 10^{-3}$ no Capítulo 2, é possível, pela equação (2.26), obter os limiares de OSNR para cada combinação de formato de modulação e taxa de transmissão de *bits*, Tabela 5¹.

¹ Aos valores de $OSNR_{th}$ da Tabela 5 foram acrescentados uma margem de 3 dB para suprir penalidades não consideradas.

Tabela 5 – Limiares de OSNR para o cenário adotado (BER= 10^{-3}).

R_b (Gbps)	OSNR _{th} (dB)			
	4QAM	8QAM	16QAM	32QAM
250	19,51	21,36	23,26	25,26
300	20,30	22,15	24,05	26,05
350	20,97	22,82	24,72	26,72
400	21,55	23,40	25,30	27,30

Fonte: a autora.

Salvo quando mencionado, as constantes e os parâmetros utilizados nas simulações são resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores utilizados nas simulações.

Variável	Valor
R_b	[250, 300, 350, 400] Gbps
Formatos de Modulações	[32, 16, 8, 4]-QAM
k -Yen	$k=3$
OSNR _{in}	40 dB
OSNR _{th}	Varia com formato de modulação e taxa de transmissão (Tabela 5)
Δf	Varia com formato de modulação e taxa de transmissão(Tabela 4)
polarização	$p = 2$
B_o	12,5 GHz
Banda C	(1530 a 1565) nm
v	193,85 THz
F	5 dB
α	0,2 dB/km
BER	10^{-3}
#slots por fibra	320
GB	1 slot
Ω	[60 a 130] Erlang com passos de 10
γ	0,0013 (W.m) ⁻¹
π	3,14
β_2	$2,07 \cdot 10^{-26}$ s ² /m
h	$6,62606957 \cdot 10^{-34}$ m ² kg/s

Fonte: a autora.

As Seções 5.2 e 5.3 contêm os resultados das simulações para os cenários, as topologias e as configurações descritos nesta seção (Seção 5.1), além das respectivas fases testes (treinamentos) quando requeridas.

Excepcionalmente quando mencionado, todos os resultados a seguir se baseiam nas métricas apresentadas nas Seções 2.4 e 2.5, sendo obtidos para cada uma das cargas do domínio declarado na Tabela 6 a média dos resultados de cinco simulações, cada uma com ao menos cem mil chamadas e cem bloqueios, ambas condições precisam ser atingidas.

5.2 RESULTADOS PARA ESTRATÉGIAS BASES DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO

Com a finalidade de obter o desempenho dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho, esta seção apresenta os resultados das estratégias de atribuição de potência de lançamento amplamente difundidas em pesquisas e apresentadas neste trabalho na Seção 4.3, que são o CPA, o CPSDA e o LOGON, os quais terão seus resultados definidos como parâmetros de comparação.

5.2.1 Estratégias de Atribuição de Potência Constante e Atribuição de Densidade Espectral de Potência Constante

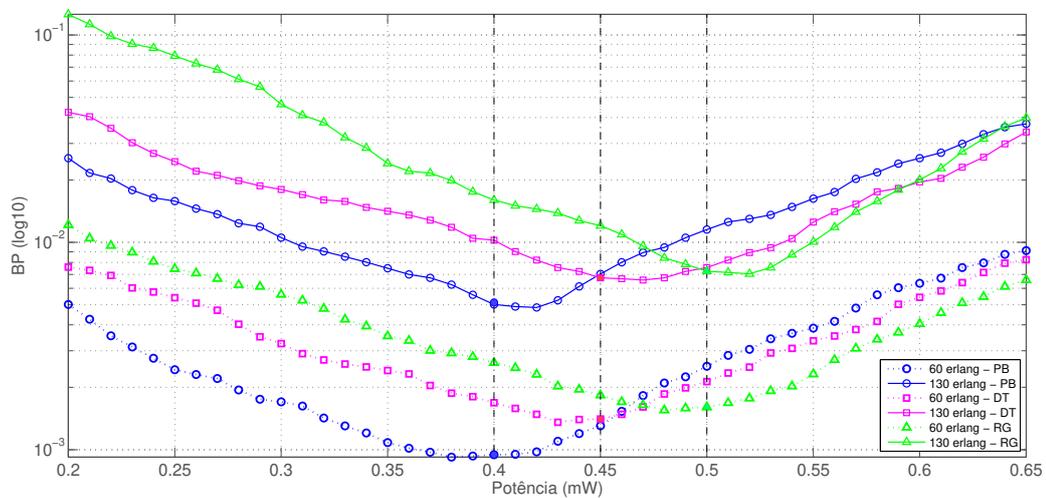
Sabe-se que as técnicas mais difundidas na literatura para EONs transparentes e com tráfegos dinâmicos são a atribuição de potência constante (CPA) (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014) e a atribuição de densidade espectral de potência constante (CPSDA) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015).

Apesar da simplicidade dessas técnicas (CPA e CPSDA), para que a comparação seja justa, é necessária a localização do ponto ótimo de potência (ou densidade espectral de potência) de lançamento para os sinais em cada uma das topologias de rede (PEREIRA, 2007). O ponto ótimo de operação foi obtido por varredura do domínio desejado (potência ou densidade espectral de potência), em que cada valor do domínio foi simulado individualmente e obtida a respectiva probabilidade de bloqueio (BP).

Nessas condições, a Figura 20 apresenta os resultados para a probabilidade de bloqueio para a atribuição de potência constante (CPA) no intervalo de domínio $[0, 2; 0, 65]$ mW com

passos de 0,01 mW para as topologias consideradas na Figura 19 e cargas máxima e mínima². Nesses resultados, foi possível observar um valor de potência distinto para cada topologia que resulta em uma probabilidade de bloqueio relativamente baixa (mínimo da curva). A topologia RG, que possui enlaces com comprimento médio superior ao das demais topologias, apresentou a necessidade de um valor para potência maior. Enquanto a PB, que apresenta o menor comprimento médio dos enlaces entre as topologias analisadas, necessitou da menor potência óptica.

Figura 20 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da potência de lançamento para CPA.



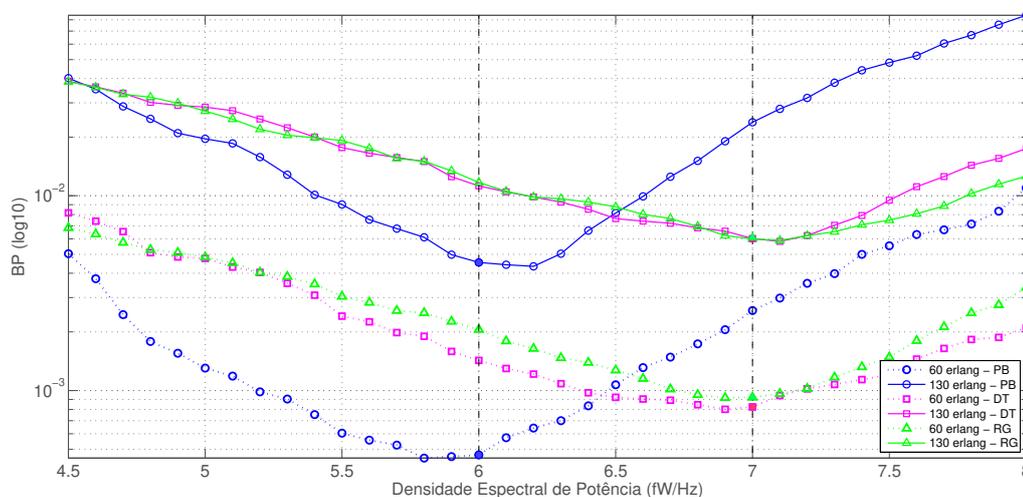
Fonte: a autora.

Analogamente à atribuição de potência constante, os resultados das probabilidades de bloqueio para a atribuição de densidade espectral de potência constante (CPSDA) são apresentados na Figura 21 para o intervalo de domínio $[4, 5; 8, 0]$ fW/Hz com passos de 0,1 fW/Hz para as topologias consideradas na Figura 19 e cargas máxima e mínima³. Nestes resultados, as duas topologias com enlaces de comprimentos médios superiores (DT e RG) obtiveram valores próximos e mais altos que a topologia PB para o ponto de ótimo da densidade espectral de potência.

² Por simplicidade na representação dos resultados, foram suprimidos os resultados das demais cargas.

³ Por simplicidade na representação dos resultados, foram suprimidos os resultados das demais cargas.

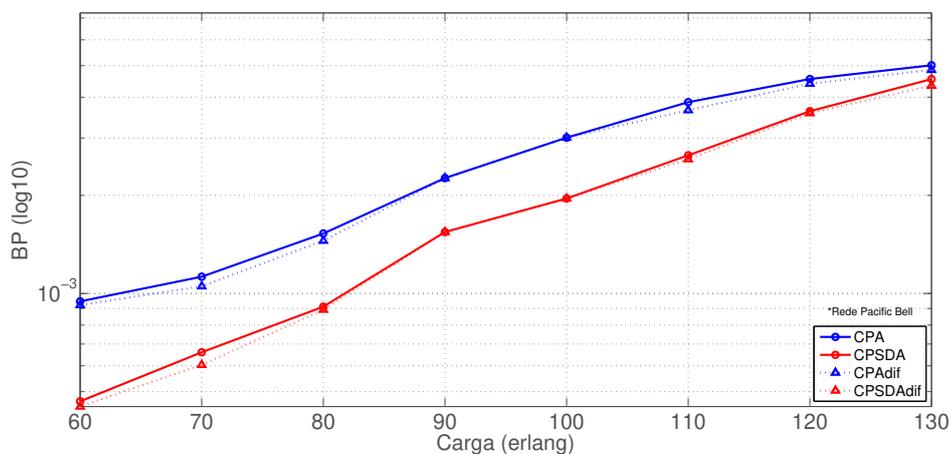
Figura 21 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da densidade espectral de potência para CPSDA.



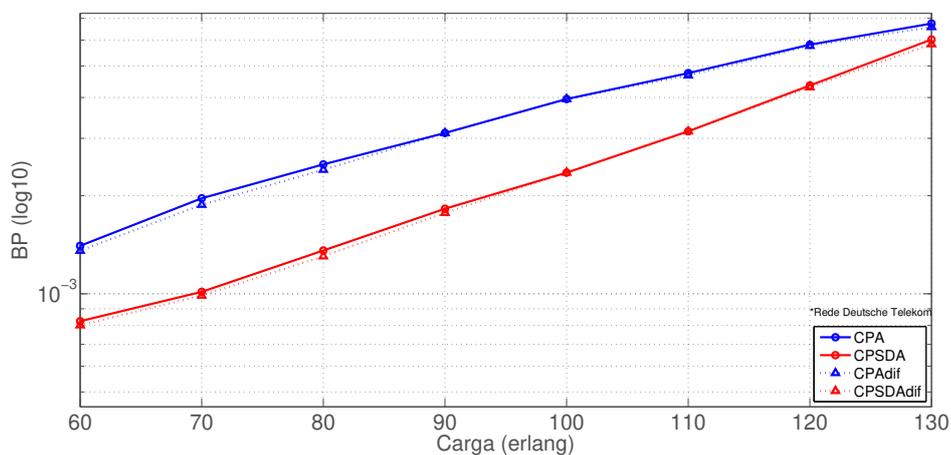
Fonte: a autora.

Baseado nos gráficos para o comportamento da probabilidade de bloqueio em função da potência de lançamento para a estratégia CPA, tem-se que os melhores resultados para as cargas de máxima e mínima ocorreram aproximadamente em 0,4 mW, 0,45 mW e 0,5 mW para PB, DT e RG, respectivamente. Enquanto para o comportamento da probabilidade de bloqueio em função da densidade espectral de potência para a estratégia CPSDA, os melhores resultados para as cargas máxima e mínima ocorreram aproximadamente em 6,0 fW/Hz para PB e 7,0 fW/Hz para DT e RG. Entretanto, os valores ótimos para potência e densidade espectral de potência variam (levemente) com a carga no cenário de EON, sendo na Figura 22 apresentados os resultados obtidos quando se utiliza um único valor de potência (ou densidade espectral de potência) independente da carga (CPA e CPSDA, linhas contínuas), além dos resultados obtidos para os valores de potência (ou densidade espectral de potência) ótimo a depender da carga (CPAdif e CPSDAdif, linhas tracejadas) para as topologias da Figura 19.

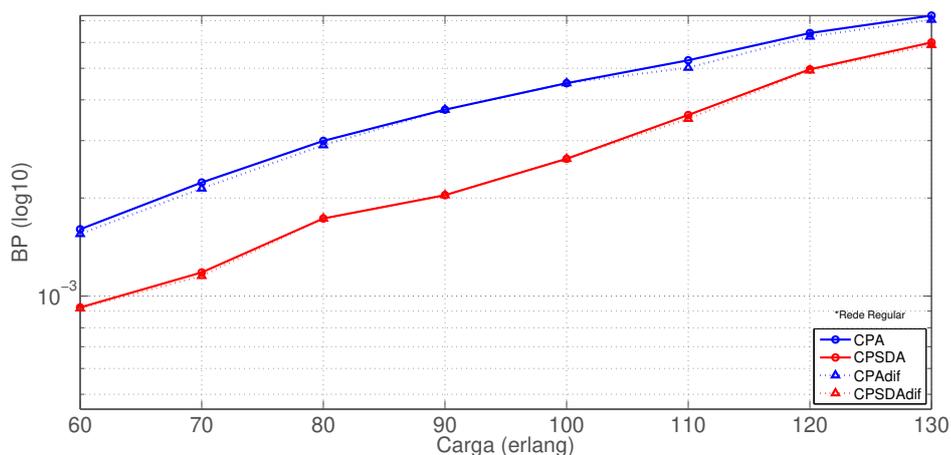
Figura 22 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para CPA e CPSDA com valores independentes e dependentes da carga nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

Pelos resultados da Figura 22, observou-se que o desempenho para a atribuição CPSDA foi melhor que o CPA nas duas configurações (valores independentes ou dependentes da carga).

Para as cargas baixas, houve uma redução na BP mais significativa, atingindo 52,4% na redução de BP, quando comparado o CPSDAdif e CPA. Além disso, a redução na BP ao aplicar a densidade espectral de potência (por exemplo) dependente da carga comparado ao utilizar um valor único alcançou uma redução de BP de no máximo 8,5% na topologia PB. Na Tabela 7, foram apresentados os pontos em que ocorreram as maiores reduções de BP.

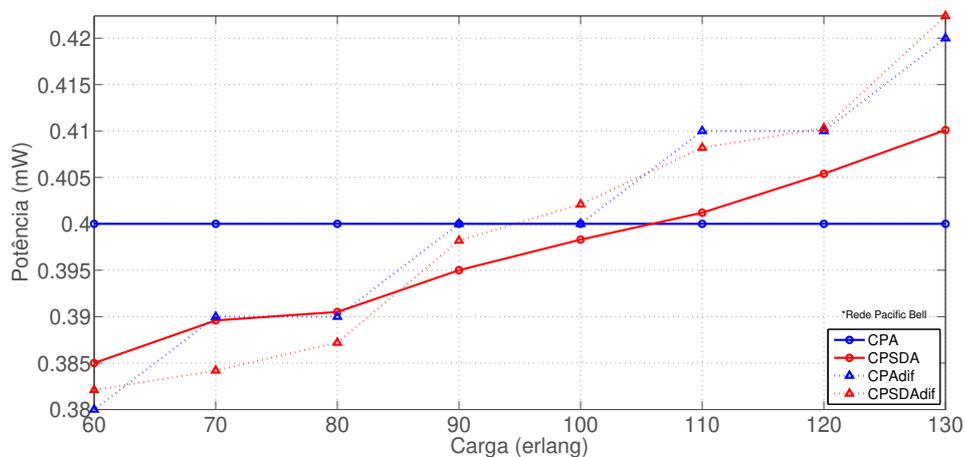
Tabela 7 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDAdif em relação ao CPA, CPSDA e CPA dif.

	CPA			CPSDA			CPAdif		
	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{CPA}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{CPSDA}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{CPAdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,476	52,4%	60	0,915	8,5%	70	0,489	51,1%	60
DT	0,503	49,7%	70	0,968	3,2%	130	0,527	47,3%	70
RG	0,517	48,3%	70	0,974	2,6%	110	0,539	46,1%	70

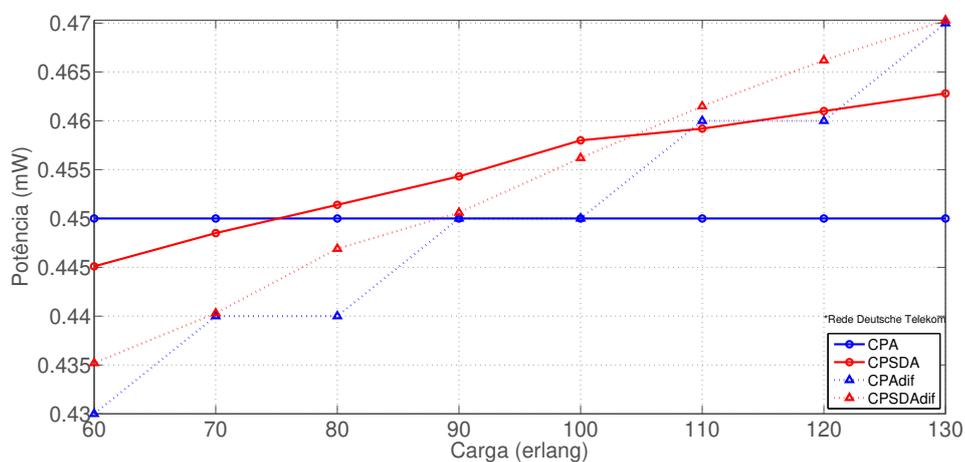
Fonte: a autora.

A redução de BP do CPSDA comparado ao CPA ocorreu devido ao fato de o primeiro ser uma adequação do segundo. O CPA oferta a mesma potência a todos os canais. Enquanto o CPSDA oferta a mesma potência a canais com larguras de banda iguais, diferenciando a potência entre canais com larguras de banda distintas, de forma que, quanto menor a largura de banda, menor a potência atribuída, e vice-versa. Quando as potências são iguais para canais estreitos e largos, resulta em maiores intensidades de não linearidades nas regiões vizinhas dos canais estreitos pela maior proximidade quando comparadas às regiões vizinhas de canais largos. Quando as potências diferem com a largura dos canais, de forma que quanto mais estreito, menor o valor de potência ofertada, as intensidades de não linearidades são mais próximas de uma equidade nas regiões vizinhas aos canais estreitos e largos. Assim, o CPSDA consegue balancear as intensidades de não linearidades ao longo do espectro dos enlaces da rede, diminuindo trechos de espectro críticos (com elevada intensidade de não linearidades). Na Figura 23 foi apresentado o comportamento dos valores médios de potência óptica de lançamento para o CPA e CPSDA em função da carga, em que o CPSDA apresenta valores de potências em torno do valor da potência ótima do CPA, entretanto a potência aumenta com o aumento da carga, pois ocorrem formatos de modulações menos eficientes espectralmente em decorrência das maiores não linearidades presentes na rede.

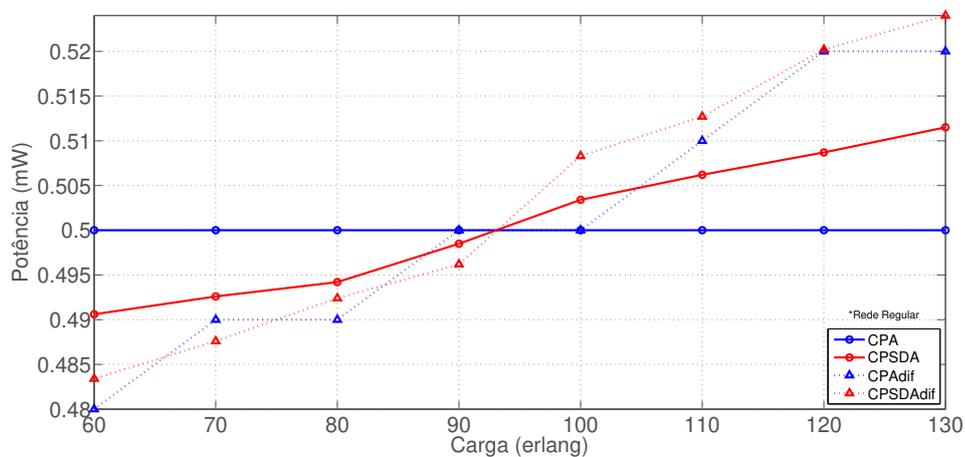
Figura 23 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para CPA e CPSDA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

5.2.2 Estratégia de Atribuição de Potência por LOGON

Uma terceira técnica de atribuição de potência de lançamento encontrada nas pesquisas atuais é a estratégia LOGON (POGGIOLINI et al., 2013b), em que uma densidade espectral de potência fixa e uma análise de OSNR em um elemento *span* ($OSNR_{span}$) da rede sob o pior cenário servem como base da estratégia. Os valores atribuídos às densidades espectrais de potência utilizados nesta seção foram os respectivos valores obtidos pelo CPSDA (independente da carga). Apesar do mesmo elemento *span*, os valores de $OSNR_{span}$ diferiram entre as topologias em função das respectivas densidades espectrais de potência, visto que tanto o cálculo da OSNR quanto as não linearidades dependem da potência do sinal, e essa depende da densidade espectral de potência. Consequentemente, os valores de entrada da estratégia para as topologias consideradas na Figura 19 foram dados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados de Entrada para a Estratégia LOGON.

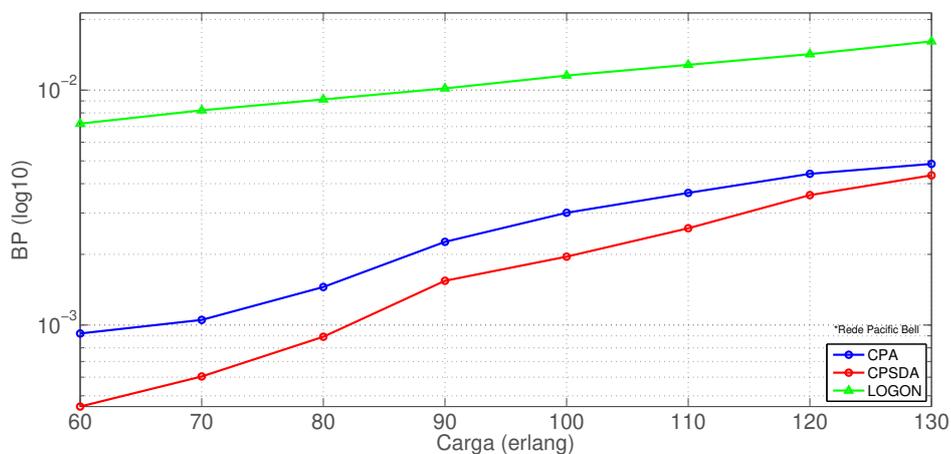
Topologia	PSD (fW/Hz)	$OSNR_{span}$ (dB)
PB	6,0	33,24
DT	7,0	33,07
RG	7,0	33,07

Fonte: a autora.

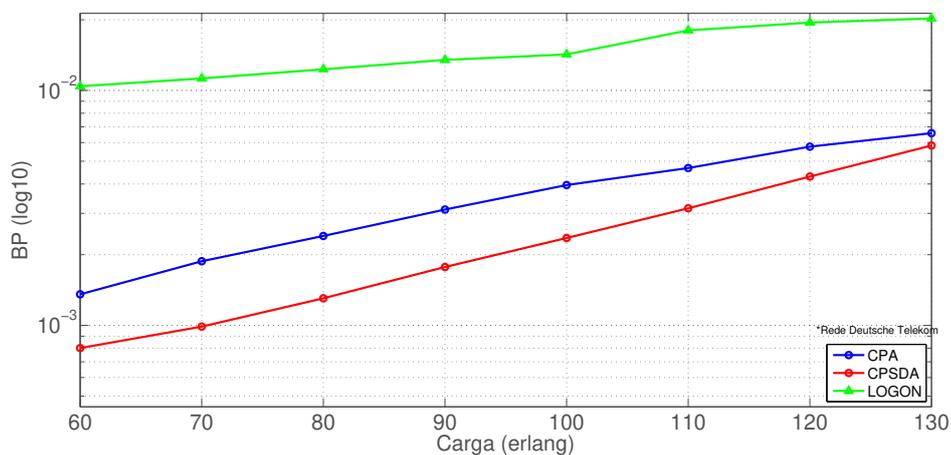
Com a obtenção dos dados de entrada, foram obtidos os resultados da estratégia LOGON para as respectivas topologias consideradas na Figura 19, os quais foram dispostos juntos aos do CPA e CPSDA⁴ na Figura 24.

⁴ Os resultados utilizados a partir desse ponto para o CPA e CPSDA foram os dependentes da carga, visto que resultaram nos melhores valores de BP. Além disso, serão referenciados apenas por CPA e CPSDA.

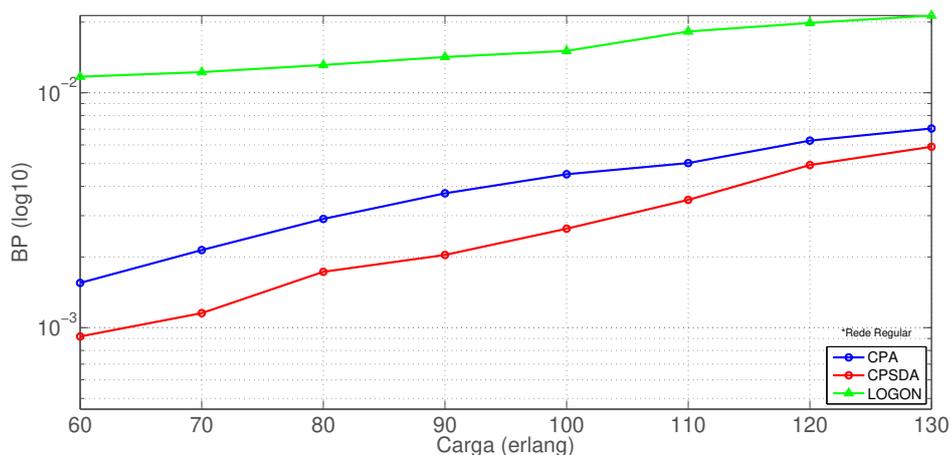
Figura 24 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para LOGON, em conjunto com CPA e CPSDA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

Nos resultados da Figura 24, foi possível observar que a probabilidade de bloqueio obteve menores valores na rede PB, pois quanto mais longos os enlaces, menores são as eficiências

dos formatos de modulações atribuídos, conseqüentemente, menor é a disponibilidade de *slots* e maiores são as larguras de banda e potências atribuídas para manter a densidade espectral de potência constante. Além disso, apesar de a influência da carga ser mínima para a BP para as três topologias, o número maior de chamadas chegando simultaneamente aumenta o bloqueio em decorrência da menor disponibilidade de espectro, não sendo as diferenças de penalidades físicas presentes na rede responsáveis pelo aumento da BP com o aumento da carga, pois todas as atribuições de formato de modulação e de potências foram baseadas no cenário de carga completa do espectro. Nesse contexto, apesar de os sinais alocados não serem afetados por canais futuros a ponto de não atenderem a seus respectivos limiares de OSNR, a eficiência do LOGON é baixa em decorrência da superestimação dos ruídos. Conseqüentemente, a redução de BP do CPSDA em relação ao LOGON é de até 93,8%, como apresentado na Tabela 9, para as respectivas cargas e topologias indicadas.

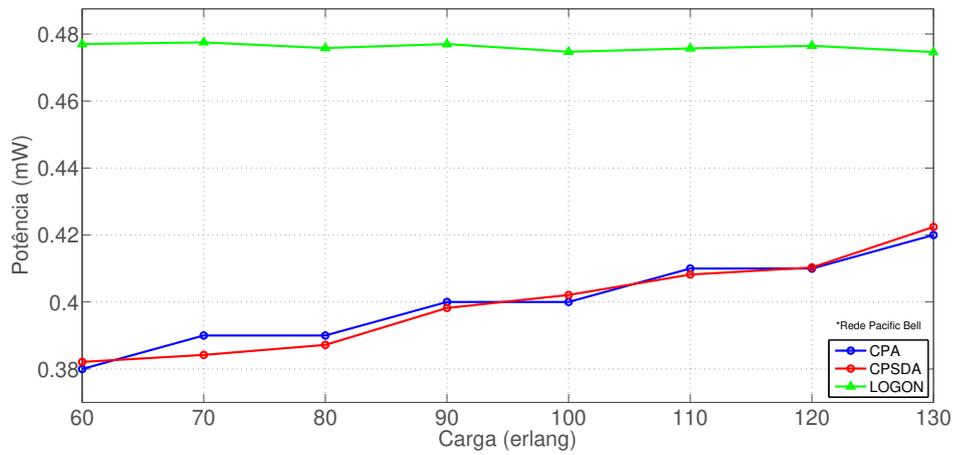
Tabela 9 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDA em relação ao LOGON.

	LOGON		
	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDA}}{BP_{LOGON}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,062	93,8%	60
DT	0,077	92,3%	60
RG	0,078	92,2%	60

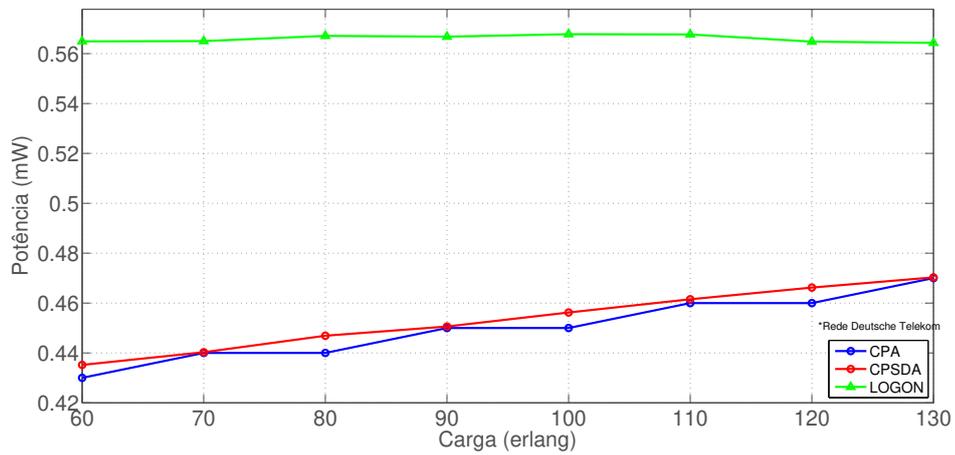
Fonte: a autora.

Na Figura 25, foi apresentado o comportamento da potência de lançamento em função da carga da rede para as topologias da Figura 19, em que foi possível observar que o valor médio de potência de lançamento da estratégia LOGON foi maior que os valores ótimos do CPA para todas as topologias. Além disso, os valores médios de potência se mantiveram sem grandes variações em função da carga, visto que sua atribuição depende exclusivamente da rota, de forma que, rotas mais curtas podem utilizar formatos de modulações mais eficientes espectralmente, diminuindo a largura de banda e a potência, para manter a densidade espectral de potência constante. Conseqüentemente, os valores médios de potência dependem da topologia, pois topologias com enlaces mais longos tendem a ter rotas mais longas, e vice-versa. As pequenas oscilações ocorridas para os valores médios de potência em função da carga da rede foram em decorrência da aleatoriedade das simulações.

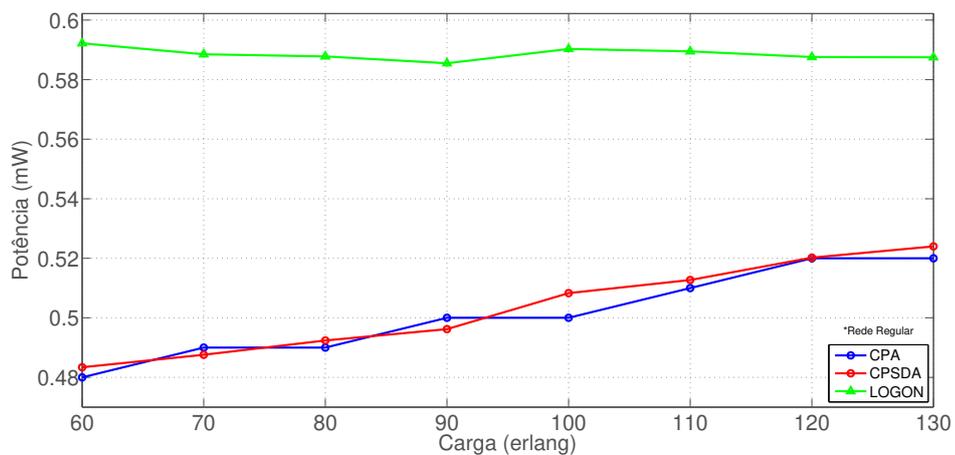
Figura 25 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para LOGON nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

5.3 RESULTADOS PARA ESTRATÉGIAS DESENVOLVIDAS DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DE LANÇAMENTO

Nesta seção, são apresentados os resultados das estratégias desenvolvidas neste trabalho para a atribuição de potência de lançamento e mostradas na Seção 4.2. Com a finalidade de manter um padrão, todos os resultados referentes à probabilidade de bloqueio (BP) desta seção foram analisados quantitativamente em relação à melhor estratégia base de atribuição de potência de lançamento, o CPSDA (com valor de densidade espectral de potência dependente da carga).

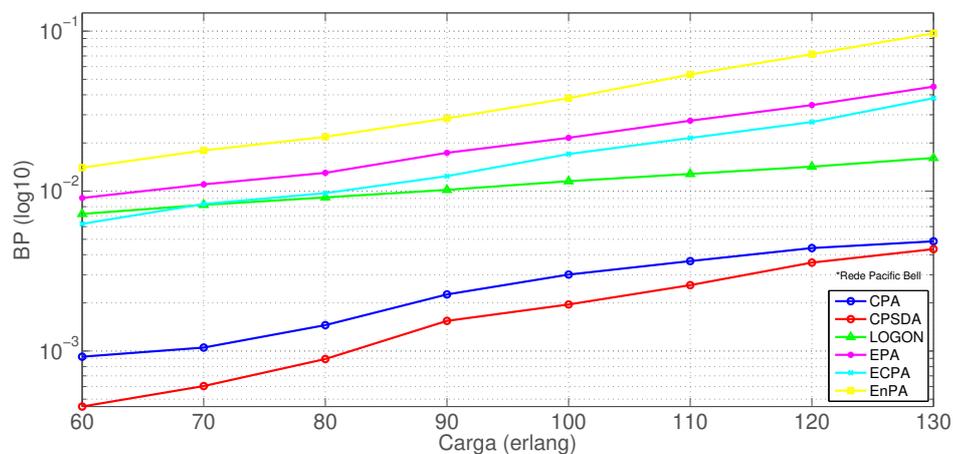
5.3.1 Atribuição de Potência Egoísta, Atribuição de Potência Consciente Egoísta, Atribuição de Potência Suficiente

As análises para as topologias de rede da Figura 19 continuaram para a atribuição de potência egoísta (EPA), em que o valor da potência que resulta na máxima OSNR para cada requisição é a solução, independentemente do estado da rede. Além disso, foi simulado o ECPA, que atribui o menor valor entre a potência que resulta na máxima OSNR para a requisição e a potência máxima tolerada pelos canais previamente alocados e interferentes com a rota da requisição. Em seguida, foram realizadas simulações para a atribuição de potência suficiente (EnPA), em que foi atribuído o valor mínimo de potência possível em um dado instante na rede para uma dada requisição, que resulta no limiar de OSNR.⁵

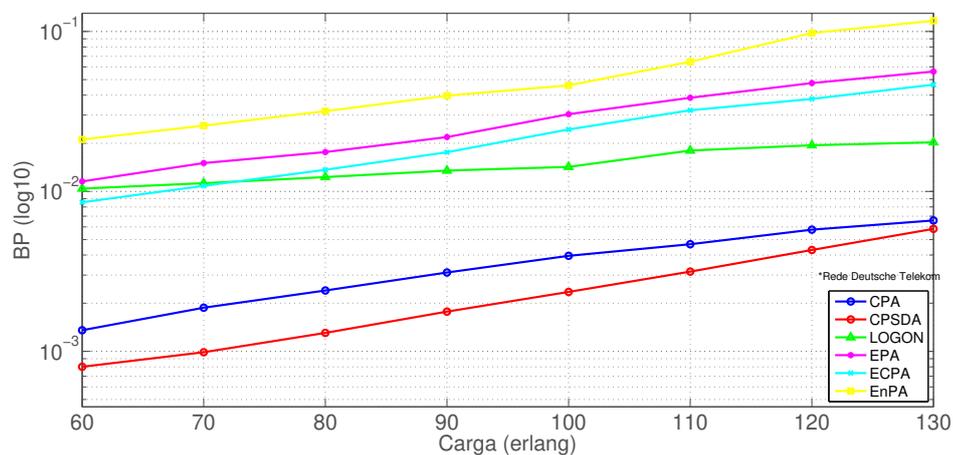
Os resultados para a probabilidade de bloqueio para essas estratégias extremas de atribuição de potência, de máxima e mínima potência (EPA, ECPA e EnPA), foram apresentados na Figura 26 para as topologias consideradas na Figura 19.

⁵ O valor para a precisão da interpolação para a obtenção da potência de OSNR_{th} na estratégia de atribuição de potência mínima (EnPA) foi de $\delta = 0,5$ W/W. Porém, para qualquer outra estratégia que não seja o EnPA e que utiliza interpolação para encontrar a potência de OSNR_{th}, o valor da precisão foi definido como $\delta = 0,01$ W/W, visto que os demais algoritmos atribuem margens suficientes (além do erro de interpolação) para OSNR.

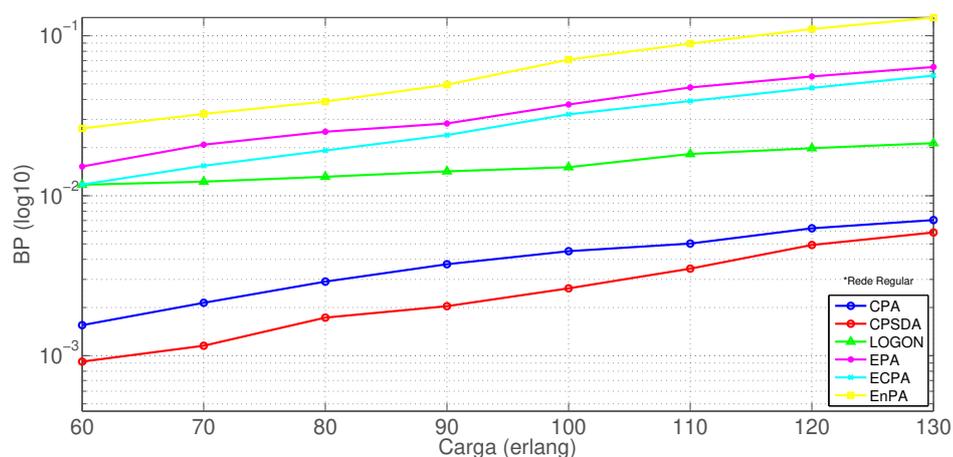
Figura 26 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para EPA, ECPA e EnPA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

Na Figura 26, as técnicas EPA e EnPA apresentaram resultados piores do que o CPA, o CPSDA e o LOGON, tendo o EnPA o pior de todos os desempenhos, alcançando o CPSDA

uma redução na BP de até 96,8% na topologia PB. Isso é justificado pelo fato de que o EnPA não possui margem para qualquer das menores interações de canais futuros, salvo pela margem em decorrência da precisão de interpolação que funcionou como uma margem adicional ao valor de OSNR limiar, o que justifica o valor de precisão relativamente elevado. Enquanto no EPA, o excesso no valor de potência funcionou como uma margem para as futuras penalidades, porém, esse mesmo excesso de margem na potência elevou as não linearidades na rede, ocasionando para o CPSDA uma redução de BP de até 95% na topologia PB. O ECPA obteve resultados melhores que o EPA, entretanto não superou o CPA e CPSDA, esse último manteve uma redução de BP de até 92,8% na topologia PB. Todos os resultados foram piores nas topologias com enlaces mais longos, em que os canais têm maior probabilidade atravessam um maior número de *spans* e, conseqüentemente, sofrerem mais penalidades. Na Tabela 10, foram apresentadas as maiores reduções de BP do CPSDA em relação às estratégias EPA, ECPA e EnPA para as respectivas cargas e topologias indicadas.

Tabela 10 – Redução máxima da BP alcançada pelo CPSDA em relação ao EPA, ECPA e EnPA.

	EPA			ECPA			EnPA		
	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{EPA}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{ECPA}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{CPSDdif}}{BP_{EnPA}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,050	95,0%	60	0,072	92,8%	60	0,032	96,8%	60
DT	0,069	93,1%	70	0,092	90,9%	70	0,038	96,2%	60
RG	0,055	94,5%	70	0,075	92,5%	70	0,035	96,5%	60

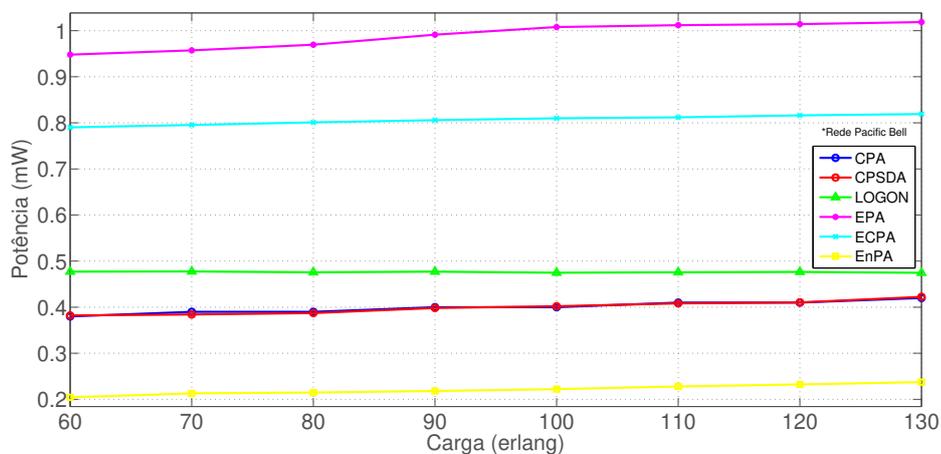
Fonte: a autora.

Observa-se que, caso fosse atribuída à precisão de interpolação um valor menor, os bloqueios para o EnPA seriam ainda maiores, pois diminuiria ainda mais a tolerância a futuros canais na rede. Entretanto, uma margem muito maior não faria sentido ao estudo desenvolvido, mesmo resultando em resultados melhores, pois fugiria da ideia de atribuir uma potência que resultasse em uma OSNR próxima do limiar.

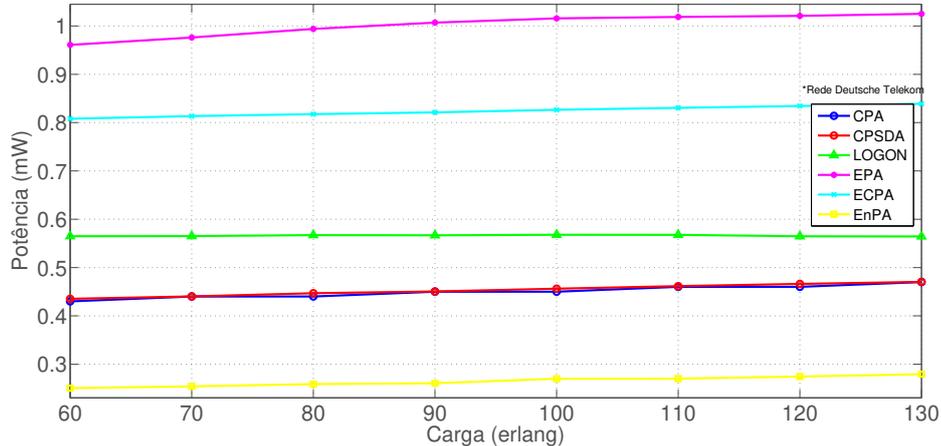
Na Figura 27, foram apresentados os comportamentos dos valores médios para a potência de lançamento em função da carga, em que os valores das potências do EPA, ECPA e EnPA desenvolvem uma função crescente. Para o EPA, esse crescimento ao longo da carga ocorreu em decorrência da exigência de formatos de modulação menos eficientes espectralmente para suportar maiores penalidades com o aumento da carga, o que resultou em larguras de banda maiores e, conseqüentemente, por ser diretamente proporcional ao valor de potência de OSNR máxima, equação (4.8), maiores valores para as potências de lançamento. Para o EnPA, o

aumento de carga (conseqüentemente aumento de penalidades) gerou um deslocamento maior para baixo da curva de OSNR (Figura 10), aumentando a potência que intercepta o seu limiar. Os valores médios de potência de lançamento do ECPA, apesar de serem menores que o EPA, por limitação dos canais alocados previamente, continuaram elevados (em torno de 0,8 mW) quando comparados aos valores das estratégias CPA e CPSDA, conseqüentemente as não linearidades na rede continuaram elevadas. Observa-se que, a curva dos valores médios de potência do ECPA possui uma inclinação em relação ao eixo da carga menos acentuada que o EPA, pois, apesar de a atribuição de potência máxima aumentar com a largura de banda e, conseqüentemente, com a utilização de formatos de modulações menos eficientes em decorrência de maiores penalidades na rede, há uma limitação adicional à potência a ser atribuída pelos canais previamente alocados. Em todos os casos, os valores médios das potências do EPA foram maiores que os valores obtidos para as potências do LOGON, enquanto o EnPA apresentou os menores valores.

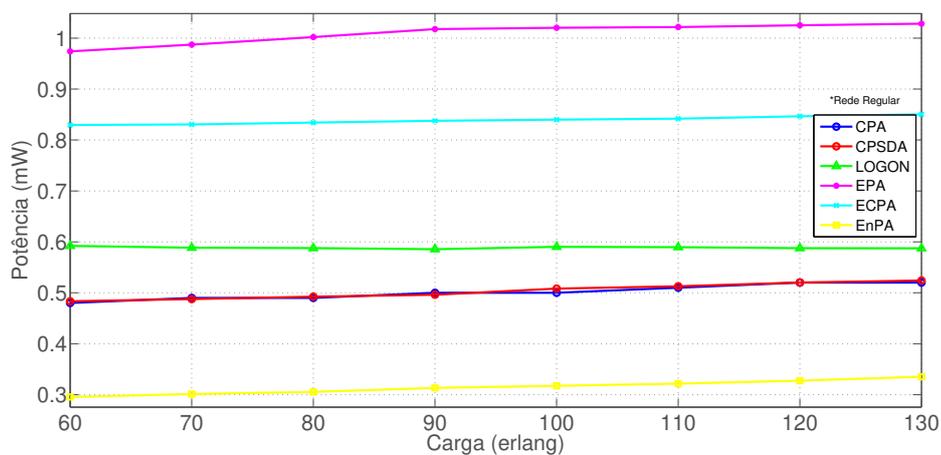
Figura 27 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para EPA, ECPA e EnPA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

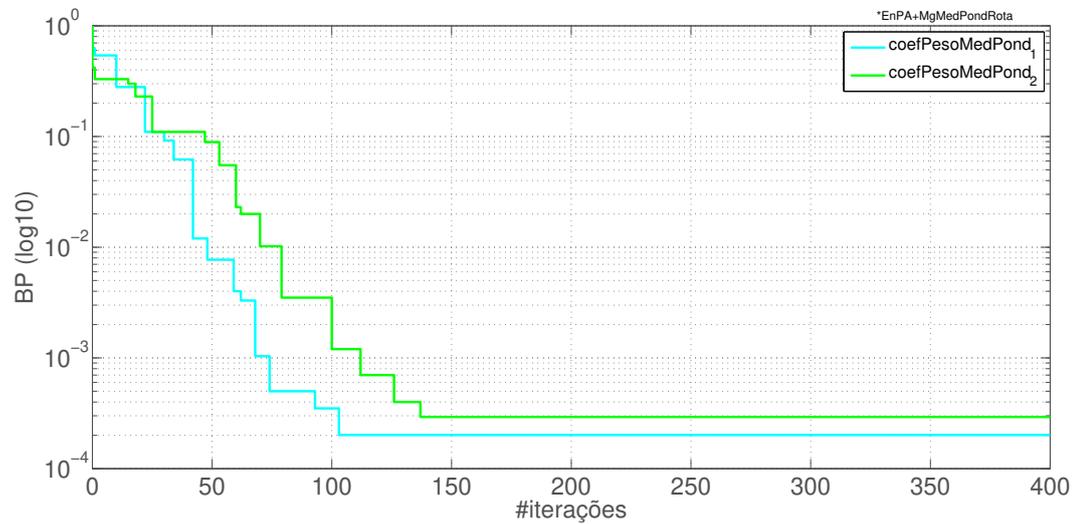
Fonte: a autora.

5.3.2 Atribuição de Potência Suficiente Acrescida de Margem (EnPA+Mg)

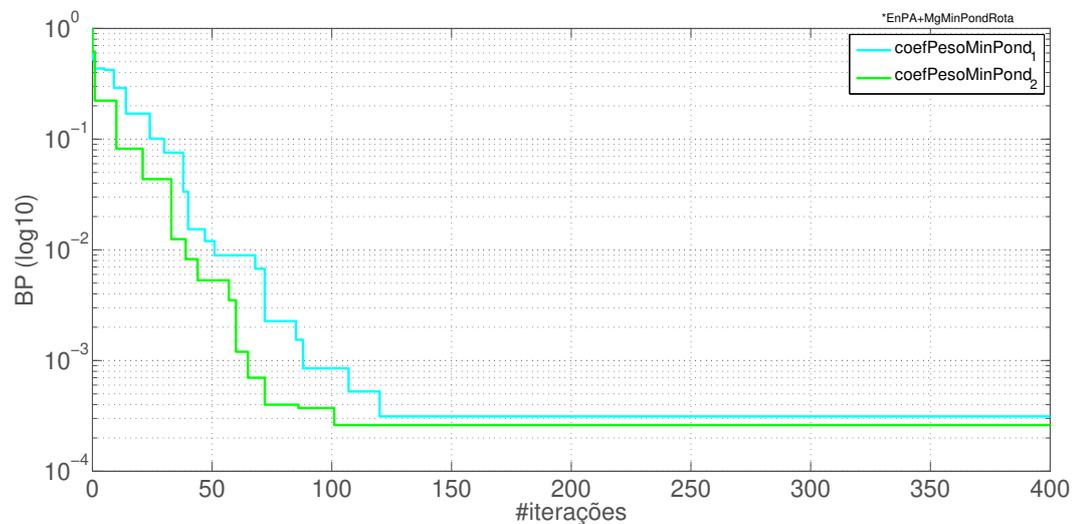
Para as simulações com o EnPA+Mg, foram necessárias fases de treinamento para as variações com ponderação (EnPA+MgMedPondRota e EnPA+MgMinPondRota), que utilizaram a meta-heurística PSO (Apêndice G) na obtenção dos coeficientes dos pesos das conexões, conforme descrito na equação (4.22). O valor utilizado para m da equação de atribuição inicial (na ausência de conexões nos cenários adotados) foi de 0,5, no intuito de atribuir ao máximo à potência de lançamento inicial a metade da margem de potência possível.

Na fase de treinamento, o PSO foi aplicado a um cenário de interesse, sendo o escolhido a topologia DT, apenas para a carga de 60 erlang. Além disso, cada valor de aptidão foi obtido por uma média de três simulações, cada uma com ao menos sessenta mil requisições e cinquenta bloqueios (ambas tiveram de ser atingidas). O número de partículas utilizadas com dimensão $Dim = 4 \times 4 \times 4$ foi igual a cinquenta ($N_{part} = 50$), e o número de iterações foi igual a quatrocentos ($L_p = 400$), valor escolhido conforme o comportamento das partículas, quando as mesmas convergem suas aptidões, não ocorrendo mudanças. A fase de treinamento foi realizada duas vezes, com inicialização das partículas de formas distintas, obtendo dois conjuntos de soluções independentes (duas partículas) que foram atribuídos aos coeficientes b_{n_1, n_2, n_3} dos pesos dos EnPA+Mg-Pond (4.22), denominados: CoefPeso₁ e CoefPeso₂ (tanto para a média, quanto para o mínimo). Na Figura 28, foram apresentados os comportamentos das aptidões dessas partículas. Em ambas as fases de treinamento, as aptidões das partículas convergiram antes de 150 iterações. Para o EnPA+MgMedPondRota (Figura 28a), a partícula do CoefPesoMedPond₁ obteve a BP final de $2,01 \times 10^{-4}$ na iteração de número 103, enquanto a partícula do CoefPesoMedPond₂ obteve a probabilidade de bloqueio final de $2,93 \times 10^{-4}$ na iteração de número 137. Para o EnPA+MgMinPondRota (Figura 28b), a partícula do CoefPesoMinPond₁ obteve a BP final de $3,13 \times 10^{-4}$ na iteração de número 120, enquanto a partícula do CoefPesoMinPond₂ obteve a probabilidade de bloqueio final de $2,61 \times 10^{-4}$ na iteração de número 101.

Figura 28 – Comportamento das aptidões (probabilidade de bloqueio) de duas partículas obtidas por PSO ao longo das iterações para uma carga de 60 erlang na topologia DT sob as estratégias: (a) EnPA+MgMedPondRota; (b) EnPA+MgMinPondRota.



(a)



(b)

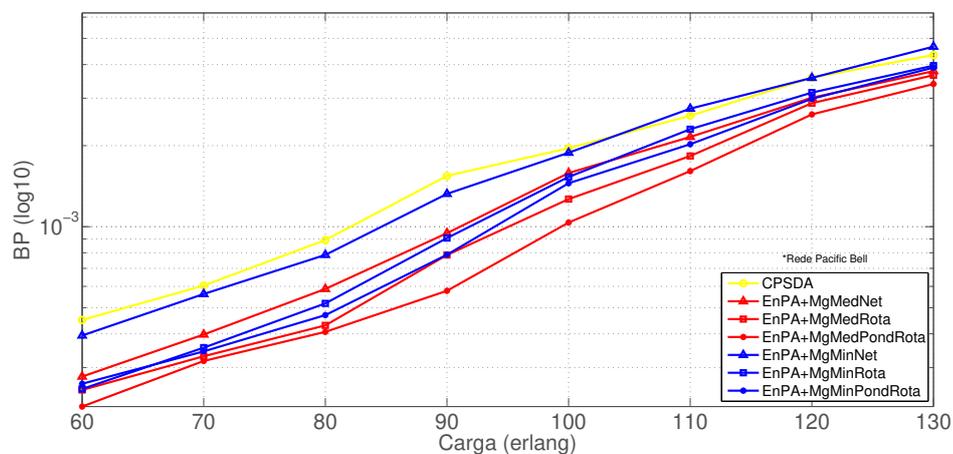
Fonte: a autora.

Os respectivos vetores de melhores posições, ou seja, os melhores coeficientes encontrados para a função peso do EnPA+Mg-Pond, foram expostos nas Tabelas 15 e 16 do Apêndice K, respectivamente, média ponderada e mínimo ponderado, em que cada uma das colunas das tabelas (CoefPeso₁ e CoefPeso₂) se refere a uma partícula obtida por inicializações independentes do PSO.

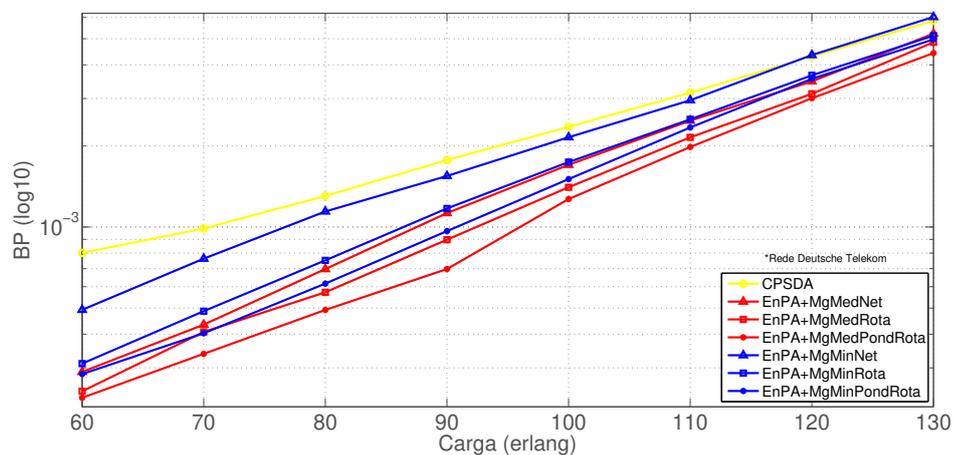
As partículas escolhidas para serem utilizadas na função peso do EnPA+Mg-Pond foram as que resultaram os melhores resultados em cada cenário, ou seja, CoefPesoMedPond₁

e CoefPesoMinPond_2 , respectivamente, $\text{EnPA+MgMedPondRota}$ e $\text{EnPA+MgMinPondRota}$. Em posse dos coeficientes para as respectivas funções pesos, foram obtidos e dispostos os resultados para todas as variações da estratégia EnPA+Mg na Figura 29.

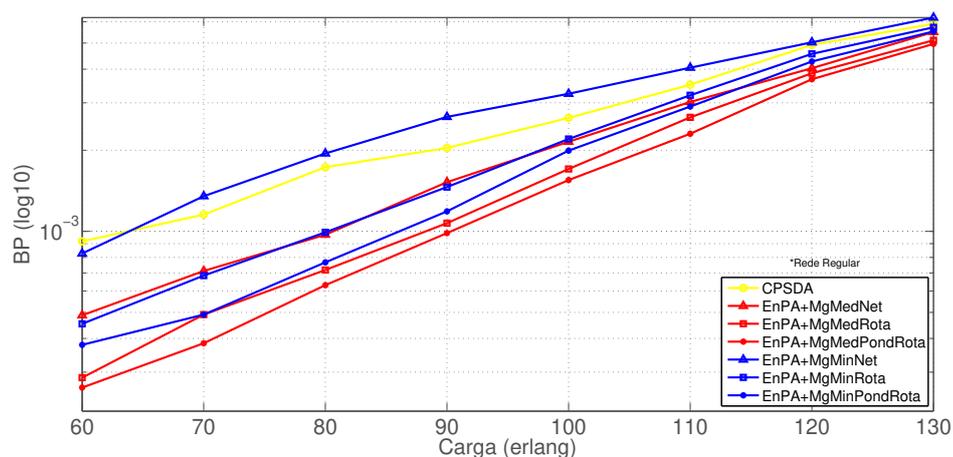
Figura 29 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o EnPA+Mg nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

Na Figura 29, comparando apenas as variações da estratégia EnPA+Mg que utilizaram o valor mínimo (linhas azuis), tem-se que as referentes ao cenário de rota obtiveram melhor

desempenho, sobretudo o valor ponderado, independentemente da topologia. A mesma conclusão foi possível ser observada para as variações do EnPA+Mg que utilizam o valor médio (linhas vermelhas). Um dos fatores que explica esse fato foi que ocorreu uma queda de margem de OSNR acentuada ao se observar a rede na totalidade comparado ao se observar apenas a rota. Além disso, a utilização da ponderação favoreceu focar nas conexões mais suscetíveis, ou seja, uma conexão que no instante da alocação da requisição não oferece grandes riscos poderá ser mais crítica em instantes futuros, tendo em vista as inúmeras combinações de taxa de transmissão, formato de modulação, potência, rota e posição espectral que as conexões podem adotar. Além disso, pelo mesmo motivo de baixar demasiadamente a margem, a utilização do padrão valor médio (linhas vermelhas) obtiveram melhores resultados que as respectivas variações com valor mínimo. Consequentemente, o melhor resultado entre as variações do EnPA+Mg foi a que utilizou o cenário da rota, com valor padrão adotado igual à média aritmética ponderada, seguido da média aritmética simples, independentemente da topologia. No geral, as estratégias EnPA+Mg alcançaram melhores resultados que o CPSDA, exceto para a topologia RG, que sofreu com as baixas margens atribuídas pelo EnPA+MgMinRede, devido aos enlaces relativamente maiores e, consequentemente, maiores penalidades. Na Tabela 11, foram apresentadas as maiores reduções de BP para cada variação do EnPA+Mg comparada ao CPSDA, em que o EnPA+MgMinNet obteve as menores reduções, inclusive, na topologia RG, a única redução de BP (9,9%) foi para a carga mais baixa, nas demais cargas houve aumento de BP comparado ao CPSDA. Enquanto os maiores ganhos ocorreram para o EnPA+MgMedPondRota, alcançando 71,4% de redução de BP.

Tabela 11 – Redução máxima da BP alcançada pelo EnPA+Mg em relação ao CPSDA dif.

	EnPA+MgMedNet			EnPA+MgMedRota			EnPA+MgMedPondRota		
	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,613	38,7%	90	0,482	51,8%	80	0,374	62,6%	90
DT	0,362	63,8%	60	0,306	69,4%	60	0,290	71,0%	60
RG	0,531	46,9%	60	0,312	68,8%	60	0,286	71,4%	60
	EnPA+MgMinNet			EnPA+MgMinRota			EnPA+MgMinPondRota		
	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EnPA+Mg}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,858	14,2%	90	0,555	44,5%	60	0,510	49,0%	90
DT	0,615	38,5%	60	0,388	61,2%	60	0,355	64,5%	60
RG	0,901	9,9%	60	0,494	50,6%	60	0,413	58,7%	60

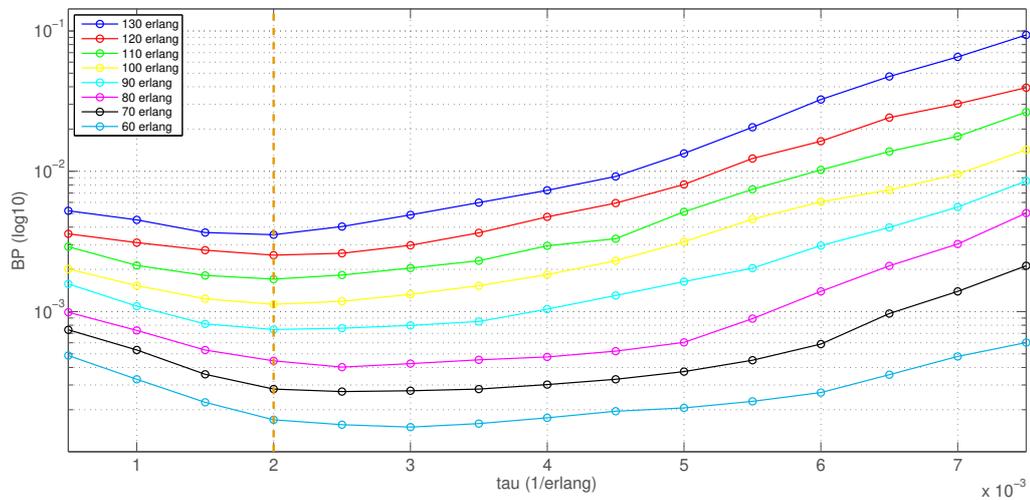
Fonte: a autora.

5.3.3 Atribuição de Potência Adaptativa

Os resultados para a atribuição de potência adaptativa (APA) foram obtidos para quatro versões: (i) sem memória e com ajustes de potência (APAnoMem); (ii) consciente sem memória e sem ajustes de potência (APACnoMem); (iii) com memória formada durante a simulação da rede e com ajustes de potência (APAmem); e (iv) com memória inicializada antecipadamente em uma pré-simulação e com ajustes de potência (APAmemPre).

O APA necessita de uma fase teste para a obtenção do valor de τ , variável responsável pela determinação da margem de potência a depender da carga da rede conforme equação (4.30). Por maior simplicidade do algoritmo, o APA sem memória e com ajustes de potência (APAnoMem) foi utilizado para a obtenção do valor de τ , sem perda de generalidade (VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022). A rede simulada foi a DT da Figura 19b por possuir características intermediárias. Os resultados da fase teste foram obtidos para o intervalo do domínio $[0,0005; 0,0075]$ (1/erlang) com passos de 0,0005 (1/erlang) para o τ . Os comportamentos das probabilidades de bloqueio foram curvas com concavidades para cima, com pontos de mínimo em $\tau = 0,002$ (1/erlang) para a maior parte das cargas, sobretudo as mais críticas. Consequentemente, a margem de potência variou de 12% a 26%, respectivamente para as cargas mais baixas (60 erlang) e mais alta (130 erlang). A diminuição e o aumento da probabilidade de bloqueio ocorreu em efeito ao comportamento da potência em função da margem vinculada a τ , em que diminuir demasiadamente pode resultar no problema do EnPA, que resulta em sinais sem margem para tolerar canais futuros, enquanto aumentar demasiadamente pode resultar no problema do EPA, em que as não linearidades se tornam elevadas na rede. A varredura de τ para cargas mais baixas resulta em um trecho quase que constante (plano), pois a variação de margem é menor quando comparada a cargas mais altas. Por exemplo, quando τ sai de 0,003 para 0,005, para 130 erlang ocorre uma variação de 39% para 65%, enquanto para 60 erlang a variação é de 18% para 30%, sendo a curva para 130 erlang mais côncava do que a de 60 erlang. Na Figura 30, foram apresentadas as curvas de BP em função de τ para todas as cargas analisadas nesta pesquisa na topologia DT.

Figura 30 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função do valor de τ para a margem de potência do APA sem memória e com ajustes (APAnoMem) na topologia DT.



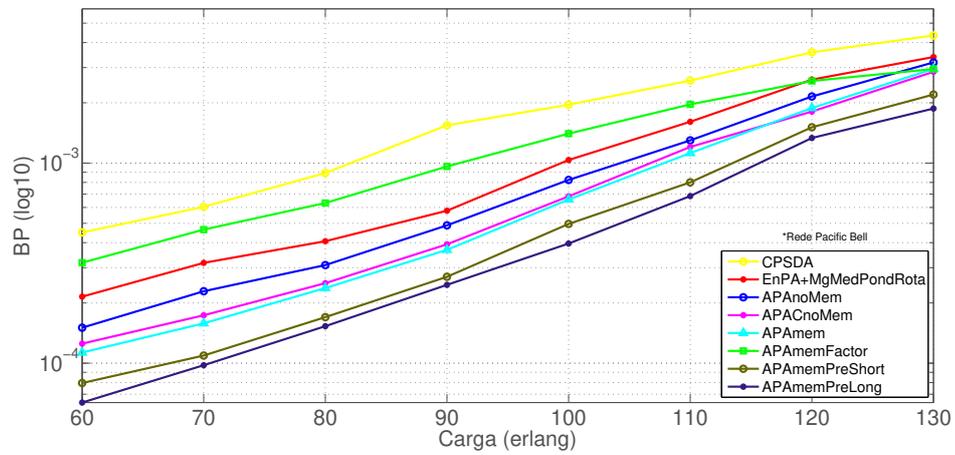
Fonte: a autora.

Entretanto, para análise da dependência da carga com a margem, foi considerada uma simulação com o APAMem com *factor*, equação (4.30), constante e igual ao obtido na carga crítica, ou seja, $factor = 0,002 \cdot 130 = 26\%$. Para distinguir do APAMem, foi atribuído o termo APAMemFactor (APAMem *with factor constant*).

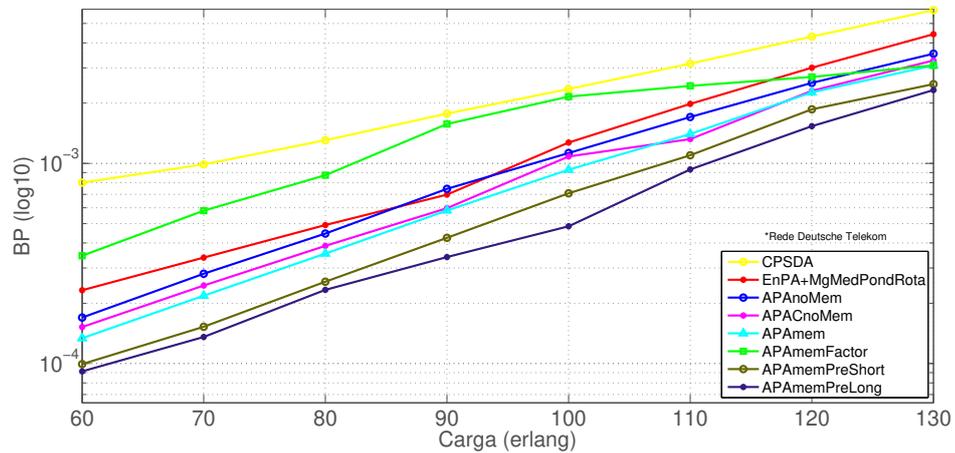
Para o APAMemPre, duas versões foram realizadas: (i) com simulação prévia padrão adotada nesta pesquisa, ou seja, 100 mil requisições e 100 bloqueios; e (ii) com simulação duas vezes mais longa, com 200 mil requisições e 200 bloqueios. A primeira foi nomeada de APAMemPreShort, enquanto a segunda foi nomeada de APAMemPreLong. A opção de estender o número de requisições e bloqueios mínimos a serem atingidos durante a simulação foi uma tentativa de tornar o banco de dados mais completo e com informações mais próximas às do estado estacionário com atualização das primeiras chamadas alocadas.

Assim, com o conhecimento das variáveis e definições necessárias para o APA (todas as variações), foram obtidas e apresentadas as probabilidades de bloqueio para as topologias PB, DT e RG na Figura 31.

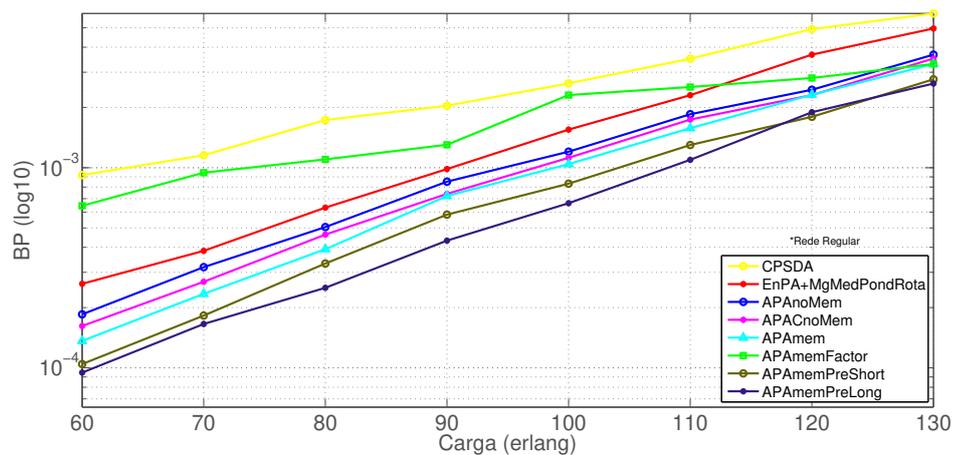
Figura 31 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o APA sob as respectivas condições de memória nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

Na Figura 31, os algoritmos APA apresentaram melhores desempenhos em todas as suas variações quando comparado ao CPSDA, pois a atribuição de potência foi realizada com co-

nhecimento do estado da rede em tempo de simulação, além de garantir margem suficiente para futuras conexões. Entretanto, o APAMemFactor, por atribuir a mesma margem de potência, considerando a maior carga (130 erlang), resultou em margens excessivas para as demais cargas, acarretando maiores bloqueios entre os APAs, inclusive com desempenho inferior à heurística EnPA+MgMedPondRota. O APAnoMem obteve até 79,8% de redução de BP comparado ao CPSDA na topologia RG, tendo resultados inferiores ao APACnoMem, que utilizou uma informação a mais, a potência tolerada pelas conexões ativas, alcançando uma redução da BP de 82,4% comparado ao CPSDA também na topologia RG. O APACnoMem alcançou resultados similares à variação com memória APAMem, que possuíam a limitação de analisar apenas seus respectivos limiares de OSNR em sua atribuição inicial. Entretanto, a utilização de um banco de dados pré-formado melhorou os resultados, pois as primeiras requisições que chegaram à rede adquiriram valores compatíveis com o estado estacionário da rede, sobretudo quando o banco de dados foi formado através da estratégia APAMemPreLong. Na Tabela 12, são apresentadas as reduções máximas da BP comparadas ao CPSDA.

Tabela 12 – Redução máxima da BP alcançada pelo APA em relação ao CPSD.

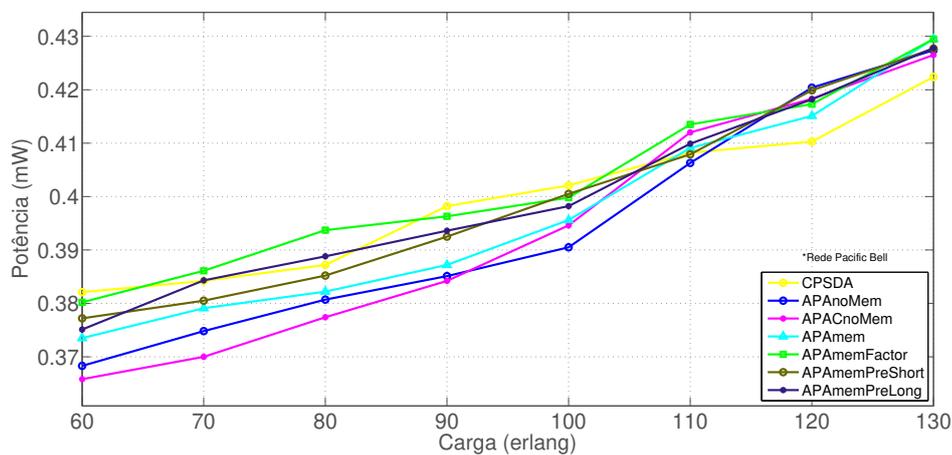
	APAnoMem			APACnoMem		
	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,316	68,4%	90	0,254	74,6%	90
DT	0,212	78,8%	60	0,190	81,0%	60
RG	0,202	79,8%	60	0,176	82,4%	60
	APAMem			APAMemFactor		
	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,239	76,1%	90	0,623	37,7%	90
DT	0,167	83,3%	60	0,431	56,9%	60
RG	0,148	85,2%	60	0,560	44,0%	60
	APAMemPreShort			APACmemPreLong		
	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{APA_x}}{BP_{CPSD_{dif}}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,175	82,5%	90	0,141	85,9%	60
DT	0,124	87,6%	60	0,114	88,6%	60
RG	0,114	88,6%	60	0,103	89,7%	60

Fonte: a autora.

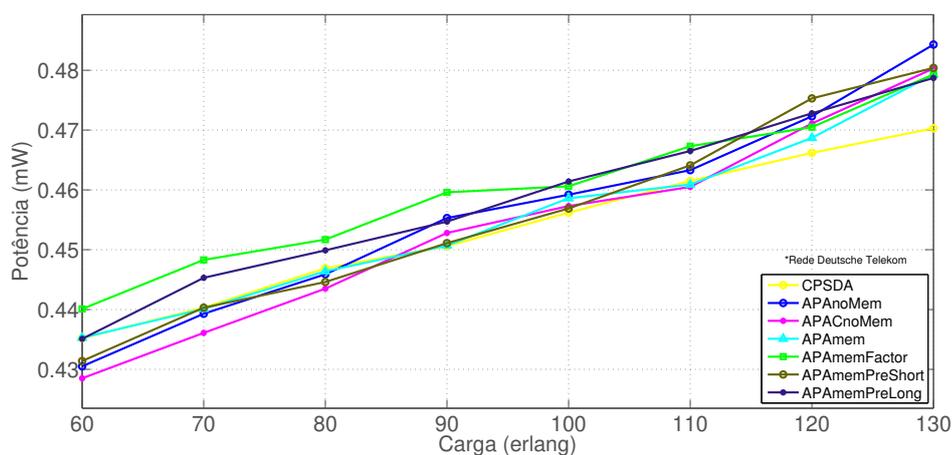
Os valores médios de potência de lançamento dos algoritmos APA foram apresentados na Figura 32, em que as curvas crescem com a carga da rede. Não há como identificar um

comportamento padrão da potência entre os algoritmos APA, pois os mesmos tentaram se adequar ao cenário da rede, buscando os melhores valores a cada simulação.

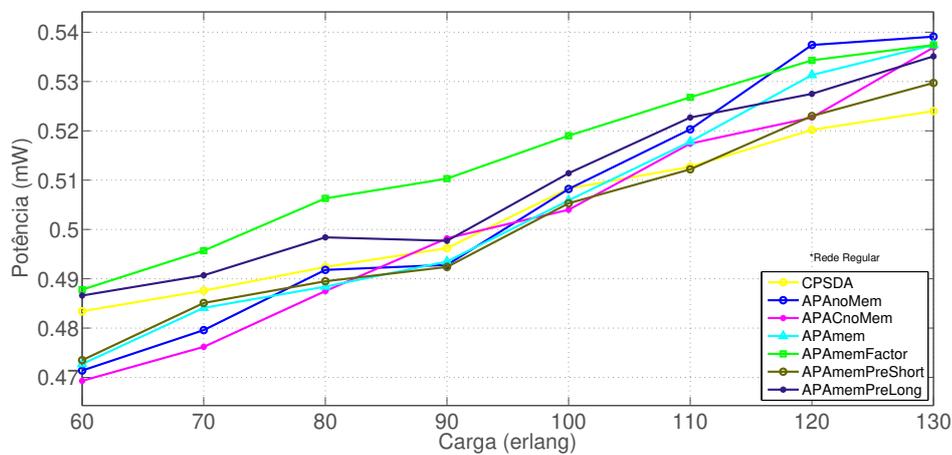
Figura 32 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para o algoritmo APA nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)

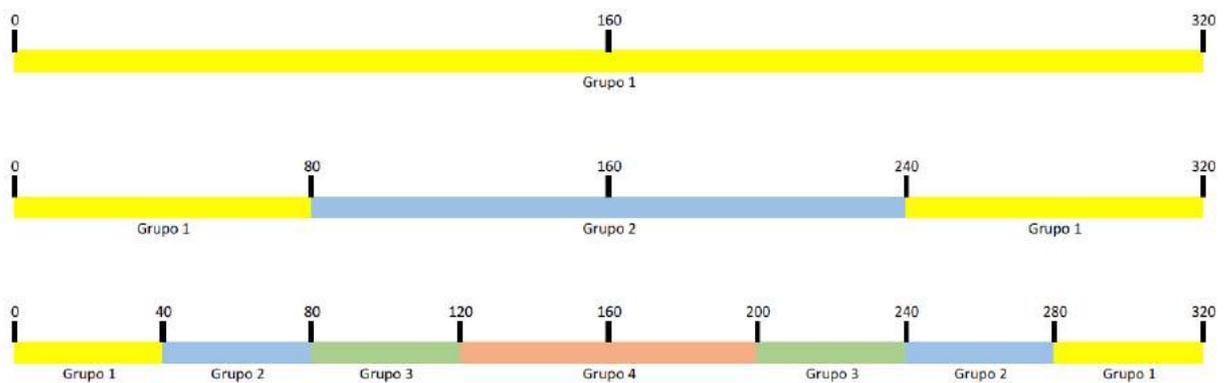


(c)

Fonte: a autora.

De modo a analisar a importância da posição espectral na atribuição de potência para o APAmem, foram consideradas subdivisões no espectro a depender da distância ao seu centro. As subdivisões adotadas foram os divisores inteiros de 320 (número de *slots* adotado nesta pesquisa). Conseqüentemente 14 (catorze) formas de agrupar foram definidas: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 160 e 320 grupos. Na Figura 33, foram apresentados exemplos para 1, 2 e 4 grupos de faixa de espectro, de modo que o primeiro grupo de cada divisor é o correspondente mais próximo da margem do espectro, enquanto o último grupo é o mais próximo do centro do espectro. Observa-se que, o divisor de número 1 (um) equivale a desprezar a posição espectral do canal no algoritmo APAmem, enquanto o divisor de número 320 (trezentos e vinte) remete a considerar fielmente a posição espectral do canal no algoritmo APAmem.

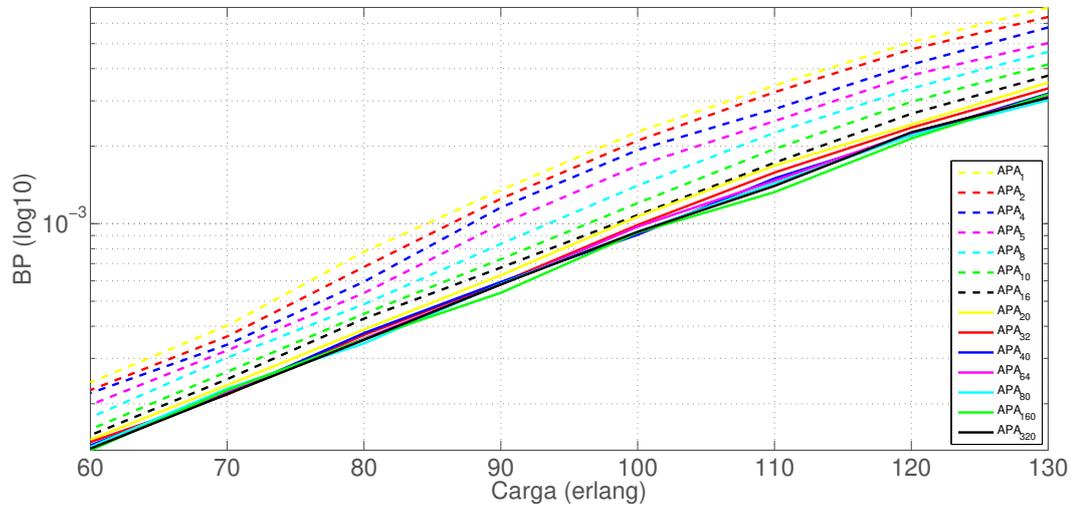
Figura 33 – Exemplo de subdivisão do espectro em 1, 2 e 4 grupos.



Fonte: a autora.

Para a topologia DT, os resultados para a probabilidade de bloqueio foram apresentados na Figura 34 para o APAmem com agrupamento de espectro conforme divisão inteira pelos divisores obtidos ($APAmem_x$), em que foi possível observar que, a partir de 20 agrupamentos de *slots* de frequências (linhas contínuas), os resultados começaram se aproximar da solução com 320 agrupamentos (ideal), inclusive para cargas elevadas.

Figura 34 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede conforme agrupamento de slots no DB para o APAmem_x na topologia DT.



Fonte: a autora.

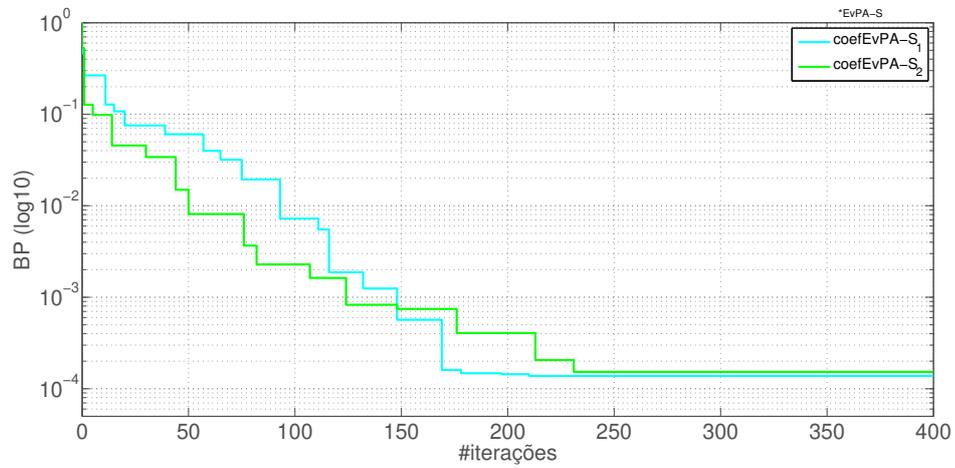
5.3.4 Atribuição de Potência Evolutiva

Para as estratégias evolutivas, tanto a estática (EvPA-S) quanto as dinâmicas (EvPA-D e EvPA-D-C), foram necessárias inicialmente fases de treinamento para a obtenção dos conjuntos de valores atribuídos aos coeficientes das respectivas relações através da meta-heurística PSO (Apêndice G). Nessas fases de treinamento, foi considerada a topologia DT com carga de 60 erlang e valor de aptidão obtido por uma média de três simulações, cada uma com ao menos sessenta mil requisições e cinquenta bloqueios (ambas deviam ser atingidas).

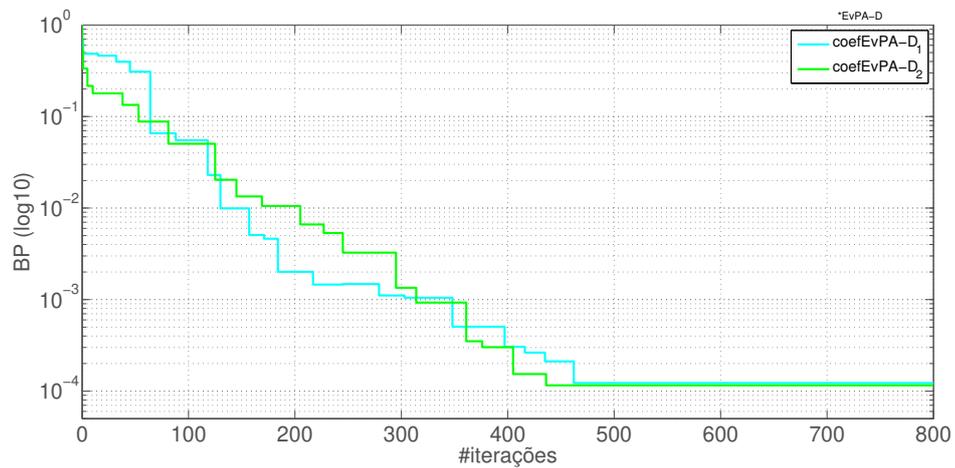
Para o EvPA-S, foram utilizadas 50 (cinquenta) partículas ($N_{part} = 50$) com dimensão $Dim = 4 \times 4$, as quais passaram por quatrocentas ($L_p = 400$) iterações. A fase de treinamento foi realizada duas vezes, com inicialização das partículas de formas independentes, obtendo dois conjuntos de soluções (duas partículas) que puderam ser atribuídos aos coeficientes do EvPA-S, denominados coefEvPA-S₁ e coefEvPA-S₂. Analogamente, para o EvPA-D e EvPA-D-C, foram utilizadas 50 (cinquenta) partículas ($N_{part} = 50$) com dimensão $Dim = 4 \times 4 \times 4$, as quais passaram por oitocentas ($L_p = 800$) iterações. Para cada uma das estratégias evolutivas dinâmicas, a fase de treinamento foi realizada duas vezes, com inicialização das partículas de formas independentes, obtendo dois conjuntos de soluções (duas partículas) para cada uma das estratégias que puderam ser atribuídos aos respectivos coeficientes, denominados coefEvPA-D₁ e coefEvPA-D₂ para o EvPA-D, e coefEvPA-DC₁ e coefEvPA-DC₂ para o EvPA-

D-C. Os comportamentos das aptidões das respectivas partículas ao longo das iterações foram apresentados na Figura 35. Em todas as fases de treinamento, as aptidões das partículas convergiram. A partícula do coefEvPA-S₁ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,38 \times 10^{-4}$ na iteração de número 210, enquanto a partícula do coefEvPA-S₂ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,53 \times 10^{-4}$ na iteração de número 231. A partícula do coefEvPA-D₁ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,22 \times 10^{-4}$ na iteração de número 462, a partícula do coefEvPA-D₂ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,15 \times 10^{-4}$ na iteração de número 436. Enquanto a partícula do coefEvPA-DC₁ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,00 \times 10^{-4}$ na iteração de número 395, enquanto a partícula do coefEvPA-DC₂ obteve a probabilidade de bloqueio final de $1,16 \times 10^{-4}$ na iteração de número 445.

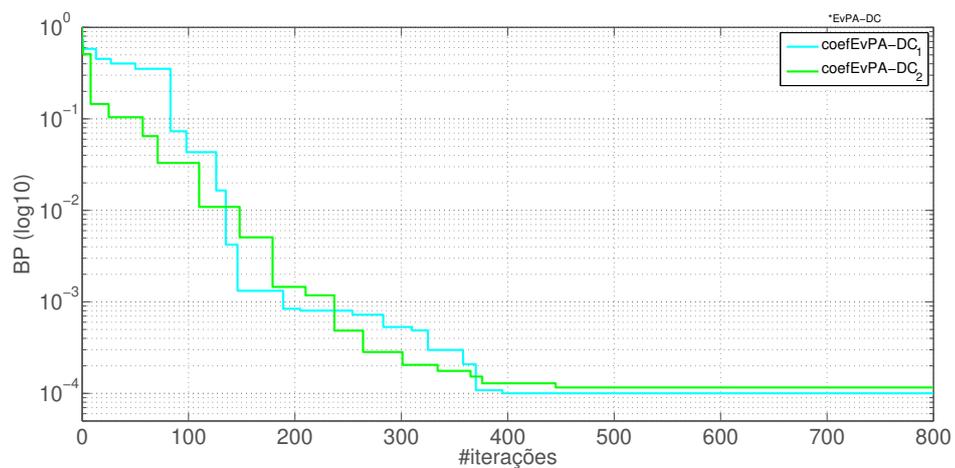
Figura 35 – Comportamento das aptidões (probabilidade de bloqueio) de duas partículas obtidas por PSO ao longo das iterações para uma carga de 60 erlang na topologia DT sob a estratégia: (a) EvPA-S; (b) EvPA-D; (c) EvPA-D-C.



(a)



(b)



(c)

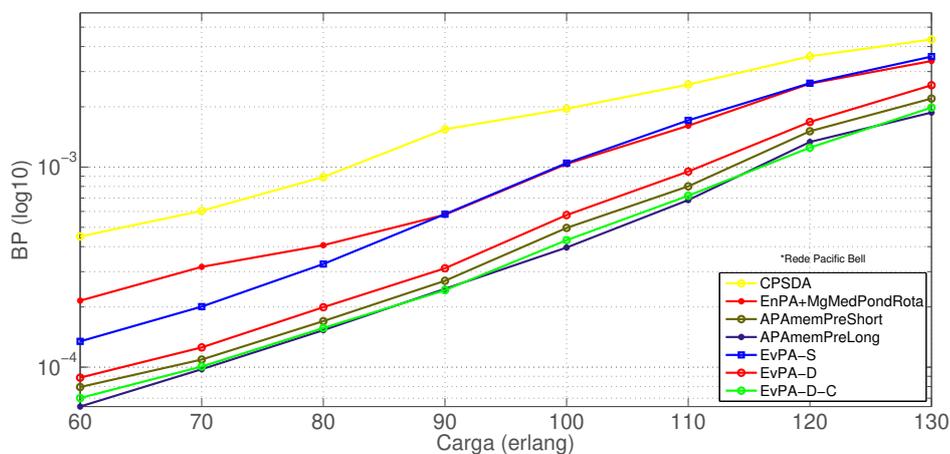
Fonte: a autora.

Os respectivos vetores de melhores posições que correspondem aos coeficientes dos algoritmos foram apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19 do Apêndice K, respectivamente, EvPA-S,

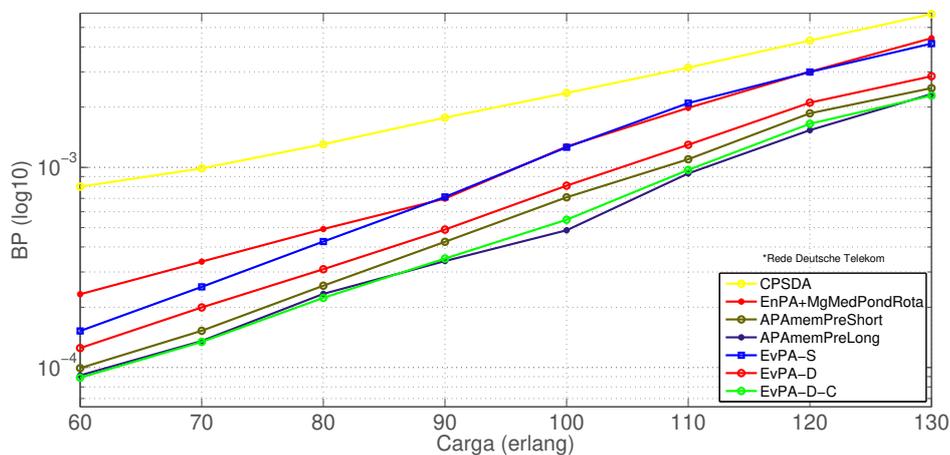
EvPA-D e EvPA-D-C. Na tabela referente à estratégia estática, foi possível observar que a ordem dos coeficientes foi próxima à ordem da potência a ser atribuída, 10^{-4} watts (como indica o valor ótimo do CPA), devido à atribuição de forma direta entre a potência e as variáveis distância percorrida e posição espectral, diferentemente dos valores obtidos para o EvPA-D e EvPA-D-C, que designa ao *factor_{dynamic}*, ou seja, um percentual.

Os valores atribuídos aos coeficientes das respectivas funções das estratégias foram escolhidos a partir dos respectivos menores valores de aptidões (BP) adquiridos, ou seja, coefEvPA-S₁, coefEvPA-D₂ e coefEvPA-DC₁, respectivamente para EvPA-S, EvPA-D e EvPA-D-C. Então, foram obtidos os resultados para probabilidade de bloqueio dispostos na Figura 36 para as topologias da Figura 19.

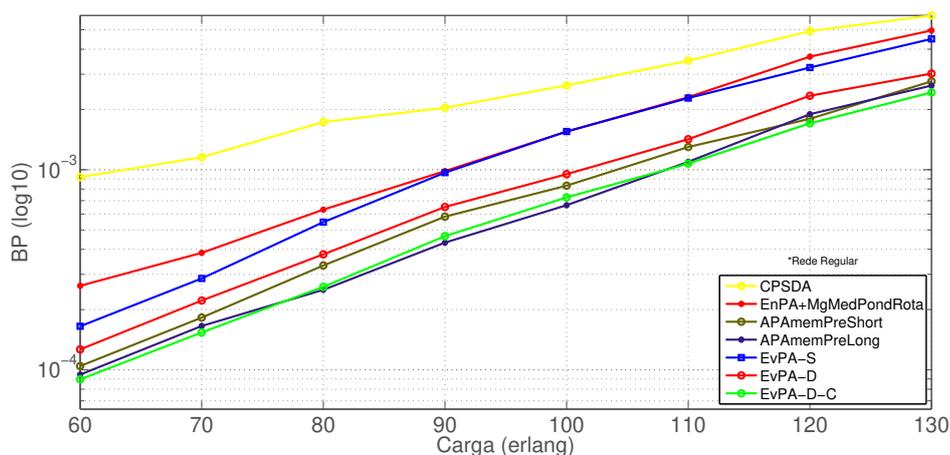
Figura 36 – Comportamento da probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para o EvPA: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

O comportamento para a probabilidade de bloqueio do EvPA-S dado na Figura 36 foi melhor quando comparado ao CPSDA, com redução de BP de até 82%. A melhora no de-

sempenho foi devido à atribuição de potência de lançamento ser baseada no comprimento da rota e na posição espectral, ou seja, sinais com mesmas larguras de banda puderam apresentar valores de potências diferentes, mais robusto que o CPSDA. Entretanto, o EvPA-S não superou os resultados do APAmemPre (*Short* e *Long*), EvPA-D e EvPA-D-C, em que se tinham conhecimentos do estado da rede, porém obteve um desempenho similar à estratégia EnPA+MgMedPondRota, que também utilizou da meta-heurística PSO com variáveis estáticas (comprimento da rota, posição espectral e formato de modulação) para os pesos, mas que foi dinâmico quanto aos valores das margens ponderadas. Apesar de as características fixas serem essenciais à atribuição de potência, o EvPA-D, na Figura 36, obteve resultados melhores que o EvPA-S, em virtude do conhecimento do estado da rede (ocupação e P_{min}) na definição da atribuição de potência, alcançando uma redução de BP de 86,2% comparado ao CPSDA. Porém, o EvPA-D não conseguiu superar o EvPA-D-C, que alcançou uma redução de 90,2% comparado ao CPSDA, em que se tinha mais uma informação para atribuição de potência, a potência tolerada pelas demais conexões da rede (P_{maxTol}). O EvPA-D-C alcançou resultados similares à estratégia APAmemPreLong, superando o APAmemPreShort. Observa-se que, em todo caso, a utilização da meta-heurística PSO para a determinação dos coeficientes necessários às estratégias EvPA se mostrou robusta o suficiente para obter resultados satisfatórios para diferentes topologias e cargas das utilizadas na fase de treinamento, obtendo uma relação adequada entre os coeficientes e as variáveis envolvidas. Por fim, as estratégias APAmemPreLong e EvPA-D-C obtiveram os melhores resultados nesta pesquisa. Na Tabela 13 foram apresentadas as reduções da probabilidade de bloqueio para as estratégias EvPA em relação ao CPSDA.

Tabela 13 – Redução máxima da BP alcançada pelo EvPA-S, EvPA-D e EvPA-D-C em relação ao CPSDA.

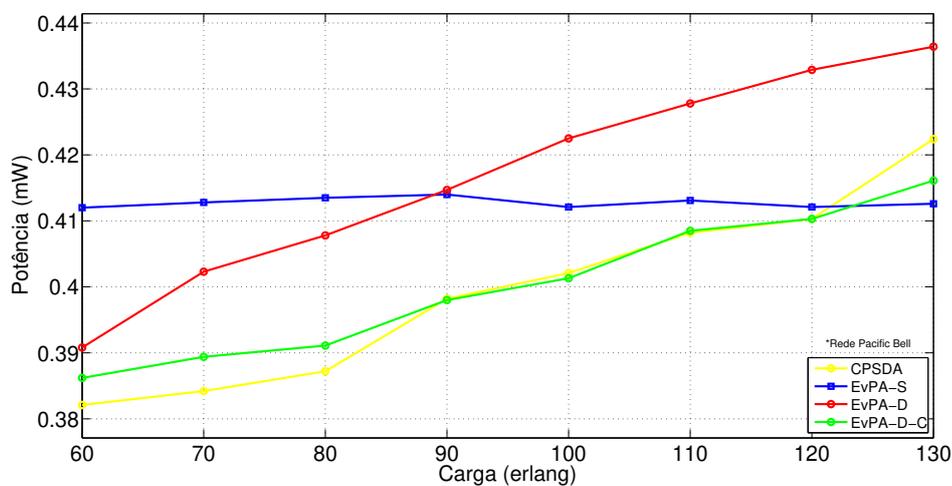
	EvPA-S			EvPA-D			EvPA-D-C		
	Relação $\left(\frac{BP_{EvPA-S}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EvPA-D}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)	Relação $\left(\frac{BP_{EvPA-D-C}}{BP_{CPSDdif}}\right)$	Redução da BP	Carga (erlang)
PB	0,299	70,1%	60	0,197	80,3%	60	0,156	84,4%	60
DT	0,190	81,0%	60	0,156	84,4%	60	0,111	88,9%	60
RG	0,180	82,0%	60	0,138	86,2%	60	0,098	90,2%	60

Fonte: a autora.

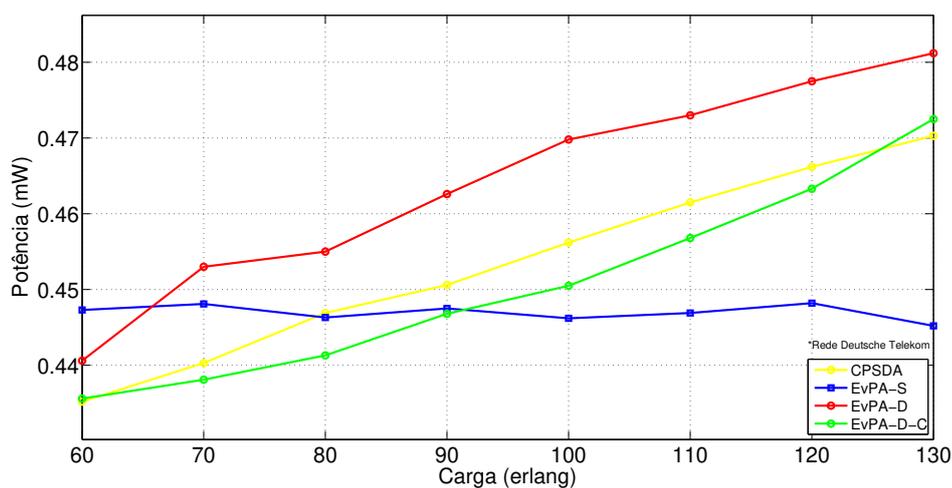
O comportamento para os valores médios das potências de lançamento dos EvPA foram dados na Figura 37, em que a variação de potência no EvPA-S com a carga é mínima, em decurso da atribuição de potência ser dependente de características fixas (rota e posição espec-

tral), entretanto houve variações entre as topologias devido ao comprimento das rotas. Esse fato fez com que a potência de lançamento do EvPA-S fosse mais adequada para cargas baixas (cenário utilizado na fase teste), obtendo uma margem de redução de BP maior nessa faixa comparado ao EnPA+MgMedPondRota. Para o EvPA-D e o EvPA-D-C, ocorreram aumentos nos valores de potência média em função da carga, entretanto os valores para o EvPA-D foram maiores que para o EvPA-D-C, em que a P_{maxTol} limitou o valor de potência a ser atribuída, atingindo valores médios mais próximos do CPSDA.

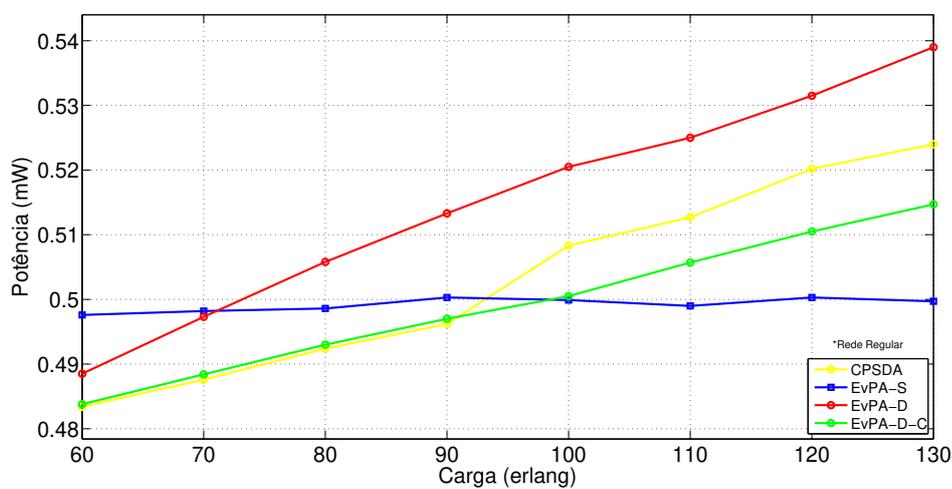
Figura 37 – Comportamento da potência média de lançamento em função da carga da rede para EvPA-S, EvPA-D e EvPA-D-C nas topologias: (a) PB; (b) DT; (c) RG.



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, as estratégias desenvolvidas para a atribuição de potência de lançamento foram comparadas com as estratégias presentes na literatura passíveis de aplicação ao cenário de redes elásticas com tráfego dinâmico. Algumas das estratégias desenvolvidas, desempenharam resultados piores do que as estratégias bases, entretanto as mesmas serviram como base para o desenvolvimento de estratégias mais robustas. A utilização de características dinâmicas na rede para a atribuição de potência, aliado ao conhecimento de valores máximos e mínimos de potência que poderiam ser atribuídos às conexões, resultaram em melhorias nos resultados. Sobretudo para estratégias que se adaptam com base em experiências passadas e atuais, como a APAmem, e as que se baseiam em modelos evolutivos, EvPA-D.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As redes elásticas agregaram melhorias ao cenário das redes ópticas, apesar de ter tornado seu gerenciamento mais complexo em função do maior número de parâmetros quando comparadas às difundidas redes WDM. A elasticidade (ou flexibilidade), em geral, é tratada em relação às larguras de banda dos canais, possibilitando a utilização de forma eficiente do espectro óptico e, conseqüentemente, prometendo saciar as demandas diversificadas e heterogêneas com menor ociosidade. Isso posto, o conhecimento das técnicas de gerenciamento de recursos é um dos principais focos de estudo atualmente em comunicações ópticas, sobretudo para os problemas RSA e suas variações (RMLSA e PRMLSA) (SILVA; ABBADE; BONANI, 2013).

Neste trabalho, foram inicialmente introduzidos os conceitos referentes às EONs, seguido de detalhamentos dos elementos que as compõem, como os SBVTs, os BV-WSSs e os enlaces ópticos. Também foi desenvolvido um ambiente computacional que considerou os cenários de interesse para uma rede óptica elástica transparente com supercanais Nyquist e com tráfego dinâmico.

Baseado no princípio que em toda transmissão ocorrem alterações nos sinais, seja em decorrência do meio de transmissão ou das interações entre os sinais, como por ASE e NLI, foi utilizado um modelo matemático para representá-las. Para o ruído ASE, o modelo utilizado se baseou no amplificador EDFA. Para as NLI, foi utilizado o modelo simplificado de Ruído Gaussiano. No modelo GN, foi possível observar a relação direta entre a potência e as penalidades sobre os canais durante a transmissão, de efeito que uma potência elevada pode diminuir a eficiência de transmissão de um sinal por aumentar as não linearidades, enquanto uma potência baixa pode levar à incapacidade de transmissão entre transmissor e receptor. Assim, a QoT , a OSNR, a probabilidade de bloqueio e, conseqüentemente, o desempenho da rede (parâmetros utilizados neste estudo) são acometidos pela potência atribuída aos sinais presentes na rede (POGGIOLINI, 2012), de forma que aumentar a complexidade do problema RMLSA com a inclusão do problema de atribuição de potência é um assunto recorrente e atual, mas com muitas lacunas sobretudo sob a condição de tráfego dinâmico e com um número elevado de requisições (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019; VALE; ALMEIDA JUNIOR; ASSIS, 2022).

Nesse contexto, este trabalho buscou solucionar o problema de atribuição de potência do PRMLSA para redes ópticas elásticas transparentes e com tráfego dinâmico, para o qual foi essencial o estudo do comportamento da OSNR em função da potência de lançamento dos

sinais, que resultou nas relações dos pontos extremos de máximo e mínimo para a atribuição de potência, as quais considerou as características dos sinais e das rotas. Além disso, o cálculo do extremo máximo para a potência evitou o desperdício de energia e a geração de efeitos não lineares ainda mais elevados, tendo em vista que potências superiores à máxima obtêm valores de OSNR idênticos a valores de potências inferiores correspondentes, em decorrência dos efeitos contrários das não linearidades e ASE. As estratégias desenvolvidas para a atribuição de potência foram EPA, ECPA, EnPA, EnPA+Mg, APA e EvPA, comparados com as estratégias mais divulgadas na literatura, o CPA (XAVIER, 2016; PALKOPOULOU et al., 2013; MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015; SAVORY, 2014), o CPSDA (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015b; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015a; YAN et al., 2015) e o LOGON (POGGIOLINI et al., 2013b).

Entre as estratégias analisadas da literatura, o CPSDA obteve os melhores resultados, enquanto o LOGON foi a pior. O LOGON, por superestimar os ruídos, resultou em sinais com formatos de modulações menos eficientes, larguras de banda maiores e altos valores de potência, o que fez aumentar a ocupação de *slots* e, conseqüentemente, os bloqueios. O CPA, por atribuir um mesmo valor de potência a todos os canais, não obteve os melhores resultados, pois uma mesma potência para um canal estreito e para um canal largo resulta em penalidades diferentes em regiões espectrais vizinhas, o qual torna mais crítico para canais estreitos devido à maior aproximação da região vizinha. Além de não considerar o pior cenário para definir a potência como no LOGON, o CPSDA difere entre as larguras de banda para a atribuição de potência, em que é ofertada a mesma potência a canais com mesmas larguras de banda, de forma que, quanto menor a largura de banda, menor a potência atribuída, e vice-versa, o que faz ser mais eficiente que o CPA.

Em busca por soluções ao problema de atribuição de potência, O EPA e o EnPA foram desenvolvidos a partir da análise inicial do comportamento da OSNR em função da potência, no qual era atribuída a potência máxima pelo EPA, que resultava no maior valor de OSNR para a nova conexão, e a potência mínima pelo EnPA, que resultava no valor limiar de OSNR para a nova conexão. Entretanto, o EPA e o EnPA apresentaram os piores resultados para as probabilidades de bloqueio entre todos os algoritmos analisados. O EnPA atribuiu valores de potência baixos, os quais geravam sinais que não suportavam a menor das influências de canais futuros, salvo pela margem definida na interpolação utilizada nos seus cálculos, o que gerou altos bloqueios, superando os do EPA. O EPA atribuída valores de potência elevados, os quais, além de poder comprometer o ingresso dos próprios sinais na rede, ocasionavam maiores não

linearidades, o que aumentou os bloqueios.

O ECPA foi desenvolvido para suprir o comprometimento do ingresso dos próprios canais na rede que ocorria no EPA. No ECPA, a atribuição de potência observou o estado da rede, atribuindo o menor valor entre a potência para obtenção da OSNR máxima da requisição e a potência máxima suportada pelos canais pré-existentes na rede, cuja rota compartilhava ao menos um enlace com a rota escolhida para a requisição. Apesar de ter ocorrido uma diminuição nos valores médios de potência com a introdução de limitação de potência comparados ao EPA, o ECPA continuou com seus valores médios de potência elevados comparados ao CPA, o que resultou em menos bloqueios que o EPA, mas permaneceu com desempenho inferior aos do CPSDA, CPA e LOGON.

Apesar de os resultados obtidos terem sido inferiores às técnicas consolidadas na literatura, as estratégias EPA, ECPA e EnPA serviram de base para o desenvolvimento das técnicas EnPA+Mg, APA e EvPA, em que foi buscado uma atribuição de potência que considerasse um ponto entre as zonas de máximas e mínimas atribuições.

O EnPA+Mg, por lidar com ajustes de potência baseados na manutenção de efetiva margem de OSNR da nova conexão e das conexões presentes na rede, apresentou melhores resultados para o desempenho da rede que as estratégias CPA e CPSDA, sobretudo para as variações que utilizaram de valores das médias (simples ou ponderada) para as margens de OSNR entre as conexões que passam pela rota da requisição. Assim, o EnPA+Mg mostrou que estratégias que não armazenam informações passadas e/ou não necessitam de fases de testes ou de treinamentos (salvo pela variação ponderada), sendo de simples implementação como o CPA e CPSDA, conseguem obter resultados melhores que as estratégias difundidas na literatura.

O APA atribuiu valores para potência baseado na análise do estado da rede no instante da atribuição e das características do sinal, como largura de banda, similarmente ao EnPA e EPA, respectivamente. De forma que, o valor de potência, sob uma margem, ficou acima da potência mínima necessária e menor que o valor de potência máxima, e assim possibilitava o ingresso de futuros canais na rede. A estratégia permitiu também ajustes aos valores de potência para casos de uma margem única não atender aos requisitos de QoT das conexões ativas na rede. Além disso, foram desenvolvidas versões com memórias, as quais possibilitaram o conhecimento do estado da rede no passado e, conseqüentemente, a previsão por experiência adquirida (no decorrer da simulação ou em simulações anteriores) do estado futuro da rede. Essas características aliadas ao conhecimento do estado da rede resultaram em um dos algorit-

mos desenvolvidos com menores números de bloqueios, o APAmemPre, sobretudo quando se utilizou um DB proveniente de uma simulação longa (APAmemPreLong). Isso porque o APAmemPre possibilitou que atribuições dos valores de potência pudessem ser realizadas baseadas no aprendizado sobre o estado estacionário fornecido pelo DB, desde as primeiras requisições.

O EvPA foi desenvolvido para suprir as limitações dos algoritmos APAmem e APAmemPre, os quais necessitavam de memória para armazenamento de dados e tempo de simulação maior (pela busca e/ou acesso à memória). Utilizando parâmetros constantes, o EvPA-S apresentou resultados melhores que o CPSDA, mas não bons o suficiente para superar os APAmemPre (*Short* e *Long*). O EvPA-D tentou compensar o conhecimento prévio da rede do APAmemPre, tanto por utilizar a ocupação para determinação de uma margem de atribuição de potência, quanto por utilizar a relação do APA com conhecimento dos limites de potências a serem atribuídos (P_{min} e P_{max}). Apesar disso, o EvPA-D não conseguiu superar os APAmemPre (*Short* e *Long*), entretanto seus resultados foram próximos e não necessitou de armazenamento de dados. A evolução do EvPA-D, o EvPA-D-C, por adicionar mais uma informação para a atribuição de potência, a atribuição de potência máxima tolerada (P_{maxTol}), fez com que os resultados alcançassem os da heurística APAmemLong.

Conclui-se que realizar de forma planejada a atribuição de potência é fundamental no desempenho da rede, sobretudo no cenário elástico em que canais com diferentes características trafegam. Conseqüentemente, o problema do PRMLSA é mais abrangente que o RMLSA e RSA, pois possibilita a atribuição adequada de potência, além do roteamento, definição do formato de modulação e posição no espectro. Portanto, a pesquisa buscou preencher lacunas para o cenário de redes ópticas elásticas transparentes e com tráfego dinâmico, como uma forma de satisfazer a crescente demanda por largura de banda, em que um bom desempenho é essencial.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros na linha de pesquisa do problema PRMLSA em redes elásticas, segue:

- Analisar outros valores padrões para obtenção da margem para a estratégia EnPA+Mg, além de mínimo e médio, por exemplo, mediana e moda. Além de considerar outros cenários, como conexões apenas em posições espectrais vizinhas.

- Levantar a importância da utilização de banco de dados (um ou mais) dos algoritmos APA para o cenário de cargas oscilantes ao longo de um dia, por exemplo, considerando horários de altas (picos) e baixas demandas.
- Considerar a remoção da representação por série de potências para as estratégias EvPA (estática e dinâmicas), através da representação em vetor, em que cada elemento é designado por uma combinação de variáveis consideradas.
- Considerar a remoção dos limiares de potência (P_{max} e P_{min}) das estratégias EvPA dinâmicas, através de uma atribuição direta (vetor) ou por série de potências entre as variáveis (similar ao EvPA-S).
- Analisar outras variáveis e/ou combinações de variáveis de entrada para os EvPA.
- Desenvolver estratégias quando múltiplos caminhos são empregados com roteamento diferente do fixo-alternativo.

REFERÊNCIAS

- ABKENAR, F. S.; RAHBAR, A. G. Study and analysis of routing and spectrum allocation (rsa) and routing, modulation and spectrum allocation (rmsa) algorithms in elastic optical networks (eons). *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 23, p. 5–39, 2017.
- ALAM, M. N. Particle swarm optimization: Algorithm and its codes in matlab. *ResearchGate*, v. 1, p. 1–10, 2016.
- ALI, M.; RAMAMURTHY, B.; DEOGUN, J. S. Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 32, n. 5, p. 539–555, 2000.
- ALMEIDA JUNIOR, R. C.; SANTOS, A. F.; ASSIS, K. D. R.; WALDMAN, H.; MARTINS FILHO, J. F. Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks. *Electronics Letters, IET*, v. 49, n. 5, p. 359–361, 2013.
- ALYATAMA, A.; ALRASHED, I.; ALHUSAINI, A. Adaptive routing and spectrum allocation in elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 24, p. 12–20, 2017.
- AMAYA, N.; MUHAMMAD, I.; ZERVAS, G. S.; NEJABATI, R.; SIMEODINOU, D.; ZHOU, Y.-R.; LORD, A. Experimental demonstration of a gridless multi-granular optical network supporting flexible spectrum switching. In: IEEE. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.], 2011. p. 1–3.
- ANDREWS, L. C. *Special Functions of Mathematics for Engineers*. [S.l.]: Spie Press, 1998. v. 49. 1–100 p.
- AZODOLMOLKY, S.; PERELLO, J.; ANGELOU, M.; AGRAZ, F.; VELASCO, L.; SPADARO, S.; POINTURIER, Y.; FRANCESCO, A.; SARADHI, C. V.; KOKKINOS, P. et al. Experimental demonstration of an impairment aware network planning and operation tool for transparent/translucent optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 29, n. 4, p. 439–448, 2010.
- BA, S.; CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Defragmentation scheme based on exchanging primary and backup paths in 1+ 1 path protected elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, v. 25, n. 3, p. 1717–1731, 2017.
- BASTOS FILHO, C. J. A. *Amplificadores Ópticos para Sistemas de Comunicação Multicanais de Alta Capacidade*. 1–150 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2005.
- BAYVEL, P.; KILMURRAY, S.; KILLEY, R. I. Nonlinear transmission performance of digital nyquist wdm and optical ofdm. In: IEEE. *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2012. p. 1–4.
- BELLMAN, R. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 16, n. 1, p. 87–90, 1958.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, 2013.

- BHATT, U. R.; PRIYADARSHNI, S.; SARSODIA, T. Parametric analysis of elastic optical network for fixed and variable data rate using fixed path and first-fit routing. *International conference on Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications*, v. 1, Março 2019.
- BHIDE, N. M.; SIVALINGAM, K. M.; FABRY-ASZTALOS, T. Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in optical wdm networks. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 3, n. 3, p. 227–236, 2001.
- BONONI, A.; SERENA, P. An alternative derivation of johannisson's regular perturbation model. *arXiv preprint arXiv:1207.4729*, v. 1, 2012.
- BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; POGGIOLINI, P.; FORGHIERI, F. Performance limits of nyquist-wdm and co-ofdm in high-speed pm-qpsk systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 22, n. 15, p. 1129–1131, 2010.
- CAVALCANTE, M. A.; PEREIRA, H. A.; CHAVES, D. A. R.; Almeida Jr., R. C. Análise do impacto do ruído ase em redes ópticas elásticas transparentes utilizando múltiplos formatos de modulação. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, SBrT, v. 1, p. 1–5, 2015.
- CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 1, p. 183–210, 2017.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015.
- CHAVES, D. A. R. *Projeto de Redes Ópticas de Alta Capacidade Utilizando Técnicas de Otimização Bioinspiradas*. 1–158 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- CHEN, X.; SHIEH, W. Closed-form expressions for nonlinear transmission performance of densely spaced coherent optical ofdm systems. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 18, n. 18, p. 19039–19054, 2010.
- CHOW, T. L. *Mathematical Methods for Physicists: A concise introduction*. 1–148 p. Dissertação (Mestrado) — Cambridge University Press, 2000.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM*, v. 1, p. 1–6, 2010.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, 2011.
- CHUNG, H. S.; CHANG, S. H.; LEE, J. C.; SHIN, J.; YOUN, J. W.; KO, J.; LEE, J. K.; KANG, S.-K.; HUH, J. Y.; LEE, J. H. et al. Field trial of 112 gb/s dual-carrier dqpsk channel upgrade in installed 516 km of fiber link and roadm. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 30, n. 24, p. 3918–3923, 2012.

- COSTA, D. N. A. *Análise do Discriminante em Equações Polinomiais de Terceiro Grau a partir de Funções Simétricas*. 1–110 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação do Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Goiás, 2020.
- DANTE, L. R. *Matemática: Contexto e aplicações*. São Paulo, Editora Ática, v. 1, 2010.
- DENG, T.; SUBRAMANIAM, S. Source power management in transparent wavelength-routed mesh networks. In: *IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 1664–1668.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- DURAND, F. R.; ABRAO, T. Time-delay and estimation uncertainty impact on the heuristic-based power control of optical networks. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, v. 48, n. 1, p. 34, 2016.
- ESSIAMBRE, R.-J.; KRAMER, G.; WINZER, P. J.; FOSCHINI, G. J.; GOEBEL, B. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 662–701, 2010.
- FIDLER, F.; WINZER, P. J.; THOTTAN, M. K.; BERGMAN, K. Impairment-aware optical networking using cross-layer communication. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 2, p. 144–158, 2013.
- FONTINELE, A. C.; SANTOS, I. G. d.; LACERDAJUNIOR, J. C.; SOARES, A. C. B.; CARTAXO, A. V. T.; CAMPELO, D. R. S. Novo algoritmo para atribuição de potência por circuito em redes ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 561–574.
- GAO, G.; ZHANG, J.; WANG, L.; GU, W.; JI, Y. Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 4, p. 672–675, 2014.
- GARBI, G. G. *O Romance das Equações Algébricas*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2009. 1–214 p.
- GERSTEL, O.; JINNO, M.; LORD, A.; YOO, S. B. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 2, p. s12–s20, 2012.
- HABIBI, M.; BEYRANVAND, H. Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 11, n. 5, p. 179–189, 2019.
- HAMAD, A. M. *All Optical Multicasting in Wavelength Routing Mesh Networks with Power Considerations: Design and Operation*. 1–138 p. Dissertação (Mestrado) — Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University, 2008.
- HAMAD, A. M.; KAMAL, A. E. Optimal power-aware design of all-optical multicasting in wavelength routed networks. In: *IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 1796–1800.

- HAMAD, A. M.; KAMAL, A. E. Efficient power-aware network provisioning for all-optical multicasting in wdm mesh networks. In: *IEEE Global Telecommunications Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5.
- HAMAD, A. M.; KAMAL, A. E. Power-aware connection provisioning for all-optical multicast traffic in wdm networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 2, n. 7, p. 481–495, 2010.
- IP, E.; LAU, A. P. T.; BARROS, D. J.; KAHN, J. M. Coherent detection in optical fiber systems. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 16, n. 2, p. 753–791, 2008.
- IVES, D. J. *Coherent Optical Fibre Networking in the Nonlinear Regime*. 1–186 p. Tese (Doutorado) — Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London (UCL), 2015.
- IVES, D. J.; BAYVEL, P.; SAVORY, S. J. Adapting transmitter power and modulation format to improve optical network performance utilizing the gaussian noise model of nonlinear impairments. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 21, p. 3485–3494, 2014.
- IVES, D. J.; BAYVEL, P.; SAVORY, S. J. Routing, modulation, spectrum and launch power assignment to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 29, n. 3, p. 244–256, 2015.
- IVES, D. J.; SAVORY, S. J. Transmitter optimized optical networks. *National Fiber Optic Engineers Conference*, Optical Society of America, v. 1, p. JW2A–64, 2013.
- JANSON, B. N. Dynamic traffic assignment for urban road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 25, p. 143–161, 1991.
- JINNO, M.; KOZICKI, B.; TAKARA, H.; WATANABE, A.; SONE, Y.; TANAKA, T.; HIRANO, A. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 8, p. 138–145, 2010.
- JINNO, M.; MIYAMOTO, Y.; HIBINO, Y. Networks: Optical-transport networks in 2015. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, v. 1, n. 3, p. 157, 2007.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y.; MATSUOKA, S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, 2009.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; SONE, Y.; YONENAGA, K.; HIRANO, A. Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 5, p. 56–65, 2012.
- JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 23, p. 4544–4552, 2014.
- JOHANNISSON, P.; KARLSSON, M. Perturbation analysis of nonlinear propagation in a strongly dispersive optical communication system. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 31, n. 8, p. 1273–1282, 2013.
- KOGIAS, P.; OVALIADIS, K.; KOGIA, F. Comparative performance evaluation of m-ary qam modulation schemes using simulink and bertool. *signal*, v. 2, p. 7, 2006.

- KYRIAKOPOULOS, C. A.; NICOPOLITIDIS, P.; PAPADIMITRIOU, G. I.; VARVARIGOS, E. Fast energy-efficient design in elastic optical networks based on signal overlap. *IEEE Access*, v. 7, p. 113931–113941, 2019.
- LI, Y.; LUO, X.; WANG, L.; YANG, T.; CHEN, X.; ZHANG, Z. Routing, modulation level and spectrum assignment for deadline-driven manycast requests in survivable inter-datacenter elastic optical networks. *Optical Fiber Technology - Elsevier*, v. 55, p. 102150, 2020.
- LOBATO, F. R. L. *Aprovisionamento Dinâmico de Recursos em Redes Ópticas Elásticas Multiplexadas por Divisão de Espaço Considerando Limitações de Camada Física*. 1–163 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2019.
- LOBATO, F. R. L.; JACOB, A.; RODRIGUES, J.; CARTAXO, A. V. T.; COSTA, J. C. W. A. Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 1, p. 1–21, 2019.
- LÓPEZ, V.; DIOS, Æ. G. D.; GERSTEL, O.; AMAYA, N.; ZERVAS, G.; SIMEONIDOU, D.; FERNANDEZ-PALACIOS, J. P. Target cost for sliceable bandwidth variable transponders in a real core network. In: IEEE. *Future Network & Mobile Summit*. [S.l.], 2013. p. 1–9.
- LOPEZ, V.; VELASCO, L. *Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control*. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2016. 1–238 p. ISBN 9783319301730.
- MEDINA, R. Photons vs. electrons [all optical network]. *IEEE Potentials*, v. 21, n. 2, p. 9–11, 2002.
- MEI, H.; DING, J.; ZHENG, J.; CHEN, X.; LIU, W. Overview of vehicle optical wireless communications. *IEEE Access*, v. 8, p. 173461–173480, 2020.
- MILIES, C. P. A solução de tartália para a equação do terceiro grau. *Revista do Professor de Matemática*, v. 25, n. 1, p. 15–22, 1994.
- MOURA, P. M.; SCARAFICCI, R. A.; FONSECA, N. L. da. Algorithm for energy efficient routing, modulation and spectrum assignment. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5961–5966.
- NAKASHIMA, H.; AKIYAMA, Y.; HOSHIDA, T.; OYAMA, T.; TANIMURA, T.; RASMUSSEN, J. C. Launch power optimization co-operated with digital nonlinear compensator for elastic optical network. In: IEEE. *Opto-Electronics and Communications Conference*. [S.l.], 2015. p. 1–3.
- OU, Y.; HAMMAD, A.; PENG, S.; NEJABATI, R.; SIMEONIDOU, D. Online and offline virtualization of optical transceiver. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 7, n. 8, p. 748–760, 2015.
- PALKOPOULOU, E.; BOSCO, G.; CARENA, A.; KLONIDIS, D.; POGGIOLINI, P.; TOMKOS, I. Nyquist-wdm-based flexible optical networks: Exploring physical layer design parameters. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 31, n. 14, p. 2332–2339, 2013.
- PASTORELLI, R.; BOSCO, G.; PICIACCIA, S.; FORGHIERI, F. Network planning strategies for next-generation flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 7, n. 3, p. A511–A525, 2015.

- PAVEL, L. Power control for osnr optimization in optical networks: A noncooperative game approach. In: IEEE. *Conference on Decision and Control*. [S.l.], 2004. v. 3, p. 3033–3038.
- PAVEL, L. Osnr optimization in optical networks: Modeling and distributed algorithms via a central cost approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 24, n. 4, p. 54–65, 2006.
- PEREIRA, H. A. *Análise Sistêmica das Penalidades de Ruído nas Redes Ópticas Transparentes*. 1–116 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- POGGIOLINI, P. The gn model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 30, n. 24, p. 3857–3879, 2012.
- POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; JIANG, Y.; FORGHIERI, F. The gn-model of fiber non-linear propagation and its applications. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 4, p. 694–721, 2013.
- POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CIGLIUTTI, R.; CURRI, V.; FORGHIERI, F.; PASTORELLI, R.; PICIACCIA, S. The logon strategy for low-complexity control plane implementation in new-generation flexible networks. In: *IEEE Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3.
- POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; JIANG, Y.; FORGHIERI, F. A simple and effective closed-form gn model correction formula accounting for signal non-gaussian distribution. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 459–473, 2015.
- PRACIANO PEREIRA, T. Cálculo numérico computacional. *Sobral Matemática*, v. 1, p. 1–20, 2007.
- QIU, Y.; XU, J. Efficient hybrid grouping spectrum assignment to suppress spectrum fragments in flexible grid optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 35, n. 14, p. 2823–2832, 2017.
- RABBANI, H.; BEYGI, L.; GHOSHONI, S.; RABBANI, H.; AGRELL, E. Quality of transmission aware optical networking using enhanced gaussian noise model. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 37, n. 3, p. 831–838, 2019.
- RAEESI, A.; RABBANI, H.; BEYGI, L.; ZOKAEE, S. Discretized gaussian model for nonlinear noise in elastic optical networks. *Optics Communications*, Elsevier, v. 460, p. 125002, 2020.
- RAMAMURTHY, B.; INESS, J. Optimizing amplifier placements in a multiwavelength optical lan/man: The equally powered wavelengths case. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 16, n. 9, p. 1560, 1998.
- RAMAMURTHY, B.; INESS, J.; MUKHERJEE, B. Optimizing amplifier placements in a multiwavelength optical lan/man: The unequally powered wavelengths case. *IEEE/ACM transactions on networking*, v. 6, n. 6, p. 755–767, 1998.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical Networks: A Practical Perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. 1–215 p.

RAPPAPORT, T. S. *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas*. [S.l.]: Prentice Hall Brasil, 2009. 1–245 p. ISBN 9788576051985.

ROBERTS, I.; KAHN, J. M. Efficient discrete rate assignment and power optimization in optical communication systems following the gaussian noise model. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 35, n. 20, p. 4425–4437, 2017.

ROSA, A.; CAVDAR, C.; CARVALHO, S.; COSTA, J.; WOSINSKA, L. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In: IEEE. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*. [S.l.], 2012. p. 242–246.

SAMBO, N.; GIORGETTI, A.; CERUTTI, I.; CASTOLDI, P. A contention detection scheme for lightpath restoration in gmpls networks. *IEEE communications letters*, v. 11, n. 10, p. 820–822, 2007.

SANTOS, J. V. A. J.; BRITO, G. L. R.; BARBOSA, G. V. Caminho mínimo de redes conectadas utilizando grafos. *Revista Cereus*, v. 11, n. 3, p. 61–68, 2019.

SANTOS, L. R. R. d.; ABRAO, T. Adaptive chaotic hurricane-aided efficient power assignment for elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 1, p. 100595, 2020.

SANTOS, L. R. R. d.; ABRAO, T. Heuristic chaotic hurricane-aided efficient power assignment for elastic optical network. *IEEE Access*, v. 8, p. 83359–83374, 2020.

SAVORY, S. J. Congestion aware routing in nonlinear elastic optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 26, n. 10, p. 1057–1060, 2014.

SAVORY, S. J.; VINCENT, R. J.; IVES, D. J. Design considerations for low-margin elastic optical networks in the nonlinear regime. *Journal of Optical Communications and Networking - Optical Society of America*, v. 11, p. C76–C85, Setembro 2019.

SCHMOGROW, R.; WINTER, M.; MEYER, M.; HILLERKUSS, D.; WOLF, S.; BAEUERLE, B.; LUDWIG, A.; NEBENDAHL, B.; BEN-EZRA, S.; MEYER, J. et al. Real-time nyquist pulse generation beyond 100 gbit/s and its relation to ofdm. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 20, n. 1, p. 317–337, 2012.

SENA, M. R. *Um Estudo sobre Otimizações Evolucionárias na Mitigação de Efeitos Não-Lineares em Canais Ópticos Elásticos*. 1–123 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SHARIATI, B.; KHODASHENAS, P. S.; RIVAS-MOSCOSO, J. M.; BEN-EZRA, S.; KLONIDIS, D.; JIMENEZ, F.; VELASCO, L.; TOMKOS, I. Evaluation of the impact of different sdm switching strategies in a network planning scenario. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2016. p. Tu2H–4.

SHEN, G.; LI, Y.; PENG, L. How much can colorless, directionless and contentionless (cdc) of roadm help dynamic lightpath provisioning? In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.], 2012. p. NW3F–1.

SHIEH, W.; CHEN, X. Information spectral efficiency and launch power density limits due to fiber nonlinearity for coherent optical ofdm systems. *IEEE Photonics Journal*, v. 3, n. 2, p. 158–173, 2011.

SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; BONANI, L. H. Performance of transparent optical networks with multiple bandwidth channels. In: *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.

SOUZA FILHO, P. F. *Proposta de Heurística e Meta-heurística para Alocação Eficiente de Recursos em Redes com Multiplexação por Divisão Espacial*. 1–169 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

STARK, A.; HSUEH, Y.-T.; DETWILER, T.; FILER, M.; TIBULEAC, S.; CHANG, G.-K.; RALPH, S. E. Fiber performance comparison in all-edfa 112 gb/s pdm-qpsk systems. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2012. p. JW2A–50.

SUASSUNA, A. V. Entrevista ao programa sangue latino. *Jornalista Eric Nepomuceno*, Canal Brasil, v. 1, n. 1, p. 1, 2014.

TALEBI, S.; ALAM, F.; KATIB, I.; KHAMIS, M.; SALAMA, R.; ROUSKAS, G. N. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 13, p. 34–48, 2014.

THOMAS, G. B. *Cálculo - Volume I*. [S.l.]: Addison Wesley, 2002. v. 2. 1–278 p.

TOMKOS, I.; AZODOLMOLKY, S.; SOLE-PARETA, J.; CAREGLIO, D.; PALKOPOULOU, E. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 9, p. 1317–1337, 2014.

TOMKOS, I.; VOGIATZIS, D.; MAS, C.; ZACHAROPOULOS, I.; TZANAKAKI, A.; VARVARIGOS, E. Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 8, p. S40–S47, 2004.

VALE, V. A. C.; ALMEIDA JUNIOR, R. C. Power, routing, modulation level and spectrum assignment in all-optical and elastic networks. *Optical Switching and Networking*, v. 32, p. 14–24, Abril 2019.

VALE, V. A. C.; ALMEIDA JUNIOR, R. C.; ASSIS, K. D. R. Network-state-dependent routing and route-dependent spectrum assignment for prmlsa problem in all-optical elastic networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 43, p. 100646, Fevereiro 2022.

VALLE, Y. D.; VENAYAGAMOORTHY, G. K.; MOHAGHEGHI, S.; HERNANDEZ, J.-C.; HARLEY, R. G. Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 12, n. 2, p. 171–195, 2008.

VIEIRA, D. L. F. G. *Modelagem Analítica e Avaliação do Retardo das Mensagens no Protocolo de Acesso ao Meio do Padrão IEEE 802.16*. 1–152 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação de Engenharia de Sistemas e Computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

VINCENT, R. J.; IVES, D. J.; SAVORY, S. J. Estimating network throughput with an adaptive routing and wavelength assignment algorithm. In: IEEE. *Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*. [S.l.], 2018. p. 1–3.

- WANG, Y. A research on spectrum defragmentation algorithms in elastic optical network. In: *2nd World Symposium on Communication Engineering*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 78–81.
- WEINBERGER, P. John kerr and his effects found in 1877 and 1878. *Philosophical Magazine Letters*, Taylor & Francis, v. 88, n. 12, p. 897–907, 2008.
- WEN, B.; SHENAI, R.; SIVALINGAM, K. Routing, wavelength and time-slot-assignment algorithms for wavelength-routed optical wdm/tdm networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 23, n. 9, p. 2598, 2005.
- WRIGHT, P.; PARKER, M. C.; LORD, A. Maximum entropy (maxent) routing and spectrum assignment for flexgrid-based elastic optical networking. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2014. p. Th4E–7.
- WU, H.; ZHOU, F.; ZHU, Z.; CHEN, Y. Spectrum management in elastic optical networks: Perspectives of topology, traffic and routing. In: IEEE. *Networking Conference (IFIP Networking)*. [S.l.], 2019. p. 1–9.
- WU, J.; XU, M.; SUBRAMANIAM, S.; HASEGAWA, H. Routing, fiber, band, and spectrum assignment (rfbsa) for multi-granular elastic optical networks. *IEEE International Conference on Communications*, v. 1, p. 1–6, 2017.
- WU, J.; XU, M.; SUBRAMANIAM, S.; HASEGAWA, H. Joint banding-node placement and resource allocation for multigranular elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 10, n. 8, p. 27–38, 2018.
- XAVIER, A. V. S. *Roteamento e Proteção Dedicada em Redes Ópticas Usando Inteligência Computacional*. 1–144 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- YAN, L.; AGRELL, E.; WYMEERSCH, H.; JOHANNISSON, P.; TARANTO, R. D.; BRANDT-PEARCE, M. Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 27, n. 12, p. 1250–1253, 2015.
- YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.
- YU, J.; CHI, N. *Digital Signal Processing In High-Speed Optical Fiber Communication Principle and Application*. [S.l.]: Springer Nature, 2020. 1–374 p.
- YUAN, J.; ZHANG, D.; ZHANG, Q.; LI, X.; REN, Z. A routing and spectrum assignment algorithm in elastic optical network based on minimizing contiguity reduction. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 1, p. 1–11, 2019.
- ZHANG, M.; LU, W.; ZHU, Z.; YIN, Y.; YOO, S. J. B. Planning and provisioning of elastic o-ofdm networks with fragmentation-aware routing and spectrum assignment (rsa) algorithms. *Asia Communications and Photonics Conference Technical Digest*, v. 1, p. ATh2D.3, Novembro 2012.
- ZHANG, M.; YOU, C.; ZHU, Z. On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, v. 24, n. 5, p. 2819–2833, 2016.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2015. p. M2I-1.

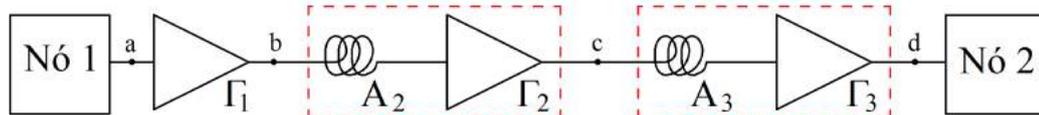
ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 33, n. 22, p. 4554-4564, 2015.

ZHAO, Y.-l.; ZHANG, J.; WANG, J.-j.; GU, W.-y. Pce-based routing and spectrum assignment in ofdm-based bandwidth-variable optical networks. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 116-122, 2012.

APÊNDICE A – RELAÇÃO PARA OSNR EM UMA ROTA

O modelo analítico desenvolvido neste trabalho se baseia no cálculo da potência do sinal e do ruído em cada um dos pontos correspondentes a saída em cada um dos elementos que formam uma rota composta por N_l enlaces que totalizam N_s spans. Cada enlace liga dois elementos comutadores, que são sucedidos por um amplificador do tipo *booster*. Os elementos que afetam a QoT do sinal são: BVTs, nós, amplificadores *booster* e *spans*. Na Figura 38 é apresentado um exemplo de uma rota composta por um enlace ($N_l = 1$) com dois elementos *spans* ($N_s = 2$), em que cada saída de um elemento é designada por uma letra minúscula.

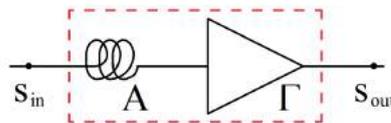
Figura 38 – Representação de uma rota com um enlace e dois *spans*.



Fonte: a autora.

Para a análise de OSNR de uma rota é necessário inicialmente observar as características do modelo adotado, sobretudo para as não linearidades geradas exclusivamente nos elementos *spans*. O elemento *span* é representado na Figura 39 com entrada s_{in} , saída s_{out} ganho do amplificador de Γ e perda na fibra de A . As relações para o modelo adotado nesta pesquisa para potência de ruído ASE e não linearidades, respectivamente P_{span}^{ASE} (2.13) e P_{span}^{NLI} (2.16), são definidas na saída do *span* (JOHANNISSON; AGRELL, 2014).

Figura 39 – Representação de um *span*.



Fonte: a autora.

Com essa informação, os valores de potências do sinal (P_{ch}) e do ruído ($P_{ruído}$) são definidos na entrada e na saída do *span* como:

- Entrada (s_{in}):

$$P_{ch_{s_{in}}} = P_{ch}, \quad (A.1)$$

$$P_{ruído_{s_{in}}} = P_{ruído_{in}}. \quad (A.2)$$

- Saída (s_{out}):

$$P_{ch_{s_{out}}} = P_{ch} \cdot (A \cdot \Gamma), \quad (A.3)$$

$$P_{ruído_{s_{out}}} = P_{ruído_{in}} \cdot (A \cdot \Gamma) + P_{span}^{ASE} + P_{span}^{NLI}. \quad (A.4)$$

Assim, sabendo do comportamento da potência do sinal (P_{ch}) e do ruído ($P_{ruído}$) na saída do elemento $span$, para a rota exemplificada na Figura 38, tem-se a análise pontual dada a seguir.

- Ponto a (após transmissor e nó de origem):

$$\begin{aligned} P_{cha} &= P_{in} \cdot A_{node1} \\ &= P_{in} \cdot A_1, \end{aligned} \quad (A.5)$$

$$\begin{aligned} P_{ruído_a} &= P_{ruído_{in}} \cdot A_{node1} \\ &= P_{ruído_{in}} \cdot A_1. \end{aligned} \quad (A.6)$$

- Ponto b (após primeiro $booster$):

$$\begin{aligned} P_{ch_b} &= P_{ch_a} \cdot \Gamma_{booster1} \\ &= P_{in} \cdot A_1 \cdot \Gamma_1, \end{aligned} \quad (A.7)$$

$$\begin{aligned} P_{ruído_b} &= \left(P_{ruído_a} \cdot \Gamma_{booster1} \right) + P_{booster1}^{ASE} \\ &= \left(P_{ruído_{in}} \cdot A_1 \cdot \Gamma_1 \right) + P_1^{ASE}. \end{aligned} \quad (A.8)$$

- Ponto c (após primeiro $span$):

$$\begin{aligned} P_{ch_c} &= P_{ch_b} \cdot A_{span2} \cdot \Gamma_{span2} \\ &= P_{in} \cdot A_1 \cdot \Gamma_1 \cdot A_2 \cdot \Gamma_2 \\ &= P_{in} \prod_{p=1}^2 A_p \Gamma_p, \end{aligned} \quad (A.9)$$

$$\begin{aligned} P_{ruído_c} &= \left(P_{ruído_b} \cdot A_{span2} \cdot \Gamma_{span2} \right) + \left(P_{span2}^{ASE} + P_{span2}^{NLI} \right) \\ &= \left\{ \left[\left(P_{ruído_{in}} \cdot A_1 \cdot \Gamma_1 \right) + P_1^{ASE} \right] \cdot A_2 \cdot \Gamma_2 \right\} + \left(P_2^{ASE} + P_2^{NLI} \right) \\ &= \left(P_{ruído_{in}} \prod_{p=1}^2 A_p \Gamma_p \right) + \left(P_1^{ASE} \cdot A_2 \cdot \Gamma_2 \right) + \left(P_2^{ASE} + P_2^{NLI} \right). \end{aligned} \quad (A.10)$$

- Ponto d (após segundo $span$):

$$\begin{aligned}
 P_{ch_d} &= P_{ch_c} \cdot A_{span_3} \cdot \Gamma_{span_3} \\
 &= \left(P_{in} \prod_{p=1}^2 A_p \Gamma_p \right) \cdot A_3 \cdot \Gamma_3 \\
 &= P_{in} \prod_{p=1}^3 A_p \Gamma_p,
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ruído_d} &= \left(P_{ruído_c} \cdot A_{span_3} \cdot \Gamma_{span_3} \right) + \left(P_{span_3}^{ASE} + P_{span_3}^{NLI} \right) \\
 &= \left\{ \left[\left(P_{ruído_{in}} \prod_{p=1}^2 A_p \Gamma_p \right) + \left(P_1^{ASE} \cdot A_2 \cdot \Gamma_2 \right) + \left(P_2^{ASE} + P_2^{NLI} \right) \right] \cdot A_3 \cdot \Gamma_3 \right\} \\
 &\quad + \left(P_3^{ASE} + P_3^{NLI} \right) \\
 &= \left(P_{ruído_{in}} \prod_{p=1}^3 A_p \Gamma_p \right) \\
 &\quad + \left[\left(P_1^{ASE} \cdot A_2 \cdot \Gamma_2 \cdot A_3 \cdot \Gamma_3 \right) + \left(P_2^{ASE} \cdot A_3 \cdot \Gamma_3 \right) + \left(P_3^{ASE} \right) \right] \\
 &\quad + \left[\left(P_2^{NLI} \cdot A_3 \cdot \Gamma_3 \right) + \left(P_3^{NLI} \right) \right] \\
 &= \left(P_{ruído_{in}} \prod_{p=1}^3 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^2 \left(P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI} \right) \prod_{p=k+1}^3 A_p \Gamma_p \right] + \left(P_3^{ASE} + P_3^{NLI} \right),
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

em que, i_e remete a 1 (um) quando se tratar de um elemento $span$ e a 0 (zero) quando se tratar de um elemento de nó, como dado em (A.13)

$$i_e = \begin{cases} 1, & \text{caso elemento seja um } span. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{A.13}$$

Para uma rota com dois enlaces ($N_l = 2$) totalizando quatro $spans$ ($N_s = 4$), como apresentado na Figura 40, obtêm-se as seguintes expressões para as potências do sinal e do ruído a partir do ponto f :

Figura 40 – Representação de uma rota com dois enlaces, totalizando quatro $spans$.



Fonte: a autora.

- Ponto f :

$$\begin{aligned}
P_{ch_f} &= P_{ch_d} \cdot A_{node_4} \cdot \Gamma_{booster_4} \\
&= \left(P_{in} \prod_{p=1}^3 A_p \Gamma_p \right) \cdot A_4 \cdot \Gamma_4 \\
&= P_{in} \prod_{p=1}^4 A_p \Gamma_p,
\end{aligned} \tag{A.14}$$

$$\begin{aligned}
P_{ruido_f} &= \left(P_{ruido_d} \cdot A_{node_4} \cdot \Gamma_{booster_4} \right) + P_{booster_4}^{ASE} \\
&= \left\{ \left\{ \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^3 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^2 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^3 A_p \Gamma_p \right] \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(P_3^{ASE} + P_3^{NLI} \right) \right\} A_4 \cdot \Gamma_4 \right\} + \left(P_4^{ASE} \right) \\
&= \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^4 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^3 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^4 A_p \Gamma_p \right] + \left(P_4^{ASE} \right).
\end{aligned} \tag{A.15}$$

- Ponto g :

$$\begin{aligned}
P_{ch_g} &= P_{ch_f} \cdot A_{span_5} \cdot \Gamma_{span_5} \\
&= \left(P_{in} \prod_{p=1}^4 A_p \Gamma_p \right) \cdot A_5 \cdot \Gamma_5 \\
&= P_{in} \prod_{p=1}^5 A_p \Gamma_p,
\end{aligned} \tag{A.16}$$

$$\begin{aligned}
P_{ruido_g} &= \left(P_{ruido_f} \cdot A_{span_5} \cdot \Gamma_{span_5} \right) + \left(P_{span_5}^{ASE} + P_{span_5}^{NLI} \right) \\
&= \left\{ \left\{ \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^4 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^3 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^4 A_p \Gamma_p \right] + \left(P_4^{ASE} \right) \right\} A_5 \cdot \Gamma_5 \right\} \\
&\quad + \left(P_5^{ASE} + P_5^{NLI} \right) \\
&= \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^5 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^4 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^5 A_p \Gamma_p \right] + \left(P_5^{ASE} + P_5^{NLI} \right).
\end{aligned} \tag{A.17}$$

- Ponto h :

$$\begin{aligned}
P_{ch_h} &= P_{ch_g} \cdot A_{span_6} \cdot \Gamma_{span_6} \\
&= \left(P_{in} \prod_{p=1}^5 A_p \Gamma_p \right) \cdot A_6 \cdot \Gamma_6 \\
&= P_{in} \prod_{p=1}^6 A_p \Gamma_p,
\end{aligned} \tag{A.18}$$

$$\begin{aligned}
P_{ruido_h} &= \left(P_{ruido_g} \cdot A_{span_6} \cdot \Gamma_{span_6} \right) + \left(P_{span_6}^{ASE} + P_{span_6}^{NLI} \right) \\
&= \left\{ \left\{ \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^5 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^4 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^5 A_p \Gamma_p \right] \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(P_5^{ASE} + P_5^{NLI} \right) \right\} \cdot A_6 \cdot \Gamma_6 \right\} + \left(P_6^{ASE} + P_6^{NLI} \right) \\
&= \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^6 A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^5 (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^6 A_p \Gamma_p \right] + \left(P_6^{ASE} + P_6^{NLI} \right).
\end{aligned} \tag{A.19}$$

A partir das análises de potências em pontos de uma rota, é possível concluir que as potências do sinal e do ruído para qualquer ponto da rota podem ser definidas, respectivamente, como (A.20) e (A.21)

$$P_{ch_n} = P_{in} \prod_{p=1}^n A_p \Gamma_p, \tag{A.20}$$

$$P_{ruido_n} = \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^n A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^{n-1} (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^n A_p \Gamma_p \right] + \left(P_n^{ASE} + i_e P_n^{NLI} \right). \tag{A.21}$$

em que n remete ao número do elemento atravessado pelo sinal óptico.

Para uma rota com N_l enlaces, que totalizam N_s spans, as relações tornam-se (A.22) e (A.23)

$$P_{ch} = P_{in} \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p, \tag{A.22}$$

$$P_{ruido} = \left(P_{ruido_{in}} \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right) + \left[\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} (P_k^{ASE} + i_e P_k^{NLI}) \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right] + \left(P_{N_l+N_s}^{ASE} + i_e P_{N_l+N_s}^{NLI} \right). \tag{A.23}$$

A potência de ruído pode ser desmembrada em duas, uma referente ao ruído ASE e outra às não linearidades ($P_{ruido} = P_{ruido_{ASE}} + P_{ruido_{NLI}}$), observar que, por simplicidade na escrita do modelo, foi optado a colocar a potência de ruído de entrada junto da potência de NLI.

$$P_{ruido_{ASE}} = \left(\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} P_k^{ASE} \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right) + \left(P_{N_l+N_s}^{ASE} \right), \tag{A.24}$$

$$P_{\text{ruído}_{NLI}} = \left(P_{\text{ruído}_{in}} \prod_{p=1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right) + \left(\sum_{k=1}^{N_i+N_s-1} i_e P_k^{NLI} \prod_{p=k+1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right) + \left(i_e P_{N_i+N_s}^{NLI} \right). \quad (\text{A.25})$$

Então, conhecendo a potência de entrada ($P_{in} = P_m$) e as relações para potência de ruído de entrada ($P_{\text{ruído}_{in}}$) (A.26), de ruído ASE (P_{span}^{ASE}) (A.27) e de ruído de não linearidades (P_{span}^{NLI}) (A.28),

$$P_{\text{ruído}_{in}} = \frac{1}{osnr_{in}} P_{in}, \quad (\text{A.26})$$

$$P_{\text{span}}^{ASE} = h \cdot v \cdot F \cdot (\Gamma - 1) \cdot B_o, \quad (\text{A.27})$$

$$P_{\text{span}}^{NLI}(f_m) = \frac{1,5 \cdot \gamma^2 \cdot B_o}{\pi \alpha \beta_2} \frac{P_m}{\Delta f_m} \left[\frac{P_m^2}{\Delta f_m^2} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_2 (\Delta f_m)^2}{\alpha} \right| + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right], \quad (\text{A.28})$$

e substituindo as mesmas nas relações de potências de sinal e de ruídos, são obtidos:

$$P_{ch} = P_m \prod_{p=1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p, \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ruído}_{ASE}} &= \left\{ \sum_{k=1}^{N_i+N_s-1} \left[h v F_k (\Gamma_k - 1) B_o \right] \prod_{p=k+1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right\} + \left[h v F_{N_i+N_s} (\Gamma_{N_i+N_s} - 1) B_o \right] \\ &= h v B_o \left\{ \sum_{k=1}^{N_i+N_s-1} \left[F_k (\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right] + F_{N_i+N_s} (\Gamma_{N_i+N_s} - 1) \right\}, \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ruído}_{NLI}} &= \left[\left(\frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right) P_m \right] \\ &+ \left\{ \sum_{k=1}^{N_i+N_s-1} i_e \left\{ \frac{1,5 \cdot \gamma_k^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_k \beta_{2,k}} \frac{P_m}{\Delta f_m} \left[\frac{P_m^2}{\Delta f_m^2} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \right. \right. \right. \\ &+ \left. \left. \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right] \right\} \prod_{p=k+1}^{N_i+N_s} A_p \Gamma_p \right\} \\ &+ \left\{ i_e \left\{ \frac{1,5 \cdot \gamma_{N_i+N_s}^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_{N_i+N_s} \beta_{2,N_i+N_s}} \frac{P_m}{\Delta f_m} \left[\frac{P_m^2}{\Delta f_m^2} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,N_i+N_s} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_i+N_s}} \right| \right. \right. \right. \\ &+ \left. \left. \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right] \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

A potência do sinal possui um único termo que depende da potência de entrada. Enquanto a potência de ruído ASE independe da potência de entrada. Porém, a potência de ruído de não linearidade depende da potência de entrada com graus diferentes. Fazendo o agrupamento dos termos de mesma ordem de potência para as não linearidades, resulta na relação (A.33)

$$\begin{aligned}
P_{ruído_{NLI}} = & \left[\left(\frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right) P_m \right] \\
& + \left\{ \sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} i_e \left[\frac{1, 5 \cdot \gamma_k^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_k \beta_{2,k} \Delta f_m^3} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \right] \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right\} P_m^3 \\
& + \left\{ \sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} i_e \left\{ \frac{1, 5 \cdot \gamma_k^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_k \beta_{2,k} \Delta f_m} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left[\frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right] \right\} \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right\} P_m \\
& + \left\{ i_e \left[\frac{1, 5 \cdot \gamma_{N_l+N_s}^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s} \Delta f_m^3} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,N_l+N_s} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_l+N_s}} \right| \right] \right\} P_m^3 \\
& + \left\{ i_e \left\{ \frac{1, 5 \cdot \gamma_{N_l+N_s}^2 \cdot B_o}{\pi \alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s} \Delta f_m} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left[\frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right] \right\} \right\} P_m,
\end{aligned} \tag{A.32}$$

$$\begin{aligned}
P_{ruído_{NLI}} = & P_m \left\{ \frac{1, 5 B_o i_e}{\pi \Delta f_m} \left[\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} \frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2,k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right] \right. \\
& + \frac{\gamma_{N_l+N_s}^2}{\alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \\
& \left. + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right\} \\
& + P_m^3 \left\{ \frac{1, 5 B_o i_e}{\pi \Delta f_m^3} \left[\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} \frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2,k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \right] \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right. \\
& \left. + \frac{\gamma_{N_l+N_s}^2}{\alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,N_l+N_s} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_l+N_s}} \right| \right\}.
\end{aligned} \tag{A.33}$$

Fazendo as seguintes substituições:

$$\begin{aligned}
a = & \frac{1, 5 B_o i_e}{\pi \Delta f_m^3} \left[\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} \frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2,k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \right] \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \\
& + \frac{\gamma_{N_l+N_s}^2}{\alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2,N_l+N_s} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_l+N_s}} \right|,
\end{aligned} \tag{A.34}$$

$$\begin{aligned}
b = & \frac{1,5B_o i_e}{\pi \Delta f_m} \left[\sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} \frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2,k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right. \\
& \left. + \frac{\gamma_{N_l+N_s}^2}{\alpha_{N_l+N_s} \beta_{2,N_l+N_s}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{\Delta f_n^2} \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right] + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p,
\end{aligned} \tag{A.35}$$

$$c = hvB_o \left\{ \sum_{k=1}^{N_l+N_s-1} \left[F_k(\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p \right] + F_{N_l+N_s}(\Gamma_{N_l+N_s} - 1) \right\}, \tag{A.36}$$

$$t = \prod_{p=1}^{N_l+N_s} A_p \Gamma_p, \tag{A.37}$$

tem-se para a relação para a osnr (A.39)

$$osnr = \frac{P_{ch}}{P_{ruido_{ASE}} + P_{ruido_{NLI}}}, \tag{A.38}$$

$$OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{t P_m}{a P_m^3 + b P_m + c} \right). \tag{A.39}$$

APÊNDICE B – AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA AS SIMULAÇÕES

O ambiente computacional para as simulações considerou a flexibilidade das redes ópticas elásticas, tanto em relação à largura de banda dos canais, quanto em relação ao formato de modulação e à potência de lançamento quando requisitada. Além das seguintes premissas:

- Quanto às penalidades consideradas:
 - ASE e NLI, com modelos matemáticos de propagação apresentados no Capítulo 2.
 - Potência de ruído de entrada do sinal na rede, constante e relacionado à $OSNR_{in}$, proveniente dos elementos SBVTs.
 - A degradação em cada BV-WXCs nos nós de roteamento pelos processos de filtragens é representada por um valor fixo de perda, compensada por um amplificador *booster* que sucede cada nó da rede.

- Quanto à camada física da rede:
 - Enlaces bidirecionais, ou seja, se existe uma ligação física entre os nós A e B da rede, então existem duas fibras ópticas diferentes conectando esses nós, uma que realiza a comunicação no sentido de A para B , outra no sentido de B para A .
 - Conexões unidirecionais definidas pelos nós origem (O) e destino (D), por exemplo, caso o nó origem seja o nó A e o nó destino seja o nó B , um único circuito é estabelecido no sentido de A para B .
 - *Spans* são idênticos dentro de um enlace, ou seja, os amplificadores com mesmo ganho e figura de ruído, enquanto as fibras com iguais características e comprimentos. Contudo, *spans* de diferentes enlaces não necessitam serem iguais.
 - Todas as perdas ocorridas nas fibras são compensadas pelos ganhos dos amplificadores que as sucedem.

Quanto à geração de chamadas, a rotina desenvolvida assume que os pedidos de conexões à rede chegam de forma dinâmica (não determinística), não existindo conhecimento sobre as requisições futuras. Essa aleatoriedade remete a: (i) nó origem; (ii) nó destino; (iii) taxa de transmissão de *bits*; (iv) instante de ocorrência da requisição; e (v) duração (tempo de permanência ativa).

Para cada requisição, dois nós distintos da rede são escolhidos aleatoriamente (por distribuição uniforme discreta) como nós origem (O) e destino (D). Da mesma maneira que a taxa de transmissão de *bits* requerida pela chamada é descrita também por uma distribuição uniforme discreta entre possíveis valores (são utilizados: 250 Gbps, 300 Gbps, 350 Gbps, 400 Gbps).

Para a representação do processo de geração dos pedidos de conexões, ou seja, para a representatividade do relógio de simulação, foi adotado um modelo de processo estocástico, como em (CHAVES, 2012; VIEIRA, 2008). A chegada de pedidos de conexão segue um processo de Poisson, em que o intervalo de tempo entre chamadas é exponencialmente distribuído com média $\frac{1}{\mu}$, enquanto a duração de cada chamada também segue uma distribuição exponencial, porém com média H .

A carga da rede (Ω) remete ao quão a mesma está ocupada. Apesar de ser uma grandeza adimensional, seu valor é dado em erlang (E) e, para enlace existente na rede e definido pelo par de nó (i, j) , é atribuída a relação (B.1) (RAPPAPORT, 2009)

$$\Omega_{i,j} = \mu_{i,j} H_{i,j}. \quad (\text{B.1})$$

Assim, a carga total da rede (Ω_{rede}) é obtida a partir da soma das cargas individuais dos enlaces (i, j) entre os n nós que formam a rede (B.2) (CHAVES, 2012)

$$\Omega_{rede} = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (\mu_{i,j} H_{i,j}). \quad (\text{B.2})$$

Para o cenário de tráfego uniforme, ou seja, mesmas médias de intervalo de tempo entre chamadas e de duração da chamada para todos os pares de nó ($\mu_{i,j} = \mu$ e $H_{i,j} = H, \forall(i, j)$), a carga da rede resulta em (B.3) (CHAVES, 2012)

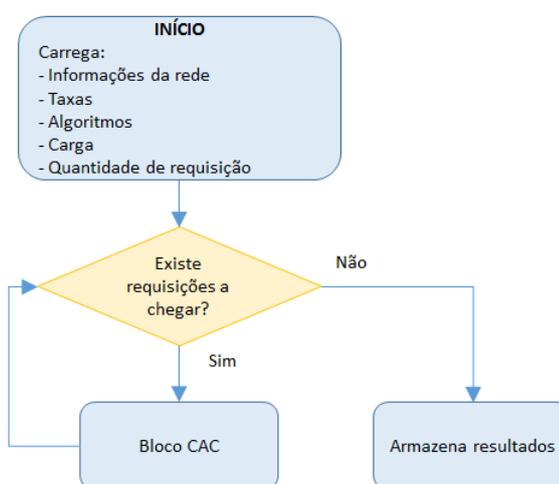
$$\Omega_{rede} = n \cdot (n - 1) \cdot \mu \cdot H. \quad (\text{B.3})$$

Essa última relação reflete no fato que: (i) para H constante, se a média de intervalo de tempo entre as chamadas for pequeno (μ grande), a carga da rede é maior, por chegar mais chamadas na rede por segundo; e (ii) para μ constante, se a média da duração da chamada for maior (H grande), a carga também é aumentada, tendo em vista que as chamadas permanecerão mais tempo na rede.

Nesse sentido, o fluxograma do ambiente computacional é representado na Fig. 41 e se divide basicamente em três etapas: inicialização, simulação e finalização. Na inicialização, to-

dos os dados considerados são carregados, como: informações da rede, taxas de transmissões, algoritmos de PRMLSA, cargas, quantidade de requisições mínima. Na simulação, cada requisição é gerada, conforme detalhado anteriormente nesta seção, e analisada no bloco de controle de admissão de chamadas (*Call Admission Control – CAC*). Na finalização, os resultados da simulação (tempo de simulação, número de bloqueios, número de requisições, carga, comprimentos médios para as conexões, potência de lançamento média para as conexões) são armazenados em um arquivo.

Figura 41 – Representação do fluxograma do ambiente computacional desenvolvido.



Fonte: a autora.

Observa-se que, a rotina permite a entrada de qualquer topologia de rede, a partir da definição de: número de nós, número de enlaces, número de *slots* por fibra e informações dos enlaces (nó origem, nó destino, comprimento e número de *spans*).

A essência do ambiente computacional desenvolvido é o bloco CAC, destacado no Algoritmo 1. Esse bloco é responsável pela decisão de uma requisição ser atendida ou não, sendo dividido em:

- Inicialização (linhas 1-4 do Algoritmo 1): o CAC recebe informações da requisição (taxa de transmissão de *bits*, nós de origem e destino). Então é inicializado o formato de modulação a ser testado (o mais eficiente espectralmente). E, com base no roteamento desejado (fixo, fixo-alternativo ou adaptativo), k rotas são pesquisadas e armazenadas em um vetor de rotas (*vectorRoutes*). Por fim, um marcador de bloqueio (*bloq*) é inicializado como *true*, e seu valor é alterado na segunda fase se houver um *lighpath* que satisfaça a QoT necessária entre as possíveis combinações de *lighpath*.

-
- Busca (linhas 5-30 do Algoritmo 1): para o formato de modulação M analisado, o limiar de OSNR ($OSNR_{th}$) e a largura de banda (Δf) são obtidos. Em seguida, para cada rota, os vazios de espectro suficientemente grandes para Δf são armazenados em um vetor de buracos (*vectorHoles*) obedecendo algum critério de sequência (por exemplo, o *First-Fit*). Para cada buraco, um dos processos de atribuição de potência mencionado e/ou descrito nos Capítulos 3 e 4 é executado (PAB - *Power Assignment Block*). Desse modo, os *lightpaths* são testados sequencialmente, examinando cada formato de modulação em todas as rotas e fatias do espectro, parando ou quando todas as tentativas de *lightpath* falham no QoT ou quando a análise satisfaz o limite OSNR da própria requisição ($OSNR_{ASE+NLI}$) e das conexões previamente alocadas ($OSNR_{others-channels}$), tornando o marcador *bloq* igual a *false*.
 - Finalização (linhas 31-36 do Algoritmo 1): quando o marcador *bloq* se torna *false*, a requisição é passível de alocação, sendo as informações de formato de modulação, rota, espectro e potência atribuídas à nova chamada da rede. Enquanto, na falha de todas as tentativas de *lightpath*, a requisição é bloqueada e contabilizada no contador de bloqueios.

Algoritmo 1 Algoritmo de Controle de Admissão de Chamadas (*Call Admission Control – CAC*)

```

1: Entradas: Taxa de transmissão de bits, nó origem, nó destino
2: Inicializa M para o formato de modulação mais eficiente espectralmente
3: Busca k rotas e armazena no vetor vectorRoutes
4: Faz a atribuição: bloq  $\leftarrow$  true
5: while (M > 2) e (bloq = true) do
6:   Calcula  $\Delta f$  e  $OSNR_{th}$ 
7:   Coloca ponteiro de rota (pointRoute) no início do vetor vectorRoutes
8:   while (pointRoute  $\neq$  NULL) e (bloq = true) do
9:     Busca buracos com largura suficiente para  $\Delta f$  e armazena no vetor vectorHoles
10:    Coloca ponteiro de buraco (pointHole) no início do vetor vectorHoles
11:    while (pointHole  $\neq$  NULL) and (bloq = true) do
12:      Atribua potência de lançamento (PAB - Power Assignment Block)
13:      if  $OSNR_{ASE+NLI} > OSNR_{th}$  then
14:        if  $OSNR_{others-channels} > OSNR_{th(x)}$  then
15:          bloq  $\leftarrow$  false
16:        else
17:          Incrementa o ponteiro do vetor vectorHoles (pointHole)
18:        end if
19:      else
20:        Incrementa o ponteiro do vetor vectorHoles (pointHole)
21:      end if
22:    end while
23:    if bloq = true then
24:      Incrementa o ponteiro do vetor vectorRoutes (pointRoute)
25:    end if
26:  end while
27:  if bloq = true then
28:     $M \leftarrow \frac{M}{2}$ 
29:  end if
30: end while
31: if (bloq = true) then
32:   Requisição é bloqueada
33: else
34:   Requisição é aceita
35: end if
36: Sai do CAC

```

APÊNDICE C – RELAÇÃO PARA POTÊNCIA DE LANÇAMENTO QUE RESULTA NA OSNR MÁXIMA

As derivadas são ferramentas úteis para examinar gráficos de funções. Em particular, os pontos críticos (ponto estacionário) de uma função ($y = f(x)$) terão um ponto no domínio (x_{do}) em que a primeira derivada é nula ou não é definida. Assim, para a obtenção dos pontos críticos é necessário aplicar a primeira derivada e igualar a zero (C.1) (THOMAS, 2002)

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} f(x) = \begin{cases} 0 \\ \neq \end{cases}, \quad \text{para } x = x_{do}. \quad (\text{C.1})$$

Os pontos críticos obtidos podem ser de máximo local, mínimo local ou de inflexão, sendo a classificação do ponto definida pela solução (S_{do}) obtida na substituição do ponto que anula (ou não é definida) a primeira derivada (x_{do}) na relação resultante da segunda derivada (C.3) (THOMAS, 2002)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} f(x) \right) = g(x), \quad (\text{C.2})$$

$$g(x_{do}) = S_{do}. \quad (\text{C.3})$$

Se a solução da segunda derivada do ponto crítico for: (i) positiva, o ponto x_{do} é um mínimo local; (ii) negativa, o ponto x_{do} é um máximo local; e (iii) nula, o ponto x_{do} é de inflexão ou parte de uma zona constante.

A determinação dos pontos críticos serve para obter o comportamento de um gráfico de uma função, pois ela é crescente ou decrescente de forma uniforme exceto nos pontos críticos (THOMAS, 2002). E, uma vez conhecendo o comportamento da função, a aplicação da derivada faz obter o valor preciso desses pontos.

Nesse contexto, para o cenário deste trabalho, para uma rota que passa por N_s spans de diferentes N_l enlaces com respectivos u canais ativos (detalhamento no Apêndice A), a equação para OSNR (C.4) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019),

$$OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{tP_m}{aP_m^3 + bP_m + c} \right), \quad (\text{C.4})$$

$$a = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m^3} \left[\sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left(\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right) + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2N_s+N_l} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_s+N_l}} \right| \right], \quad (C.5)$$

$$b = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right\} + \frac{1}{OSNR_{in}} \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (C.6)$$

$$c = h \cdot v \cdot B_o \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[F_k (\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + F_{N_s+N_l} (\Gamma_{N_s+N_l} - 1) \right\}, \quad (C.7)$$

$$t = \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (C.8)$$

pode ser analisada sob o aspecto matemático de derivada, com a finalidade de encontrar seu ponto de máximo baseado no comportamento físico conhecido e descrito no Capítulo 4.

Baseado na regra da cadeia (C.9) (THOMAS, 2002),

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (C.9)$$

na regra da derivada do quociente entre uma função f e uma função g (C.10) (THOMAS, 2002),

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f}{g} \right) = \frac{\left(\frac{\partial}{\partial x} f \right) g - f \left(\frac{\partial}{\partial x} g \right)}{g^2}, \quad (C.10)$$

e na derivada da função logarítmica (C.11) (THOMAS, 2002),

$$\frac{\partial}{\partial x} \log_{10} x = \frac{1}{x \cdot \ln 10}, \quad (C.11)$$

e fazendo as seguintes substituições (C.12)

$$\begin{aligned}
OSNR &= \log_{10} z, \\
z &= \frac{f}{g}, \\
f &= tP_m, \\
g &= aP_m^3 + bP_m + c,
\end{aligned} \tag{C.12}$$

é possível obter a primeira derivada para a função OSNR em função da potência de lançamento (C.13)

$$\frac{\partial}{\partial P_m}(OSNR) = \frac{\partial OSNR}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial P_m}. \tag{C.13}$$

Substituindo as duas primeiras relações de (C.12) em (C.13), tem-se (C.14)

$$\frac{\partial}{\partial P_m}(OSNR) = \frac{\partial}{\partial z}(\log_{10} z) \cdot \frac{\partial}{\partial P_m}\left(\frac{f}{g}\right), \tag{C.14}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_m}(OSNR) = \frac{1}{z \cdot \ln 10} \frac{\left(\frac{\partial}{\partial P_m} f\right)g - f\left(\frac{\partial}{\partial P_m} g\right)}{g^2}, \tag{C.15}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_m}(OSNR) = \frac{1}{\frac{f}{g} \cdot \ln 10} \frac{\left(\frac{\partial}{\partial P_m} f\right)g - f\left(\frac{\partial}{\partial P_m} g\right)}{g^2}, \tag{C.16}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_m}(OSNR) = \frac{\left(\frac{\partial}{\partial P_m} f\right)g - f\left(\frac{\partial}{\partial P_m} g\right)}{f \cdot g \cdot \ln 10}. \tag{C.17}$$

Igualando a expressão obtida para a primeira derivada (C.17) a zero, como na relação (C.1), é obtido (C.19)

$$\frac{\left(\frac{\partial}{\partial P_m} f\right)g - f\left(\frac{\partial}{\partial P_m} g\right)}{f \cdot g \cdot \ln 10} = 0, \tag{C.18}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial P_m} f\right)g - f\left(\frac{\partial}{\partial P_m} g\right) = 0. \tag{C.19}$$

Por fim, substituindo as duas últimas relações de (C.12), é obtida a relação para a potência de lançamento que resulta na máxima OSNR (C.26) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$t(a \cdot P_m^3 + b \cdot P_m + c) - t \cdot P_m(3a \cdot P_m^2 + b) = 0, \tag{C.20}$$

$$a \cdot t \cdot P_m^3 + b \cdot t \cdot P_m + c \cdot t - 3a \cdot t \cdot P_m^3 - b \cdot t \cdot P_m = 0, \tag{C.21}$$

$$-2a \cdot t \cdot P_m^3 + c \cdot t = 0, \quad (\text{C.22})$$

$$2a \cdot t \cdot P_m^3 = c \cdot t, \quad (\text{C.23})$$

$$P_m^3 = \frac{c}{2a}, \quad (\text{C.24})$$

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{c}{2a}}, \quad (\text{C.25})$$

$$P_{m,OSNR_{Max}} = \sqrt[3]{\frac{c}{2a}} \quad (\text{C.26})$$

APÊNDICE D – ALGORITMO ECPA

Baseado no fluxograma da Figura 11, o Algoritmo 2 é referente à forma de atribuição de potência ECPA, que pode ser dividido em seis fases:

- Na Fase de Inicialização (linhas 1-3), são inicialmente carregadas as informações sobre a requisição (*lightpath*, taxa de transmissão de *bits* e formato de modulação). Em seguida é inicializada a potência máxima tolerada com um valor elevado ($P_{maxTol} = \infty$). Então é calculada a potência máxima para a requisição sem consciência das demais conexões ($P_{max,req}$).
- Na Primeira Fase de Teste (linhas 4-24), a potência máxima para a requisição sem consciência das demais conexões ($P_{max,req}$) é testada em relação ao limiar de OSNR da requisição. Caso não atenda, a estratégia faz $P_{ECPA} = P_{max,req}$ (linha 23), seguindo para a fase de finalização.
- Na Fase de Conhecimento da Rede (linhas 5-12), são varridas todas as conexões que compartilham ao menos um enlace da rota da requisição, retornando o menor valor possível a ser atribuída à potência da requisição, P_{maxTol} , de modo que as OSNRs das conexões previamente alocadas continuem a atender aos respectivos limiares.
- Na Fase de Obtenção da Potência (linhas 13-21), são comparadas as potências $P_{max,req}$ e P_{maxTol} . Caso P_{maxTol} seja o menor valor, o algoritmo segue para a Segunda Fase de Teste. Caso $P_{max,req}$ seja o menor valor, a estratégia faz $P_{ECPA} = P_{max,req}$ (linha 20), seguindo para fase de finalização.
- Na Segunda Fase de Teste (linhas 14-18), a potência P_{maxTol} é testada em relação ao limiar de OSNR da requisição. Caso não atenda ao limiar de OSNR, a estratégia faz $P_{ECPA} = P_{max,req}$ (linha 17), e a requisição não é aceita para dado cenário avaliado de rota, posição de espectro e formato de modulação. Caso atenda ao limiar de OSNR, a estratégia faz $P_{ECPA} = P_{maxTol}$ (linha 15), e a requisição é aceita para dado cenário avaliado de rota, posição de espectro e formato de modulação.
- Na Fase de Finalização (linha 25), o algoritmo retorna com P_{ECPA} .

Observa-se que, para obter o valor da potência da requisição suportado pelas demais conexões (P_{maxTol}), são analisadas as atualizações das respectivas OSNR sob a suposição

Algoritmo 2 Algoritmo ECPA

```

1: Carrega informações da requisição (lightpath, taxa de transmissão de bits e formato de modulação)
2: Inicializa  $P_{maxTol}$  com um valor elevado:  $P_{maxTol} \leftarrow \infty$ 
3: Calcula:  $P_{max,req} \leftarrow P_{EPA}$ 
4: if  $OSNR(P_{max,req}) > OSNR_{th}$  then
5:   Encontra as  $N_{call}$  que compartilham ao menos um enlace da rota da requisição.
6:   while  $N_{call} > 0$  do
7:     Encontra para a conexão  $N_{call}$  o valor de  $P_{max,N_{call}}$  (D.14)
8:     if  $P_{max,N_{call}} < P_{maxTol}$  then
9:        $P_{maxTol} \leftarrow P_{max,N_{call}}$ 
10:    end if
11:    Decrementa  $N_{call}$ 
12:  end while
13:  if  $P_{max,req} > P_{maxTol}$  then
14:    if  $OSNR(P_{maxTol}) > OSNR_{th}$  then
15:       $P_{ECPA} \leftarrow P_{maxTol}$ 
16:    else
17:       $P_{ECPA} \leftarrow P_{max,req}$ 
18:    end if
19:  else
20:     $P_{ECPA} \leftarrow P_{max,req}$ 
21:  end if
22: else
23:    $P_{ECPA} = P_{max,req}$ 
24: end if
25: Sai do algoritmo e retorna  $P_{ECPA}$ 

```

da requisição ser aceita. Da relação OSNR (C.4), para uma conexão i que compartilha $N_{l,i}$ enlaces, totalizando $N_{s,i}$ *spans* com a rota da requisição, tem-se que o único termo que altera são as XCI, que equivale ao termo b , resultando para a OSNR de uma conexão (*call*) com a inclusão de uma requisição a relação (D.1)

$$OSNR_{call} = 10 \log_{10} \left[\frac{tP_m}{aP_m^3 + (b + b_{\Delta})P_m + c} \right]. \quad (D.1)$$

Para garantir que a conexão continue a atender à QoT, o novo valor de OSNR da chamada deve atender ao respectivo limiar ($OSNR_{call} > OSNR_{th,call}$, resultando na relação (D.2)

$$OSNR_{th,call} < 10 \log_{10} \left[\frac{tP_m}{aP_m^3 + (b + b_{\Delta})P_m + c} \right]. \quad (D.2)$$

Manipulando a relação (D.2) (em escala linear), é obtida a relação para a variação do coeficiente b (b_{Δ}) (D.6)

$$aP_m^3 + (b + b_{\Delta})P_m + c < \frac{tP_m}{osnr_{th,call}}, \quad (D.3)$$

$$(b + b_{\Delta})P_m < \frac{tP_m}{osnr_{th,call}} - aP_m^3 - c, \quad (D.4)$$

$$b + b_{\Delta} < \frac{t}{osnr_{th,call}} - aP_m^2 - \frac{c}{P_m}, \quad (D.5)$$

$$b_{\Delta} < (t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1}). \quad (D.6)$$

Observa-se que, b para uma conexão i é definido por (D.7)

$$b = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right\} + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (D.7)$$

em que, n remete à requisição e m a uma conexão i . Assim, a variação do coeficiente b (b_{Δ}) corresponde à influência da requisição sobre uma conexão i , ou seja, a inclusão de mais uma chamada ativa na rede (u), resultando para a variação b_{Δ} a relação (D.8)

$$b_{\Delta} = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i}+N_{l,i}-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i}+N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i}+N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i}+N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i}+N_{l,i}}} \right\}. \quad (D.8)$$

Substituindo a relação (D.8) na relação (D.6), seguida de algumas manipulações, é obtido o valor da potência da requisição suportado por uma conexão n ($P_{max,N_{call}}$) (D.14)

$$\frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i}+N_{l,i}-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i}+N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i}+N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i}+N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i}+N_{l,i}}} \right\} < (t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1}), \quad (D.9)$$

$$\frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) < \frac{(t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1})}{\sum_{k=1}^{N_{s,i}+N_{l,i}-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i}+N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i}+N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i}+N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i}+N_{l,i}}}}, \quad (D.10)$$

$$\left(\frac{P_n}{\Delta f_n}\right)^2 < \frac{\pi \cdot \Delta f_m}{1, 5B_o} \frac{(t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1})}{\ln\left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2}\right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i} + N_{l,i} - 1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i} + N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i} + N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i} + N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i} + N_{l,i}}} \right\}}, \quad (D.11)$$

$$\left(\frac{P_n}{\Delta f_n}\right) < \sqrt[2]{\frac{\pi \cdot \Delta f_m}{1, 5B_o} \frac{(t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1})}{\ln\left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2}\right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i} + N_{l,i} - 1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i} + N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i} + N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i} + N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i} + N_{l,i}}} \right\}}}, \quad (D.12)$$

$$P_n < \sqrt[2]{\frac{\pi \cdot \Delta f_m \Delta f_n^2}{1, 5B_o} \frac{(t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1})}{\ln\left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2}\right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i} + N_{l,i} - 1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i} + N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i} + N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i} + N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i} + N_{l,i}}} \right\}}}. \quad (D.13)$$

$$P_{max, N_{call}} < \sqrt[2]{\frac{\pi \cdot \Delta f_m \Delta f_n^2}{1, 5B_o} \frac{(t \cdot osnr_{th,call}^{-1}) - (aP_m^2) - b - (c \cdot P_m^{-1})}{\ln\left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2}\right) \left\{ \sum_{k=1}^{N_{s,i} + N_{l,i} - 1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \prod_{p=k+1}^{N_{s,i} + N_{l,i}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_{s,i} + N_{l,i}}^2}{\alpha_{N_{s,i} + N_{l,i}} \beta_{2N_{s,i} + N_{l,i}}} \right\}}}. \quad (D.14)$$

APÊNDICE E – MÉTODO DE CARDANO-TARTAGLIA PARA EQUAÇÃO DE TERCEIRO GRAU

As equações polinomiais de grau três não possuem um processo determinado por fórmulas, salvo quando se conhece uma ou duas raízes, o que reduz a ordem do polinômio a ser solucionado, ou quando em condições peculiares (DANTE, 2010). Para essas condições particulares, conseqüentemente, não sendo válido para todos os cenários, o método dos matemáticos Cardano e Tartaglia possibilita a solução algébrica através de sucessivas operações do polinômio sem conhecer nenhuma de suas raízes *a priori* (GARBI, 2009).

O método Cardano-Tartaglia utiliza-se de manipulações matemáticas para tornar uma equação de terceiro grau completa (com todos os coeficientes reais e diferentes de zero) (E.1)

$$a_i \cdot x^3 + b_i \cdot x^2 + c_i \cdot x + d_i = 0, \quad (\text{E.1})$$

em uma equação de terceiro grau incompleta (com coeficientes reais e diferentes de zero, salvo para o termo de segunda ordem que é nulo) (E.2)

$$y^3 + P \cdot y + Q = 0. \quad (\text{E.2})$$

Observa-se que, para equações que já são no formato da equação incompleta (E.2), pode-se partir direto para solução do método nesse ponto.

Para a simplificação da equação completa (E.1) para incompleta (E.2), é inicialmente tornado o coeficiente do termo dominante igual a um (E.3) (COSTA, 2020)

$$x^3 + B_i \cdot x^2 + C_i \cdot x + D_i = 0, \quad (\text{E.3})$$

em que, os novos coeficientes são resultados da divisão pelo coeficiente dominante (E.4) (COSTA, 2020)

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{b_i}{a_i}, \\ C_i &= \frac{c_i}{a_i}, \\ D_i &= \frac{d_i}{a_i}. \end{aligned} \quad (\text{E.4})$$

Em seguida, é realizada a substituição (E.5) (COSTA, 2020)

$$x = y + k, \quad (\text{E.5})$$

que resulta em outra equação de terceiro grau (E.6) (COSTA, 2020)

$$(y + k)^3 + B_i \cdot (y + k)^2 + C_i \cdot (y + k) + D_i = 0, \quad (\text{E.6})$$

que pode ser manipulada até (E.8) (COSTA, 2020)

$$(y^3 + 3y^2k + 3yk^2 + k^3) + B_i(y^2 + 2yk + k^2) + C_i(y + k) + D_i = 0, \quad (\text{E.7})$$

$$y^3 + (3k + B_i)y^2 + (3k^2 + 2B_ik + C_i)y + (k^3 + B_ik^2 + C_ik + D_i) = 0. \quad (\text{E.8})$$

Essa equação é passível de anular o termo de segunda ordem com a finalidade de obter a equação incompleta desejada (E.2), desde que seja realizada a condição (E.9) (COSTA, 2020)

$$k = \frac{-B_i}{3}. \quad (\text{E.9})$$

Substituindo (E.9) em (E.8), tem-se (E.11) (COSTA, 2020)

$$y^3 + \left[3\left(\frac{-B_i}{3}\right)^2 + 2B_i\left(\frac{-B_i}{3}\right) + C_i \right] y + \left[\left(\frac{-B_i}{3}\right)^3 + B_i\left(\frac{-B_i}{3}\right)^2 + C_i\left(\frac{-B_i}{3}\right) + D_i \right] = 0, \quad (\text{E.10})$$

$$y^3 + \left(C_i - \frac{B_i^2}{3} \right) y + \left(\frac{2B_i^3}{27} - \frac{B_i C_i}{3} + D_i \right) = 0. \quad (\text{E.11})$$

Comparando a equação (E.11) com a equação de terceiro grau incompleta desejada (E.2), tem-se que os coeficientes se relacionam da seguinte forma E.12 (COSTA, 2020)

$$\begin{aligned} P &= C_i - \frac{B_i^2}{3}, \\ Q &= \frac{2B_i^3}{27} - \frac{B_i C_i}{3} + D_i. \end{aligned} \quad (\text{E.12})$$

Para solucionar uma equação de terceiro grau incompleta da forma (E.2), é realizada a seguinte substituição (E.13) (COSTA, 2020)

$$y = u + v, \quad (\text{E.13})$$

que, depois de algumas manipulações, resulta em (E.17) (COSTA, 2020)

$$(u + v)^3 + P(u + v) + Q = 0, \quad (\text{E.14})$$

$$(u^3 + 3u^2v + 3uv^2 + v^3) + P(u + v) + Q = 0, \quad (\text{E.15})$$

$$(u^3 + v^3) + 3uv(u + v) + P(u + v) + Q = 0, \quad (\text{E.16})$$

$$(u^3 + v^3 + Q) + (u + v)(3uv + P) = 0, \quad (\text{E.17})$$

Para que essa igualdade seja verdadeira, pode-se utilizar os valores (E.18) (COSTA, 2020)

$$u^3 + v^3 + Q = 0, \quad (\text{E.18})$$

$$3uv + P = 0.$$

Colocando u e v em evidência (E.19) (COSTA, 2020)

$$\begin{aligned} u^3 + v^3 &= -Q, \\ u^3v^3 &= \frac{-P^3}{27}. \end{aligned} \quad (\text{E.19})$$

Da segunda relação de (E.19), pode-se retirar o valor de v^3 (E.20) (COSTA, 2020)

$$v^3 = \frac{-P^3}{27u^3}, \quad (\text{E.20})$$

que substituindo em (E.17), resulta em uma equação de sexto grau (E.23) (COSTA, 2020)

$$\left[u^3 + \left(\frac{-P^3}{27u^3} \right) + Q \right] + \left(u + \sqrt[3]{\frac{-P^3}{27u^3}} \right) \left(3u\sqrt[3]{\frac{-P^3}{27u^3}} + P \right) = 0, \quad (\text{E.21})$$

$$u^3 + \left(\frac{-P^3}{27u^3} \right) + Q = 0, \quad (\text{E.22})$$

$$u^6 + Qu^3 + \left(\frac{-P^3}{27} \right) = 0, \quad (\text{E.23})$$

que pode ser reduzida para uma equação de segundo grau substituindo (E.24) (COSTA, 2020)

$$z = u^3, \quad (\text{E.24})$$

em (E.23), que resulta (E.25) (COSTA, 2020)

$$z^2 + Qz + \left(\frac{-P^3}{27}\right) = 0, \quad (\text{E.25})$$

cuja solução é dada por (E.28) (COSTA, 2020)

$$z = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 + \frac{4P^3}{27}}}{2}, \quad (\text{E.26})$$

$$z = \frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2 + \frac{4P^3}{27}}{4}}. \quad (\text{E.27})$$

$$z = \frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}} \quad (\text{E.28})$$

Com a solução para z , são realizadas as substituições consideradas, começando pela relação (E.24), que resulta no valor de u (E.29) (COSTA, 2020)

$$u = \sqrt[3]{z} = \sqrt[3]{\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}}. \quad (\text{E.29})$$

Prosseguindo para relação (E.20) para obter v (E.30) (COSTA, 2020)

$$v = \sqrt[3]{\frac{-P^3}{27u^3}} = \sqrt[3]{\frac{-P^3}{27\left(\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}\right)}}. \quad (\text{E.30})$$

Pela relação (E.13), é possível encontrar o valor para y (E.31) (COSTA, 2020)

$$y = u + v = \sqrt[3]{\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{-P^3}{27\left(\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}\right)}}. \quad (\text{E.31})$$

Enquanto das relações (E.5) e (E.9), é obtido o valor para x (E.33) (COSTA, 2020)

$$x = k + y = \frac{-B_i}{3} + y, \quad (\text{E.32})$$

$$x = \frac{-B_i}{3} + \sqrt[3]{\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{-P^3}{27\left(\frac{-Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}\right)}}, \quad (\text{E.33})$$

em que P e Q foram definidos em (E.12).

Entretanto, há uma limitação no método Cardano-Tartaglia. Observando a solução para x obtida (E.33), há um termo que se encontra em uma raiz quadrada (discriminante da raiz), o qual deverá ser maior que zero para garantir uma solução real, gerando a seguinte condição para aplicação do método Cardano-Tartaglia (E.34) (COSTA, 2020)

$$\Delta = \frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27} = \left(\frac{Q}{2}\right)^2 + \left(\frac{P}{3}\right)^3 \geq 0. \quad (\text{E.34})$$

Em caso do discriminante ser negativo, haverá a necessidade de aplicar os conceitos dos números complexos e de trigonometria, em especial utilizando as leis De Moivre, com uma série de substituições, e ainda utilizará valores das tábuas trigonométricas, que também são aproximações (COSTA, 2020). Nesse sentido, para discriminantes negativos, não é viável computacionalmente a utilização do método de Cardano-Tartaglia para solução de uma equação de terceiro grau.

Baseado nessa limitação, para avaliar se a solução algébrica é viável para o cenário em questão (E.35)

$$P_{EnPA}^3 + \frac{b \cdot osnr_{th} - t}{a \cdot osnr_{th}} P_{EnPA} + \frac{c}{a} = 0, \quad (\text{E.35})$$

tem que analisar o discriminante da equação correspondente.

Como a mesma já se trata de uma equação incompleta de terceiro grau no formato (E.2) cuja solução é dada pela equação (E.31), seus valores de P e Q são dados de forma direta (E.36)

$$P = \frac{b \cdot osnr_{th} - t}{a \cdot osnr_{th}}, \quad (\text{E.36})$$

$$Q = \frac{c}{a}.$$

Consequentemente, o discriminante para a equação desejada é (E.37)

$$\Delta = \left(\frac{c}{2a}\right)^2 + \left(\frac{b \cdot osnr_{th} - t}{3a \cdot osnr_{th}}\right)^3, \quad (\text{E.37})$$

que, pela limitação do método Cardano-Tartaglia para o discriminante (E.34) resultará na condição (E.39)

$$\frac{c^2}{4.a^2} + \frac{b^3 \cdot osnr_{th}^3 - 3.b^2 \cdot osnr_{th}^2 \cdot t + 3.b \cdot osnr_{th} \cdot t^2 - t^3}{27.a^3 \cdot osnr_{th}^3} \geq 0, \quad (\text{E.38})$$

$$(27.a^3.c^2.osnr_{th}^3) + (4.a^2.b^3.osnr_{th}^3) - (12.a^2.b^2.osnr_{th}^2.t) + (12.a^2.b.osnr_{th}.t^2) - (4.a^2.t^3) \geq 0, \quad (E.39)$$

em que a $osnr_{th}$ é o limiar de OSNR em escala linear, que varia com o formato de modulação, taxa de transmissão e, conseqüentemente, largura de banda, enquanto os termos a , b , c , t são definidos pelas características da rota, do canal e do estado da rede (E.40) (E.41) (E.42) (E.43) (VALE; ALMEIDA JUNIOR, 2019)

$$a = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m^3} \left[\sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left(\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right) + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2N_s+N_l} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{N_s+N_l}} \right| \right], \quad (E.40)$$

$$b = \frac{1,5B_o}{\pi \cdot \Delta f_m} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{N_s+N_l}^2}{\alpha_{N_s+N_l} \beta_{2N_s+N_l}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{mn} + \Delta f_n/2}{f_{mn} - \Delta f_n/2} \right) \right\} + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p, \quad (E.41)$$

$$c = h \cdot v \cdot B_o \left\{ \sum_{k=1}^{N_s+N_l-1} \left[F_k(\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p \right] + F_{N_s+N_l}(\Gamma_{N_s+N_l} - 1) \right\}, \quad (E.42)$$

$$t = \prod_{p=1}^{N_s+N_l} A_p \Gamma_p. \quad (E.43)$$

Conseqüentemente, a condição do discriminante (E.39) não tem como ser garantida para todos os cenários possíveis de uma rede com tráfego dinâmico, devido às inúmeras combinações possíveis. Nesse sentido, a solução algébrica não poderá ser aplicada nesse cenário, sendo uma solução numérica mais vantajosa.

APÊNDICE F – ALGORITMO ENPA+MG

O Algoritmo EnPA+Mg é dado a seguir, e se divide em cinco fases:

- A Fase de inicialização (linhas 1-2) carrega informações sobre o cenário e padrão definidos para toda a simulação, além de informações sobre a requisição (rota, $OSNR_{th}$, P_{max} e $OSNR_{max}$). A $OSNR_{max}$ da requisição é testada em relação ao seu limiar ($OSNR_{th}$), podendo atender, seguindo para próxima fase, ou não atender, seguindo para fase de finalização com a potência $P_{EnPA+Mg}$ igual a P_{max} .
- A Fase de busca (linhas 3-7) inicia com o cálculo de P_{min} para a requisição, depois são encontradas e armazenadas em *vetorConnect* as conexões ativas no cenário desejado (rota ou rede). Caso *vetorConnect* seja vazio, segue para a fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual a (F.1)

$$P_{EnPA+Mg} = P_{min} + m \cdot (P_{max} - P_{min}). \quad (F.1)$$

Caso *vetorConnect* não seja vazio, é encontrado P_{maxTol} (similar ao ECPA) das conexões que formam *vetorConnect*. Se P_{min} for maior que P_{maxTol} , segue para fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual a P_{max} . Se P_{min} for menor que P_{maxTol} , segue para próxima fase.

- A Fase de definição de referência (linhas 8-16) é responsável pela obtenção do valor máximo de potência a ser atribuído à $P_{EnPA+Mg}$, garantindo a inexistência de sinais com potências elevadas, sobretudo no estado transiente da rede. Se P_{maxTol} for menor que a relação (4.18), P_{ref} será igual a P_{maxTol} . Caso contrário, P_{ref} será igual à relação (4.18). Ao final dessa fase, é inicializado um contador inteiro *cont* ($cont = 0$), utilizado na fase seguinte.
- A Fase de adaptação de potência (linhas 17-61) utiliza a variável P_{temp} , em que serão atribuídos valores a serem testados para $P_{EnPA+Mg}$. Os valores de P_{temp} serão atribuídos crescentemente a partir de P_{min} pela utilização do contador *cont*. Assim, pode ocorrer:
 - P_{temp} ser maior que P_{ref} , seguindo para fase de finalização com $P_{EnPA+Mg}$ igual ao P_{temp} anteriormente atribuído ($cont - 1$).
 - P_{temp} ser menor que P_{ref} , seguindo para análise da diferença entre as margens (desejada e requisição):

-
- * A diferença entre $MgOSNR_{Desejada}$ (mínima ou média) e a margem da requisição com P_{temp} ser menor negativa, sendo então comparada a posição atual ($cont$) com a anterior ($cont - 1$). A posição de P_{temp} (anterior ou atual) que resultar na menor diferença de margem de OSNR (desejada e requisição) será atribuída à $P_{EnPA+Mg}$, seguindo para a fase de finalização.
 - * A diferença entre $MgOSNR_{Desejada}$ (mínima ou média) e a margem da requisição com P_{temp} ser positiva, sendo então incrementado o $cont$ e reiniciando a Fase de adaptação de potência.
- A Fase de finalização (linha 62) retorna o valor encontrado para a potência $P_{EnPA+Mg}$.

Algoritmo 3 Algoritmo do EnPA+Mg

```

1: Entradas: informações da requisição ( $OSNR_{th}$ ,  $OSNR_{max}$ ,  $P_{max}$  e rota), cenário e padrão adotado.
2: if  $OSNR_{th} < OSNR_{max}$  then
3:   Encontra  $P_{min}$ 
4:   Encontra conexões ativas no cenário desejado e armazena no vetor  $vetorConectOn$ 
5:   if  $vetorConectOn.size > 0$  then
6:     Encontra  $P_{maxTol} \leftarrow P_{ECPA}$ 
7:     if  $P_{min} < P_{maxTol}$  then
8:       if  $P_{maxTol} < P_{min} + m \cdot (P_{max} - P_{min})$  then
9:          $P_{ref} \leftarrow P_{maxTol}$ 
10:         $cont \leftarrow 0$ 
11:         $marker \leftarrow true$ 
12:      else
13:         $P_{ref} \leftarrow P_{min} + m \cdot (P_{max} - P_{min})$ 
14:         $cont \leftarrow 0$ 
15:         $marker \leftarrow true$ 
16:      end if
17:      while  $marker == true$  do
18:         $P_{temp} \leftarrow P_{min} + cont \cdot 10^{-6}$ 
19:        if  $P_{temp} < P_{ref}$  then
20:           $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{temp}$ 
21:          Encontra  $MgOSNR$ 
22:          Atualiza margens de  $vetorConectOn$  para req. com  $P_{EnPA+Mg}$ 
23:          Encontra margem de OSNR desejada em  $vetorConectOn$  ( $MgOSNR_{Desejada}$ )
24:           $\Delta MgOSNR \leftarrow MgOSNR_{Desejada} - MgOSNR$ 
25:          if  $\Delta MgOSNR < 0,00$  then
26:            if  $cont > 0$  then
27:               $P1_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{min} + (cont - 1) \cdot 10^{-6}$ 
28:              Encontra  $MgOSNR1$ 
29:              Atualiza margens de  $vetorConectOn$  para req. com  $P1_{EnPA+Mg}$ 
30:              Encontra margem de OSNR desejada em  $vetorConectOn$  ( $MgOSNR1_{Desejada}$ )
31:               $\Delta MgOSNR1 \leftarrow MgOSNR1_{Desejada} - MgOSNR1$ 
32:              if  $abs(\Delta MgOSNR1) < abs(\Delta MgOSNR)$  then
33:                 $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P1_{EnPA+Mg}$ 
34:                 $marker \leftarrow false$ 
35:              else
36:                 $marker \leftarrow false$ 
37:              end if
38:            else
39:               $marker \leftarrow false$ 
40:            end if
41:          else
42:             $cont \leftarrow cont + 1$ 
43:          end if
44:        else
45:           $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{min} + (cont - 1) \cdot 10^{-6}$ 
46:           $marker \leftarrow false$ 
47:        end if
48:      end while
49:    else
50:       $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{max}$ 
51:    end if
52:  else
53:     $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{min} + m \cdot (P_{max} - P_{min})$ 
54:  end if
55: else
56:    $P_{EnPA+Mg} \leftarrow P_{max}$ 
57: end if
58: Sai do algoritmo e retorna  $P_{EnPA+Mg}$ 

```

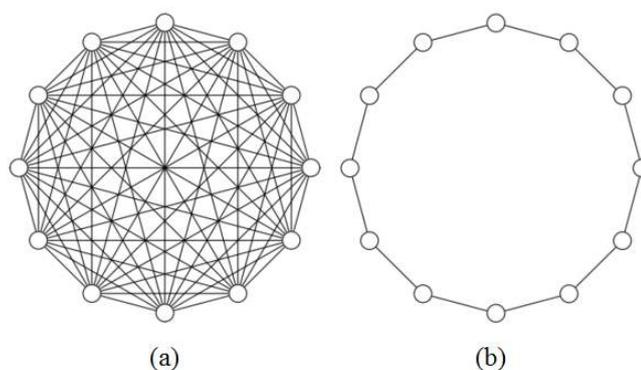
APÊNDICE G – META-HEURÍSTICA PSO

O PSO é um algoritmo da inteligência artificial, utilizado para otimizar um problema iterativamente ao tentar melhorar a solução candidata com respeito a uma dada medida de qualidade (função custo objetivo). Seu método encontra-se entre as meta-heurísticas evolutivas de algoritmos de otimização baseadas em padrões da natureza, como, por exemplo, a representação do movimento de cada indivíduo dentro de um bando (coletivo de pássaros), incluindo seus comportamentos sociais e cooperativos (ALAM, 2016).

O PSO resolve um problema criando uma população de soluções candidatas (partículas) e as movendo em torno do espaço de busca, de acordo com fórmulas matemáticas simples sobre a posição e velocidade da partícula (VALLE et al., 2008). Essas formulações guiam-se pela experiência pessoal ($P_{e_{best}}$) e experiência geral ($G_{e_{best}}$).

As partículas trocam informações sobre suas experiências, podendo o compartilhamento ser entre todas as partículas ou entre um grupo de partículas (suas vizinhas, por exemplo), como apresentado na Figura 42, em que se tem um sistema global e um sistema em anel. Apesar de o compartilhamento entre todas as partículas fazer o algoritmo convergir mais rapidamente, essa escolha pode levar a um mínimo (ou máximo) local que não seja o global. Isso porque, quando uma partícula encontra um mínimo (ou máximo) local, ela informa sua posição às demais, fazendo com que todas as partículas se dirijam para lá e deixando de varrer outras áreas que poderiam conter o valor real de mínimo (ou máximo) global. Assim, a escolha de um grupo de partículas menor para troca de informações, apesar de tornar o algoritmo mais lento, permite uma varredura de um número maior de pontos no espaço.

Figura 42 – Exemplo de topologias de enxames: (a) topologia global; (b) topologia em anel.



Fonte: adaptado de VALLE et al. (2008).

Portanto, neste trabalho, optou-se por um compartilhamento com um pequeno grupo, mais

especificamente o sistema em anel, em que as partículas vizinhas trocam informações (baseado no número de identificação de cada uma, i'). Ou seja, a partícula de identificação de número cinco ($i = 5$), troca informações apenas com as partículas com números de identificação quatro ($i = 4$) e seis ($i = 6$), e assim sucessivamente. Por fim, as características de cada partícula de identidade i são:

- Aptidão ($g(x_i)$): valor definido pela função custo objetivo (objetivo da otimização), podendo ser definida para cada posição de partícula i ($g(x_i)$) e, conseqüentemente, para a melhor posição ($g(p_i)$). Neste trabalho, a função custo a ser minimizada é a probabilidade de bloqueio resultante da média de três simulações utilizando os coeficientes (b_{n_1, n_2} ou b_{n_1, n_2, n_3}) substituídos pelos respectivos valores do vetor posição atual (\vec{x}_i) da partícula i .
- Vetor melhor posição (\vec{p}_i): vetor de posição que apresentou o melhor desempenho, correspondente à melhor aptidão. Neste trabalho, é o vetor de posição cuja combinação de valores para os coeficientes b 's (b_{n_1, n_2} ou b_{n_1, n_2, n_3}) resultou na menor probabilidade de bloqueio.
- Vetor velocidade atual (\vec{v}_i): vetor que define o passo e a direção de varredura do espaço, conseqüentemente, é responsável pela definição da próxima posição (vetor solução de coeficientes) a ser testada. Das relações de série de potências que utilizam o PSO nesta pesquisa, tem-se $(n + 1) \times (n + 1)$ ou $(n + 1) \times (n + 1) \times (n + 1)$ coeficientes, respectivamente, para b_{n_1, n_2} e b_{n_1, n_2, n_3} , conseqüentemente a dimensão do vetor velocidade é de $Dim = (n + 1) \times (n + 1)$ ou $Dim = (n + 1) \times (n + 1) \times (n + 1)$, em que, cada termo d é definido por (G.1) (CHAVES, 2012)

$$\bar{v}_{i,d} = \bar{\chi}[\bar{v}_{i,d} + c_1\epsilon_1(\bar{p}_{i,d} - \bar{x}_{i,d}) + c_2\epsilon_2(\bar{p}_{n(i),d} - \bar{x}_{i,d})], \quad (\text{G.1})$$

em que, $\bar{v}_{i,d}$ é a última velocidade atual; $\bar{p}_{i,d}$ é a melhor posição em que a partícula já esteve; $\bar{x}_{i,d}$ é a última posição da partícula; $\bar{p}_{n(i),d}$ é a posição que resultou na melhor aptidão dentro de um grupo de partículas (global ou não global); ϵ_1 e ϵ_2 são valores aleatórios obtidos por uma distribuição uniforme; c_1 e c_2 são normalmente constantes que desempenham os pesos dados à importância da experiência individual e global, respectivamente; $\bar{\chi}$ é definida como uma função dos pesos c_1 e c_2 ($\varphi = c_1 + c_2$) (G.2) (CHAVES, 2012)

$$\bar{\chi} = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}. \quad (\text{G.2})$$

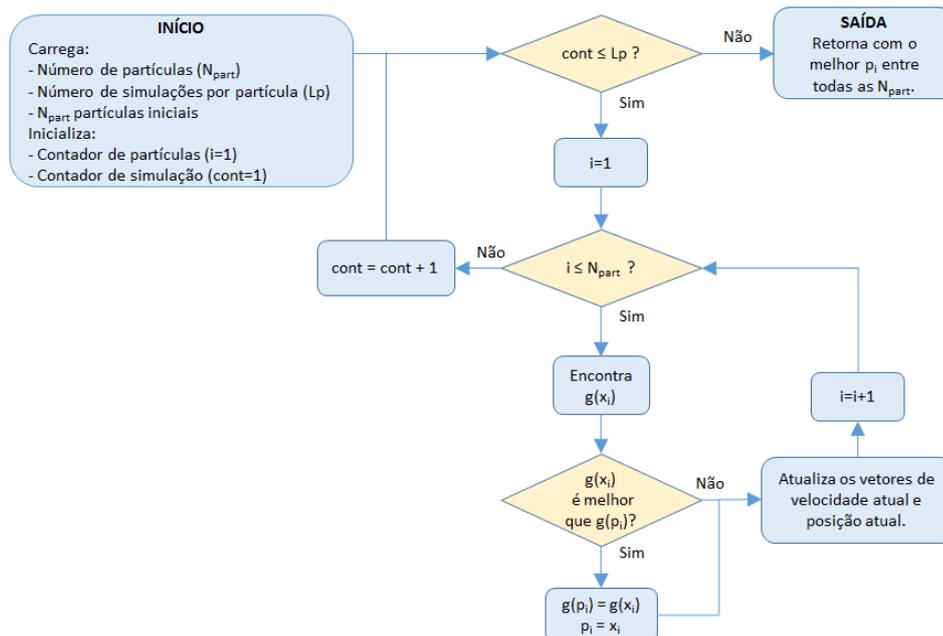
- Vetor posição atual ($\vec{\mathbf{x}}_i$): vetor de combinações de valores para os coeficientes b_{n_1, n_2} ou b_{n_1, n_2, n_3} que está sendo testado. Sua dimensão é definida de maneira análoga à dimensão do vetor velocidade, sendo cada termo d do seu vetor definido por (G.3) (CHAVES, 2012)

$$x_{i,d} = \bar{v}_{i,d} + x_{i,d}, \quad (\text{G.3})$$

em que $\bar{v}_{i,d}$ é a última velocidade atual e $\bar{x}_{i,d}$ é a última posição da partícula.

Na Figura 43 é apresentado o fluxograma do algoritmo PSO. Nesse fluxograma, inicialmente, são definidos o número de partículas (N_{part}) e o número total de simulações por partícula (L_p), seguido do carregamento das N_{part} partículas iniciais e da inicialização do contador de simulações ($cont = 1$) e do contador de partículas ($i = 1$). Desse ponto, o algoritmo entra nos L_p ciclos de obtenção de aptidão (g_{x_i}) e atualização dos vetores melhor posição ($\vec{\mathbf{p}}_i$), velocidade ($\vec{\mathbf{v}}_i$) e posição atual ($\vec{\mathbf{x}}_i$) para cada uma das N_{part} partículas. Neste trabalho, a obtenção da aptidão (g_{x_i}) é realizada através do resultado da probabilidade de bloqueio para um dado vetor posição atual ($\vec{\mathbf{x}}_i$). Caso o valor da aptidão para a posição atual (g_{x_i}) seja melhor (menor probabilidade de bloqueio) que a aptidão da melhor posição (g_{p_i}), essa última é atualizada com o valor da aptidão da posição atual (g_{x_i}), e o vetor melhor posição ($\vec{\mathbf{p}}_i$) é atualizado pela posição atual ($\vec{\mathbf{x}}_i$). Enquanto a atualização do vetor velocidade ($\vec{\mathbf{v}}_i$) e da posição atual ($\vec{\mathbf{x}}_i$) ocorrem a cada finalização de obtenção da aptidão (g_{x_i}).

Figura 43 – Fluxograma PSO.



Fonte: a autora.

Para a definição das partículas iniciais, é utilizada uma distribuição uniforme no domínio $U[-1; 1]$ para: (i) vetor posição atual (\vec{x}_i); (ii) vetor melhor posição (\vec{p}_i); e (iii) vetor velocidade atual (\vec{v}_i). Enquanto a atribuição inicial à aptidão da melhor posição é definida como um valor elevado ($g(p_i) = 1$, 100% de bloqueio), pois não se conhece essa informação a qual, nesta pesquisa, deseja-se minimizar. Para a simulação do PSO, foram consideradas 50 (cinquenta) partículas ($N_{part} = 50$) com dimensão igual a Dim , que foram simuladas até as partículas estabilizarem suas aptidões (Lp). Os valores de ϵ_1 , ϵ_2 , c_1 e c_2 da equação para atualização do vetor velocidade (G.1) estão definidos na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores utilizados no PSO.

Variável	Valor
ϵ_1	$U[0, 1] \Rightarrow$ Distribuição Uniforme
ϵ_2	$U[0, 1] \Rightarrow$ Distribuição Uniforme
c_1	2,05
c_2	2,05

Fonte: Adaptado de CHAVES (2012).

O Algoritmo 4 é dado de forma genérica, servindo para qualquer cenário que possa ser utilizada a meta-heurística PSO, especificamente neste trabalho, foi utilizado para a função peso do EnPA+Mg com ponderação, função de potência do EvPA-S e funções de *factor*

para os EvPA-D e EvPA-D-C. Os pontos em que diferenciam a depender da aplicação são as dimensões das partículas, o número de iterações e a definição da aptidão ($g(x_i)$) (Linha 6), que nesta pesquisa a probabilidade de bloqueio foi sempre utilizada como a aptidão.

Inicialmente são definidas algumas variáveis de entrada (número de partículas N_{part} e número de simulações por partícula Lp) e inicializados os contadores (de partículas $i = 1$ e de simulações $cont = 1$) (Linhas 1-2). Após o carregamento das partículas iniciais (Linha 3), as mesmas entrarão em ciclos (Linhas 4-16). Cada partícula terá seu vetor posição atual (\vec{x}_i) testado individualmente para obtenção de sua aptidão ($g(x_i)$) (Linha 6), que é comparada com sua aptidão da sua melhor posição ($g(p_i)$) (Linhas 7-10). Caso seja melhor, o vetor de melhor posição (\vec{p}_i) e seu respectivo valor de aptidão ($g(p_i)$) são atualizados, respectivamente, por \vec{x}_i e $g(x_i)$ (Linhas 8-9). Em todo caso, o vetor velocidade atual (\vec{v}_i) e posição atual (\vec{x}_i) são atualizados para a futura simulação (Linhas 11-14). Ao final de todas as simulações ($cont > Lp$), o algoritmo devolve a melhor posição entre todas as posições que todas as N_{part} estiveram, que neste trabalho corresponde aos coeficientes (b_{n_1, n_2}) (Linha 17).

Algoritmo 4 Algoritmo PSO. (Fonte: adaptado de CHAVES (2012).)

- 1: Define a quantidade de partículas (N_{part}).
 - 2: Define o número de simulações para cada uma das N_{part} partículas (Lp).
 - 3: Carrega população de partículas inicial.
 - 4: **for** $cont = 1$ até Lp **do**
 - 5: **for** $i = 1$ até N_{part} **do**
 - 6: Encontra $g(\vec{x}_i)$
 - 7: **if** $g(\vec{x}_i)$ melhor que $g(\vec{p}_i)$ **then**
 - 8: $g(\vec{p}_i) = g(\vec{x}_i)$
 - 9: $\vec{p}_i = \vec{x}_i$
 - 10: **end if**
 - 11: **for** $d = 1$ até dimensão D da partícula **do**
 - 12: $\vec{v}_{i,d} = \bar{\chi}[\vec{v}_{i,d} + c_1\epsilon_1(\vec{p}_{i,d} - \vec{x}_{i,d}) + c_2\epsilon_2(\vec{p}_{n(i),d} - \vec{x}_{i,d})]$
 - 13: $\vec{x}_{i,d} = \vec{v}_{i,d} + \vec{x}_{i,d}$
 - 14: **end for**
 - 15: **end for**
 - 16: **end for**
 - 17: Sai do algoritmo e retorna \vec{p}_i com melhor valor de $g(\vec{p}_i)$
-

Os vetores de posições atuais das partículas são substituídos nos coeficientes das respectivas relações que utilizam o PSO como ferramenta com a finalidade de se obter ao final um valor de potência. Consequentemente, cada combinação de coeficientes simulada resultará em uma probabilidade de bloqueio. O valor obtido para a aptidão é resultado da média de três simulações para probabilidade de bloqueio. Observa-se que, algumas combinações de coeficientes (b_{n_1, n_2} ou b_{n_1, n_2, n_3}) podem resultar em valores impraticáveis, sendo necessárias algumas condições de contorno. Para o EvPA-S, caso o resultado seja um valor negativo, será

retornado um valor menor que a potência mínima. Para os demais algoritmos que tratam de percentuais, caso resulte em um valor negativo, será retornado o valor zero, enquanto para valores maiores que um, será retornado um.

APÊNDICE H – ALGORITMO APA COM MEMÓRIA E COM AJUSTES

Baseado no fluxograma da Figura 16, o Algoritmo 5 é referente à forma de atribuição de potência APA com memória e com ajustes, que pode ser dividido em quatro fases:

- Na Fase de Inicialização (linhas 1-5), são carregadas as informações da requisição (par de nó origem-destino, rota, posição do espectro, taxa de transmissão e formato de modulação), além do número máximo de ajustes $LimInt$ e DB atual. Então, são inicializadas as variáveis auxiliares ($ContInt = 0$, $NewCall = false$, $EndMarker = false$) e encontrados os valores para P_{max} e $OSNR_{max}$, que são testados em relação ao limiar de OSNR (linha 4).
 - Caso P_{max} atenda à $OSNR_{th}$, segue para fase de busca.
 - Caso P_{max} não atenda à $OSNR_{th}$, seu valor é atribuído à $P_{current}$ e segue para a Fase de Finalização.
- Na Fase de Inicialização de Potência (linhas 6-13), é inicialmente obtido o valor de P_{min} e realizada uma busca no DB por uma posição com as mesmas características da solicitação de conexão:
 - Caso exista, o $P_{current}$ da requisição recebe $P_{current_{DB}}$ da posição correspondente.
 - Caso contrário, $NewCall$ torna-se $true$ e a requisição recebe o valor da potência mínima acrescida de uma margem de potência (4.32).
- Na Fase de Testes (linhas 14-48), ocorre enquanto o marcador $EndMarker$ for $false$. Inicialmente, é analisada a QoT da requisição, ou seja, é comparada a $OSNR_{th}$ com a $OSNR_{current}$, seguido pelo teste de impacto da requisição sobre os outros canais previamente alocados na rede ($OSNR_{others-channels}$). Ao final de cada teste, uma requisição poderá ser aceita, ou não aceita, para dado cenário avaliado de rota, posição de espectro e formato de modulação. No caso de não ser aceita, poderá ser testada outra combinação de rota, posição no espectro e formato de modulação, conforme Algoritmo 1 ao sair do Algoritmo 5. No caso de ser aceita, é avaliado o marcador $NewCall$ para definir se haverá uma inserção de uma nova posição no DB com as características da requisição ou se haverá a atualização do valor de $P_{current_{DB}}$ na referida posição do DB. Assim, ao avaliar a QoT para a potência, poderão ocorrer as seguintes respostas:

-
- $OSNR_{current}$ satisfaz o limiar de $OSNR_{th}$, e os outros canais previamente alocados suportam $P_{current}$. Nesse cenário, o *EndMarker* torna-se *true* e segue para última fase do algoritmo, pois foi encontrada uma solução. Se *NewCall* for *true*, essa solicitação é incluída no DB. Se *NewCall* for *false*, o DB deve atualizar o valor de $P_{current_{DB}}$ da posição correspondente.
 - $OSNR_{current}$ satisfaz o limiar de $OSNR_{th}$, mas os outros canais previamente alocados não suportam $P_{current}$. Nesse cenário, se o *ContInt* for menor ou igual ao número de iterações máximo, o $P_{current}$ terá seu valor diminuído em 1%, e a fase de teste é reiniciada. Observe que, caso o resultado desse decremento seja menor que P_{min} ou caso *ContInt* for maior que o limite do número de ajustes, o marcador *EndMarker* se tornará *true*, e o algoritmo segue para a fase de finalização, com a impossibilidade de alocação dessa requisição nesse cenário (rota, posição de espectro e/ou formato de modulação).
 - $OSNR_{current}$ não satisfaz o limiar de $OSNR_{th}$. Nesse cenário, se o *ContInt* for menor ou igual ao número de iterações máximo, o $P_{current}$ terá seu valor aumentado em 1%, e a fase de teste é reiniciada. Observe que, caso o resultado desse aumento seja maior que P_{max} ou caso *ContInt* for maior que o limite do número de ajustes, o marcador *EndMarker* se tornará *true*, e o algoritmo segue para a fase de finalização, com a impossibilidade de alocação dessa requisição nesse cenário (rota, posição de espectro e/ou formato de modulação).
- Na Fase de Finalização (linha 49), o algoritmo retorna com $P_{current}$ obtido.

Algoritmo 5 Algoritmo APA com memória e com ajustes

```

1: Carrega informações da requisição
2: Inicializa variáveis:  $ContInt = 0$ ,  $NewCall = false$ ,  $EndMarker = false$ 
3: Encontra  $P_{max}$  e  $OSNR_{max}$ 
4: if  $OSNR_{max} < OSNR_{th}$  then
5:    $P_{current} \leftarrow P_{max}$ 
6: else
7:   Encontra  $P_{min}$ 
8:   if Existe correspondete no DB com características iguais a da requisição then
9:      $P_{current} \leftarrow P_{current}$  do DB
10:  else
11:     $NewCall \leftarrow true$ 
12:     $P_{current} \leftarrow (P_{min} + margem)$ 
13:  end if
14:  while  $EndMarker = false$  do
15:    if  $OSNR_{current} > OSNR_{th}$  then
16:      if  $OSNR_{others-channels} > OSNR_{th(x)}$  then
17:         $EndMarker \leftarrow true$ 
18:        if  $NewCall = true$  then
19:          Adiciona nova informação ao DB.
20:        else
21:          Atualiza  $P_{current}$  na respectiva posição do DB.
22:        end if
23:      else
24:        if  $P_{current} - 0,01 \cdot P_{current} < P_{min}$  then
25:           $EndMarker \leftarrow true$ 
26:        else
27:          Atualiza  $ContInt = ContInt + 1$ 
28:          if  $ContInt > LimInt$  then
29:             $EndMarker \leftarrow true$ 
30:          else
31:             $P_{current} \leftarrow P_{current} - 0,01 \cdot P_{current}$ 
32:          end if
33:        end if
34:      end if
35:    else
36:      if  $P_{current} + 0,01 \cdot P_{current} > P_{max}$  then
37:         $EndMarker \leftarrow true$ 
38:      else
39:        Atualiza  $ContInt = ContInt + 1$ 
40:        if  $ContInt > LimInt$  then
41:           $EndMarker \leftarrow true$ 
42:        else
43:           $P_{current} \leftarrow P_{current} + 0,01 \cdot P_{current}$ 
44:        end if
45:      end if
46:    end if
47:  end while
48: end if
49: Sai do algoritmo e retorna  $P_{current}$ 

```

APÊNDICE I – ALGORITMO APA SEM MEMÓRIA E COM AJUSTES

Ajustando o algoritmo APA com memória e com ajustes a partir da remoção do DB e tudo que tem relação com o mesmo, é obtido o APA sem memória e com ajustes (Algoritmo 6), em que, quando existe valor de potência atingível do limiar ($OSNR_{max} > OSNR_{th}$), a potência inicial atribuída à cada requisição é definida pela potência mínima acrescida de uma margem (E.35). Essa atribuição inicial de potência poderá sofrer ajustes: (i) ou até atender aos limiares do próprio canal e dos demais canais da rede; (ii) ou até o número de ajustes atingir o limite atribuído; (iii) ou até um dos ajustes resultar em um valor de potência fora dos limites de P_{min} e P_{max} . Observa-se que, o valor inicial atribuído à potência atende ao limiar de OSNR do próprio canal, não sendo necessários ajustes para aumentar a potência em um primeiro momento, podendo os ajustes serem realizados apenas para diminuir o valor de potência de partida. Entretanto, com os ajustes para diminuição do seu valor, a potência poderá cair abaixo da potência mínima para a requisição, podendo ser necessário aumentar seu valor.

Algoritmo 6 Algoritmo APA sem memória e com ajustes

```

1: Carrega informações da requisição
2: Inicializa variáveis:  $ContInt = 0$ ,  $EndMarker = false$ 
3: Encontra  $P_{max}$  e  $OSNR_{max}$ 
4: if  $OSNR_{max} < OSNR_{th}$  then
5:    $P_{current} \leftarrow P_{max}$ 
6: else
7:   Encontra  $P_{min}$ 
8:    $P_{current} \leftarrow (P_{min} + margem)$ 
9:   while  $EndMarker = false$  do
10:    if  $OSNR_{current} > OSNR_{th}$  then
11:     if  $OSNR_{others-channels} > OSNR_{th(x)}$  then
12:       $EndMarker \leftarrow true$ 
13:     else
14:      if  $P_{current} - 0,01 \cdot P_{current} < P_{min}$  then
15:        $EndMarker \leftarrow true$ 
16:      else
17:       Atualiza  $ContInt = ContInt + 1$ 
18:       if  $ContInt > LimInt$  then
19:         $EndMarker \leftarrow true$ 
20:       else
21:         $P_{current} \leftarrow P_{current} - 0,01 \cdot P_{current}$ 
22:       end if
23:      end if
24:     end if
25:    else
26:     if  $P_{current} + 0,01 \cdot P_{current} > P_{max}$  then
27:       $EndMarker \leftarrow true$ 
28:     else
29:      Atualiza  $ContInt = ContInt + 1$ 
30:      if  $ContInt > LimInt$  then
31:        $EndMarker \leftarrow true$ 
32:      else
33:        $P_{current} \leftarrow P_{current} + 0,01 \cdot P_{current}$ 
34:      end if
35:     end if
36:    end if
37:   end while
38: end if
39: Sai do algoritmo e retorna  $P_{current}$ 

```

APÊNDICE J – ALGORITMO PARA O LOGON

Para a estratégia de atribuição de potência de lançamento LOGON (POGGIOLINI et al., 2013b), o bloco de Controle de Admissão de Chamadas (*Call Admission Control* – CAC) do ambiente computacional apresentado no Apêndice B é modificado, pois a definição do formato de modulação não segue a ordem de eficiência espectral (maior para a menor), mas sua definição é baseada em uma otimização local, que resulta em uma otimização global (LOGON). Nesse sentido, o bloco de CAC do LOGON é dado pelo Algoritmo 7, dividido em três fases:

- Inicialização (linhas 1-5 do Algoritmo 7): são recebidas informações gerais obtidas previamente (densidade espectral de potência dos canais G_o , $OSNR_{span}$ e limiares de OSNR para combinações de formatos de modulações e taxas de transmissão de *bits*) e informações sobre a requisição (taxa de transmissão de *bits*, nós de origem e destino). Então é inicializado um marcador booleano ($bloq = true$), que indicará se a chamada é bloqueada ou aceita. E, com base no roteamento desejado (fixo, fixo-alternativo ou adaptativo), k rotas são pesquisadas e armazenadas em um vetor de rotas (*vectorRoutes*).
- Análise (linhas 6-29 do Algoritmo 7): dada uma rota, o número de *spans* que a formam é contabilizado (N_s), então é obtida a $OSNR_{rota}$ pela relação (4.42) e valores de $OSNR_{span}$ e N_s . Em seguida, é obtido o formato de modulação mais eficiente espectralmente que tolera a $OSNR_{rota}$ para a taxa de transmissão de *bits* desejada. Caso não haja formato de modulação capaz de suportar a respectiva $OSNR_{rota}$, outra rota é analisada¹. Caso exista formato de modulação capaz de atender à respectiva $OSNR_{rota}$, a largura de banda Δf e a potência de lançamento são obtidas. Em seguida, é buscado um buraco que comporte a largura de banda necessária. Caso o buraco exista, o marcador *bloq* se torna *false*. Caso não exista buraco, o ponteiro do vetor de rota é incrementado e é reiniciada a análise para a nova rota.
- Finalização (linhas 30-35 do Algoritmo 7): quando o marcador *bloq* se torna *false*, a requisição é passível de alocação, sendo as informações de formato de modulação, rota,

¹ Observa-se que, caso o roteamento utilizado seja o *Shortest-Path*, se a primeira rota não atender ao limiar do formato de modulação menos eficiente espectralmente, nenhuma outra rota atenderá. Assim, nesse ponto, quando utilizado o *Shortest-Path*, pode o ponteiro do *vectorRoutes* ir para o final do vetor.

espectro e potência atribuídas à nova chamada da rede. Enquanto, na falha de todas as tentativas de rota, a requisição é bloqueada e contabilizada no contador de bloqueios.

Algoritmo 7 Algoritmo LOGON. (Fonte: adaptado de POGGIOLINI et al. (2013b).)

```

1: Entradas gerais:  $G_o$ ,  $OSNR_{span}$  e  $OSNR_{th}$  para formatos de modulações e taxas de transmissão de bits
2: Entradas requisição: taxa de transmissão de bits, nó origem e nó destino
3: Faz a atribuição:  $bloq \leftarrow true$ 
4: Busca k rotas e armazena no vetor vectorRoutes
5: Coloca ponteiro de rota (pointRoute) no início do vetor vectorRoutes
6: while (pointRoute  $\neq NULL$ ) e ( $bloq = true$ ) do
7:   Contabiliza número de spans na rota ( $N_s$ )
8:   Encontra a  $OSNR_{rota}$  com base na relação (4.42) e nos valores de  $OSNR_{span}$  e  $N_s$ 
9:   Inicializa  $M$  com formato de modulação mais eficiente espectralmente
10:  Faz a atribuição:  $teste_M \leftarrow false$ 
11:  while ( $M > 2$ ) e ( $teste_M = false$ ) do
12:    if  $OSNR_{th_M} > OSNR_{rota}$  then
13:      Faz a atribuição:  $M \leftarrow \frac{M}{2}$ 
14:    else
15:      Faz a atribuição:  $teste_M \leftarrow true$ 
16:    end if
17:  end while
18:  if  $teste_M = true$  then
19:    Calcula  $\Delta f$  e a potência de lançamento
20:    Busca buraco com largura suficiente para  $\Delta f$  e armazena na variável hole
21:    if (hole =  $NULL$ ) then
22:      Incrementa o ponteiro do vetor vectorRoutes (pointRoute)
23:    else
24:      Faz a atribuição:  $bloq \leftarrow false$ 
25:    end if
26:  else
27:    Incrementa o ponteiro do vetor vectorRoutes (pointRoute)
28:  end if
29: end while
30: if ( $bloq = true$ ) then
31:   Requisição é bloqueada
32: else
33:   Requisição é aceita
34: end if
35: Sai do CAC

```

APÊNDICE K – RESULTADOS DAS MELHORES PARTÍCULAS DO PSO

Tabela 15 – Melhores posições de partículas encontradas de formas independentes pelo PSO para o EnPA+MgMedPondRota.

Coef.	CoefPesoMedPond ₁	CoefPesoMedPond ₂	Coef.	CoefPesoMedPond ₁	CoefPesoMedPond ₂
$b_{0,0,0}$	0,306710	0,540890	$b_{2,0,0}$	0,071600	0,102920
$b_{0,0,1}$	-0,105380	0,151480	$b_{2,0,1}$	-0,783900	-0,972500
$b_{0,0,2}$	-0,149210	0,144890	$b_{2,0,2}$	0,139440	0,200440
$b_{0,0,3}$	-0,155270	-0,423200	$b_{2,0,3}$	0,159790	0,229690
$b_{0,1,0}$	-0,263810	-0,379220	$b_{2,1,0}$	0,048990	0,070420
$b_{0,1,1}$	-0,033160	-0,047660	$b_{2,1,1}$	0,051250	0,073670
$b_{0,1,2}$	-0,112300	-0,161430	$b_{2,1,2}$	0,125870	0,180930
$b_{0,1,3}$	0,609870	0,343050	$b_{2,1,3}$	0,132660	0,190690
$b_{0,2,0}$	-0,030900	-0,044410	$b_{2,2,0}$	-0,044470	-0,063920
$b_{0,2,1}$	-0,039940	-0,057410	$b_{2,2,1}$	0,504670	0,725460
$b_{0,2,2}$	0,110040	0,061890	$b_{2,2,2}$	0,123610	0,177680
$b_{0,2,3}$	-0,096480	-0,138690	$b_{2,2,3}$	0,130390	0,187430
$b_{0,3,0}$	0,055770	-0,031370	$b_{2,3,0}$	0,064820	0,093170
$b_{0,3,1}$	0,053510	0,076920	$b_{2,3,1}$	-0,062560	-0,089930
$b_{0,3,2}$	0,107780	0,154930	$b_{2,3,2}$	0,121350	0,174440
$b_{0,3,3}$	0,094210	0,135420	$b_{2,3,3}$	0,128130	0,184180
$b_{1,0,0}$	0,069340	0,099670	$b_{3,0,0}$	0,148480	0,213440
$b_{1,0,1}$	0,076120	0,109420	$b_{3,0,1}$	0,150750	0,216700
$b_{1,0,2}$	0,137180	0,197190	$b_{3,0,2}$	0,153010	0,219950
$b_{1,0,3}$	0,157530	0,226440	$b_{3,0,3}$	0,148740	0,213810
$b_{1,1,0}$	0,028640	0,041170	$b_{3,1,0}$	0,085170	-0,047900
$b_{1,1,1}$	0,037680	0,054160	$b_{3,1,1}$	0,091950	-0,051720
$b_{1,1,2}$	-0,119090	-0,171190	$b_{3,1,2}$	0,146220	-0,082240
$b_{1,1,3}$	-0,105520	-0,151680	$b_{3,1,3}$	0,140700	-0,202250
$b_{1,2,0}$	0,035420	0,050910	$b_{3,2,0}$	0,082910	-0,119180
$b_{1,2,1}$	0,042210	0,060670	$b_{3,2,1}$	-0,089690	-0,128920
$b_{1,2,2}$	-0,116830	-0,167940	$b_{3,2,2}$	-0,439660	-0,632010
$b_{1,2,3}$	0,103260	0,148430	$b_{3,2,3}$	0,130650	0,187800
$b_{1,3,0}$	0,060300	0,086680	$b_{3,3,0}$	0,680650	0,382860
$b_{1,3,1}$	0,058030	0,083410	$b_{3,3,1}$	0,874350	-0,491820
$b_{1,3,2}$	0,114570	0,164690	$b_{3,3,2}$	-0,141700	0,203690
$b_{1,3,3}$	0,101000	0,145180	$b_{3,3,3}$	0,120600	-0,067830

Fonte: a autora.

Tabela 16 – Melhores posições de partículas encontradas de formas independentes pelo PSO para o EnPA+MgMinPondRota.

Coef.	CoefPesoMinPond ₁	CoefPesoMinPond ₂	Coef.	CoefPesoMinPond ₁	CoefPesoMinPond ₂
$b_{0,0,0}$	0,323800	0,430200	$b_{2,0,0}$	0,087260	0,107160
$b_{0,0,1}$	0,230500	0,020300	$b_{2,0,1}$	-0,955370	-0,732000
$b_{0,0,2}$	0,060000	-0,291000	$b_{2,0,2}$	0,169940	0,134140
$b_{0,0,3}$	-0,289230	-0,151200	$b_{2,0,3}$	0,194740	0,139790
$b_{0,1,0}$	-0,215150	-0,343810	$b_{2,1,0}$	0,059700	0,042200
$b_{0,1,1}$	-0,040410	0,041500	$b_{2,1,1}$	0,062460	0,011250
$b_{0,1,2}$	-0,136860	-0,101230	$b_{2,1,2}$	0,153400	0,128000
$b_{0,1,3}$	0,476460	0,509870	$b_{2,1,3}$	0,161670	0,126600
$b_{0,2,0}$	-0,037650	-0,035700	$b_{2,2,0}$	-0,054190	-0,034550
$b_{0,2,1}$	-0,048670	0,029940	$b_{2,2,1}$	0,615060	0,500600
$b_{0,2,2}$	0,085960	0,100400	$b_{2,2,2}$	0,150640	0,131000
$b_{0,2,3}$	-0,117580	-0,106480	$b_{2,2,3}$	0,158910	0,103900
$b_{0,3,0}$	0,122000	0,045720	$b_{2,3,0}$	0,078990	0,048500
$b_{0,3,1}$	0,065210	0,055700	$b_{2,3,1}$	-0,076240	-0,065400
$b_{0,3,2}$	0,131350	0,171800	$b_{2,3,2}$	0,147890	0,102350
$b_{0,3,3}$	0,114810	0,042100	$b_{2,3,3}$	0,156150	0,181300
$b_{1,0,0}$	0,084500	0,063000	$b_{3,0,0}$	0,180960	0,181000
$b_{1,0,1}$	0,092770	0,061200	$b_{3,0,1}$	0,183720	0,125050
$b_{1,0,2}$	0,167180	0,123180	$b_{3,0,2}$	0,186480	0,130100
$b_{1,0,3}$	0,191980	0,125000	$b_{3,0,3}$	0,181270	0,108400
$b_{1,1,0}$	0,349050	0,018640	$b_{3,1,0}$	0,018630	0,051700
$b_{1,1,1}$	0,045920	0,036550	$b_{3,1,1}$	0,020110	0,099200
$b_{1,1,2}$	-0,145140	-0,190900	$b_{3,1,2}$	0,031990	0,160200
$b_{1,1,3}$	-0,128600	-0,105200	$b_{3,1,3}$	-0,030770	0,121000
$b_{1,2,0}$	0,043160	0,023520	$b_{3,2,0}$	-0,018130	0,062910
$b_{1,2,1}$	0,051440	0,032210	$b_{3,2,1}$	-0,109300	-0,095500
$b_{1,2,2}$	-0,142380	-0,168300	$b_{3,2,2}$	-0,535830	-0,336600
$b_{1,2,3}$	0,125840	0,132260	$b_{3,2,3}$	0,159220	0,300000
$b_{1,3,0}$	0,073490	0,060830	$b_{3,3,0}$	0,531750	0,606500
$b_{1,3,1}$	0,070720	0,056630	$b_{3,3,1}$	0,191260	0,435000
$b_{1,3,2}$	0,139630	0,117000	$b_{3,3,2}$	0,030990	-0,112700
$b_{1,3,3}$	0,123090	0,105500	$b_{3,3,3}$	0,026380	0,110600

Fonte: a autora.

Tabela 17 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-S.

Coeficientes	EvPA-S ₁	EvPA-S ₂
$b_{0,0}$	$6,76 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-4}$
$b_{0,1}$	$5,05 \times 10^{-4}$	$4,25 \times 10^{-4}$
$b_{0,2}$	$-1,27 \times 10^{-4}$	$-2,80 \times 10^{-4}$
$b_{0,3}$	$6,62 \times 10^{-5}$	$1,71 \times 10^{-4}$
$b_{1,0}$	$5,54 \times 10^{-4}$	$8,29 \times 10^{-4}$
$b_{1,1}$	$-9,27 \times 10^{-5}$	$-7,59 \times 10^{-5}$
$b_{1,2}$	$-3,79 \times 10^{-5}$	$-4,14 \times 10^{-5}$
$b_{1,3}$	$5,09 \times 10^{-5}$	$-9,68 \times 10^{-5}$
$b_{2,0}$	$6,76 \times 10^{-4}$	$6,30 \times 10^{-4}$
$b_{2,1}$	$2,55 \times 10^{-4}$	$-3,16 \times 10^{-4}$
$b_{2,2}$	$-5,14 \times 10^{-5}$	$-9,28 \times 10^{-5}$
$b_{2,3}$	$1,59 \times 10^{-4}$	$-7,96 \times 10^{-5}$
$b_{3,0}$	$-8,96 \times 10^{-6}$	$-2,85 \times 10^{-5}$
$b_{3,1}$	$-8,72 \times 10^{-5}$	$-9,37 \times 10^{-5}$
$b_{3,2}$	$-1,34 \times 10^{-3}$	$2,32 \times 10^{-4}$
$b_{3,3}$	$4,09 \times 10^{-4}$	$2,51 \times 10^{-4}$

Fonte: a autora.

Tabela 18 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-D.

Coef.	EvPA-D ₁	EvPA-D ₂	Coef.	EvPA-D ₁	EvPA-D ₂
$b_{0,0,0}$	0,425320	0,337646	$b_{2,0,0}$	-0,564622	-0,024517
$b_{0,0,1}$	-0,109670	-0,058901	$b_{2,0,1}$	0,529786	0,055214
$b_{0,0,2}$	-0,324890	0,064030	$b_{2,0,2}$	-0,026371	0,048982
$b_{0,0,3}$	0,207451	0,011915	$b_{2,0,3}$	-0,186901	0,043534
$b_{0,1,0}$	-0,119514	0,031223	$b_{2,1,0}$	0,236650	0,042127
$b_{0,1,1}$	0,230167	0,023992	$b_{2,1,1}$	0,233579	0,026786
$b_{0,1,2}$	-0,097723	0,025215	$b_{2,1,2}$	-0,106049	-0,040520
$b_{0,1,3}$	0,191990	0,026007	$b_{2,1,3}$	-0,090467	0,064564
$b_{0,2,0}$	0,095405	0,052709	$b_{2,2,0}$	0,269342	-0,010359
$b_{0,2,1}$	-0,112843	0,028371	$b_{2,2,1}$	0,232907	0,029356
$b_{0,2,2}$	0,120362	0,008466	$b_{2,2,2}$	-0,220129	0,060405
$b_{0,2,3}$	-0,509280	-0,539458	$b_{2,2,3}$	-0,090025	0,032963
$b_{0,3,0}$	0,242090	0,008700	$b_{2,3,0}$	-0,237985	0,041078
$b_{0,3,1}$	0,152110	0,024156	$b_{2,3,1}$	0,035215	-0,032962
$b_{0,3,2}$	0,015515	0,006263	$b_{2,3,2}$	-0,206557	-0,004606
$b_{0,3,3}$	0,118787	0,015946	$b_{2,3,3}$	-0,122689	0,028352
$b_{1,0,0}$	0,150436	0,010825	$b_{3,0,0}$	-0,007046	0,008470
$b_{1,0,1}$	-0,202627	0,651904	$b_{3,0,1}$	-0,171860	-0,012090
$b_{1,0,2}$	-0,057938	-0,416803	$b_{3,0,2}$	0,177390	-0,030543
$b_{1,0,3}$	0,376763	0,050888	$b_{3,0,3}$	-0,131707	0,007251
$b_{1,1,0}$	-0,318993	0,049331	$b_{3,1,0}$	0,237605	-0,010503
$b_{1,1,1}$	-0,000690	-0,018883	$b_{3,1,1}$	0,075557	0,029540
$b_{1,1,2}$	0,169831	0,037063	$b_{3,1,2}$	-0,099153	0,017436
$b_{1,1,3}$	0,117686	0,030489	$b_{3,1,3}$	-0,084444	-0,054154
$b_{1,2,0}$	-0,194139	0,039082	$b_{3,2,0}$	-0,011611	0,033701
$b_{1,2,1}$	-0,151388	0,050401	$b_{3,2,1}$	-0,116721	-0,027288
$b_{1,2,2}$	-0,130160	0,031916	$b_{3,2,2}$	0,000259	0,009204
$b_{1,2,3}$	0,042198	-0,317231	$b_{3,2,3}$	-0,016668	0,016778
$b_{1,3,0}$	-0,058999	-0,492032	$b_{3,3,0}$	0,277695	0,052294
$b_{1,3,1}$	0,021912	0,023136	$b_{3,3,1}$	-0,230484	-0,039041
$b_{1,3,2}$	0,042283	-0,016465	$b_{3,3,2}$	-0,013392	0,022353
$b_{1,3,3}$	-0,211762	-0,035404	$b_{3,3,3}$	0,320863	0,013213

Fonte: a autora.

Tabela 19 – Melhores posições encontradas de formas independentes pelo PSO para o EvPA-D-C.

Coef.	EvPA-D ₁	EvPA-D ₂	Coef.	EvPA-D ₁	EvPA-D ₂
$b_{0,0,0}$	0,360148	0,436851	$b_{2,0,0}$	-0,135	-0,2453
$b_{0,0,1}$	-0,24698	-0,11853	$b_{2,0,1}$	-0,01966	0,093217
$b_{0,0,2}$	0,026734	-0,23858	$b_{2,0,2}$	-0,03259	-0,06706
$b_{0,0,3}$	0,09386	0,176441	$b_{2,0,3}$	-0,03566	-0,01736
$b_{0,1,0}$	-0,0398	-0,1098	$b_{2,1,0}$	0,141031	0,353601
$b_{0,1,1}$	0,120267	0,192003	$b_{2,1,1}$	0,095973	0,221933
$b_{0,1,2}$	-0,0236	-0,08999	$b_{2,1,2}$	0,076356	-0,05008
$b_{0,1,3}$	0,102273	0,180734	$b_{2,1,3}$	-0,14906	-0,17489
$b_{0,2,0}$	0,054547	0,089464	$b_{2,2,0}$	0,114932	0,249048
$b_{0,2,1}$	-0,03596	-0,10424	$b_{2,2,1}$	0,274584	0,217
$b_{0,2,2}$	0,230131	0,164025	$b_{2,2,2}$	-0,07717	-0,20343
$b_{0,2,3}$	-0,14418	-0,1099	$b_{2,2,3}$	-0,14401	-0,08338
$b_{0,3,0}$	0,179383	0,226423	$b_{2,3,0}$	-0,21949	-0,12951
$b_{0,3,1}$	-0,00616	0,15139	$b_{2,3,1}$	0,025728	0,030839
$b_{0,3,2}$	-0,08603	0,012546	$b_{2,3,2}$	-0,08494	-0,19221
$b_{0,3,3}$	0,145332	0,107764	$b_{2,3,3}$	-0,05424	-0,12454
$b_{1,0,0}$	0,011637	0,221492	$b_{3,0,0}$	-0,0029	-0,0046
$b_{1,0,1}$	-0,07449	-0,21706	$b_{3,0,1}$	-0,06449	-0,20146
$b_{1,0,2}$	-0,05488	-0,25588	$b_{3,0,2}$	0,094088	0,161841
$b_{1,0,3}$	0,123511	0,2615	$b_{3,0,3}$	-0,06357	-0,12055
$b_{1,1,0}$	-0,11265	-0,29887	$b_{3,1,0}$	0,205421	0,219836
$b_{1,1,1}$	-0,13768	-0,02476	$b_{3,1,1}$	-0,03609	0,063501
$b_{1,1,2}$	0,126285	0,124228	$b_{3,1,2}$	0,080186	-0,0779
$b_{1,1,3}$	-0,05909	0,1114	$b_{3,1,3}$	-0,13831	-0,07523
$b_{1,2,0}$	-0,19772	-0,20643	$b_{3,2,0}$	0,01545	-0,01342
$b_{1,2,1}$	-0,04145	-0,14295	$b_{3,2,1}$	-0,11639	-0,09384
$b_{1,2,2}$	0,235469	-0,11385	$b_{3,2,2}$	0,039023	-0,00859
$b_{1,2,3}$	-0,10508	0,035506	$b_{3,2,3}$	0,02361	-0,01439
$b_{1,3,0}$	0,120612	-0,09079	$b_{3,3,0}$	-0,06903	0,197209
$b_{1,3,1}$	0,023204	-0,00518	$b_{3,3,1}$	-0,11988	-0,21243
$b_{1,3,2}$	0,099489	0,041505	$b_{3,3,2}$	0,001203	-0,00169
$b_{1,3,3}$	-0,02226	-0,22109	$b_{3,3,3}$	0,174564	0,428806

Fonte: a autora.