



## **Desempenho de algoritmos PSO e PSO baseados em sub exames para o problema de alocação de potência em redes OCDMA**

**CARLOS HENRIQUE DE MELO VASSOLER**

Agosto de 2016

**Instituto Superior de Engenharia do Porto**  
Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida 431, 4200-072 Porto

# **Desempenho de algoritmos PSO e PSO baseados em sub exames para o problema de alocação de potência em redes ÓCDMA**

Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -  
Área de Especialização de Telecomunicações elaborado por:

**Carlos Henrique de Melo Vassoler**

Orientador: Prof. Francisco José Dias Pereira  
Co-orientador: Prof. Osmar Tormena Junior

Ano Lectivo: 2016



---

# Agradecimentos

---

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela sua infinita bondade e amor.

Também gostaria de agradecer minha família, principalmente meus pais Edson Carlos e Telmira pelo incentivo e afeto.

Aos meus amigos, em especial ao Anderson, Luiz Fernando e Daniel que além de amigos foram minha família durante o intercâmbio.

A todos os meus professores durante todo meu ciclo de estudos, em especial ao Prof. Francisco que aceitou o convite de ser orientador deste trabalho.



---

# Resumo

---

Neste trabalho é investigado o controlo óptimo de potência em redes ópticas de acesso múltiplo por divisão de código (OCDMA) através de algoritmos de optimização por enxames de partículas (PSO) e desenvolvido um PSO modificado baseado em múltiplos enxames. O algoritmo é utilizado para encontrar potências óptimas e garantir uma razão sinal ruído mais interferência (SNIR) que possa garantir qualidade de serviço (QoS) de transmissão. Para o estudo deste trabalho foram considerados códigos não coerentes unidimensionais (1D) conhecidos como códigos primos e considerados os efeitos de ruído de emissão espontânea do amplificador óptico (ASE). Foram investigados a influência da determinação dos parâmetros para algoritmos PSO para o problema de alocação de potência em redes OCDMA, e investigado também adaptações ao algoritmo PSO para garantir a convergência, sobreposição de restrições de SNIR e a capacidade de gerar soluções válidas. Os principais resultados apresentados fornecem uma comparação de desempenho entre o PSO e o PSO modificado proposto neste trabalho para o problema da alocação de potência em redes OCDMA.

## **Palavras-Chave**

PSO, PSO modificado, Sub enxames, Redes OCDMA, Alocação de Potência, Contorolo Óptimo de Potência,



---

# Abstract

---

This dissertation investigated the optimum power control in optical networks with code division multiple access (OCDMA) using particle swarm optimization (PSO) algorithms and developed a modified PSO based on multiple swarms. The algorithm is used to find optical powers and ensure signal noise plus interference ratio (SNIR) that can ensure quality of service (QoS) of transmission. For the study of this work were considered not coherent unidimensional codes (1D) known as prime codes and considering the effects of amplifier spontaneous emission (ASE) noise of the optical amplifier. We investigated the influence of the parameters for determination of PSO algorithm for power allocation problem in networks OCDMA, and also investigated adaptations to the PSO algorithm to ensure the convergence, overlapping of SNIR constraints and the ability to generate valid solutions. The main results presented provide a comparison performance between the PSO and modified PSO proposed in this paper for power allocation problem in OCDMA networks.

**Keywords** PSO, modified PSO, sub-swarm, OCDMA networks, optimum power control, power allocation.



---

# Conteúdo

---

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Glossário	vii
Variáveis	ix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização . . . . .	1
1.2 Problema . . . . .	2
1.3 Motivação . . . . .	2
1.4 Objetivos . . . . .	2
1.5 Planeamento do Projecto . . . . .	3
1.6 Estrutura do Relatório . . . . .	3
<b>2 Redes Ópticas WDM/OCDM</b>	<b>5</b>
2.1 Caracterização de um sistema óptico WDM . . . . .	7
2.1.1 Transmissores . . . . .	9
2.1.2 Recetores . . . . .	10
2.1.3 Multiplexadores . . . . .	11
2.1.4 Amplificadores Ópticos . . . . .	12
2.1.5 Limitações da Tecnologia WDM . . . . .	14
2.2 A tecnologia OCDM . . . . .	14
2.3 Rede híbrida WDM/OCDM . . . . .	15
<b>3 Alocação de Recursos em Redes Ópticas</b>	<b>19</b>
3.1 Descrição do Problema . . . . .	22
3.2 Restrições da Camada Física . . . . .	25

<b>4</b>	<b>Optimização por enxame de partículas</b>	<b>29</b>
4.1	Alocação e Optimização de Recursos . . . . .	31
4.2	Algoritmos de Múltiplos Enxames . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Resultados Numéricos</b>	<b>35</b>
5.1	Parâmetros Gerais . . . . .	35
5.2	Soluções válidas através do PSO . . . . .	36
5.3	Optimização de Parâmetros do PSO . . . . .	38
5.4	Desempenho do PSO clássico . . . . .	43
5.5	PSO 1 . . . . .	43
5.6	PSO 2 . . . . .	47
5.7	PSO 3 . . . . .	51
5.8	Algoritmo de múltiplos enxames . . . . .	54
5.9	Primeiro Método de Atualização das Partículas para algoritmo de 3 sub enxames . . . . .	55
5.10	Segundo Método de Atualização das Partículas para o algoritmo de 3 sub enxames . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusão . . . . .	73
6.2	Desenvolvimentos Futuros . . . . .	75
	<b>Bibliografia</b>	<b>77</b>
	<b>Anexos</b>	<b>83</b>
<b>A</b>	<b>Algoritmo Forma Matricial</b>	<b>85</b>
<b>B</b>	<b>PSO clássico e condições para convergência</b>	<b>89</b>
<b>C</b>	<b>PSO clássico</b>	<b>107</b>
<b>D</b>	<b>PSO baseado em múltiplos enxames de método 1</b>	<b>125</b>
<b>E</b>	<b>PSO baseado em múltiplos enxames de método 2</b>	<b>133</b>

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Princípio do WDM [1]. . . . .	7
2.2	Dispersão na Transmissão Digital [1]. . . . .	8
2.3	WDM <i>Duplex</i> [1]. . . . .	9
2.4	Componentes do Transmissor [2]. . . . .	10
2.5	Componentes do Componentes do Fotodetector [2]. . . . .	11
2.6	Tipos de Amplificadores [2]. . . . .	12
2.7	Amplificadores: Ganho $\times$ <i>Comprimentodeonda</i> [1]. . . . .	13
2.8	Estágios da regeneração do sinal [1]. . . . .	13
2.9	Acoplador Estrela [2]. . . . .	16
3.1	Arquitetura da rede [2][3]. . . . .	24
3.2	SNIR máxima em função do número de utilizadores. . . . .	25
3.3	Amplificadores em cascata. . . . .	27
4.1	Fluxograma do PSO. . . . .	30
5.1	Evolução do valor da função de custo para $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 1$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	39
5.2	Evolução da SNIR em cada OCP para a $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 1$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	39
5.3	Evolução do valor da função de custo para $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 0,9$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	40
5.4	Evolução da SNIR em cada OCP para a $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 0,9$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	41
5.5	Evolução do valor da função de custo para $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	42
5.6	Evolução da SNIR em cada OCP para a $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 800$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$ e $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . . . . .	42

5.7	Evolução do valor da função de custo para $K = 19$ $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 6000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,9 \rightarrow 0,1$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	45
5.8	Evolução da SNIR em cada OCP para $K = 19$ de $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 6000$ , $\mathcal{P} = 9$ , $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	46
5.9	Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para $K = 19$ a $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 6000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	47
5.10	Evolução do valor da função de custo para $K = 19$ $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,2, C_2 = 1,8$ , $\mathcal{G} = 2000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	48
5.11	Evolução da SNIR em cada OCP para $K = 19$ de $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,2$ , $C_2 = 1,8$ , $\mathcal{G} = 2000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	49
5.12	Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para $K = 19$ a $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,2$ , $C_2 = 1,8$ , $\mathcal{G} = 2000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	50
5.13	Evolução da SNIR em cada OCP para $K = 19$ de $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,5$ , $C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 8000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	52
5.14	Evolução do valor da função de custo para $K = 19$ de $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,5$ , $C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 8000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	53
5.15	Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para $K = 19$ de $\vec{b}_g^{best}$ em que $C_1 = 1,5$ , $C_2 = 2$ , $\mathcal{G} = 8000$ , $\mathcal{P} = 21$ , $\omega = 0,7$ e $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . . . . .	54
5.16	Evolução do valor da função de custo para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	55
5.17	Evolução do SNIR em cada OCP para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	56
5.18	Sub enxame de origem da $\vec{b}_g^{best}$ para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	57
5.19	Evolução da SNIR em cada OCP de $\vec{b}_g^{best}$ para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2. . . . .	64
5.20	Evolução da função de custo de $\vec{b}_g^{best}$ para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2. . . . .	65
5.21	Enxame de origem $\vec{b}_g^{best}$ para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2 . . . . .	65

---

# Lista de Tabelas

---

1.1	Calendarização referente as etapas do trabalho. . . . .	3
5.1	Comprimentos da ligação de cada OCP. . . . .	36
5.2	Descrição da Rede. . . . .	37
5.3	Características da Rede. . . . .	43
5.4	Potência e Custo do PSO 1 em seis execuções. . . . .	44
5.5	SNIR em cada OCP para PSO 1 em seis execuções. . . . .	45
5.6	Potência e Custo do PSO 2 em seis execuções. . . . .	49
5.7	SNIR em cada OCP para PSO 2 em seis execuções. . . . .	51
5.8	Potência e Custo do PSO 3 em seis execuções. . . . .	52
5.9	SNIR em cada OCP para PSO 3 em seis execuções. . . . .	53
5.10	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 1 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	58
5.11	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do subenxame 1 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	59
5.12	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 2 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	60
5.13	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 2 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	61
5.14	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 3 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1. . . . .	62
5.15	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 3 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1 . . . . .	63
5.16	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 1 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2. . . . .	67
5.17	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 2 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2. . . . .	68
5.18	Potência e custo para cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub enxame 3 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2. . . . .	69

5.19	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub exame 1 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2 . . . . .	70
5.20	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub exame 2 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2 . . . . .	71
5.21	SNIR de cada $\vec{b}_p^{best}$ do sub exame 3 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2. . . . .	72
B.1	Valores máximos e mínimos. . . . .	96

---

# Glossário

---

Abreviatura	Descrição
1D	<i>Unidimensional</i>
1R	<i>Reamplificação</i>
2D	<i>Bidimensional</i>
2R	<i>Reformatação do impulso</i>
3R	<i>Retemporização do impulso</i>
4R	<i>Relação de comprimento de onda</i>
ASE	<i>Ruído de emissão espontânea do amplificador</i>
BER	<i>Taxa de erro por bit</i>
CD	<i>Dispersão cromática</i>
CDM	<i>Multiplexagem por divisão de código</i>
CDMA	<i>Acesso Múltiplos por divisão de código</i>
CIR	<i>Relação portadora interferência</i>
DFB	<i>Realimentação distribuída</i>
DSSS	<i>Espalhamento espectral por sequência direta</i>
DWDM	<i>Densa multiplexagem por divisão de comprimentos de onda</i>
EFDA	<i>Amplificadores de fibra dopados com Érbio</i>
FBG	<i>Rede de Bragg em fibra</i>
FHSS	<i>Espalhamento espectral por saltos em frequência</i>
FWM	<i>Mistura de quatro ondas</i>
GVD	<i>Velocidade de dispersão de grupo</i>
ISI	<i>Interferência entre símbolos</i>
LASER	<i>Dispositivo de amplificação de luz por emissão estimulada</i>
LED	<i>Diodos emissores de luz</i>
MAI	<i>Interferência por acesso múltiplo</i>
MUX	<i>Multiplexador</i>
OADM	<i>Multiplexador óptico de adição/remoção</i>
OCDM	<i>Multiplexagem por divisão de código óptico</i>
OCDMA	<i>Acesso Múltiplos por divisão de código óptico</i>
OCP	<i>Caminho de código óptico</i>

---

Abreviatura	Descrição
OCS	<i>Comutação de circuitos ópticos</i>
OXC	<i>Comutadores ópticos de cruzamento</i>
PMD	<i>Dispersão modal de polarização</i>
PN	<i>Pseudo aleatória</i>
PON	<i>Rede óptica passiva</i>
QoS	<i>Qualidade de serviço</i>
RFA	<i>Amplificador de fibra por espalhamento de Raman</i>
ROADM	<i>OADM reconfigurável</i>
SBS	<i>Espalhamento estimulado de Brillouin</i>
SDH	<i>Hierarquia digital síncrona</i>
SNIR	<i>Razão sinal ruído mais interferência</i>
SNR	<i>Razão sinal ruído</i>
SOA	<i>Amplificadores ópticos semicondutores</i>
SONET	<i>Rede óptica síncrona</i>
SRS	<i>Espalhamento estimulado de Raman</i>
TDMA	<i>Acesso múltiplo do divisão no tempo</i>
VOCP	<i>Caminhos ópticos virtuais baseados em códigos</i>
VWP	<i>Caminhos virtuais de comprimento de onda</i>
WDM	<i>Multiplexagem por divisão de comprimento de onda</i>
XPM	<i>Modulação de fase Cruzada</i>
ZCC	<i>Códigos de correlação cruzada zero</i>

---

# Variáveis e Símbolos

---

Abreviatura	Descrição
$\vec{p}$	<i>Vetor de potência</i>
$P_{min}$	<i>Potência mínima</i>
$P_{max}$	<i>Potência máxima</i>
$K$	<i>Número de utilizadores</i>
$\Gamma$	<i>CIR</i>
$G_{ii}$	<i>Atenuação no OCP <math>i</math></i>
$G_{ij}$	<i>Atenuação no OCP <math>ij</math></i>
$p_i$	<i>Potência do transmissor <math>i^{th}</math></i>
$p_j$	<i>Potência da interferência do transmissor <math>j^{th}</math></i>
$G_{amp}$	<i>Ganho do amplificador</i>
$N_{sp}^{eq}$	<i>Potência do ruído de emissão espontânea</i>
$q$	<i>Peso do código primo</i>
$\sigma^2$	<i>Variância média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica</i>
$\vec{H}$	<i>Matriz de interferência</i>
$\vec{u}$	<i>Vetor potência de ruído</i>
$P_{SBS}$	<i>Potência superior do limite de Brillouin</i>
$\gamma$	<i>SNIR</i>
$\delta$	<i>Excesso de perdas</i>
$\sigma_D$	<i>Variância de potência devido à combinação dos efeitos da GVD e da PMD de primeira ordem</i>
$\omega$	<i>Peso inercial</i>
$\mathcal{P}$	<i>Tamanho da população</i>
$\mathcal{P}$	<i>Número de gerações</i>
$\vec{b}_g^{best}$	<i>Melhor solução global</i>
$\vec{b}_p^{best}$	<i>Melhor solução da partícula</i>
$V_{max}$	<i>Velocidade máxima</i>
$C_1$	<i>Coefficiente de atualização de velocidade</i>
$C_2$	<i>Coefficiente de atualização de velocidade</i>



# Capítulo 1

---

## Introdução

---

A comunicação por redes de fibra óptica é uma tecnologia eletricamente passiva e imune à interferência eletromagnética, possui uma elevada largura de banda que possibilita aumentar a capacidade de transmissão, além disso, as redes de fibra óptica apresentam alta escalabilidade com baixo custo, e.g., a utilização de multiplexagem por divisão dos comprimentos de onda (WDM) e processamento digital de sinais. Entre outras vantagens, as redes de fibra óptica são preferencialmente utilizadas para a transmissão de informações em locais onde a interferência eletromagnética é um fator de ruído, e.g., indústrias e empresas produtoras e distribuidoras de energia elétrica. A crescente demanda por maiores taxas de transmissão e largura de banda exigem que as redes sejam capazes de suprir necessidades dos utilizadores e também garantir a qualidade de serviço (QoS).

Redes ópticas de acesso múltiplo por divisão de código (OCDMA) são capazes de oferecer menores requisitos de tempo e frequência em comparação com outras técnicas de transmissão em fibra óptica, a implementação de redes OCDMA através dispositivos passivos oferece maior transparência e flexibilidade de configuração do encaminhamento evitando a utilização de conversões eletroópticas e optoeletrônicas.

Os algoritmos de otimização por enxame de partículas PSO são algoritmos de otimização conhecidos por oferecerem boas soluções em relação à sua complexidade de implementação, e à sua vasta utilização em diversos problemas de otimização principalmente na engenharia.

### 1.1 Contextualização

O presente trabalho determina e investiga a influência dos parâmetros do algoritmo PSO para o problema de alocação de potência em redes ópticas, bem como

apresenta adaptações através de condições iniciais e de contorno para parâmetros do PSO clássico de forma a garantir soluções válidas ao sobrepor as restrições de razão sinal ruído mais interferência impostas pela utilização de códigos primos. Posteriormente, o presente trabalho oferece novas abordagens do PSO para o problema de otimização na alocação de potência em redes OCDMA considerando a capacidade e viabilidade de implementação da rede.

Quanto à simulação, será utilizado o ambiente de MATLAB; todos os algoritmos desenvolvidos estão comentados ao longo dos Anexos.

## 1.2 Problema

A problemática do controlo de potência para redes OCDMA apresentado matricialmente não oferece a solução otimizada e a solução apresentada matricialmente também não considera o limite superior de SNIR alcançável com códigos primos. Tendo em vista esse problemas, a otimização apresenta-se como uma potencial solução para esses problemas, e além da otimização de potência também oferece maior eficiência energética.

## 1.3 Motivação

Expandir os conhecimentos do tema da utilização de algoritmos de controlo distribuído de potência em redes ópticas através de algoritmos PSO e avaliar o desempenho de novas abordagens de algoritmos PSO.

## 1.4 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é apresentar resultados referentes a uma nova abordagem para o PSO clássico na problemática de alocação de potência em redes.

Na intenção da abordagem do tema proposto, procurar conhecer sobre a problemática, compreender o problema e então o desenvolvimento do algoritmo. Para efetuar a implementação foi realizado o estudo sobre os algoritmos de otimização, algoritmos genéticos e algoritmos de otimização por enxame de partículas.

A intenção da abordagem do tema proposto, procura perceber as influências da determinação de parâmetros do PSO clássico e desenvolver um algoritmo menos suscetível a influência da determinação dos parâmetros, e então comparar os resultados obtidos com o PSO clássico e a nova abordagem apresentada neste trabalho.

## 1.5 Planeamento do Projecto

O desenvolvimento da investigação sobre o tema foi feito da maneira apresentada na tabela 1.1, que exhibe os focos principais deste trabalho e as etapas para elaboração do trabalho.

Tabela 1.1: Calendarização referente as etapas do trabalho.

Etapas	Mês					
	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.
1.Elaboração da proposta de trabalho	X					
2. Levantamento bibliográfico sobre redes ópticas e algoritmos genéticos	X	X				
3. Estudo da alocação de potência em redes OCDMA por algoritmos PSO		X	X			
Desenvolvimento e implementação			X	X		
Resultados e conclusões				X	X	
Ajustes finais na redação e correção para posterior apresentação					X	X

## 1.6 Estrutura do Relatório

Neste primeiro capítulo abordou-se a introdução ao trabalho, sua contextualização, problema, motivação, objetivos e planeamento do projeto a serem cumpridos.

O segundo capítulo é uma breve apresentação dos conceitos das redes ópticas, suas características, dispositivos, e tecnologias.

O terceiro capítulo faz a descrição matemática das redes OCDMA e aborda o problema de alocação de potência.

O quarto capítulo faz uma breve abordagem sobre os algoritmos PSO e também apresenta a uma nova abordagem de PSO baseada em sub enxames para o problema de alocação de potência em redes OCDMA.

O quinto capítulo demonstra os resultados obtidos e promove a discussão dos resultados.

No sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, e também a perspectiva de trabalhos futuros.



## Capítulo 2

---

# Redes Ópticas WDM/OCDM

---

*Este capítulo tem como objetivo fazer uma breve descrição sobre redes ópticas híbridas WDM/OCDM que são o tema de estudo deste trabalho, neste capítulo são apresentadas características, dispositivos da rede WDM e também uma breve introdução histórica.*

As redes de fibra óptica são comercialmente desde a década de 80 para transmissão de áudio, vídeo e dados. As primeiras redes de fibra óptica foram implementadas em redes públicas de telefone e utilizavam padrões proprietários que tornavam trabalhosa e com custos elevados a interligação entre diferentes operadoras. Na primeira geração de redes de fibra óptica estão a *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH) e *Synchronous Optical Network* (SONET) baseadas em abordagens de ligação ponto-a-ponto que traziam benefícios como a interconexão de tecnologias e fabricantes diferentes. Nestas redes a amplificação, repetição, comutação e encaminhamento era feito no domínio elétrico. A segunda geração de redes de fibra óptica é caracterizada pelo encaminhamento através de comprimentos de onda, já a terceira geração concentra esforços na comutação óptica rápida, comutação óptica de circuitos rápida e dinâmica, comutação óptica de pacotes e também na comutação óptica híbrida [1].

Entre outras vantagens, as fibras ópticas apresentam elevada capacidade de transmissão, baixa taxa de erros, imunidade a interferências eletromagnéticas, elevada largura de banda, peso e volume reduzidos, e baixo custo. Nos últimos anos têm-se intensificado os esforços na investigação com o objetivo de aproveitar ao máximo a capacidade de transmissão das fibras.

A multiplexagem por divisão em comprimentos de onda (WDM) é uma técnica de multiplexagem que consiste na transmissão paralela de vários canais em comprimentos de onda na mesma fibra, e mostrou-se uma maneira eficiente para

o aproveitamento da enorme largura de banda das fibras ópticas. As primeiras investigações ainda na década de 1980 já mostravam que WDM de dois canais era muito mais atrativa para um sistema simples, aproveitando-se uma taxa de transmissão de 565 Mbit/s para uma instalação de uma ligação de 140 Mbit/s, e desta forma aumentar a capacidade de transmissão da rede [4].

Na época dos anos 90, as investigações voltadas para o telefone móvel concentravam esforços no acesso múltiplo por divisão de código (CDMA), e também na multiplexagem por divisão de código (CDM). Posteriormente, CDM e CDMA passaram a ser aplicados em redes ópticas, e assim a dar início ao CDM óptico (OCDM) e também ao CDMA óptico (OCDMA).

O OCDM é uma técnica digital de multiplexagem que utiliza uma sequência pseudoaleatória, i.e. um código, para codificar um sinal antes de o transmitir e, depois da transmissão, o sinal no recetor é decodificado utilizando a mesma sequência pseudoaleatória, e a autocorrelação. O CDMA é a técnica que permite o acesso múltiplo através da divisão de código, baseado no mesmo princípio do CDMA.

OCDM é baseado na comutação de circuitos (OCS), OCS é utilizado em redes de ligação orientada ("*connection-oriented*") e a sua principal desvantagem é não ser viável em relação à sua eficiência quando há grandes oscilações no tráfego [5]. Dessa forma, soluções em redes baseadas em OCS evoluíram de serviços de longas distâncias, e.g. SDH/SONET, para redes residenciais e empresariais. O desenvolvimento deste trabalho aborda redes de pequena dimensão, e em que as taxas de transmissão são constantes.

A técnica de combinar dois ou mais tipos de multiplexagem é conhecida como multiplexagem híbrida. A multiplexagem híbrida pode oferecer vantagens, e.g. sobrepor limitações de determinada técnica. A utilização de abordagens utilizando WDM e OCDM diminui os requisitos de gerenciamento de tempo e frequência quando se distribui código óptico pelos nós [6] [7] [8].

Neste trabalho as redes híbridas WDM/OCDM são utilizadas na rede de transporte e o OCDMA na rede de acesso. O objetivo deste trabalho incide na alocação de recursos da camada de enlace. WDM tem como característica o aproveitamento eficiente da largura de banda com o aumento de taxas de transmissão através da combinação de vários sinais em diferentes comprimentos de onda para transmitir na mesma fibra. A combinação de sinais é realizada por um multiplexador óptico e transportados através de uma única fibra como ilustra a Figura 2.1. As primeiras redes WDM comerciais surgiram na década de 90 em abordagens ponto-a-ponto com o objetivo de aproveitar a largura de banda e também como alternativa para a instalação de novos cabos de fibra óptica, essas redes suportavam poucos canais com separação entre 3 e 5 nm. O desenvolvimento ao longo do tempo de dispositivos mais seletivos em comprimento de onda, e.g.

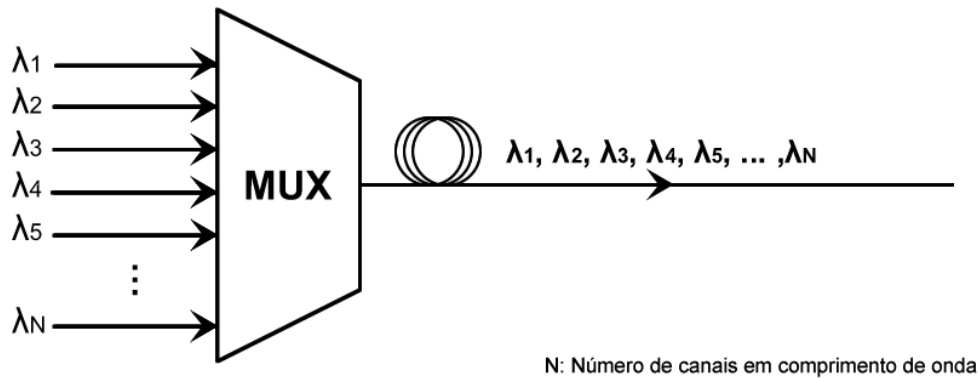


Figura 2.1: Princípio do WDM [1].

fontes ópticas que apresentavam melhores resolução espectral e detetores com elevada sensibilidade, possibilitaram diminuir a separação entre comprimentos de onda, e assim o aparecimento de sistemas WDM comerciais com maior número de canais. Paralelamente a este desenvolvimento, outras abordagens também se desenvolveram, e.g., transporte multiponto com canais fixos e encaminhamento óptico WDM.

Atualmente a tecnologia WDM é largamente utilizada em redes de transporte pois tem como característica oferecer transparência e flexibilidade de configuração de encaminhamento, pois os caminhos virtuais são configurados no meio físico, i.e., em comutadores ópticos. Entretanto, a separação entre canais de comprimento de onda é dependente da estabilidade de fontes ópticas e de pouca inserção de ruído, e dessa forma, torna-se importante a tarefa de controlar e alocar recursos em redes WDM [2][9].

Para que seja possível a comunicação em uma rede WDM são necessários inúmeros dispositivos e.g. fontes de luz, detetores de luz, acopladores ópticos, divisores ópticos, comutadores ópticos e outros inúmeros dispositivos e acessórios. Além disso, são necessários estágios intermediários que realizam o processamento dos dados para o controle de operação [10].

## 2.1 Caracterização de um sistema óptico WDM

A arquitetura da rede WDM apresenta nós com transmissores e recetores. As fontes ópticas são responsáveis pela transmissão, e entre as fontes ópticas destacam-se os diodos emissores de luz (LED) e os dispositivos de amplificação de luz por emissão estimulada (LASER). Os LASER's são as fontes ópticas preferenciais para as redes WDM por serem fontes coerentes, por terem uma largura espectral

muito pequena, e por poderem emitir com potências mais elevadas do que os LED [11][1].

Na rede WDM cada LASER transmissor opera em um comprimento de onda, e cada recetor deve ser capaz de encaminhar o sinal gerado em um nó de acesso para qualquer nó dentro da rede. Por motivos diversos, e.g. limitações de dispositivos e número de comprimentos de onda, é por vezes necessário a reutilização de comprimentos de onda através da utilização de dispositivos ópticos capazes de adicionar ou remover comprimentos de onda; esses dispositivos são conhecidos como multiplexador óptico de adição/remoção (OADM). Inicialmente, os dispositivos OADM eram estáticos, posteriormente a combinação de OADM e comutação óptica possibilitou o OADM reconfiguráveis (ROADM), que são dispositivos passivos baseados em rede de Bragg em fibra (FBG)[1][12]. Na procura pela flexibilização e conectividade da rede também surgiram os comutadores ópticos de cruzamento (OXC's), dispositivos capazes de promover a escolha da conexão entre sinais de entrada e sinais de saída.

Os transmissores da rede são geralmente LASER de realimentação distribuída (DFB) com modulação externa ou interna, onde os sinais são combinados na mesma fibra através de um multiplexador óptico. Devido a atenuações, perdas por inserção e outras perdas, ou outros motivos e.g., impactos devido à distribuição geográfica da rede, o sinal pode ser amplificado por amplificadores ópticos [13].

Existem ainda problemas de dispersão na transmissão do feixe de luz ao longo de uma fibra óptica, a qual causa a distorção do sinal ao longo da transmissão. A dispersão na transmissão digital consiste no alargamento do impulso gerando a sobreposição de impulsos vizinhos, esse fenômeno é conhecido como interferência entre símbolos (ISI), a ISI aumenta a taxa de erros e pode até mesmo tornar o sinal indistinguível para o recetor. A dispersão penaliza os sistemas ao limitar a taxas de transmissão, desta forma é importante o planeamento para a compensação de dispersão [1][14]. A Figura 2.2 ilustra o efeito da dispersão.

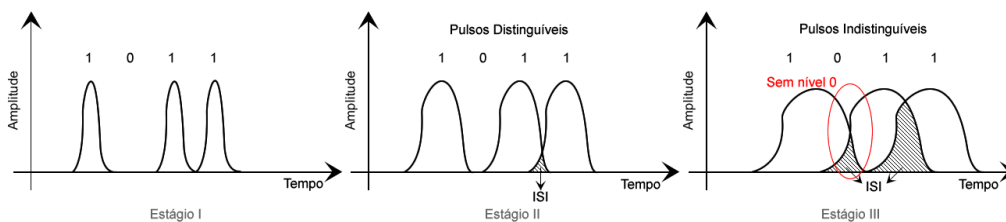


Figura 2.2: Dispersão na Transmissão Digital [1].

Simulações de redes ópticas passivas (PON) compararam métodos diferentes de compensação da dispersão cromática (CD) em redes densa WDM (DWDM) e

concluíram que é possível obter melhores resultados com a utilização de FBG em configurações de pré-compensação[15].

Os amplificadores ópticos são dispositivos que operam no domínio óptico, sem qualquer conversão electroóptica. Entre os amplificadores ópticos destacam-se os amplificadores de fibra dopada com érbio (EFDA). Os recetores são detetores ópticos, dispositivos responsáveis pela conversão do sinal óptico em sinal eléctrico e também é responsável pela amplificação do sinal eléctrico para processamentos posteriores. Na Figura 2.3 é ilustrada uma rede óptica com WDM *duplex*.

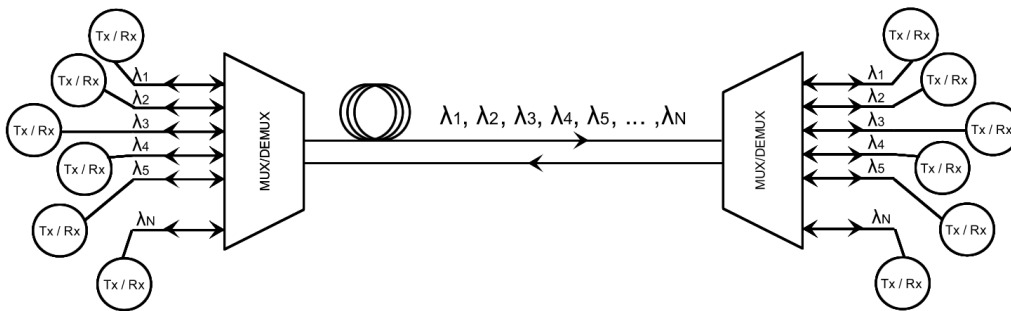


Figura 2.3: WDM *Duplex* [1].

### 2.1.1 Transmissores

Os transmissores são responsáveis pela conversão do sinal eléctrico em sinal óptico para ser transmitido na fibra óptica. Em sistemas WDM as fontes ópticas mais utilizadas são os LASER pelos motivos indicados anteriormente.

Existe uma variedade de LASER diferentes com características que os tornam importantes em diversas aplicações desde a biomédica, astronomia e telecomunicações. Os lasers DFB com sintonização fixa são muito utilizados em redes ópticas, embora LASER sintonizáveis sejam preferíveis em aplicações WDM, laboratórios WDM e ambientes de testes de modo a reduzir o número de fontes de luz necessárias.

A potência injetada pelo laser na fibra é um fator relevante para o planeamento da rede pois permite avaliar a necessidade da utilização de amplificadores, e caso seja necessário a sua utilização, planejar onde os amplificadores devem ser instalados. A Figura 2.4 ilustra os componentes genéricos de um transmissor.

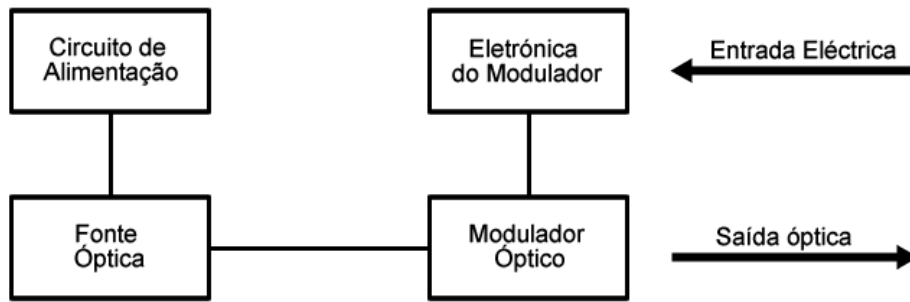


Figura 2.4: Componentes do Transmissor [2].

### 2.1.2 Recetores

Os detetores ópticos são dispositivos fundamentais para a comunicação através de fibra óptica. Estes dispositivos são responsáveis pela conversão do sinal óptico em sinal elétrico e pela amplificação do sinal elétrico para processamentos posteriores. O detetor deve apresentar como características uma alta sensibilidade aos comprimentos de onda da transmissão, alta fidelidade, grande resposta elétrica ao sinal recebido, pequenos tempos de resposta, introduzir o mínimo ruído, apresentar estabilidade e durabilidade[1].

O planeamento eficiente da conversão optoeletrônica está dependente da modulação utilizada. Um dos principais parâmetros do detetor é a sua sensibilidade, e esta pode ser definida como a potência óptica mínima necessária para ser detetada pelo fotodetetor, sendo um parâmetro determinante para o sistema e pode também ser definida como a menor taxa de erro por bit (BER) necessária para o sinal ser corretamente detetado [2].

A precisão do detetor é dependente da razão sinal ruído que chega ao fotodetetor. O ruído penaliza o sistema, e.g., a dispersão, onde o alargamento do impulso leva a deteção incorreta e aumenta o número de erros. Devido às características dos sistemas OCDMA a taxa de BER é dependente do número de utilizadores ativos [3].

Entre os fotodetetores utilizados em redes ópticas destacam-se os fototransistores e fotodiodos, e em especial os fotodiodos com/sem efeito de avalanche pois apresentam bom desempenho considerando o seu menor custo. Os fotodiodos de silício da primeira geração apresentam alta sensibilidade em comprimentos de onda entre os 800 e 900 nm, condutância de junção desprezável e longo prazo de estabilidade [16]. Já a segunda geração oferecia boa sensibilidade nos comprimentos de onda entre 1100 e 1600 nm. Outro tipo de fotodetetor de destaque são os fotodiodos de heterojunção e detetor fotocondutivo, ambos feitos de matérias

semicondutores. Atualmente, os detetores mais utilizados são fotodiodos do tipo pin e fotodiodos de efeito de avalanche.

Os fotodiodos pin são conhecidos por fotodiodos sem ganho interno pois apresentam um único par eletrão-lacuna por fóton, e basicamente a sua sensibilidade depende de uma corrente aleatória e flutuações de tensão nos terminais de saída para detectar a presença ou não de luz. Devido a isso, e também a outros efeitos cumulativos de características próprias dos fotodiodos e.g., corrente de escuridão, os fotodiodos devem ser encarados também como fontes de ruído [1].

Em todo o processo de fotodeteção existe adição de ruídos e a origem dos ruídos é variada. Diversos ruídos são adicionados na transmissão e amplificação, e.g., ruídos de amplificação, dispersão cromática e ruídos de partição modal. Portanto, pode-se dizer que a sensibilidade deve ser determinada tendo em conta todas as formas de ruído que degeneram a razão sinal ruído (SNR) [2].

A Figura 2.5 ilustra os componentes de um recetor genérico.

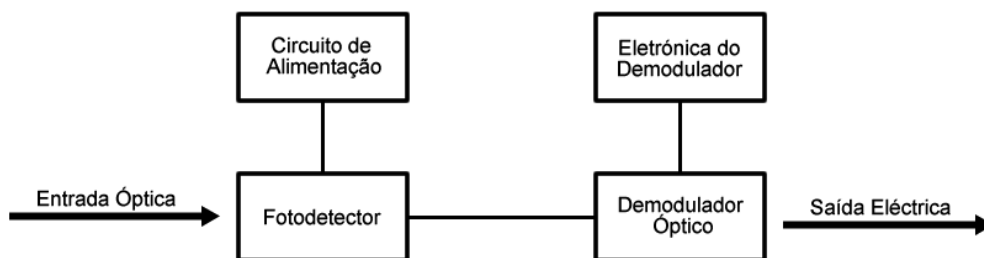


Figura 2.5: Componentes do Componentes do Fotodetector [2].

### 2.1.3 Multiplexadores

O multiplexador também conhecido como MUX é o dispositivo responsável por misturar os  $\lambda_N$  sinais de comprimentos de onda provenientes de  $N$  diferentes fibras numa mesma fibra. Em WDM a separação e extração dos sinais multiplexados (i.e., comprimentos de onda) é feita com a utilização de filtros ópticos, e.g., filtros de interferência, filtros de redes de difração ou filtros prismáticos. [1]

A necessidade de multiplexação deve-se a ser mais económico transmitir dados em elevadas taxas de transmissão através de uma única fibra do que transmitir em baixas taxas de transmissão em múltiplas fibras [17].

O demultiplexador também conhecido por DEMUX faz o processo inverso do multiplexador, sendo responsável por separar os  $\lambda_N$  sinais multiplexados de uma mesma fibra em  $N$  sinais para  $N$  fibras diferentes.

### 2.1.4 Amplificadores Ópticos

As conversões eletroópticas e optoeletrônicas, são fundamentais na transmissão em redes ópticas, contudo essas conversões podem representar um problema, e.g., limitações com a largura de banda da fibra e qualidade do sinal, e dessa forma a diminuir o desempenho do sistema. Os amplificadores ópticos, como o nome indica, trabalham apenas no domínio óptico sem a necessidade de conversões optoeletrônicas ou eletroópticas e desta forma resolvem o problema mencionado anteriormente.

Os amplificadores ópticos são posicionados ao longo da fibra para promover a amplificação linear do sinal e, conforme o sítio em que está localizado, desempenha a amplificação com funções diferentes. Os amplificadores de potência são posicionados na saída do transmissor, os amplificadores de linha estão distribuídos ao longo da fibra e servem para compensar as perdas de transmissão, já os pré-amplificadores estão posicionados na entrada do receptor e têm como finalidade aumentar a potência do sinal de maneira a melhorar a sensibilidade do receptor [2]. A Figura 2.6 ilustra os diferentes tipos de amplificador e a sua localização.

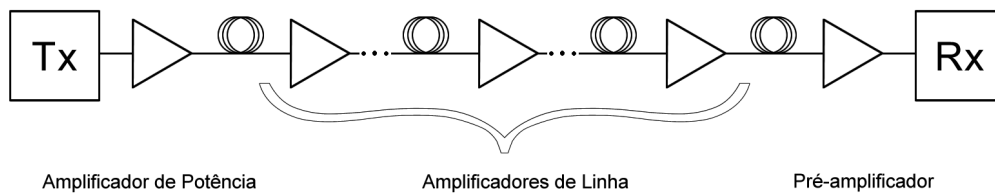


Figura 2.6: Tipos de Amplificadores [2].

Existem atualmente duas abordagens dominantes em relação à investigação sobre os amplificadores ópticos. Essas abordagens são: os amplificadores ópticos semicondutores (SOA) que utilizam a emissão estimulada através da injeção de portadoras; e amplificadores ópticos em que o ganho provém da emissão estimulada. A emissão estimulada pode ser obtida através de efeitos não lineares, e.g., espalhamento de *Brillouin* e *Raman*, ou pode ser obtida através da dopagem com elementos raros, e.g., érbio [1]. Esses amplificadores propõem ganhos em bandas diferentes de comprimentos de onda, dessa forma, a amplificação é dependente do comprimento de onda do sinal e não depende da taxa de transmissão de dados. A Figura 2.7 ilustra os ganhos de diferentes amplificadores ao longo dos comprimentos de onda [1].

Em sistemas WDM os amplificadores mais utilizados são os SOA e os EFAs devido à sua largura de banda espectral [10]. Algumas publicações também propõem amplificadores híbridos que combinam amplificadores EDFA e amplificadores de fibra por espalhamento de Raman (RFA) em sistemas WDM, essa com-

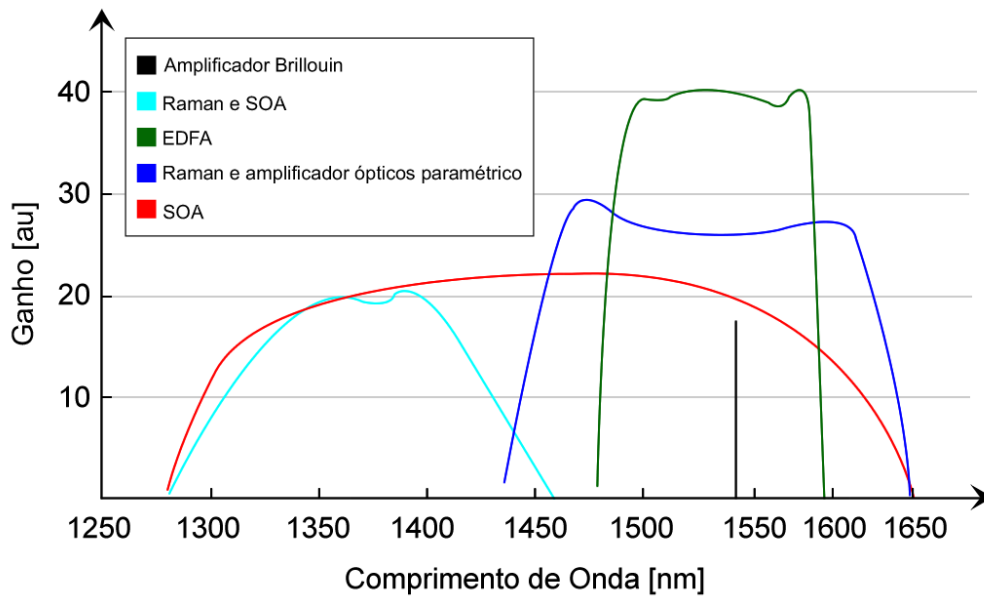


Figura 2.7: Amplificadores: Ganho  $\times$  Comprimento de onda [1].

binhação propõe melhorias como possibilitar o ganho em qualquer comprimento de onda [18]. Outra proposta de amplificadores híbridos a combinar SOA e RFA demonstrou ser capaz de transmitir a 170 km de distância em situações dinâmicas de disponibilidade de recursos com a utilização de um ganho variável por parte do amplificador [19].

Além dos amplificadores ópticos existem os repetidores ópticos que são dispositivos ativos, i.e., fazem a conversão optoeletrônica e eletroóptica do sinal. A amplificação obtida por repetidores ópticos pode conter até 4 estágios conhecidos como 4R, e são eles reamplificação (1R), reformatação do impulso (2R), retemporização do impulso (3R) e realocação de comprimentos de onda (4R) [1]. A Figura 2.8 ilustra os estágios de regeneração do sinal.

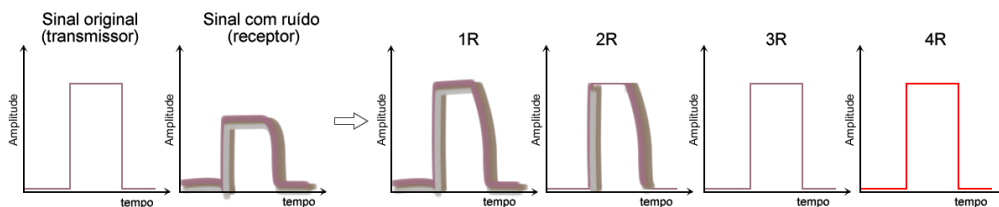


Figura 2.8: Estágios da regeneração do sinal [1].

Após um determinado número de ampliações, devido ao efeito cumulativo de ruídos e distorção, o sinal torna-se corrompido sendo necessário os estágios 2R e 3R para diminuir o número de erros. O estágio 4R é uma melhoria em redes WDM e é capaz de aumentar a conectividade da rede pois possibilita o reaproveitamento de comprimentos de onda evitando conflitos quando o mesmo nó recebe sinais de transmissores distintos que utilizam o mesmo comprimento de onda [1][20].

### 2.1.5 Limitações da Tecnologia WDM

O sistema WDM oferece outras vantagens além da elevada largura de banda. Num sistema WDM a principal limitação é o *crosstalk*, i.e., a interferência entre canais, pois praticamente todos os componentes introduzem *crosstalk* de alguma maneira, inclusive a fibra óptica devido às suas não linearidades.

Outra limitação é o número de comprimentos de onda definidos por características próprias dos componentes devido à busca crescente por aumentar a largura de banda e a esta limitação surgiram abordagens com redes ópticas WDM/OCDMA para a rede de transporte.

## 2.2 A tecnologia OCDM

O CDMA é baseado em conceitos de espectro espalhado de partilha da largura de banda, e embora possa soar contra intuitivo, a partilha de forma aleatória da largura de banda é tão eficiente quanto as técnicas em que cada utilizador tem frequências ou intervalos de tempo específicos, e apresenta mesmo menores requisitos de temporização e gestão da frequência [21].

Começamos por abordar alguns conceitos básicos sobre a modulação CDMA: de forma genérica, existe o sinal de dados (*data signal*) com um intervalo de bit  $T_b$  muito maior que o intervalo de bit do sinal de codificação  $T_c$  (*code signal* ou *chirp signal*) e para dar origem ao sinal a ser transmitido é realizada a operação de 'ou exclusivo' (XOR) entre os sinais. A razão  $T_b/T_c$  é conhecida como fator de espalhamento e determina o número máximo de utilizadores ativos simultaneamente. Posteriormente o sinal é recuperado no recetor através da correlação. Para cada sinal de dados deve existir apenas um sinal de código.

É desejável que todos os códigos sejam ortogonais entre si, i.e., não interferentes. Existem diversas maneiras de construir códigos ortogonais, porém é matematicamente impossível a construção de um número muito grande de códigos aleatórios e todos serem ortogonais entre si. Dessa forma são gerados códigos de forma determinística conhecidos como pseudo-aleatórios ou também chamados como pseudo-ruído (PN), essas sequências PN são estatisticamente não correlacionadas e a soma de um grande número de sequências é visto como ruído gaussiano

por parte do recetor, sendo esse fenômeno conhecido como interferência por acesso múltiplo (MAI) [21].

O OCDMA é a aplicação do CDMA em redes ópticas e as primeiras investigações sobre OCDMA surgiram na década de 90 e foram se desenvolvendo ao longo do tempo, sendo em algumas referências o CDM chamado de CDMA síncrono. Aplicação do OCDMA alivia requisitos em temporização em relação ao Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA) que necessita de uma sincronização de precisão muito alta. OCDMA também alivia os requisitos em relação à frequência pois dispensa bandas de guarda entre frequências adjacentes requeridas em Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências. No OCDMA é necessário apenas um controlo de potência, a qual está ao nível da camada física, e dessa forma a torna a sua implementação mais simples [21][22].

Alguns investigadores demonstraram que a utilização de OCDMA combinada com técnicas de multiplexagem de saltos múltiplos (*multihop*) em nível óptico é uma alternativa à expansão das redes WDM já existentes e sem comprometimento de recursos, i.e., a implementação de redes WDM/OCDMA [23]. Novas investigações em OCDMA também propõem abordagens com deteção incoerente e uma arquitetura com dois códigos ópticos diferentes com correlação cruzada zero (ZCC) entre si que apresentam um potencial para transmissão 123% maior que as técnicas de deteção coerente tradicionais [24].

## 2.3 Rede híbrida WDM/OCDM

A utilização de redes WDM/OCDMA apresenta muitos atrativos pois, com a utilização de ambas as técnicas os canais passam a apresentar duas dimensões: código e comprimento de onda. Dessa forma é possível aumentar o número de canais, e além disso a implementação pode reduzir o número de comprimentos de onda WDM utilizados e contornar as limitações da rede WDM que apresenta um número de canais em comprimento limitado devido à curva de atenuação da fibra em relação aos comprimentos de onda. Esse alívio também pode reduzir o *crosstalk* introduzido pelos dispositivos da rede. Além desses atrativos a abordagem de rede WDM/OCDM também apresenta escalabilidade, i.e., a capacidade do sistema de acomodar um grande número de nós e utilizadores finais sem prejudicar o seu rendimento. As características mencionadas permitem um alto nível de conectividade [25]. A implementação de redes WDM/OCDM surge como uma alternativa viável para a expansão da rede WDM

A camada de transporte da rede WDM/OCDM é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em códigos (VOCP) e caminhos virtuais de comprimento de onda (VWP). Caminho virtual é a ligação estabelecida entre o transmissor até o recetor [23].

Na rede WDM/OCDM a primeira camada é a de comprimentos de onda e a segunda camada é de códigos ópticos, i.e., os códigos ópticos estão combinados dentro do mesmo comprimento de onda.

A rede óptica WDM/OCDM considerada para esta tese de mestrado consiste em nós formados por núcleos ópticos de encaminhamento interconectados através de caminho de código óptico (OCP) definidos pelo sinal de código e comprimento de onda específico, as ligações são compostos por uma ligação e em cada ligação há um amplificador óptico. Os sinais são acoplados por meio de um acoplador em estrela responsável por distribuir o sinal óptico de uma fibra de entrada para múltiplas fibras de saída. A Figura 2.9 ilustra a arquitetura de um acoplador em estrela.

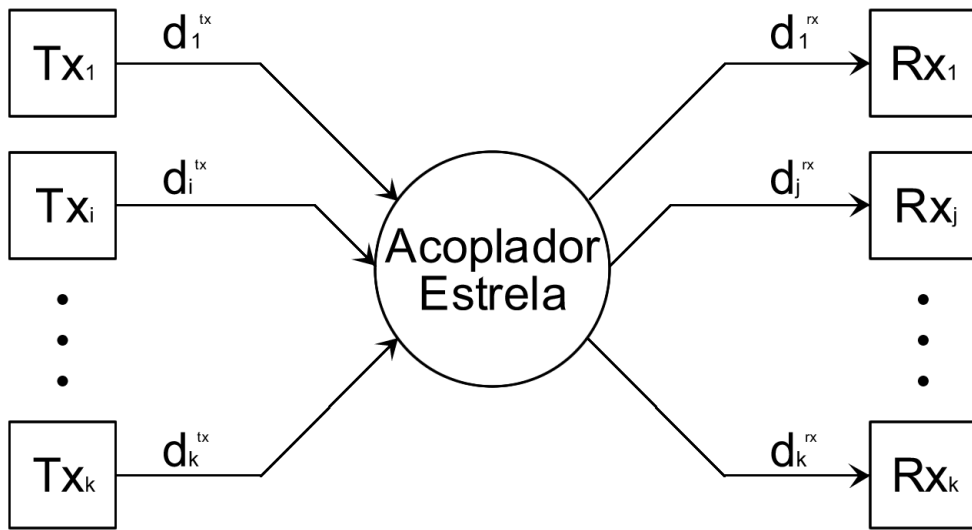


Figura 2.9: Acoplador Estrela [2].

O OCP entre os transmissores e recetores é criado a partir do comprimento da ligação entre ambos e dado pela expressão:

$$d_{ij} = \sum_i d_i^{tx} + \sum_j d_j^{rx} \quad (2.1)$$

Onde  $d_i^{tx}$  é o comprimento da ligação entre o nó transmissor até o acoplador óptico,  $d_j^{rx}$  é o comprimento entre o acoplador até o nó do recetor. A potência  $P_r$  recebida pelo  $j^{th}$  nó é dada por:

$$P_r = \alpha_{star} * P_i * G_{amp} * e^{-\alpha_f d_{ij}} \quad (2.2)$$

Em que  $\alpha_{star}$  é a atenuação do acoplador em estrela,  $P_i$  é a potência emitida pelo nó transmissor  $i^{th}$ ,  $G_{amp}$  é o ganho proveniente do amplificador,  $\alpha_f$  é a

atenuação da fibra em dB/km e  $d_{ij}$  é o comprimento total da ligação em km [26]. E  $\alpha_{star}$  é definido como:

$$\alpha_{star}^{dB} = 10[\log_{10}(K) - \log_2(K) * \log_{10}(\delta)] \quad (2.3)$$

Com  $\delta$  como perda por excesso e  $K$  é o número de utilizadores ativos [26]. O termo  $10 \log_{10}(K)$  é também conhecido como *Splitting loss* [1].



## Capítulo 3

---

# Alocação de Recursos em Redes Ópticas

---

*Neste capítulo será abordado o problema da alocação de potência em redes ópticas OCDMA através da descrição matemática.*

Alguns investigadores propuseram e avaliaram a escalabilidade e desempenho em diferentes arquiteturas de redes OCDMA e mostraram que as redes OCDMA possuem boa escalabilidade e dessa forma é uma técnica que apresenta potencial para a expansão e o aumento do número de utilizadores [9][27]. A utilização de outras técnicas através do processamento digital de sinais também mostrou ser capaz de aumentar o número de utilizadores com a utilização de filtros digitais e uma opção de escalabilidade de baixo custo [28]. Dessa forma, o planeamento da rede e alocação dos recursos em redes ópticas é uma tarefa importante e torna-se trabalhosa com a expansão da rede com uma grande quantidade de OCP's.

A alocação de recursos é decisiva para se obter o maior aproveitamento da largura de banda disponível e também minimizar efeitos não lineares que aparecem nas fibras quando a transmissão é a potências mais elevadas, e.g. espalhamento estimulado de *Brillouin* (SBS) e espalhamento estimulado de *Raman* (SRS). Além disso, foi demonstrado que sistemas OCDMA não coerentes e intensamente modulados apresentam falhas de segurança em que o código pode ser quebrado por uma simples deteção de potência [27][29].

Neste trabalho será analisada a modulação conhecida como espalhamento espectral por sequência direta (DSSS), embora existam outras formas de espalhamento espectral, e.g., espalhamento espectral por saltos em frequência (FHSS). Para realizar a transmissão OCDMA são necessários codificadores e decodificadores localizados nos transmissores e recetores respectivamente. O sinal pretendido

é selecionado através da sequência de pulsos ou da forma temporal do sinal. O codificador é o componente responsável pelo espalhamento do sinal enquanto o decodificador utiliza o mesmo código e comprime o espectro do sinal gerado pelo codificador para recuperar o sinal de dados através da correlação. Em sistemas OCDMA a principal fonte de ruído é a MAI, uma das principais maneiras de reduzir a MAI é o dimensionamento de códigos ortogonais.

Em OCDMA existem sistemas não coerentes unipolares baseados apenas na modulação da intensidade de potência óptica; também existem sistemas de códigos bipolares coerentes baseados na amplitude e modulação de fase. Embora os sistemas bipolares apresentem um desempenho maior ao comparar a razão sinal-ruído e interferência (SNIR) as suas aplicações ainda se restringem às investigações e experiências laboratoriais devido à complexidade da implementação e modulação de fase do sinal óptico [30][31].

Na rede estudada neste trabalho todos os utilizadores são ligados através de um acoplador em estrela numa área central e cada utilizador tem dois cabos de fibras, um para transmissão e outro para receção. As distâncias de cada nó até o acoplador são diferentes, os efeitos de dispersão são desprezados, também são desprezados os efeitos não lineares devido à limitação de potência que pode garantir a minimização de efeitos não lineares, o tráfego na rede é considerado constante e sem flutuações.

Devido à capacidade de implementação foi adotado no estudo deste trabalho um código do tipo não coerente. Os códigos não coerentes podem ser classificados em unidimensionais (1D) ou bidimensionais (2D). Enquanto nos códigos 1D os bits são subdivididos no tempo em muitos chirps curtos com padrão de chirp designado, nos códigos 2D os bits são subdivididos em chirps individuais e a cada chirp é atribuído um comprimento de onda independente de um conjunto discreto de comprimentos de onda. Os códigos 2D possuem um desempenho melhor que os códigos 1D e o seu desempenho foi avaliado em simulações levando em consideração codificação, topologia e limitações físicas [32].

O código 1D adotado no estudo deste trabalho é conhecido como código primo. Os códigos primos apresentam uma figura de mérito conhecido como peso  $q$ , onde  $q$  é um número primo (os valores geralmente utilizados são 7, 13, 17, 23 e 31); o código compreende  $q$  blocos de comprimento  $q$ , dessa forma geram um código de comprimento  $N_T = q^2$ . Em relação aos códigos ortogonais, os códigos primos apresentam alta correlação e suportam um número maior de utilizadores [3]. Entre os atrativos dos códigos primos destacam-se a capacidade de ser implementados de forma simples através de componentes passivos, métodos com baixa complexidade de deteção de múltiplos utilizadores, e melhor eficiência espectral e desempenho em relação às taxas de transmissão dos códigos primos comparados com outros códigos não coerentes [26][33]. Um esquema de cancelamento da

interferência que reduz os efeitos da MAI e aumenta a capacidade do sistema é proposto em [34].

A alocação de recursos em redes OCDMA e o controle de potência com a utilização de algoritmos de balanceamento distribuídos é apresentado em [3]. Outra investigação propôs um algoritmo inspirado no modelo de Verhulst como algoritmo distribuído de controle de potência em [11]. Em outras investigações também foi proposto a utilização de algoritmos de otimização por enxame de partículas, como apresentado em [2].

Os algoritmos de múltiplos enxames são algoritmos de otimização baseados em algoritmos de otimização por enxame de partículas (PSO) que foram inspirados no comportamento de enxames de animais, e.g., pássaros e abelhas. Os enxames são sistemas compostos por agentes, em que os agentes têm pouca ou nenhuma inteligência e também capacidades individuais limitadas, entretanto os agentes são capazes de interagir entre si, e também interagir com o meio ambiente, dessa forma produzindo uma inteligência coletiva. Essas estratégias de otimização são conhecidas como inteligência dos enxames.

O sucesso de um algoritmo PSO geralmente é conseguido a partir do compartilhamento de informações ou do intercâmbio entre indivíduos. Pesquisas sobre o comportamento do algoritmo PSO canônico (ou clássico) mostraram que o algoritmo penaliza-se com a convergência prematura, desta forma, a fim de se evitar a convergência prematura, é proposto o algoritmo de múltiplos enxames [35][36].

Os algoritmos de múltiplos enxames diferenciam-se do PSO, por apresentar PSO modificados onde os enxames também são uma classe de variáveis. Existem várias maneiras de estabelecer um algoritmo de múltiplos enxames, e.g. com sub-espacos e estruturas subordinadas, estruturas interativas entre dois enxames, que interagem trocando frequentemente sua melhor solução encontrada até o momento, conhecida como *gbest*, outra forma de estabelecer interação é uma estrutura mestre-escravo, quando há um módulo de comparação entre o enxame mestre e os enxames escravos. Além destes existem outras inúmeras maneiras de conceber-se uma otimização por múltiplos enxames, onde coexistam enxames que interagem de alguma forma [35][37][38][36][39][40][41].

Este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho de algoritmos de múltiplos enxames na alocação de recursos e controle de potência em redes OCDMA baseadas em acoplador em estrela. Os algoritmos de múltiplos enxames são relativamente recentes e podem ser encarados como um ou dois ou mais algoritmos PSO que funcionam simultaneamente e interagem de alguma forma. As interações entre populações nos algoritmos de múltiplos enxames podem ocorrer de inúmeras maneiras diferentes, e a forma como os enxames interagem ainda são um campo vasto para investigação e inovações.

### 3.1 Descrição do Problema

Esquemas de otimização da alocação de recursos e controlo de potência são importantes para aumentar o desempenho de redes ópticas com objetivo de garantir transmissão bem-sucedida e satisfazer os requerimentos de utilizadores. Dessa forma, é considerado a SNIR como critério de qualidade de serviço (QoS).

O controlo de potência em redes ópticas OCDMA surge como um problema de otimização.

Na análise do controlo de potência centralizado a relação entre portadora e ruído (CIR) é denotada por  $\Gamma_i$  e corresponde ao valor desejado para obter a QoS requerida pelo sistema, i.e., o valor requerido na entrada do decodificador para alcançar o máximo valor tolerado de BER pelo  $i^{th}$  nó óptico. O vetor de potência óptica transmitida tem dimensão  $K$  e é representado por  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$ . Então, o controlo de potência consiste em encontrar um vetor  $\vec{p}$  que minimize a função de custo  $J(\mathbf{p})$  [2][3][11][42].

$$\min J(\mathbf{p}) = \min 1^T \mathbf{p} = \min \sum_{i=1}^K p_i \quad (3.1)$$

Sujeita à restrição

$$\begin{aligned} P_{min} \leq p_i \leq P_{max} \forall i = 1, 2, \dots, K \\ P_{min} \geq 0, P_{max} \neq 0 \end{aligned}$$

$$\Gamma_i = \frac{G_{ii} p_i G_{amp}}{G_{amp} G_{ij} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \quad (3.2)$$

Em que  $K$  é o número de utilizadores ativos,  $1^T = [1, 1, \dots, 1]$  e  $\Gamma^*$  é a CIR mínima para alcançar QoS desejada, ou também chamada de CIR alvo;  $G_{ij}$  é a atenuação do OCP entre o nó transmissor  $j^{th}$  e o nó receptor  $i^{th}$ ,  $G_{amp}$  é o ganho do amplificador no OCP,  $p_i$  é a potência transmitida pelo  $i^{th}$  OCP e  $p_j$  é a potência transmitida pela interferência no OCP,  $N_{sp}^{eq}$  é a potência de ruído espontâneo do amplificador (ASE) ao considerar amplificadores em cascata e pode ser dada por:

$$N_{sp} = 2n_{sp} h f_c (G_{amp} - 1) B_0 \quad (3.3)$$

Onde  $n_{sp}$  é o fator de emissão espontânea, geralmente entre 2 e 5,  $h$  é a constante de Planck,  $f_c$  é a frequência da portadora e  $B_0$  é a largura de banda óptica. A SNIR é denotada por  $\gamma_i$  e é relacionada com a CIR por um fator  $\frac{N_T}{\sigma^2}$  como mostra a expressão a seguir:

$$\Gamma_i \approx (q/\sigma)^2 \Gamma_i \approx \frac{q^2}{\sigma^2} \Gamma_i \quad (3.4)$$

E que  $\sigma^2$  é variação média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica, para códigos primos é aproximadamente  $\sigma^2 \approx 0.29$  independentemente de  $q$  [3][34]. Dessa forma obtém-se [3][11]:

$$\gamma_i = \frac{q^2 G_{ii} p_i G_{amp}}{\sigma^2 G_{amp} G_{ij} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \geq \gamma^* \quad (3.5)$$

A expressão 3.2 pode ser escrita em notações matriciais como:

$$[\vec{\mathbf{I}} - \vec{\mathbf{\Gamma}}^* \vec{\mathbf{H}}] \vec{\mathbf{p}} \geq \vec{\mathbf{u}} \quad (3.6)$$

Onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade,  $\mathbf{\Gamma}^*$  é a matriz diagonal com elementos da CIR mínima,  $\mathbf{H}$  é a matriz de interferência normalizada e  $\mathbf{u}$  é o vetor de potência de ruído.  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{u}$  estão representados a seguir.

$$H_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{quando } i = j \\ \frac{G_{ij}}{G_{ii}} & \text{quando } i \neq j \end{cases} \quad (3.7)$$

$$u_i = \frac{2\gamma N_{sp}^{eq}}{q^2 G_{amp} G_{ii}} \quad (3.8)$$

Ao rearranjar a expressão 3.5, ao substituir a desigualdade por igualdade, e ao multiplicar pela matriz inversa, podemos obter o vetor de potência.

$$\vec{\mathbf{p}}^* = [\vec{\mathbf{I}} - \vec{\mathbf{\Gamma}}^* \vec{\mathbf{H}}]^{-1} \vec{\mathbf{u}} \quad (3.9)$$

A expressão (3.9) mostra que a inversão da matriz é equivalente ao controle de potência centralizada, i.e., a existência de um nó central para o controle de potência. Dessa forma o nó central armazena informação sobre toda a arquitetura da rede.

A probabilidade de erro com a utilização de códigos primos é dada por  $P_b = Q(\frac{\sqrt{\gamma}}{2})$ .

A análise da transmissão de potência óptima em (3.9) pode ser simplificada ao dividir a rede em duas partes distintas, a rede de acesso caracterizada entre os transmissores até à saída do acoplador em estrela, e a rede de transporte, caracterizada após o acoplador em estrela. Dessa forma as atenuações podem ser divididas em  $g_j$  a atenuação do transmissor até a saída acoplador e  $g_i$  como a atenuação após o acoplador em estrela até o receptor. Essa análise particionada implica que  $G_{ij} = g_j \hat{g}_i$  e assim a expressão (3.5) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\gamma_i = \frac{q^2 p_i G_{amp}}{\sigma^2 G_{amp} \sum_{j \neq i, j=1}^K p_j \frac{g_j}{g_i} + \frac{2N_{sp}^{eq}}{g_i \hat{g}_i}} \quad (3.10)$$

A Figura 3.1 ilustra a arquitetura da rede.

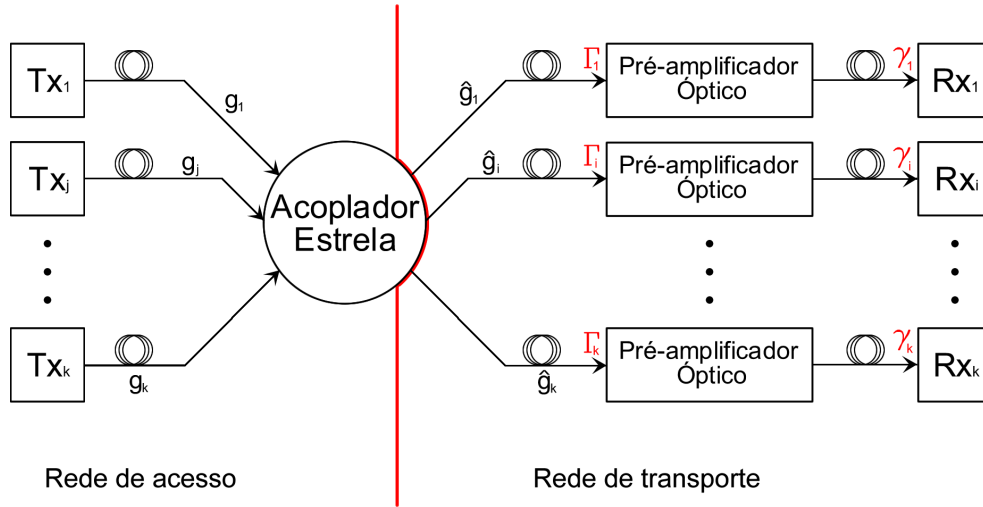


Figura 3.1: Arquitetura da rede [2][3].

Ao assumir o ruído da fonte emissora desprezável e assumir apenas o ASE do pré-amplificador, a CIR na saída do acoplador em estrela é dada por:

$$\Gamma = \frac{p_i g_i}{\sum_{j \neq i, j=1}^K p_j g_j} = \frac{p_i}{\sum_{j \neq i, j=1}^K p_j \frac{g_j}{g_i}} \quad (3.11)$$

Analisando o controlo de forma particionada a matriz de interferência normalizada  $H$  apresentada em (3.7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$H_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{quando } i = j \\ \frac{g_j}{g_i} & \text{quando } i \neq j \end{cases} \quad (3.12)$$

É importante realçar que a SNIR máxima alcançada em redes OCDMA com a utilização de códigos primos é fornecida por [3]:

$$\gamma_{max} = \frac{q^2}{\sigma^2(K-1)} \quad (3.13)$$

O gráfico da Figura 3.2 mostra a SNIR máxima para diferentes pesos de código e números de utilizadores.

A desvantagem do controlo de potência centralizado é a necessidade de um nó central que armazena toda a informação da atenuação das ligações na arquitetura

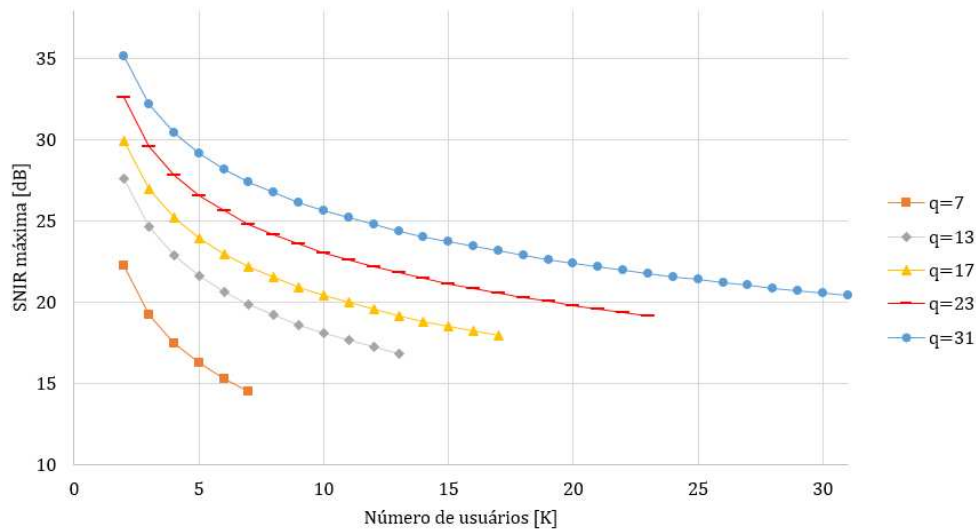


Figura 3.2: SNIR máxima em função do número de utilizadores.

da rede, e.g., atenuações provenientes do comprimento da fibra, atenuação do acoplador, etc.

Enquanto isso, a abordagem do controlo distribuído de potência oferece a vantagem de conhecer apenas informações locais, e.g., CIR alvo ou SNIR alvo para configurar a potência transmitida por determinado nó. Investigações de algoritmos de controlo distribuído de potência (DPCA) em redes ópticas mostraram a eficiência do método através de diferentes abordagens [2][3][11][42].

## 3.2 Restrições da Camada Física

A implementação prática de uma rede óptica deve ser planeada de modo a levar em consideração as restrições impostas pela camada física, pois as restrições da camada física têm um impacto no desempenho da rede óptica de forma significativa. Entre as limitações das redes ópticas destacam-se os efeitos da velocidade de grupo de dispersão (GVD), a dispersão modal de polarização (PMD), e o ruído de emissão espontânea (ASE). Também existem efeitos não lineares, os efeitos não lineares são divididos em efeitos de espalhamento e efeitos Kerr. Os efeitos de espalhamento não lineares mais conhecidos são o espalhamento estimulado de Brillouin (SBS) e espalhamento estimulado de Raman (SRS); ambos possuem características muito semelhantes, diferentemente do espalhamento linear de Rayleigh, que emite uma onda na mesma frequência da onda incidente e dessa forma é conhecido por ser um efeito elástico, os espalhamentos de Brillouin e Raman

são conhecidos por serem inelásticos, i.e., emitem uma onda em uma frequência de desvio em relação à frequência de onda incidente. Enquanto nos efeitos Kerr, destacam-se a auto modulação de fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM) e a mistura de quatro ondas (FWM); estes efeitos são conhecidos por penalizar as comunicações em fibra óptica, e ainda são temas de investigação com o objetivo de contornar essas penalizações [1][43][44][45][46].

Os efeitos de SBS e SRS são causados pelo alto nível de potência, e o controle de potência abaixo do nível de SBS e SRS garante o não aparecimento desses efeitos, enquanto o gerenciamento e planeamento da dispersão é uma técnica efetiva para suprimir as penalizações causadas pelas não linearidades de efeito Kerr [1][43][45][46].

O limite superior de potência em Watts para o aparecimento dos efeitos SBS assumindo que a polarização da luz não é mencionada é dado pela expressão [1]:

$$P_B = 4,4 \times 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} \vartheta \quad (3.14)$$

Onde  $d$  é o diâmetro do núcleo da fibra,  $\lambda$  é o comprimento de onda de operação em micrometros,  $\alpha_{dB}$  é a atenuação da fibra em dB/km e  $\vartheta$  é a largura de banda em GHz.

Atualmente, a maior restrição em redes ópticas é a PMD e devido à sua natureza é extremamente difícil de determinar e compensar de forma eficiente, entretanto o desenvolvimento de novos processos de fabrico tem permitido diminuir o parâmetro da PMD. Investigações mostraram que futuramente em redes domésticas e empresariais a PMD não será um problema para taxas de transmissão menores que 10 Gbps [47][48]. Ao considerar os efeitos da GVD e PMD de primeira ordem a expressão (8) pode ser escrita da seguinte maneira [2][45]:

$$\gamma_i = \frac{\frac{q^2 G_{ii} p_i G_{amp}}{\sigma_D}}{\sigma^2 G_{amp} G_{ij} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \geq \gamma^* \quad (3.15)$$

Em que  $\sigma_D$  é a variância de potência devido aos efeitos da GVD e PMD de primeira ordem para pulsos Gaussianos [2][49]. E  $\sigma_D$  pode ser expresso por [49]:

$$\sigma_D = \left( \left( 1 + \frac{C_p \beta_2 d_{ij}}{2\tau_0^2} \right) + \left( \frac{\beta}{2d_{ij}} 2\tau_0^2 \right) + x - \left( \frac{1}{2(1 + C_p^2)} \right) \times 1 + \sqrt{\frac{4}{3}(1 + C_p^2)x - 1} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

Onde  $C_p$  é o parâmetro de chirp,  $\tau_0 = \frac{T_C}{2\sqrt{2 \log_e 2}}$  é a largura do pulso RMS,  $T_C$  é o período de chirp de meia altura,  $\beta_2 = -D\lambda_0^2/2\pi c$  é o fator GVD,  $D$  é parâmetro de dispersão,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $x = \Delta\tau^2/4\tau_0^2$  e  $\Delta\tau = D_{PMD}\sqrt{d_{ij}}$ ,

$D_{PMD}$  é o parâmetro da dispersão e  $d_{ij}$  é o comprimento da ligação. O fator GVD é diferente para cada comprimento de onda, no entanto de forma a simplificar os cálculos é aceitável considerar o mesmo valor de fator de GVD para toda a janela de transmissão para uma quantidade pequena de canais em comprimento de onda. O ASE ao longo de uma ligação com vários amplificadores em cascata como ilustrado na 2.6 pode ser interpretado pelo modelo também abordado em [11], onde o ASE nos amplificadores é calculado de forma recursiva. A Figura 3.3 é uma versão particular da Figura 2.6; a Figura 3.3 nomeia os amplificadores para ilustrar a expressão do ASE ( $N_{sp}^{eq}$ ) apresentada a seguir:

$$N_{sp}^{eq} = \frac{N_{SP-1}(G_1 - 1)G_{ii}G_0 + N_{SP-0}(G_0) - 1}{G_1G_{ii}G_0 - 1} \quad (3.17)$$

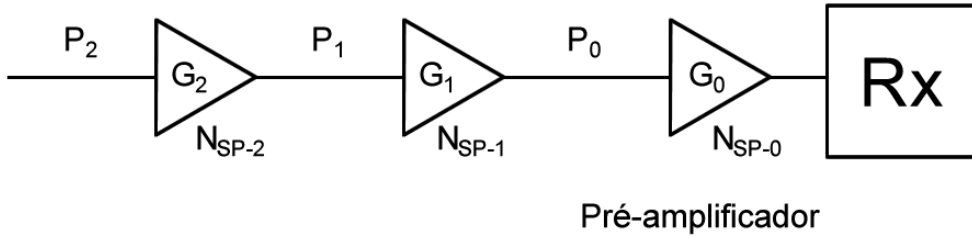


Figura 3.3: Amplificadores em cascata.

Neste modelo o pré-amplificador é nomeado como número 0, a partir daí cada amplificador é numerado a partir do recetor, na expressão 3.15  $G_i$  é assumido como o ganho do amplificador, e  $P_i$  representado na Figura 3.3 equivale à potência na entrada do amplificador  $i^{th}$ ; o ASE de cada amplificador  $N_{SP-i}$  pode ser calculado pela expressão (3.2). No âmbito deste trabalho a maior limitação da SNIR alvo é o ASE, dessa forma ao considerar uma rede OCDMA com curtas distâncias de ligações e baixas taxas de transmissão, os efeitos da GVD e PMD não serão considerados.



## Capítulo 4

---

# Optimização por enxame de partículas

---

*Este capítulo tem como objetivo apresentar o conceito de otimização por enxames de partículas, e como a otimização é utilizada para o problema de alocação de potência.*

A otimização por enxame de partículas (PSO) é um algoritmo de otimização inspirado no comportamento coletivo de enxames, e.g., pássaros, cardumes, abelhas. As partículas voam por um espaço multidimensional de soluções possíveis com o objetivo de encontrar a solução que otimiza a função de custo. A recursividade possibilita a interação entre as partículas e melhorando o desempenho do algoritmo, pois durante o voo a partícula modifica a sua posição conforme a sua própria experiência e a experiência adquirida coletivamente pelo comportamento das outras partículas.

A alocação de recursos através do PSO já demonstrou ser eficaz, e proporcionar uma convergência rápida e confiável, entretanto a convergência prematura pode penalizar o desempenho do algoritmo, outra desvantagem é a forte dependência dos parâmetros de controle do algoritmo que em alguns casos não levam ao comportamento de convergência confiável [35][38].

Cada partícula armazena as suas coordenadas no espaço de busca associadas à melhor solução encontrada até o momento durante a execução do algoritmo, essa função que armazena a melhor solução é conhecida como *fitness* e serve como critério de avaliação do desempenho das partículas. O termo indicador da experiência ou conhecimento individual de cada partícula é conhecido como *pbest* e o indicador responsável pelo conhecimento do enxame como um todo é o *gbest*. A proposta do PSO é que as partículas movimentam-se pelo espaço de

buscas atualizando a sua velocidade dinamicamente de acordo com o histórico de experiências individuais e coletivas, portanto a evolução do PSO está associada à trajetória percorrida pelo enxame e tempo gasto para encontrar a melhor solução do problema. O fluxograma apresentado na 4.1 ilustra a lógica de um algoritmo PSO clássico.

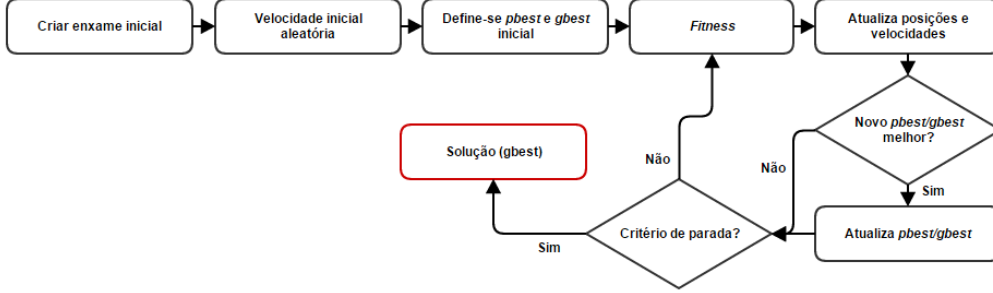


Figura 4.1: Fluxograma do PSO.

A descrição do PSO contínuo para o problema de alocação de recursos em redes OCDM é descrito em [2] [50] e [51]. A velocidade de vôo da partícula é denotada por  $\vec{v}_p$  e a posição da partícula é denotada por  $\vec{b}_p$ , e cada vetor de potência candidato à solução com dimensão  $K \times 1$  é denotado por  $\vec{b}_p[t]$ . A atualização da velocidade de busca a iteração é dada por [2]:

$$\vec{v}_p[t+1] = \omega[t] \vec{v}_p[t] + C_1 \vec{U}_{p1}[t] \left( \vec{b}_p^{best}[t] - \vec{b}_p[t] \right) + C_2 \vec{U}_{p2}[t] \left( \vec{b}_g^{best}[t] - \vec{b}_p[t] \right) \quad (4.1)$$

Em que  $\omega[t]$  é a inércia da velocidade anterior para atualização da nova velocidade, e o vetor de velocidade tem dimensão  $\vec{v}_p = [v_{p1}^t v_{p2}^t \dots v_{pK}^t]^T$ ,  $\vec{U}_{p1}[t]$  e  $\vec{U}_{p2}[t]$  são matrizes diagonais com dimensão  $K$  e tem os seus elementos com variáveis aleatórias com distribuição uniforme  $U \in [0, 1]$ ,  $\mathcal{G}$  é a geração do enxame correspondente de  $t$ ,  $\vec{b}_p^{best}$  é o melhor vetor de posição geral encontrado até o momento pela partícula  $\vec{b}_g^{best}$  é o melhor vetor de posição encontrado entre todas as partículas do enxame até o momento. Enquanto  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de aceleração em relação às melhores partículas e melhores posições locais que influenciam a velocidade de atualização.

O primeiro termo da expressão (4.1)  $\omega[t]$  é conhecido como inércia ou peso inercial e é importante para a convergência, o termo  $C_1 U_{p1}[t](b_p^{best}[t] - b_p[t])$  é conhecido como termo cognitivo e faz referência à aprendizagem individual da partícula. Por sua vez, o termo  $C_2 U_{p2}[t](b_g^{best}[t] - b_p[t])$  é conhecido como termo coletivo, e é responsável pelo aprendizado do comportamento coletivo, os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  são importantes para o comportamento de diversidade e exploração.

A atualização da posição da partícula  $p^{th}$  é atualizada a cada  $t^{th}$  iteração no vetor candidato de potência  $\vec{b}_p = [b_{p1}^t \ b_{p2}^t \ \dots \ b_{pK}^t]^T$  pela expressão:

$$\vec{b}_p[t+1] = \vec{b}_p[t] + \vec{v}_p[t+1], p = 1, 2, \dots, \mathcal{P} \quad (4.2)$$

O  $\mathcal{P}$  é o tamanho da população de partículas do enxame. A fim de evitar que partículas deixem o universo de busca, o fator de velocidade máxima  $V_{max}$  é incorporado no modelo do PSO, e será responsável por limitar a velocidade no intervalo  $[-V_{max}, V_{max}]$ . A estratégia para o ajuste da velocidade máxima é apresentada em [2], a estratégia que consiste em limitar a velocidade máxima através da expressão :

$$\vec{v}_{pk}^t = \min[V_{max}; \max[-V_{max}; \vec{v}_{pk}^t]] \text{ para } k = 1, \dots, K; p = 1, \dots, \mathcal{P} \quad (4.3)$$

É comum definir  $V_{max}$  em função do espaço de busca, i.e., o intervalo  $[P_{min}; P_{max}]$ , e dessa forma  $V_{max} = \phi(P_{max} - P_{min})$ , em que  $0, 1 \leq \phi \leq 1, 0$  [52].

O peso inercial influencia a partícula a mover-se na mesma direção, que tende a seguir a própria direção com a mesma velocidade. O termo cognitivo melhora o indivíduo, e força o indivíduo a voltar para uma posição anterior que seja melhor que a atual, i.e., é um fator conservativo, no termo de aprendizado coletivo o indivíduo é forçado a seguir a direção dos seus vizinhos com melhores resultados [52].

Quanto menor for o peso inercial, este incentiva a exploração local assim como as partículas são mais atraídas por  $\vec{b}_p^{best}$  e  $\vec{b}_g^{best}$ , e com objetivo de alcançar a convergência e um equilíbrio entre busca local e busca global, é proposto um peso inercial linear dinâmico e decrescente com a convergência incorporado com um algoritmo evolutivo que demonstra boa capacidade de pesquisa global inicialmente e boa capacidade de busca local em suas últimas iterações, dessa maneira, o peso inercial  $[\omega]$  pode ser descrito como:

$$\omega[t] = (\omega_{inicial} - \omega_{final}) \left( \frac{\mathcal{G} - t}{\mathcal{G}} \right) + \omega_{final} \quad (4.4)$$

Em que  $\omega_{inicial}$  é a inércia inicial e  $\omega_{final}$  é a inércia final, com  $\omega_{inicial} > \omega_{final}$ ,  $\mathcal{G}$  o número de gerações do PSO.

## 4.1 Alocação e Optimização de Recursos

A função de custo apresentada em [51] pode ser utilizada para a atribuição e controlo da potência numa rede OCDM, a função incorpora o problema perto-

longe (*near-far*):

$$J_1(\vec{p}) = \max \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{F}^{th} \left( 1 - \frac{p_k}{P_{max}} \right) + \frac{\rho}{\sigma_{rp}} \quad (4.5)$$

para  $\gamma \geq \gamma^*$ ,  $0 < p_k^l \leq P_{max}$ ,  $R^l = R_{min}^l$ ,  $\forall k \in K_l$  e  $\forall l = 1, 2, \dots, L$

Em que  $L$  é o número de diferentes grupos de taxa de informações permitidos no sistema, e  $K_l$  é o número de utilizadores no  $l^{th}$  com taxa mínima dada por  $R_{min}^l$ . O termo  $\rho/\sigma_{rp}$  dá crédito para soluções com utilizadores com diferentes requisitos de QoS e com múltiplas taxas de transmissão, através da utilização do fator de taxa inversa  $F^l$  e com pequenos desvios padrão para a potência distribuída normalizada, os valores próximos de potência normalizada são recebidos e  $\rho_{rp}$  pode ser expresso por [51]:

$$\rho_{rp} = var(F^1 p_1 g_{11}, F^2 p_2 g_{22}, \dots, F^k p_k g_{kk}, F^l p_k g_{KK}) \quad (4.6)$$

Dessa maneira, o termo  $\rho/\sigma_{rp}$  tem como objetivo minimizar o efeito perto-longe. Para o contexto deste trabalho, é considerado um sistema de taxa de transmissão única, i.e.,  $F^1 = F^l = \dots = F^L$ , e os mesmos requisitos de QoS, i.e., a mesma SNIR para todos os utilizadores. Desta forma, as taxa de transmissão são as mesmas para todos os pares transmissor-recetor, e o termo  $\rho/\sigma_{rp}$  assume pouca importância e pode ser desprezado.

Em seguida, a função de restrição  $F_k^{th}$  em (4.5) é apresentada como:

$$\mathcal{F}^{th} = \begin{cases} 1 & \text{quando } \gamma_k \geq \gamma^* \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

Onde a SNIR  $\gamma^*$  é fornecida pela expressão (3.10), de forma alternativa ao considerar diferentes abordagens através de diferentes DPCA a SNIR pode também ser estimada através de estimativas da CIR de formas distintas [3]:

$$\tilde{\Gamma}_i = \frac{p_i[t]g_i}{P_{star}[t] - p_i g_i} \quad (4.8)$$

Essa técnica é baseada em mensurar e enviando de volta a potência transmitida por todas as saídas da parte de acesso da rede  $P_{star}[t]$  os nós, onde  $P_{star} = \sum_{j=1}^K p_j[t]g_j$ . E por fim, o termo  $\left(1 - \frac{p_k}{P_{max}}\right)$  dá crédito a soluções que utilizam a menor potência e penaliza as soluções com níveis mais altos de energia [51][52]. O algoritmo do PSO é composto da recursividade e iteração através da

atualização constante da velocidade e posição apresentadas pelas expressões 4.1 e 4.2, o PSO clássico de objetivo comum para o problema de alocação de recursos em redes OCDM é apresentado em pseudocódigo pelo Algoritmo 1 [2].

---

**Algoritmo 1 – Algoritmo PSO clássico para o problema de alocação de potência**

---

início

1. Inicializa a população em  $t = 0$

$$\vec{B}[0] \sim U \in [P_{min}; P_{max}]$$

$$\vec{b}_p^{best}[0] = 0 = \vec{b}_p \text{ e } \vec{b}_g^{best} = [\vec{P}_{max}]$$

$$\vec{v}_p[0] = 0 : \text{velocidade inicial nula}$$

2. **Enquanto**  $t \leq \mathcal{G}$

a. Calcular  $J(\vec{b}_p[t]), \forall \vec{b}_p[t] \text{ in } \vec{B}[t]$  utilizando (4.6)

b. Atualizar a velocidade  $\vec{v}_p[t], p = 1, 2, \dots, \mathcal{P}$  utilizando (4.1)

c. Atualizar as melhores posições:

**para**  $p = 1, 2, \dots, \mathcal{P}$

**se**  $J(\vec{b}_p[t]) \leq J(\vec{b}_g^{best}[t])$

$$\vec{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \vec{b}_p[t]$$

**senão**

$$\vec{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \vec{b}_p^{best}[t]$$

**fim**

**se**  $(\exists \vec{b}_p[t] | J(\vec{b}_p[t]) < \vec{b}_g^{best}[t] \ \& \ R_p[t] \geq R_{min} \ \& \dots$

$\dots [J(\vec{b}_p[t]) \leq J(\vec{b}_p[t]) \leq \vec{b}_p^{best}[t] \ \forall p' \neq p])$

$$\vec{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \vec{b}_p[t]$$

**senão**

$$\vec{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \vec{b}_g^{best}[t]$$

**fim**

d. Desenvolve uma nova população de partículas utilizando (4.6)

e. Seleciona  $t = t + 1$

**fim**

3.  $\vec{p}^* = \vec{b}_g^{best}[\mathcal{G}]$

---

$\vec{B}[0]$ : Matriz inicial de partículas

$\mathcal{G}$ : Número de gerações

$\mathcal{P}$ : Tamanho da população

---

## 4.2 Algoritmos de Múltiplos Enxames

Os algoritmos de otimização por múltiplos enxames são uma variante do PSO clássico, inúmeras investigações ao longo dos últimos anos propuseram e continuam a propor estratégias diferentes para diferentes problemas de otimização,

com o objetivo de aprimorar resultados e sobrepor limitações do PSO clássico. Entre as estratégias de desenvolvimento para o algoritmo de múltiplos enxames estão interações entre enxames com número de partículas reduzido conhecidos como subenxames, e também mecanismos relacionados com algoritmos evolucionários [37][38][36][53][54][55][40].

Estratégias de subenxames que colaboram entre si exibiram bons resultados em funções de desempenho (*benchmark*), problemas multiobjectivo e problemas sujeitos a restrições [53]. Para este trabalho, a estratégia para criação do algoritmo de múltiplos é inspirada em trabalhos anteriores e consiste em subenxames como diferentes parâmetros que partilham a mesma melhor e solução encontrada até o momento ( $\vec{b}_g^{best}$ ). A forte dependência dos parâmetros do PSO pode influenciar na melhor solução encontrada. A abordagem de múltiplos enxames tem como objetivo estimular a exploração ao combinar enxames com diferentes perfis de performances durante a exploração.

Inicialmente, cada subenxame possui diferentes valores para os parâmetros de peso inercial  $\omega$ , coeficiente de aprendizado individual  $C_1$  e coeficiente de aprendizado coletivo  $C_2$ . O número de gerações  $\mathcal{G}$  é o mesmo para todos subenxames, e o tamanho da população  $\mathcal{P}$  é o mesmo para todos subenxames. O tamanho igual entre todos os subenxames tem como objetivo evitar que algum enxame consiga impor suas soluções  $\vec{b}_p^{best}$  durante todas as gerações. Neste trabalho também são investigados diferentes métodos de atualização da posição das partículas dos subenxames.

## Capítulo 5

---

# Resultados Numéricos

---

*Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulações realizadas com a utilização do software MATLAB<sup>TM</sup>, também serão descritos os parâmetros utilizados pelo PSO clássico e os algoritmos de múltiplos enxames. Algumas definições utilizadas neste trabalho são baseadas na literatura existente e em trabalhos anteriores.*

### 5.1 Parâmetros Gerais

Para todas as simulações foi considerado o comprimento de onda central  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , o  $N_{sp}^{eq}$  tem um valor diferente para cada comprimento de onda, entretanto é aceitável assumir o mesmo valor de  $N_{sp}^{eq}$  para um pequeno número de comprimentos de onda na janela de  $1550 \text{ nm}$ . Foi considerada a transmissão monomodo em uma fibra de dispersão diferente de zero (NFD)-ITU G.655 com atenuação ( $\alpha_f$ ) de  $0,2 \text{ dB/km}$  e diâmetro de  $6\mu\text{m}$  em um única ligação entre ligações transmissor até acoplador, e também um única ligação entre acoplador e recetor. Os comprimentos das ligações são pequenos e os efeitos da SPM podem ser desprezados. Os valores típicos para  $n_{sp} = 2$ ,  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}$  e o ganho dos amplificadores  $G_{amp} = 20 \text{ dB}$ , a taxa de transmissão ( $R_{min}^L$ ) é de  $10 \text{ Gbps}$  para todos os OCP's.

O peso do código escolhido é  $q = 31$ , com variação média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica  $\sigma^2 = 0,29$  e com a QoS é escolhida a SNIR alvo ( $\gamma^*$ ).

## 5.2 Soluções válidas através do PSO

Inicialmente é importante saber que nem todas as soluções encontradas pelo PSO podem ser soluções válidas, esta secção abordará as condições impostas ao algoritmo do PSO clássico para a obtenção de soluções válidas e a descrição destes processos. As simulações foram realizadas através do software MATLAB<sup>TM</sup>.

Tendo em vista que são necessárias algumas adaptações do algoritmo, a otimização por algoritmos de enxames de partículas pode tornar-se um processo complexo. No caso da alocação de potência em redes ópticas nem todas as soluções geradas pelo PSO podem ser consideradas soluções válidas. Para o estudo deste trabalho, uma solução é considerada como solução válida apenas quando a SNIR mínima apresentada pela equação (3.5) é garantida em todos os OCP's e também se a SNIR correspondente no OCP está abaixo do limite de SNIR estabelecido pela equação (3.13). Portanto, embora um vetor de solução consiga satisfazer a SNIR em todos os OCP's e apresentar qualquer SNIR acima do limite estabelecido em (3.13) é considerado como solução inválida. A não garantia da SNIR em algum OCP penaliza a função de custo (4.5) através da função  $\mathcal{F}_k^{th}$  que assume valor zero quando a SNIR está abaixo da SNIR alvo ou acima do limite de SNIR.

A fim de solucionar o problema da alocação de potência durante as simulações foram observados a influência da determinação dos parâmetros, e assim estabelecidos os parâmetros mais adequados. Entre os parâmetros observados pode-se citar o coeficiente de aceleração referente ao aprendizado individual  $C_1$ , o coeficiente de aceleração referente ao aprendizado coletivo  $C_2$ , a velocidade máxima  $V_{max}$ , o peso inercial  $\omega$ , o tamanho da população  $\mathcal{P}$  e o número de gerações  $\mathcal{G}$ .

O caso de estudo apresentado nesta secção para determinação dos parâmetros do PSO foi para uma rede com 7 OCP's, i.e.,  $K = 7$ , foram consideradas perdas por decodificação no lado do recetor  $\alpha_{dec}$ , a configuração da rede e suas características são descritas na Tabela 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Comprimentos da ligação de cada OCP.

OCP	Distância Tx - Acoplador [km]	Distância Acoplador - Rx [km]
1	2	2
2	16	16
3	30	30
4	44	44
5	58	58
6	72	72
7	86	86

Para o problema de alocação de potência, os parâmetros do algoritmo são

Tabela 5.2: Descrição da Rede.

Variável	Valor
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ J/Hz
Frequência da luz	$193,12 \times 10^{12}$ Hz
Taxa de transmissão	10 Gbps
Largura de banda óptica	20 GHz
Fator de ruído de transmissão espontânea	2
Perdas por excesso	0,2
Ganho do amplificador	20 dB
Peso do código	31
Variação média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica	0,29
Perdas por decodificação no receptor	14 dB
Potência máxima	20 dBm
Potência mínima	-20 dBm
SNIR alvo	20 dB

dependentes do número de utilizadores que transmitem simultaneamente, e a optimização dos parâmetros foi estudada em [53][54].

Primeiramente, o tamanho da população de partículas e o número de gerações foi estabelecido de acordo com [54] em que  $\mathcal{P} = K + 2$  e  $\mathcal{G} = 1000$ . O critério de paragem adotado é a quantidade de gerações.

Inicialmente, foi implementado um algoritmo da forma apresentada pelo Algoritmo 1. Em inúmeras execuções do algoritmo com uma população com tamanho  $\mathcal{P} = K + 2 = 9$  e o com o número de gerações  $\mathcal{G} = 1000$  a observação dos resultados mostraram que vetor de melhor solução  $\vec{b}_g^{best}$  não era capaz de produzir soluções válidas de forma a satisfazer a restrição de SNIR em todos os OCP's. Dessa forma, foi estabelecida uma condição inicial para o algoritmo em que as partículas de posição inicial na  $\mathcal{G} = 0$  satisfizessem a condição de restrição da SNIR na matriz aleatória inicial de população com valores entre  $P_{max}$  e  $P_{min}$ . A função responsável pela geração da matriz de população inicial é apresentada com mais detalhes no Anexo A.

Posteriormente foram estabelecidos os coeficientes  $C_1 = C_2 = 2$  segundo a literatura de trabalhos anteriores apresentados em [54], e o peso inercial  $\omega = 1$  e sem imposição de velocidade máxima. Foi observado que a não imposição de uma velocidade  $V_{max}$  fazia com que o algoritmo não conseguisse atingir a convergência e continuava a não gerar soluções válidas capazes de satisfazer a função de restrição  $\mathcal{F}_k^{th}$  responsável pela determinação da SNIR mínima e consequentemente penalizando a função de custo apresentada em 4.5 de maneira a minimizar

o seu valor. A não imposição de  $V_{max}$  implicava que as partículas abandonavam o espaço de busca. Portanto, foi estabelecida uma velocidade máxima sugerida em [54] em função da gama dinâmica em que  $V_{max} = 0,2(P_{max} - P_{min})$ .

Seguidamente, foi observado que a limitação da velocidade estabelecida por  $V_{max} = 0,2(P_{max} - P_{min})$  ainda não era condição suficiente para garantir a SNIR mínima em OCP's de menores distâncias após  $\mathcal{G} = 1000$ , pois a velocidade máxima ainda era alta nas primeiras gerações em comparação com a potência requerida pelo OCP, tal facto fazia a partícula deixar de satisfazer a restrição de SNIR e consequentemente penalizava a função de custo.

A fim de sobrepor o problema da velocidade máxima foi estabelecida uma condição de contorno eficiente de forma empírica baseada na observação de vetores soluções capazes de satisfazer a restrição de SNIR para todos os OCP's. Num algoritmo paralelo foi executado uma rotina para encontrar soluções aleatórias válidas, durante 10 execuções do algoritmo foram encontrados 623 vetores que satisfaziam as condições de SNIR mínima em todos os OCP's, dessa forma foi observado o intervalo que compreendia os valores mínimos e máximos possíveis para cada posição do vetor, então a  $V_{max}$  foi estabelecida como  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$  em que  $P_{K_{max}}$  é a potência de maior ocorrência para a posição  $K$  do vetor de potência e  $P_{K_{min}}$  é a potência de menor ocorrência para a posição  $K$  do vetor de potência. Após a condição inicial de criação da matriz de partículas em  $\mathcal{G} = 0$  e a condição de contorno para a  $V_{max}$ , o algoritmo forneceu soluções  $\vec{b}_g^{best}$  que satisfaziam a restrição da SNIR e maximizavam a função de custo (4.5).

O motivo provável pelo qual o algoritmo não conseguia satisfazer as restrições inicialmente consiste em dois fatores: o primeiro fator a ser apontado é que solução  $\vec{b}_g^{best} = [P_{max}]$  não é uma solução válida, dessa forma as partículas eram atraídas para uma solução inválida, por esse motivo a condição inicial consiste em encontrar partículas capazes de satisfazer as restrições; o segundo fator é que para OCP's com menores distâncias, uma variação de velocidade igual  $0,2(P_{max} - P_{min})$  era uma grande variação, ao ser atualizada a posição da partícula, a potência assumia um grande valor, alterando o valor da SNIR no OCP e também influenciando na SNIR de outros OCP's e dessa forma a solução tornava-se inválida e penalizando a função de custo.

### 5.3 Optimização de Parâmetros do PSO

Esta secção tem como objetivo investigar a importância da determinação dos parâmetros do algoritmo PSO para o problema de alocação de potência e avaliar o desempenho do algoritmo e o impacto da determinação dos parâmetros nas soluções encontradas. Após estabelecidas as condições que garantem a convergência e a geração de soluções válidas foi avaliada e comparada a performance de

algoritmos com diferentes parâmetros. Com os parâmetros iniciais estabelecidos anteriormente em uma rede com características descritas pelas Tabelas 5.1 e 5.2 e parâmetros do PSO determinados com  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 1$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$  foi observado a evolução do valor da função de custo, que é mostrada pelo Gráfico apresentado na figura 5.1.

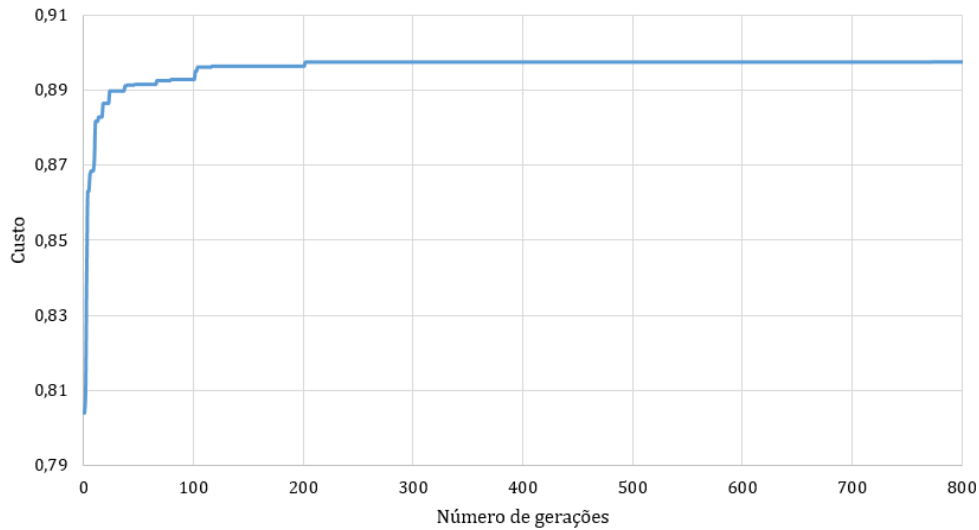


Figura 5.1: Evolução do valor da função de custo para  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 1$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

Através do gráfico é possível observar que o valor da função de custo teve pouca alteração após  $\mathcal{G} = 202$ . A evolução da SNIR em cada OCP é apresentada pelo Gráfico da Figura 5.2

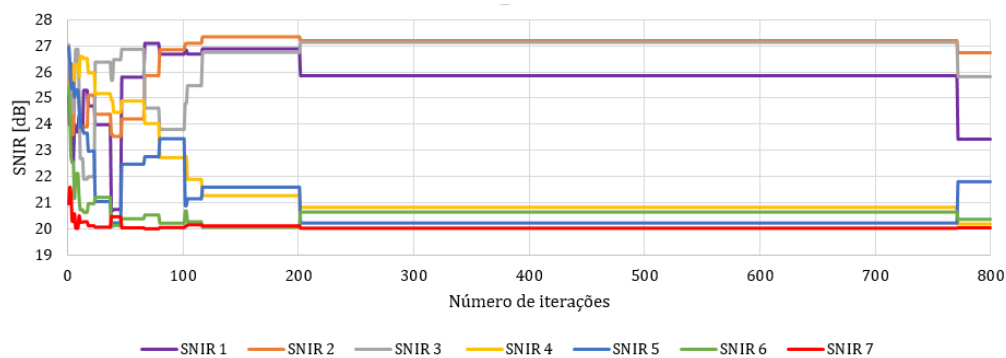


Figura 5.2: Evolução da SNIR em cada OCP para a  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 1$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

O vetor solução  $\vec{b}_g^{best} = [-9, 9834; -2, 5269; 1, 2762; 0, 7705; 7, 6393; 11, 6422; 16, 8226]$  dBm é uma solução válida com  $\gamma_1 = 23, 4369$  dB,  $\gamma_2 = 26, 7267$  dB,  $\gamma_3 = 25, 8114$  dB,  $\gamma_4 = 20, 1725$  dB,  $\gamma_5 = 21, 7910$  dB,  $\gamma_6 = 20, 3629$  dB,  $\gamma_7 = 20, 0408$  dB.

Como observado pelos gráficos das figuras 5.1 e 5.2, o valor de custo tenha praticamente atingido o valor final após  $\mathcal{G} = 202$  o algoritmo apresentou uma convergência prematura e com pouca capacidade de encontrar outras soluções melhores. Apenas algumas SNIR's alcançaram o valor próximo ao valor desejado.

É importante lembrar que devido à natureza aleatória do mecanismo de exploração do PSO em diferentes execuções o mesmo algoritmo pode apresentar soluções diferentes. O caso apresentado a seguir para os parâmetros  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$  e  $V_{max} = 0, 2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$  descritos anteriormente, entretanto um novo valor para o peso inercial é adotado com  $\omega = 0, 9$  e obteve um vetor solução com  $\vec{b}_g^{best} = [-12, 8800; -8, 6713; -2, 8132; 2, 8314; 6, 4822; 11, 4974; 16, 8260]$  dBm, e com  $\gamma_1 = 20, 9462$  dB,  $\gamma_2 = 20, 7633$  dB,  $\gamma_3 = 21, 8361$  dB,  $\gamma_4 = 22, 3773$  dB,  $\gamma_5 = 20, 6876$  dB,  $\gamma_6 = 20, 2534$  dB,  $\gamma_7 = 20, 0638$  dB. A evolução de sua função de custo é apresentada pelo Gráfico na Figura 5.3 e a evolução da SNIR ao longo das iterações é apresentada pelo Gráfico representado na Figura 5.4.

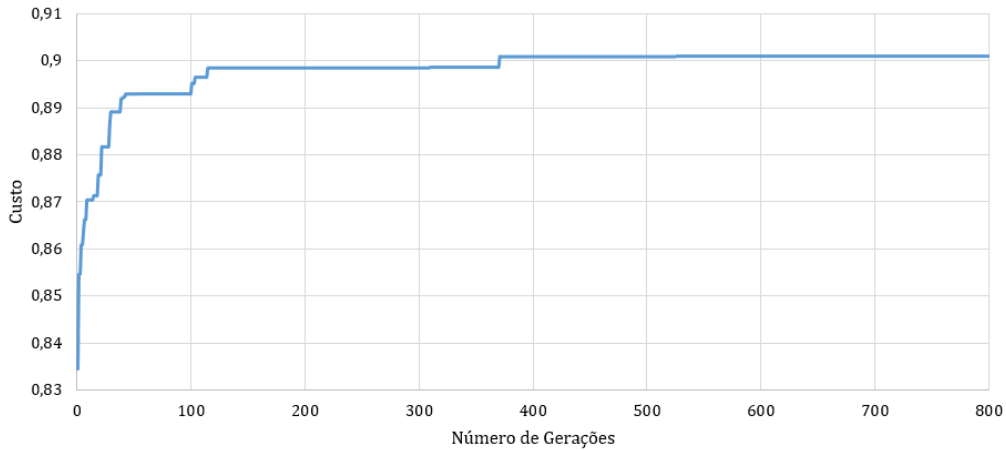


Figura 5.3: Evolução do valor da função de custo para  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 0, 9$  e  $V_{max} = 0, 2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

Foi observado que um peso inercial  $\omega$  é capaz de encontrar melhores soluções e menos penalizado por convergências prematuras.

O peso inercial linear que reduz seu valor gradativamente é uma abordagem que possibilita otimizar a atualização da velocidade da partícula. Para um PSO com parâmetros estabelecidos com  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $V_{max} = 0, 2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ , e peso inercial linear apresentado pela equação

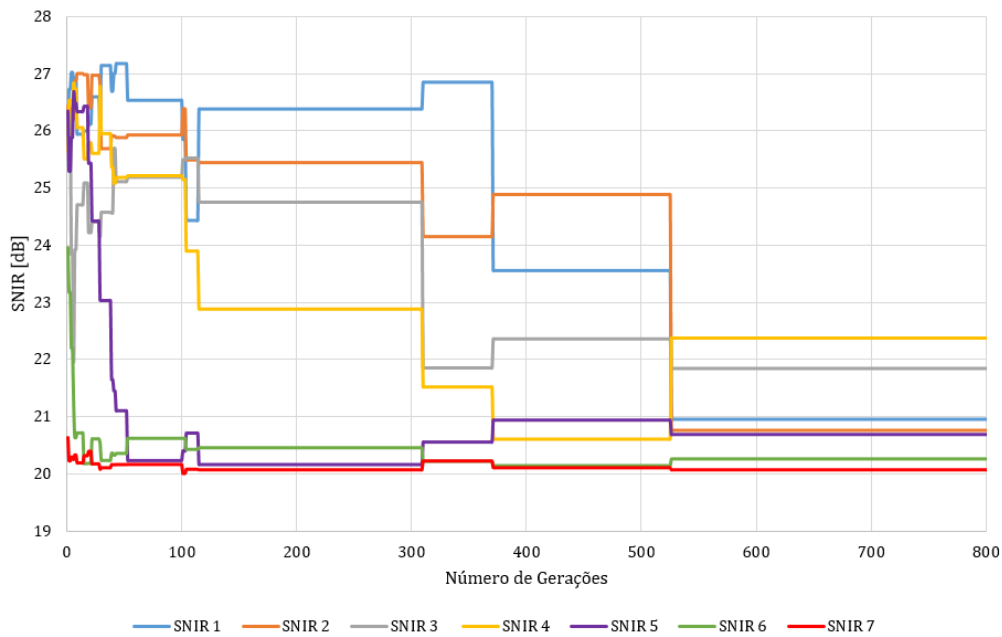


Figura 5.4: Evolução da SNIR em cada OCP para a  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 0,9$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

(4.4) em que  $\omega_{inicial} = 0,9$  e  $\omega_{final} = 0,1$ . Os valores adotados para  $\omega_{inicial}$  e  $\omega_{final}$  foram baseados em trabalhos anteriores exibidos em [52], pois os resultados demonstraram que esses valores são mais adequados visto que oferecem um bom equilíbrio entre o peso inercial e exploração do espaço pelos termos referentes ao aprendizado individual e aprendizado coletivo na atualização da velocidade ao passo que o algoritmo atinge convergência. A evolução da SNIR ao longo das gerações nos OCP's é exibida no Gráfico exibido pela Figura 5.5, a evolução da função de custo é apresentada no Gráfico na Figura 5.6.

O algoritmo descrito anteriormente com peso inercial linear  $\omega_{inicial} = 0,9$  e  $\omega_{final} = 0,1$  apresentou os melhores resultados e também mostrou não sofrer com a convergência prematura e foi capaz de encontrar soluções ótimas, i.e., todas as SNIR convergiram para a SNIR alvo.

Os ficheiros com os algoritmos PSO descritos nessa secção estão presentes no Anexo B.

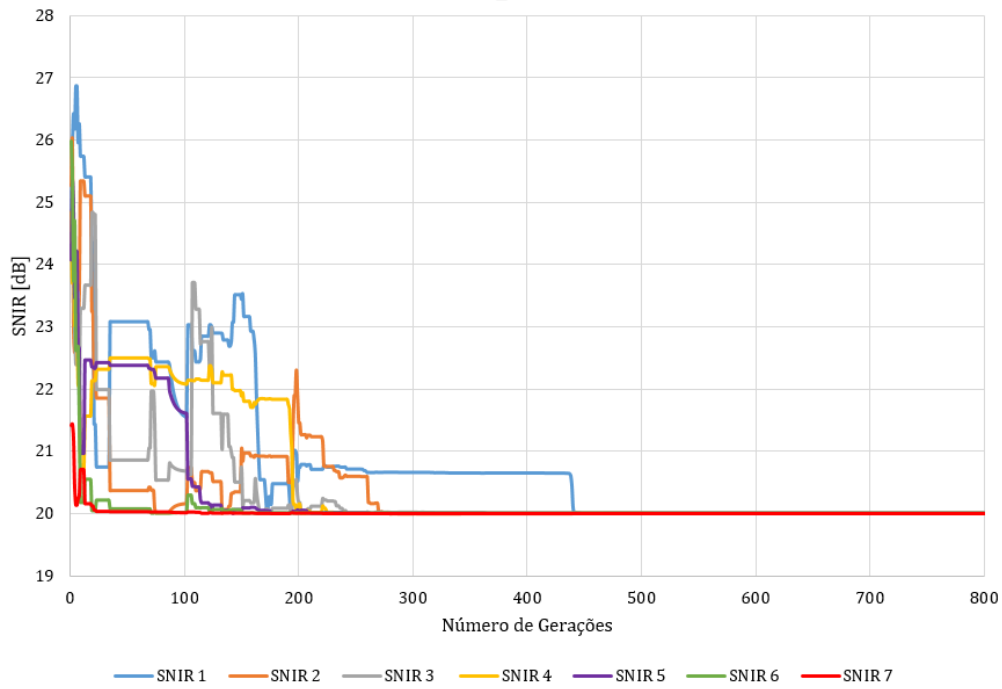


Figura 5.5: Evolução do valor da função de custo para  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

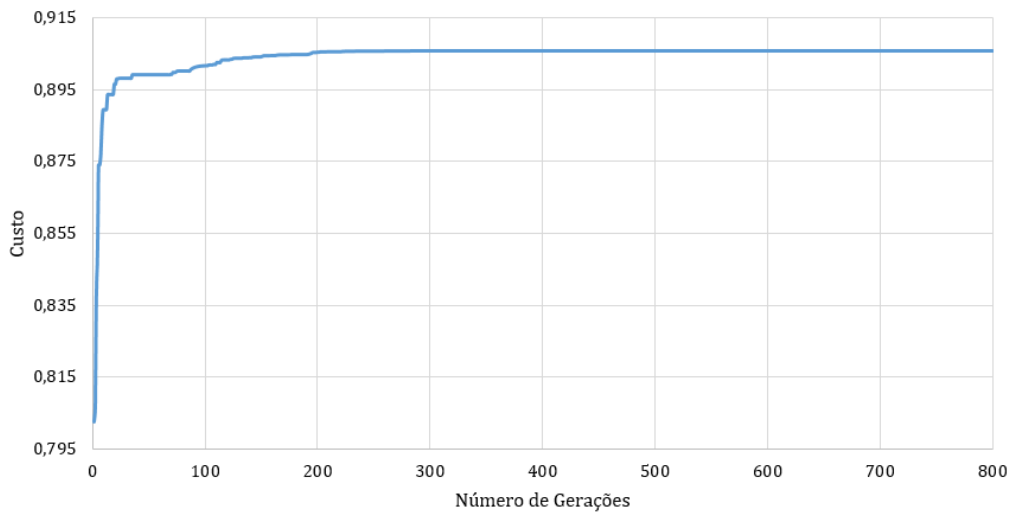


Figura 5.6: Evolução da SNIR em cada OCP para a  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 800$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$  e  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

## 5.4 Desempenho do PSO clássico

O objetivo desta secção é mostrar o desempenho do PSO clássico para a alocação de potência em redes OCDMA para um número maior de utilizadores. Ao considerar a viabilidade de implementação da rede e desejando o não aparecimento de efeitos não-lineares indesejáveis para qualidade da transmissão foi assumido o SBS como potência máxima alcançável pelo transmissor. As características da rede seguem na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Características da Rede.

Variável	Valor
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ J/Hz
Frequência da luz	$193,12 \times 10^{12}$ Hz
Taxa de transmissão	10 Gbps
Largura de banda óptica	20 GHz
Fator de ruído de transmissão espontânea	2
Perdas por excesso	0,2
Ganho do amplificador	20 dB
Peso do código	31
Variação média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica	0,29
Perdas por decodificação no receptor	5 dB
Potência máxima	31,83 dBm
Potência mínima	-20 dBm
SNIR alvo	20 dB
Distância Tx - Acoplador	2 → 110 km
Distância Acoplador - Rx	2 → 110 km

## 5.5 PSO 1

O desempenho do PSO para diferentes parâmetros e condições para a convergência observadas anteriormente possibilitaram compreender as limitações do PSO e estender as análises para um número maior de OCP's. Assim para um número de  $K \geq 8$  foi utilizada uma condição inicial diferente da mencionada anteriormente pelo Anexo C, a condição utilizada em redes com número de OCP's consiste em estabelecer  $\vec{b}_g^{best}$  com valores fornecidos pela solução matricial apresentada pela equação (3.9). A matriz de partículas iniciais é criada com valores aleatórios no intervalo  $[0, 8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}; 5 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$  em que  $\vec{b}_{k_0}^{best}$  é o valor da partícula resultante da forma matricial pelo OCP  $k$ .

O limite da potência para o não aparecimento de efeitos de SBS é fornecido pela equação (3.14) e é de  $P_{SBS} = 1,522$  W. Através da solução matricial (3.9)

é possível observar a quantidade de OCP's suportados pela rede considerando seus parâmetros. Em uma rede com os parâmetros descritos pela Tabela 5.3 em que a distância entre os OCP's consecutivos é igualmente espaçada, verificou-se que através da forma matricial (3.9) que a rede pode suportar até 19 utilizadores simultâneos, i.e.,  $K = 19$ .

Os parâmetros do PSO determinados para essa análise são  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 6000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ , e  $V_{max} = [5 \times \vec{b}_{k_0}^{best}; 0, 8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ , e peso inercial linear apresentado pela equação (4.4) em que  $\omega_{inicial} = 0,9$  e  $\omega_{final} = 0,1$ . Com objetivo de comprovar a validade das soluções encontradas, o algoritmo foi executado seis vezes. A Tabela 5.16 exibe o valor de custo da função (4.5) e também as potências em dBm de  $\vec{b}_g^{best}$  de cada transmissor em cada OCP durante as seis execuções, a Tabela 5.17 exibe o valor da SNIR em cada OCP para o cada  $\vec{b}_g^{best}$  da Tabela 5.16.

Através da análise dos resultados obtidos é possível notar que o PSO descrito é capaz de encontrar os valores óptimos de potências e garantir a SNIR mínima para os requisitos de QoS da rede.

Tabela 5.4: Potência e Custo do PSO 1 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
Tx-OCP1	-8,65	-8,48	-8,66	-8,66	-8,63	-8,24
Tx-OCP2	-7,12	-7,12	-7,12	-7,12	-7,12	-7,10
Tx-OCP3	-5,49	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50	-5,49
Tx-OCP4	-3,81	-3,80	-3,80	-3,80	-3,81	-3,66
Tx-OCP5	-2,03	-1,83	-2,03	-2,03	-2,03	-2,02
Tx-OCP6	-0,07	-0,17	0,00	0,00	-0,17	-0,16
Tx-OCP7	1,83	1,77	1,77	1,77	1,80	1,78
Tx-OCP8	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,84
Tx-OCP9	5,89	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87
Tx-OCP10	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,02
Tx-OCP11	10,21	10,21	10,21	10,21	10,22	10,30
Tx-OCP12	12,45	12,45	12,45	12,45	12,45	12,64
Tx-OCP13	14,72	14,72	14,78	14,78	14,72	14,72
Tx-OCP14	17,02	17,02	17,02	17,02	17,02	17,02
Tx-OCP15	19,34	19,34	19,34	19,34	19,34	19,34
Tx-OCP16	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,69
Tx-OCP17	24,04	24,04	24,04	24,04	24,04	24,04
Tx-OCP18	26,40	26,41	26,40	26,40	26,40	26,40
Tx-OCP19	28,78	28,78	28,78	28,78	28,78	28,78
Custo	0,9376	0,9376	0,9376	0,9376	0,9376	0,9376

Foi analisada com mais detalhes execução n°5 do algoritmo, em que evolução da função de custo é apresentada no Gráfico pela Figura 5.7, a evolução da SNIR de cada OCP é fornecida pelo Gráfico , a potência de cada transmissor é

Tabela 5.5: SNIR em cada OCP para PSO 1 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
SNIR 1	17,02	17,18	17,01	17,01	17,04	17,42
SNIR 2	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,02
SNIR 3	17,01	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 4	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,14
SNIR 5	17,00	17,20	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 6	17,10	17,00	17,17	17,17	17,00	17,01
SNIR 7	17,06	17,00	17,00	17,00	17,03	17,00
SNIR 8	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,05
SNIR 9	17,02	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 10	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,01
SNIR 11	17,00	17,00	17,00	17,00	17,01	17,09
SNIR 12	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,19
SNIR 13	17,00	17,00	17,06	17,06	17,00	17,00
SNIR 14	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 15	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 16	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 17	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 18	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 19	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00

apresentada pelo Gráfico na Figura 5.8. O Gráfico na Figura 5.9 exibe a evolução do vetor de potência de cada OCP na  $\vec{b}_g^{best}$  ao longo de  $\mathcal{G} = 6000$ .

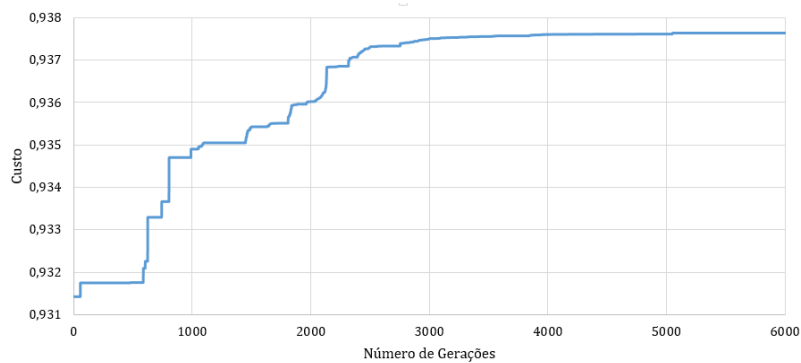


Figura 5.7: Evolução do valor da função de custo para  $K = 19$   $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 6000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,9 \rightarrow 0,1$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

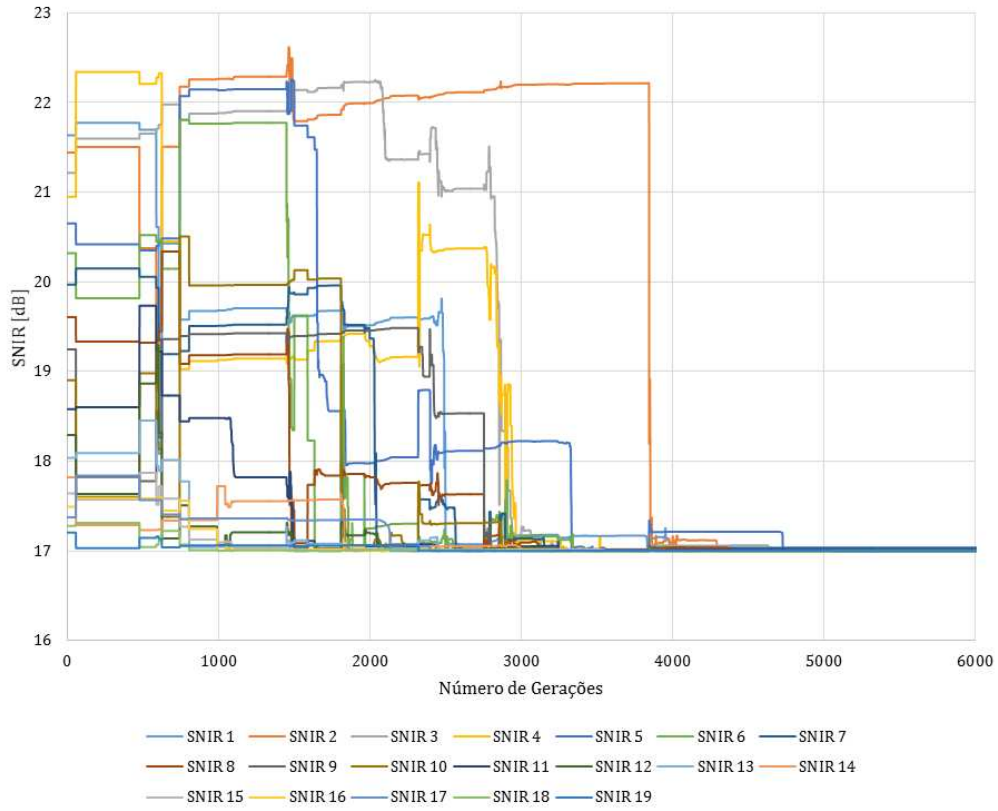


Figura 5.8: Evolução da SNIR em cada OCP para  $K = 19$  de  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 6000$ ,  $\mathcal{P} = 9$ ,  $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

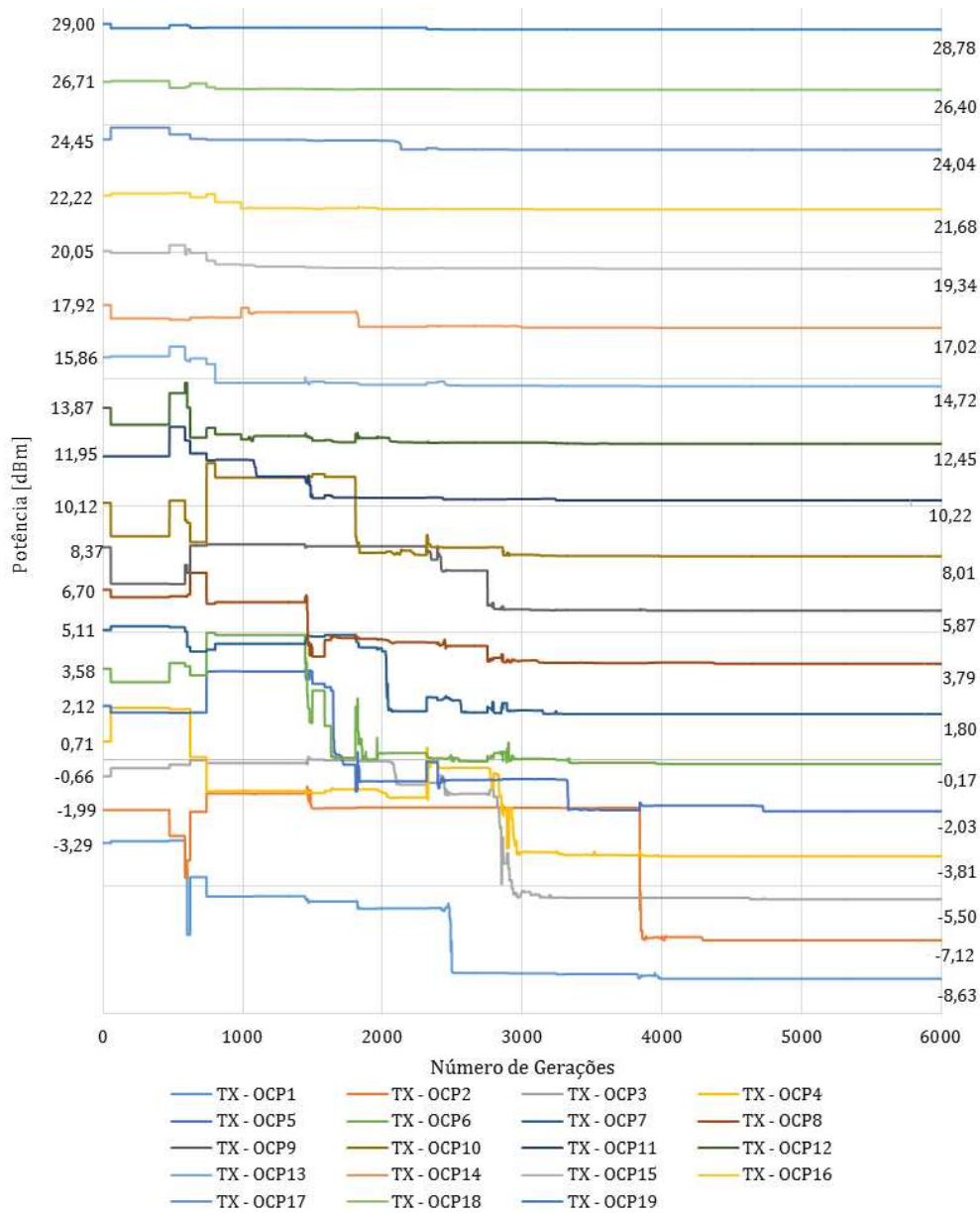


Figura 5.9: Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para  $K = 19$  a  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 6000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,9 \rightarrow 0,2$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

## 5.6 PSO 2

A análise da rede descrita pela tabela 5.3 foi estendida para um PSO com os seguintes parâmetros  $C_1 = 1,2$ ,  $C_2 = 1,8$ ,  $\mathcal{G} = 2000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ , e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ , e peso inercial  $\omega = 0,7$ . Da mesma maneira como o apresentado

anteriormente o algoritmo foi executado seis vezes, a Tabela 5.18 exibe o valor de custo da função (4.5) e também as potências em dBm de  $\vec{b}_g^{best}$  de cada transmissor em cada OCP durante as seis execuções, a Tabela 5.7 exibe o valor da SNIR em cada OCP para o cada  $\vec{b}_g^{best}$  da Tabela 5.18. O gráfico representado na Figura 5.10 exibe a evolução da SNIR, o gráfico presente na figura 5.11 exibe a evolução da função de custo e o Gráfico na Figura 5.12 exibe a evolução da potência dos transmissores em cada OCP ao longo das gerações.

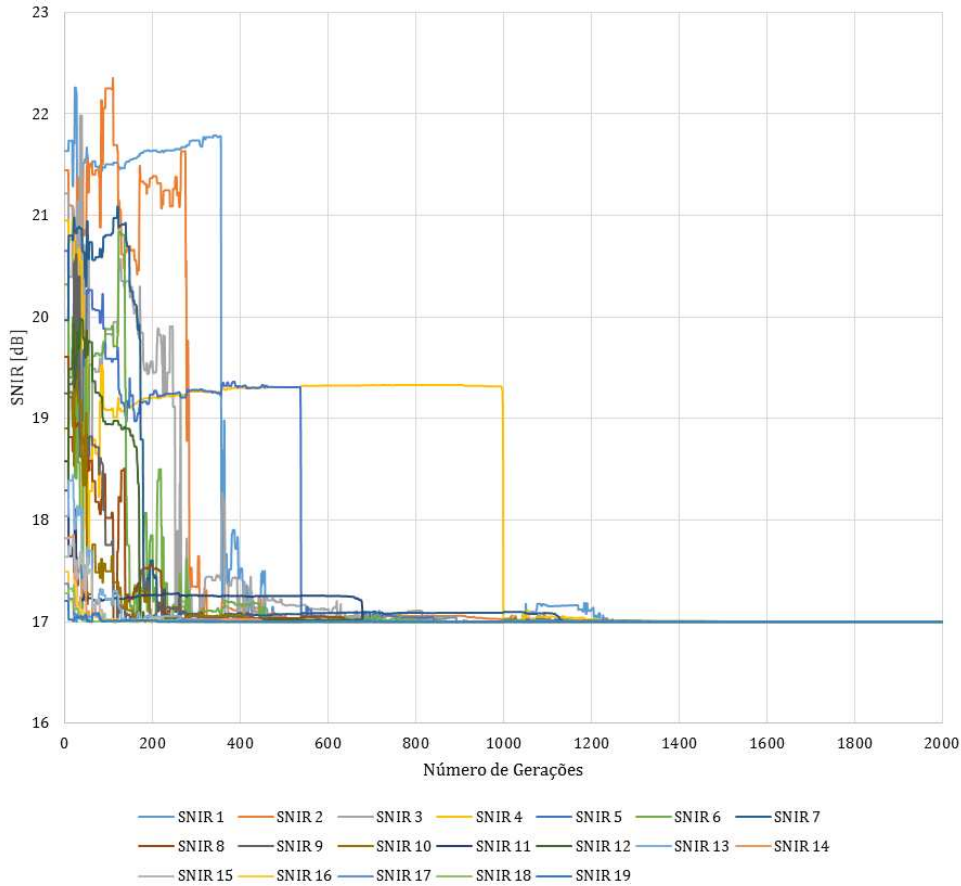


Figura 5.10: Evolução do valor da função de custo para  $K = 19$   $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1, 2, C_2 = 1, 8, \mathcal{G} = 2000, \mathcal{P} = 21, \omega = 0, 7$  e  $V_{max} = 0, 2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0, 8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

Através da análise dos gráficos é possível ver que o PSO consegue também encontrar valores ótimos de potência de forma a garantir a SNIR alvo. Com a evolução da potência de cada transmissor é possível notar que OCP's com menores distâncias apresentam maiores variações no valor de potência emitida, enquanto os OCP's com maiores distâncias apresentam pouca variação de seu valor. Isso pode ser explicado devido ao fato que a  $\vec{b}_g^{best}$  inicial obtida pela solução matricial

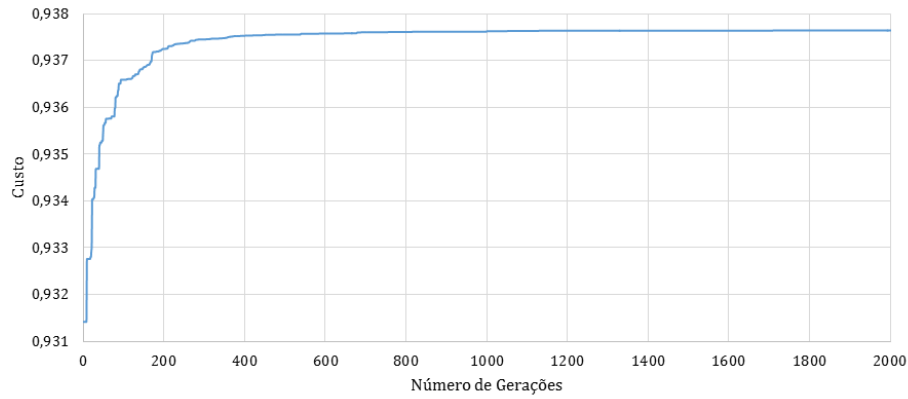


Figura 5.11: Evolução da SNIR em cada OCP para  $K = 19$  de  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1,2$ ,  $C_2 = 1,8$ ,  $\mathcal{G} = 2000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

Tabela 5.6: Potência e Custo do PSO 2 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
TX-OCP1	-8,67	-8,67	-8,67	-8,67	-8,67	-8,67
TX-OCP2	-7,12	-7,12	-7,12	-7,12	-7,12	-7,12
TX-OCP3	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50
TX-OCP4	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81
TX-OCP5	-2,03	-2,03	-2,03	-2,03	-2,03	-2,03
TX-OCP6	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
TX-OCP7	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
TX-OCP8	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79
TX-OCP9	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87
TX-OCP10	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01
TX-OCP11	10,21	10,21	10,21	10,21	10,21	10,21
TX-OCP12	12,45	12,45	12,45	12,45	12,45	12,45
TX-OCP13	14,72	14,72	14,72	14,72	14,72	14,72
TX-OCP14	17,02	17,02	17,02	17,02	17,02	17,02
TX-OCP15	19,34	19,34	19,34	19,34	19,34	19,34
TX-OCP16	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68
TX-OCP17	24,04	24,04	24,04	24,04	24,04	24,04
TX-OCP18	26,40	26,40	26,40	26,40	26,41	26,40
TX-OCP19	28,78	28,78	28,78	28,78	28,78	28,78
Custo	0,937642	0,937642	0,937642	0,937642	0,937642	0,937642

(3.9) apresenta maiores SNIR para OCP's com menores distâncias, enquanto os OCP's com maiores distâncias tem valores mais próximos da SNIR alvo.

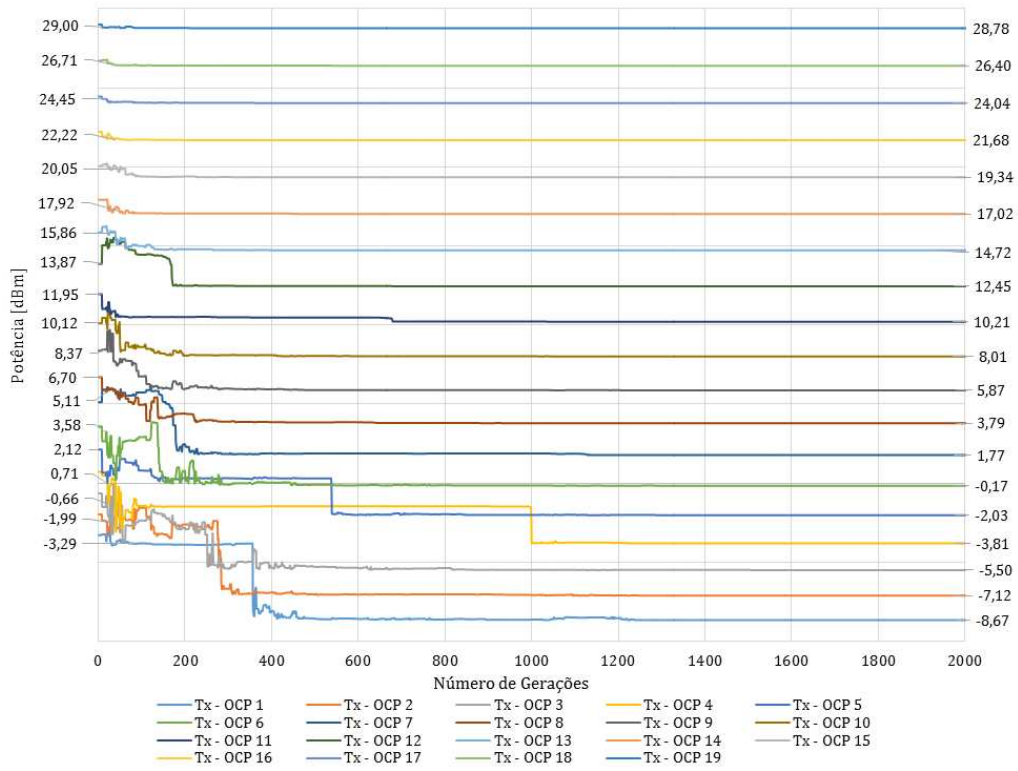


Figura 5.12: Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para  $K = 19$  a  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1,2$ ,  $C_2 = 1,8$ ,  $\mathcal{G} = 2000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

Tabela 5.7: SNIR em cada OCP para PSO 2 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
SNIR 1	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 2	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 3	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 4	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 5	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 6	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 7	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 8	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 9	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 10	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 11	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 12	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 13	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 14	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 15	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 16	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 17	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 18	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
SNIR 19	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00

## 5.7 PSO 3

Novamente com o objetivo de investigar a influência da determinação dos parâmetros para a solução encontrada por meio do PSO em redes OCDMA, é apresentado um PSO com seguintes parâmetros:  $C_1 = 1,5$ ,  $C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 8000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ , e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$  e peso inercial constante de  $\omega = 0,9$ . O algoritmo também foi executado seis vezes e os resultados são apresentados nas tabelas 5.20 e 5.21, a Tabela 5.20 exibe o valor de custo da função 4.6 e também as potências em dBm de  $\vec{b}_g^{best}$  de cada transmissor em cada OCP durante as seis execuções, a Tabela 5.21 exibe o valor da SNIR em cada OCP para o cada  $\vec{b}_g^{best}$  da Tabela 5.20. Foi investigado mais detalhadamente a primeira execução do algoritmo e os resultados obtidos são exibidos nos gráficos da seguinte forma: o Gráfico da Figura 5.13 exibe a evolução da SNIR, o Gráfico da Figura 5.14 exibe a evolução da função de custo e o Gráfico da figura 5.15 exibe e evolução da potência dos transmissores em cada OCP ao longo das gerações.

O PSO 3 ilustra um caso em que o algoritmo é fortemente influenciado pelos seus parâmetros, sendo muito penalizado por convergência prematura e alterando poucas vezes o seu valor de  $\vec{b}_g^{best}$  e incapaz de encontrar soluções ótimas.

Tabela 5.8: Potência e Custo do PSO 3 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
TX-OCP1	-6,23	-2,48	-3,43	-4,79	-5,65	-2,53
TX-OCP2	-3,19	-1,01	-2,04	-0,94	-1,21	-4,32
TX-OCP3	0,12	-1,49	-0,11	-4,06	-1,11	-1,02
TX-OCP4	-2,45	-0,13	2,25	-1,28	0,55	0,89
TX-OCP5	2,80	2,02	2,72	3,61	3,61	1,79
TX-OCP6	2,01	3,75	2,33	0,35	3,20	3,55
TX-OCP7	6,15	4,47	6,34	5,40	4,82	6,69
TX-OCP8	8,34	9,28	7,53	8,59	6,33	7,23
TX-OCP9	7,60	8,78	9,63	9,13	7,10	8,18
TX-OCP10	8,67	11,54	9,80	9,57	8,36	10,10
TX-OCP11	12,10	11,29	11,91	11,57	11,12	12,27
TX-OCP12	15,80	13,99	13,80	14,45	13,08	12,67
TX-OCP13	15,65	14,96	15,67	15,37	18,19	16,17
TX-OCP14	17,41	18,67	17,78	17,15	17,64	17,39
TX-OCP15	19,61	19,84	19,96	19,82	19,73	19,69
TX-OCP16	22,03	22,18	21,96	22,57	21,95	21,85
TX-OCP17	24,12	24,21	24,16	24,13	24,27	24,08
TX-OCP18	26,45	26,67	26,49	26,44	26,50	26,60
TX-OCP19	28,87	28,84	28,91	28,82	28,89	28,94
Custo	0,9344	0,9329	0,9339	0,9343	0,9335	0,9340

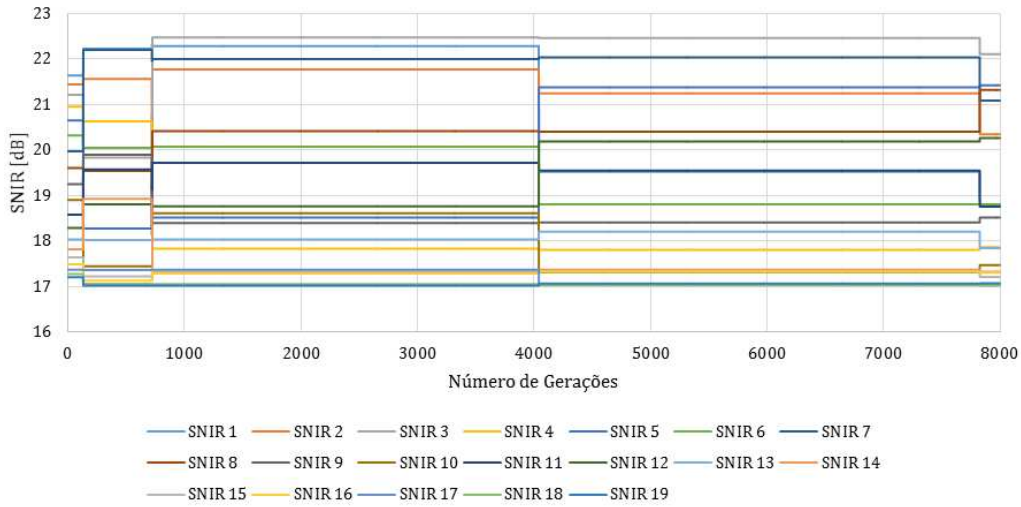


Figura 5.13: Evolução da SNIR em cada OCP para  $K = 19$  de  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1,5$ ,  $C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 8000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

Tabela 5.9: SNIR em cada OCP para PSO 3 em seis execuções.

	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6
SNIR 1	18,79	22,42	21,52	20,25	19,36	22,52
SNIR 2	20,35	22,39	21,41	22,62	22,33	19,20
SNIR 3	22,11	20,34	21,79	17,89	20,84	20,95
SNIR 4	17,86	20,07	22,52	19,04	20,87	21,23
SNIR 5	21,42	20,52	21,27	22,25	22,23	20,40
SNIR 6	18,81	20,47	19,07	17,14	20,00	20,36
SNIR 7	21,08	19,31	21,22	20,33	19,73	21,63
SNIR 8	21,32	22,20	20,45	21,57	19,28	20,19
SNIR 9	18,52	19,65	20,52	20,06	18,00	19,10
SNIR 10	17,48	20,32	18,58	18,39	17,16	18,92
SNIR 11	18,76	17,90	18,54	18,22	17,77	18,93
SNIR 12	20,26	18,41	18,22	18,90	17,51	17,11
SNIR 13	17,85	17,13	17,85	17,56	20,40	18,37
SNIR 14	17,33	18,58	17,68	17,06	17,55	17,31
SNIR 15	17,21	17,43	17,55	17,43	17,33	17,29
SNIR 16	17,31	17,44	17,23	17,85	17,22	17,12
SNIR 17	17,05	17,14	17,08	17,06	17,20	17,01
SNIR 18	17,02	17,24	17,06	17,01	17,07	17,17
SNIR 19	17,07	17,04	17,11	17,02	17,09	17,15

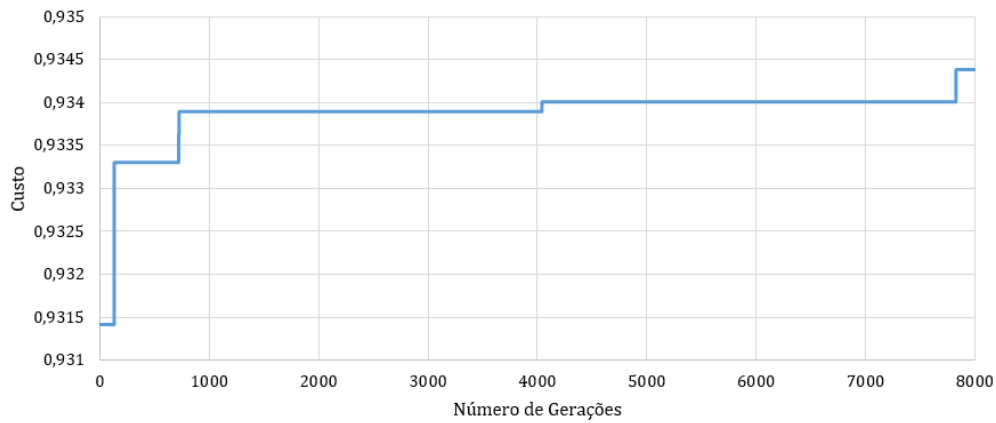


Figura 5.14: Evolução do valor da função de custo para  $K = 19$  de  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1,5$ ,  $C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 8000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

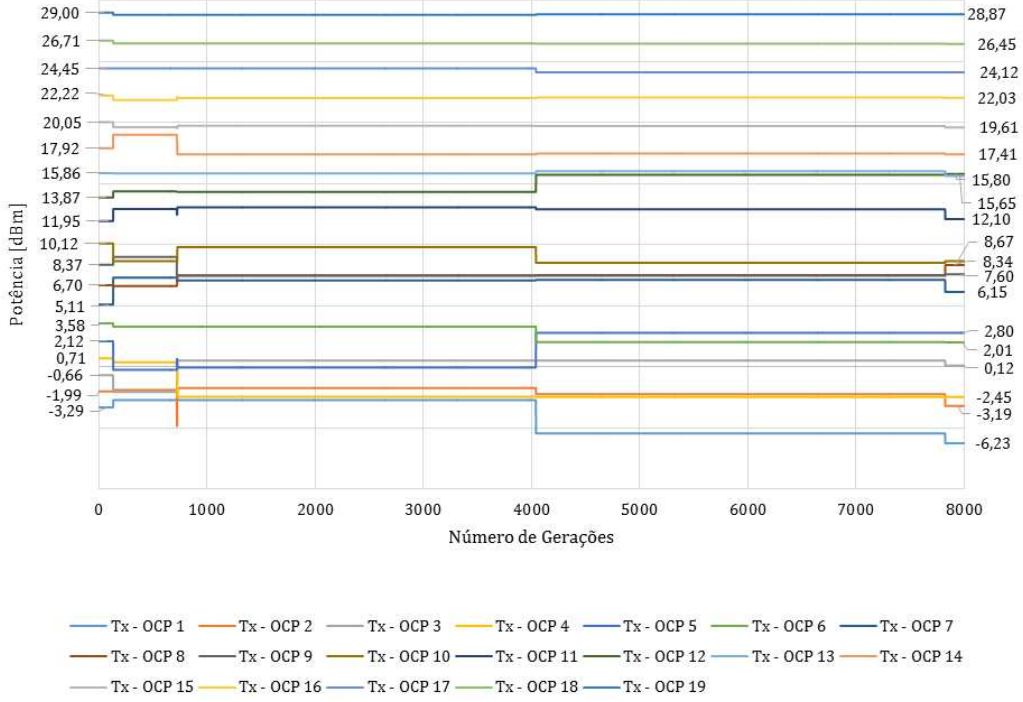


Figura 5.15: Evolução da Potência em cada transmissor de cada OCP para  $K = 19$  de  $\vec{b}_g^{best}$  em que  $C_1 = 1,5$ ,  $C_2 = 2$ ,  $\mathcal{G} = 8000$ ,  $\mathcal{P} = 21$ ,  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

## 5.8 Algoritmo de múltiplos enxames

A estratégia adotada pelo algoritmo MSO deste trabalho foi descrita anteriormente e consiste em três sub enxames cada um com tamanho de população  $\mathcal{P} = \frac{K}{2}$  e número de gerações  $\mathcal{G} = 100000$  para todos os sub enxames. O valor de  $\mathcal{G}$  foi escolhido baseado em que os algoritmos de múltiplos enxames apresentaram convergência mais lenta que o PSO clássico, desta forma o número de  $\mathcal{G}$  foi estabelecido para ser suficientemente grande de forma a permitir análises posteriores do desempenho do algoritmo.

O sub enxame 1 apresenta como parâmetros os coeficientes de atualização da velocidade  $C_1 = C_2 = 2$ ,  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ , e peso inercial linear apresentado pela equação (4.5) em que  $\omega_{inicial} = 0,9$  e  $\omega_{final} = 0,1$ . O sub enxame 2 apresenta coeficientes de atualização da velocidade  $C_1 = 1,2$  e  $C_2 = 1,8$ , peso inercial constante  $\omega = 0,7$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ . Por último, o sub enxame 3 apresenta  $C_1 = 1,5$ ,  $C_2 = 2$ , e peso inercial constante de  $\omega = 0,9$  e  $V_{max} = 0,2[5 \times \vec{b}_{k_0}^{best} - 0,8 \times \vec{b}_{k_0}^{best}]$ .

O primeiro método de atualização da posição das partículas consiste a cada

geração atualizar todas as partículas de um sub enxame de uma única vez, i.e., após atualizar todas partículas de um sub enxame, outro sub enxame tem todas suas partículas atualizadas, e isto ocorre até todos sub enxames tiverem sido atualizados, após todos sub enxames serem atualizados ocorre a iteração para próxima geração. O segundo método consiste em atualizar uma partícula de cada sub enxame por vez, i.e., somente após todas as partículas forem atualizadas uma nova iteração da geração é produzida.

## 5.9 Primeiro Método de Atualização das Partículas para algoritmo de 3 sub enxames

Nesta subsecção são apresentados os resultados obtidos através do algoritmo de múltiplos enxames pelo primeiro método de atualização dos enxames descrito anteriormente em uma rede descrita pela tabela 5.3

O gráfico apresentado pela Figura 5.16 exhibe o valor da função de custo e o gráfico exibido pela Figura 5.17 exhibe a evolução da SNIR em cada OCP ao longo das gerações. O gráfico ilustrado pela Figura 5.18 exhibe de qual sub enxame encontrou a solução  $\vec{b}_g^{best}$  até o momento.

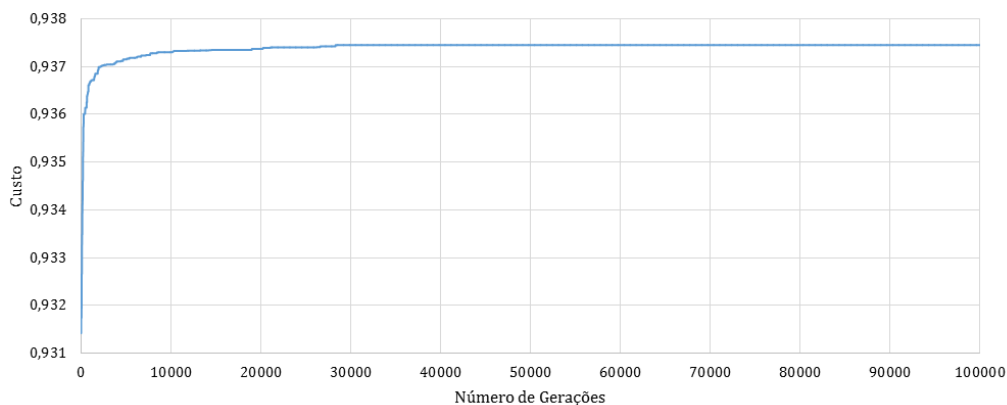


Figura 5.16: Evolução do valor da função de custo para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1.

A Tabela ?? exhibe o valor final de cada partícula em dBm e também o valor de custo para cada  $(\vec{b}_p^{best})$  do sub enxame 1, a Tabela ?? exhibe o valor final da potência em dBm de cada partícula  $(\vec{b}_p^{best})$  do sub enxame 2 e da mesma forma a Tabela ?? exhibe o valor final para cada partícula  $(\vec{b}_p^{best})$  do sub enxame 3. Todos os valores das  $\vec{b}_p^{best}$  de cada sub enxame estão em dBm. As Tabelas ??, ??, ?? apresentam a SNIR para  $\vec{b}_p^{best}$  dos sub enxames 1, 2 e 3 respectivamente. Os



Figura 5.17: Evolução do SNIR em cada OCP para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1.

valores em destaque significam valores de SNIR ( $\gamma$ ) que não estão compreendidos entre  $\gamma^* \leq \gamma \leq \gamma_{max}$ .

Conforme observado pelo gráfico da figura 5.18, apenas os sub enxames 1 e 2 foram responsáveis pelo  $\vec{b}_g^{best}$  i.e., o PSO que apresentou parâmetros fortemente influenciados não conseguiu impor sua  $\vec{b}_g^{best}$  como  $\vec{b}_g^{best}$  global, o sub enxame 2 que estabelecidos com parâmetros que conseguem encontrar soluções ótimas com menores gerações encontrou uma quantidade maior de melhores soluções, o algoritmo atingiu a convergência em 28323 e não foi capaz de encontrar uma solução óptima. Através das Tabelas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15, é possível observar que ao final de  $\mathcal{G} = 100000$  existem partículas que nunca foram capazes de encontrar soluções válidas.

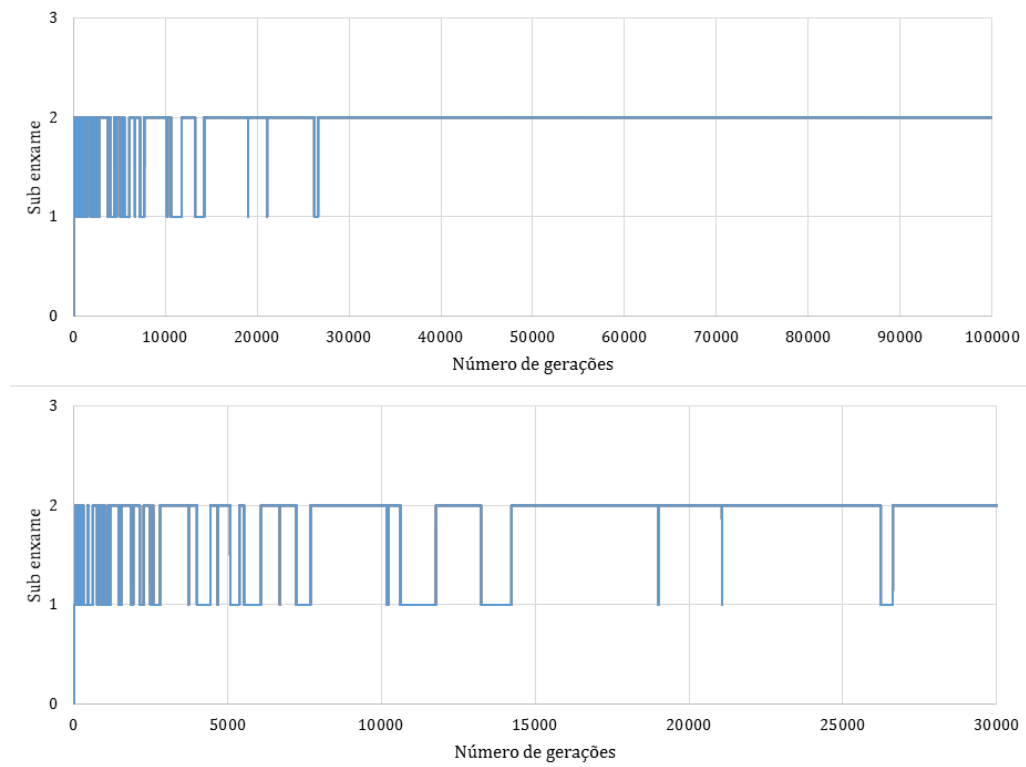


Figura 5.18: Sub enxame de origem da  $\vec{b}_g^{best}$  para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1.

Tabela 5.10: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 1 para o algoritmo de múltiplos exames do método 1.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-1,07	-3,10	-3,55	-3,23	1,61
Tx - OCP2	-0,27	-3,85	-4,98	-6,47	1,75
Tx - OCP3	2,24	-2,69	-1,28	-2,84	1,47
Tx - OCP4	4,36	1,05	-2,78	-0,98	5,01
Tx - OCP5	5,10	2,47	-1,05	-1,20	5,53
Tx - OCP6	9,43	0,12	3,09	0,09	6,54
Tx - OCP7	9,90	1,98	5,87	1,98	5,85
Tx - OCP8	10,87	4,51	6,50	4,99	8,50
Tx - OCP9	12,85	9,04	6,95	6,09	11,89
Tx - OCP10	13,20	8,16	8,91	8,09	12,83
Tx - OCP11	12,33	11,59	10,42	10,30	13,78
Tx - OCP12	16,14	13,34	13,33	12,48	12,88
Tx - OCP13	17,33	15,19	15,03	14,83	15,85
Tx - OCP14	20,88	17,23	17,19	17,06	22,11
Tx - OCP15	22,07	19,67	19,52	19,36	24,68
Tx - OCP16	24,05	21,73	21,94	21,70	23,95
Tx - OCP17	27,90	24,08	24,47	24,05	29,54
Tx - OCP18	29,14	26,47	26,50	26,41	30,75
Tx - OCP19	30,24	28,82	28,85	28,78	30,62
Custo	0,6272	0,9360	0,9349	0,9374	0,6489
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	0,38	0,12	-3,21	-3,68	-3,35
Tx - OCP2	0,99	2,22	3,33	4,03	-5,99
Tx - OCP3	3,13	4,18	3,23	3,97	-2,24
Tx - OCP4	4,76	4,93	2,67	3,20	-0,68
Tx - OCP5	4,30	6,03	7,43	3,83	-1,51
Tx - OCP6	7,03	6,60	7,46	3,99	0,39
Tx - OCP7	6,36	6,85	9,55	8,46	1,90
Tx - OCP8	8,85	9,97	9,59	8,79	4,04
Tx - OCP9	11,28	11,00	11,85	9,93	6,89
Tx - OCP10	14,57	11,27	14,88	12,31	8,16
Tx - OCP11	14,73	15,33	15,30	12,77	10,34
Tx - OCP12	15,52	17,36	17,28	15,75	12,48
Tx - OCP13	15,66	19,77	20,30	19,58	14,76
Tx - OCP14	19,86	20,05	21,16	21,00	17,05
Tx - OCP15	20,05	25,92	23,48	19,76	19,38
Tx - OCP16	26,80	26,44	23,94	22,95	21,71
Tx - OCP17	28,18	28,85	26,81	26,73	24,05
Tx - OCP18	29,20	30,55	27,85	27,21	26,41
Tx - OCP19	30,20	31,10	30,69	30,40	28,78
Custo	0,6736	0,6523	0,5776	0,8011	0,9374

Tabela 5.11: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do subenxame 1 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	21,75	22,23	21,75	22,35	<b>23,94</b>
SNIR 2	21,16	19,93	18,77	17,53	<b>22,70</b>
SNIR 3	22,26	19,50	20,91	19,56	20,99
SNIR 4	<b>22,91</b>	21,60	17,72	19,75	<b>23,10</b>
SNIR 5	22,08	21,27	17,71	17,74	22,09
SNIR 6	<b>24,85</b>	17,07	20,05	17,18	21,51
SNIR 7	<b>23,59</b>	17,02	20,93	17,15	19,14
SNIR 8	<b>22,76</b>	17,57	19,56	18,16	20,06
SNIR 9	<b>22,89</b>	20,07	17,95	17,18	21,65
SNIR 10	21,27	17,04	17,79	17,04	20,67
SNIR 11	18,36	18,31	17,13	17,07	19,63
SNIR 12	20,10	17,83	17,82	17,01	16,67
SNIR 13	19,13	17,42	17,26	17,09	17,53
SNIR 14	20,50	17,18	17,13	17,03	21,64
SNIR 15	19,44	17,30	17,14	17,00	22,01
SNIR 16	19,15	17,02	17,23	17,00	18,99
SNIR 17	20,71	17,02	17,41	17,00	22,32
SNIR 18	19,61	17,05	17,08	17,00	21,21
SNIR 19	18,37	17,03	17,06	17,00	18,72

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	<b>23,21</b>	22,00	19,42	19,77	22,22
SNIR 2	22,43	<b>22,76</b>	<b>24,65</b>	<b>26,18</b>	18,00
SNIR 3	23,16	<b>23,34</b>	<b>23,11</b>	<b>24,62</b>	20,16
SNIR 4	<b>23,31</b>	<b>22,65</b>	21,03	22,28	20,04
SNIR 5	21,27	22,26	<b>24,31</b>	21,31	17,42
SNIR 6	22,39	21,26	<b>22,70</b>	19,78	17,48
SNIR 7	20,00	19,86	<b>23,12</b>	22,53	17,06
SNIR 8	20,71	21,29	21,37	21,02	17,19
SNIR 9	21,29	20,53	21,78	20,23	17,98
SNIR 10	<b>22,66</b>	18,91	<b>22,90</b>	20,63	17,11
SNIR 11	20,77	21,04	21,30	19,01	17,10
SNIR 12	19,47	21,05	21,20	19,87	17,01
SNIR 13	17,45	21,37	22,10	21,54	17,02
SNIR 14	19,46	19,48	20,75	20,72	17,02
SNIR 15	17,41	<b>23,20</b>	20,84	17,20	17,03
SNIR 16	21,92	21,44	19,01	18,11	17,01
SNIR 17	20,99	21,58	19,60	19,58	17,01
SNIR 18	19,67	20,97	18,31	17,71	17,00
SNIR 19	18,33	19,18	18,81	18,56	17,00

Tabela 5.12: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 2 para o algoritmo de múltiplos exames do método 1.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-4,70	-3,64	0,24	-4,51	-3,78
Tx - OCP2	-5,32	-4,97	1,98	-6,40	-5,00
Tx - OCP3	-0,58	-2,32	3,36	-2,65	-0,39
Tx - OCP4	0,34	-0,44	3,92	-0,66	0,67
Tx - OCP5	2,04	-1,07	7,34	-1,23	0,42
Tx - OCP6	3,36	0,42	7,50	0,12	3,98
Tx - OCP7	5,67	1,98	7,56	1,86	5,89
Tx - OCP8	7,50	3,88	9,93	4,11	4,56
Tx - OCP9	10,07	8,17	12,80	6,77	9,87
Tx - OCP10	9,64	8,12	16,31	8,16	8,82
Tx - OCP11	10,97	10,35	16,50	10,30	12,11
Tx - OCP12	13,01	12,49	19,22	12,47	13,16
Tx - OCP13	14,88	14,83	19,90	14,77	16,54
Tx - OCP14	18,35	17,04	24,11	17,07	18,86
Tx - OCP15	19,45	19,39	24,47	19,36	21,70
Tx - OCP16	21,97	21,71	25,26	21,70	21,98
Tx - OCP17	24,28	24,05	26,28	24,04	24,22
Tx - OCP18	26,60	26,41	28,47	26,41	26,81
Tx - OCP19	28,88	28,79	29,47	28,78	29,26
Custo	0,9339	0,9372	0,5869	0,9374	0,9280
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	-2,48	-3,47	-3,57	-3,34	-4,38
Tx - OCP2	-4,49	-4,01	-3,80	-3,13	-6,52
Tx - OCP3	-1,26	0,15	-0,90	0,24	-2,64
Tx - OCP4	-2,14	1,25	-0,16	-3,26	-0,63
Tx - OCP5	0,96	3,23	1,67	-0,28	-1,19
Tx - OCP6	4,22	5,85	2,86	1,01	-0,09
Tx - OCP7	2,99	6,48	5,97	2,81	1,94
Tx - OCP8	5,44	7,18	7,48	5,22	4,12
Tx - OCP9	8,71	8,69	10,30	7,55	6,62
Tx - OCP10	11,77	9,40	10,05	10,57	8,05
Tx - OCP11	11,08	12,39	11,77	10,33	10,30
Tx - OCP12	12,62	13,84	13,74	13,82	12,47
Tx - OCP13	14,90	15,70	16,05	15,93	14,80
Tx - OCP14	17,16	18,50	17,94	17,58	17,05
Tx - OCP15	19,70	22,73	20,49	21,02	19,36
Tx - OCP16	22,43	22,03	21,76	21,72	21,69
Tx - OCP17	24,08	24,22	24,10	24,09	24,05
Tx - OCP18	26,63	26,92	26,46	26,45	26,41
Tx - OCP19	29,33	29,09	28,83	28,80	28,78
Custo	0,9312	0,9274	0,9342	0,9347	0,9374

Tabela 5.13: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub enxame 2 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	20,37	21,89	22,41	21,07	21,00
SNIR 2	18,23	18,99	<b>22,81</b>	17,61	18,28
SNIR 3	21,42	20,05	<b>22,79</b>	19,77	21,37
SNIR 4	20,69	20,25	21,89	20,08	20,81
SNIR 5	20,68	17,85	<b>23,83</b>	17,72	18,84
SNIR 6	20,19	17,49	22,39	17,23	20,64
SNIR 7	20,61	17,13	20,78	17,04	20,69
SNIR 8	20,48	17,03	21,43	17,28	17,39
SNIR 9	21,02	19,26	22,50	17,87	20,71
SNIR 10	18,47	17,06	<b>24,15</b>	17,12	17,56
SNIR 11	17,63	17,11	22,34	17,07	18,71
SNIR 12	17,46	17,01	<b>23,03</b>	17,01	17,55
SNIR 13	17,08	17,09	21,57	17,04	18,70
SNIR 14	18,27	17,01	<b>23,65</b>	17,03	18,76
SNIR 15	17,05	17,03	21,77	17,01	19,29
SNIR 16	17,25	17,01	20,29	17,01	17,23
SNIR 17	17,21	17,00	19,02	17,00	17,14
SNIR 18	17,17	17,00	18,89	17,00	17,38
SNIR 19	17,09	17,01	17,56	17,00	17,45

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	23,21	22,00	19,42	19,77	22,22
SNIR 2	22,43	22,76	24,65	26,18	18,00
SNIR 3	23,16	23,34	23,11	24,62	20,16
SNIR 4	23,31	22,65	21,03	22,28	20,04
SNIR 5	21,27	22,26	24,31	21,31	17,42
SNIR 6	22,39	21,26	22,70	19,78	17,48
SNIR 7	20,00	19,86	23,12	22,53	17,06
SNIR 8	20,71	21,29	21,37	21,02	17,19
SNIR 9	21,29	20,53	21,78	20,23	17,98
SNIR 10	22,66	18,91	22,90	20,63	17,11
SNIR 11	20,77	21,04	21,30	19,01	17,10
SNIR 12	19,47	21,05	21,20	19,87	17,01
SNIR 13	17,45	21,37	22,10	21,54	17,02
SNIR 14	19,46	19,48	20,75	20,72	17,02
SNIR 15	17,41	23,20	20,84	17,20	17,03
SNIR 16	21,92	21,44	19,01	18,11	17,01
SNIR 17	20,99	21,58	19,60	19,58	17,01
SNIR 18	19,67	20,97	18,31	17,71	17,00
SNIR 19	18,33	19,18	18,81	18,56	17,00

Tabela 5.14: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 3 para o algoritmo de múltiplos exames do método 1.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-4,46	-0,61	-3,20	1,49	-2,65
Tx - OCP2	-0,14	0,45	-2,26	3,33	-0,39
Tx - OCP3	1,65	1,95	-2,82	3,38	-3,87
Tx - OCP4	2,38	3,56	-1,63	5,22	1,41
Tx - OCP5	4,41	4,55	0,09	5,96	4,78
Tx - OCP6	5,89	4,88	1,84	7,77	3,52
Tx - OCP7	6,30	6,98	2,69	9,30	4,89
Tx - OCP8	8,63	7,99	6,49	10,29	9,60
Tx - OCP9	10,15	11,74	6,67	14,71	9,87
Tx - OCP10	11,17	10,81	9,43	14,86	11,50
Tx - OCP11	14,05	12,74	11,02	15,26	12,08
Tx - OCP12	16,87	17,67	13,61	19,76	17,23
Tx - OCP13	17,03	18,31	16,02	19,78	17,47
Tx - OCP14	20,68	20,71	17,69	21,77	19,89
Tx - OCP15	21,72	22,15	21,92	25,74	22,96
Tx - OCP16	24,61	25,63	21,78	28,34	22,72
Tx - OCP17	26,10	26,88	24,73	30,96	25,86
Tx - OCP18	26,67	28,50	26,52	31,04	27,38
Tx - OCP19	29,38	29,90	28,87	31,60	30,00
Custo	0,9148	0,8957	0,9314	0,5783	0,9106
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	-4,22	-3,75	-0,82	1,16	0,51
Tx - OCP2	0,53	4,17	-4,78	2,81	2,18
Tx - OCP3	2,33	5,97	1,71	4,90	3,06
Tx - OCP4	1,94	6,07	3,28	5,24	6,34
Tx - OCP5	4,70	6,72	1,37	7,76	7,73
Tx - OCP6	7,06	7,58	4,54	7,97	9,01
Tx - OCP7	6,72	9,87	7,05	8,09	11,24
Tx - OCP8	9,08	9,96	8,70	8,57	11,64
Tx - OCP9	9,78	14,46	9,83	14,25	13,97
Tx - OCP10	13,62	17,02	12,26	15,06	15,78
Tx - OCP11	14,67	18,01	15,19	15,34	16,54
Tx - OCP12	17,22	19,80	17,42	15,46	19,57
Tx - OCP13	18,14	20,40	18,51	19,04	20,03
Tx - OCP14	21,99	20,55	20,79	21,10	22,41
Tx - OCP15	20,05	22,74	22,65	21,48	24,62
Tx - OCP16	24,67	23,97	24,88	27,84	25,05
Tx - OCP17	28,32	26,10	27,12	28,16	29,50
Tx - OCP18	28,02	28,85	27,65	29,44	31,30
Tx - OCP19	29,78	29,85	28,56	30,67	31,55
Custo	0,8955	0,4289	0,8811	0,4180	0,4719

Tabela 5.15: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub enxame 3 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 1 .

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	19,28	22,56	21,85	22,35	21,19
SNIR 2	22,21	22,22	21,28	<b>22,88</b>	22,03
SNIR 3	22,52	22,27	19,14	21,57	17,02
SNIR 4	21,70	22,38	18,69	22,02	20,78
SNIR 5	22,13	21,80	18,69	21,32	22,55
SNIR 6	21,91	20,46	18,64	21,64	19,56
SNIR 7	20,53	20,85	17,60	21,61	19,14
SNIR 8	21,01	20,04	19,44	20,96	22,02
SNIR 9	20,58	21,92	17,58	<b>23,71</b>	20,33
SNIR 10	19,59	18,99	18,24	22,04	19,95
SNIR 11	20,39	18,88	17,67	20,55	18,42
SNIR 12	21,07	21,73	18,06	23,13	21,46
SNIR 13	19,03	20,20	18,22	21,09	19,48
SNIR 14	20,45	20,39	17,61	20,98	19,66
SNIR 15	19,21	19,57	19,54	<b>22,82</b>	20,47
SNIR 16	19,80	20,77	17,06	<b>23,23</b>	17,91
SNIR 17	18,97	19,71	17,67	<b>23,60</b>	18,73
SNIR 18	17,18	18,99	17,10	21,38	17,90
SNIR 19	17,54	18,04	17,08	19,61	18,17

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	18,86	18,39	22,64	<b>23,22</b>	21,71
SNIR 2	22,24	<b>25,05</b>	17,21	<b>23,53</b>	22,06
SNIR 3	22,61	<b>25,46</b>	22,28	<b>24,25</b>	21,58
SNIR 4	20,69	<b>24,08</b>	22,33	<b>23,12</b>	<b>23,48</b>
SNIR 5	21,90	<b>23,20</b>	18,80	<b>24,16</b>	<b>23,42</b>
SNIR 6	22,63	22,48	20,32	<b>22,78</b>	<b>23,18</b>
SNIR 7	20,54	<b>23,13</b>	21,09	21,23	<b>23,84</b>
SNIR 8	21,11	21,47	20,91	19,98	22,56
SNIR 9	19,91	<b>24,20</b>	20,12	<b>23,91</b>	<b>23,17</b>
SNIR 10	21,81	<b>24,88</b>	20,57	<b>22,82</b>	<b>23,15</b>
SNIR 11	20,81	<b>23,88</b>	21,44	21,12	21,99
SNIR 12	21,27	<b>23,62</b>	21,55	19,18	<b>23,06</b>
SNIR 13	20,01	22,09	20,46	20,67	21,45
SNIR 14	21,67	20,04	20,51	20,58	21,71
SNIR 15	17,45	20,02	20,11	18,73	21,76
SNIR 16	19,80	18,99	20,05	<b>22,89</b>	19,95
SNIR 17	21,16	18,83	19,97	20,89	22,16
SNIR 18	18,50	19,27	18,15	19,86	21,67
SNIR 19	17,91	17,94	16,70	18,76	19,59

## 5.10 Segundo Método de Atualização das Partículas para o algoritmo de 3 sub enxames

Nesta subsecção são apresentados os resultados obtidos através do algoritmo de múltiplos enxames pelo segundo método de atualização dos enxames descrito anteriormente. Conforme é descrito na literatura, os algoritmos de múltiplos enxames possuem convergência mais lenta que o PSO canônico, dessa forma foi adotado um número de gerações  $\mathcal{G} = 100000$ , os sub enxames são os mesmos sub enxames descritos anteriormente pela secção 5.5.1.

A evolução da função de custo é mostrada pelo gráfico da figura 5.20, a evolução da SNIR em cada OCP é exibido pelo gráfico da figura 5.19 e o enxame de origem da  $\vec{b}_g^{best}$  é informado pelo gráfico da figura 5.21

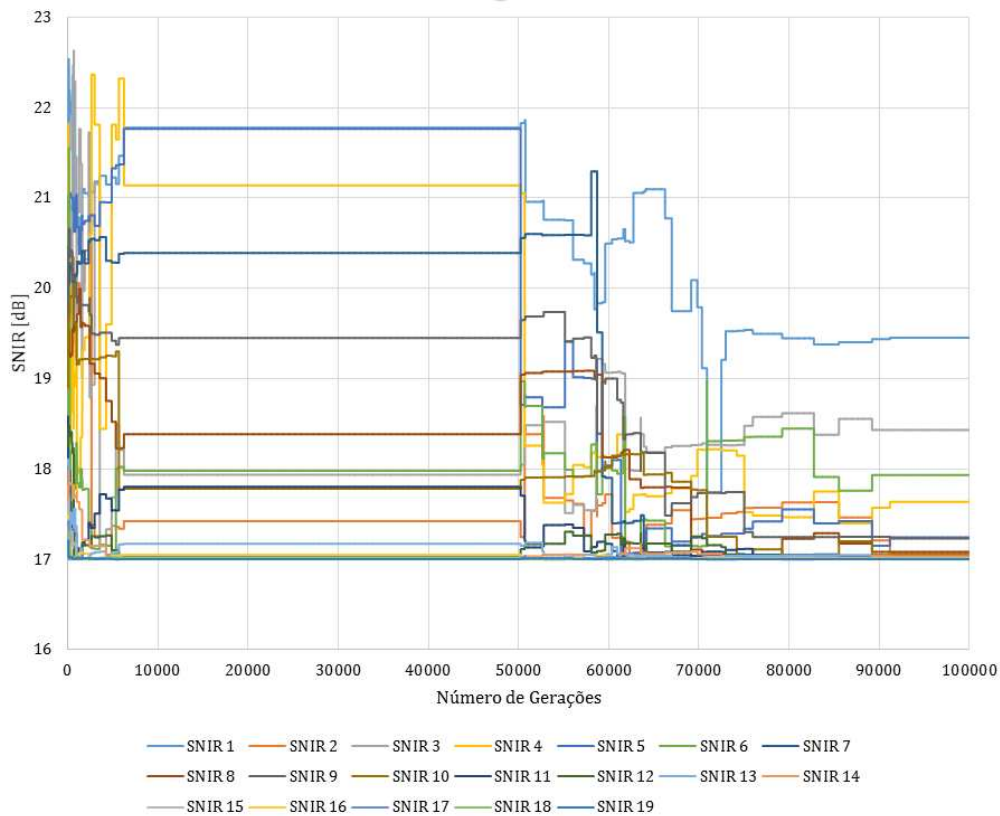


Figura 5.19: Evolução da SNIR em cada OCP de  $\vec{b}_g^{best}$  para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2.

As tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 informam o valor de custo e a potência em dBm para cada  $\vec{b}_p^{best}$  dos sub enxames 1, 2 e 3 respectivamente. As Tabelas 5.19, 5.20 e 5.21 informam a SNIR para cada  $\vec{b}_p^{best}$  dos sub enxames 1, 2 e 3 respectivamente. Os

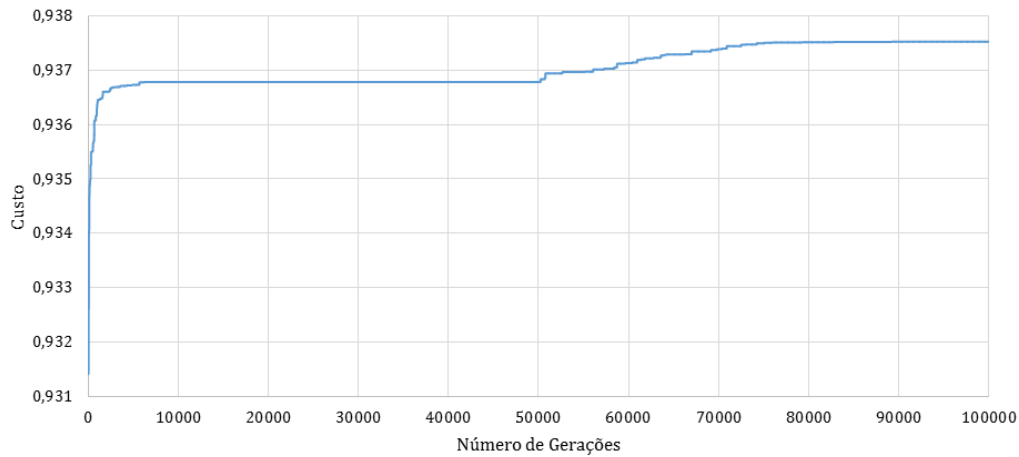


Figura 5.20: Evolução da função de custo de  $\vec{b}_g^{best}$  para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2.

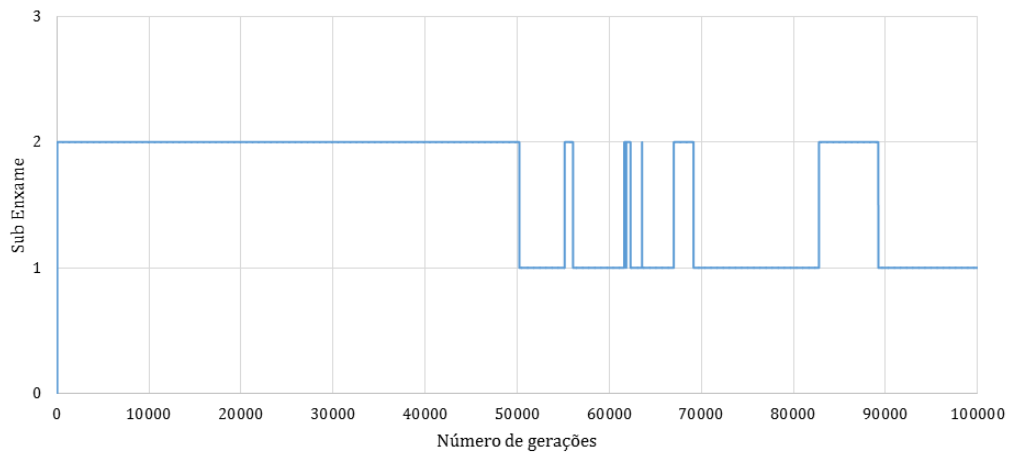


Figura 5.21: Enxame de origem  $\vec{b}_g^{best}$  para o algoritmo de enxames múltiplos de método 2 .

valores em destaque mostram que a SNIR está acima do limite da SNIR máxima ou abaixo da SNIR alvo.

Embora o algoritmo de método 2 também não tenha alcançado soluções ótimas de forma a conseguir a SNIR mínima em todos os OCP's, o algoritmo foi capaz de abandonar a convergência em  $\mathcal{G} = 50050$ , através do gráfico da função de custo exibido pela figura 5.20. Até  $\mathcal{G} = 50500$  a solução  $\vec{b}_g^{best}$  era fornecida pelo sub enxame 2, então uma nova solução  $\vec{b}_g^{best}$  é encontrada pelo sub enxame 1, isso possibilitou o algoritmo abandonar a convergência encontrada anteriormente e continuar a procurar por uma solução com maior valor de custo.

Da mesma maneira como no PSO de múltiplos enxames, existem partículas que mesmo após  $\mathcal{G} = 100000$  nunca foram capazes de gerar soluções válidas.

Tabela 5.16: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub enxame 1 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-5,98	-1,45	-5,99	-2,17	-3,00
Tx - OCP2	-5,39	-0,90	1,32	0,36	1,13
Tx - OCP3	-3,66	-1,21	-4,12	2,88	1,57
Tx - OCP4	-1,95	0,96	1,29	4,06	0,40
Tx - OCP5	-1,26	4,68	4,69	6,80	4,19
Tx - OCP6	0,40	3,77	2,48	7,99	1,94
Tx - OCP7	1,93	8,71	6,11	8,06	4,99
Tx - OCP8	5,51	9,73	9,66	10,82	7,44
Tx - OCP9	7,88	11,70	11,16	11,77	10,93
Tx - OCP10	9,83	14,83	11,78	12,85	11,72
Tx - OCP11	10,59	13,84	14,71	11,03	15,60
Tx - OCP12	14,06	17,00	14,88	17,69	17,03
Tx - OCP13	15,07	17,60	18,75	18,51	20,25
Tx - OCP14	17,07	21,73	19,94	21,15	20,10
Tx - OCP15	19,52	25,31	22,63	25,15	22,16
Tx - OCP16	22,07	27,12	22,38	25,62	24,37
Tx - OCP17	24,09	28,14	24,17	26,31	27,27
Tx - OCP18	26,53	29,14	23,52	27,90	28,24
Tx - OCP19	28,94	30,30	29,94	30,36	29,13
Custo	0,9348	0,82	0,78	0,68	0,8508
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	-4,79	-6,18	-2,30	1,58	-5,72
Tx - OCP2	1,49	-7,00	-1,45	2,00	0,66
Tx - OCP3	1,20	-4,04	1,39	2,60	1,44
Tx - OCP4	4,14	-3,14	0,67	3,66	3,25
Tx - OCP5	4,45	-1,75	4,11	4,19	3,88
Tx - OCP6	3,35	0,79	6,08	5,72	5,98
Tx - OCP7	8,59	1,84	4,75	9,20	7,75
Tx - OCP8	6,78	3,89	7,79	11,42	9,23
Tx - OCP9	9,27	6,12	9,01	12,54	11,73
Tx - OCP10	12,79	8,07	11,59	15,35	12,58
Tx - OCP11	12,48	10,25	15,61	17,32	14,47
Tx - OCP12	16,40	12,47	16,37	17,60	16,48
Tx - OCP13	15,10	14,74	16,32	19,60	18,55
Tx - OCP14	20,14	17,06	20,33	19,96	20,41
Tx - OCP15	22,15	19,36	23,44	23,82	22,29
Tx - OCP16	24,25	21,69	23,54	24,15	24,36
Tx - OCP17	27,69	24,04	26,01	25,89	27,24
Tx - OCP18	28,78	26,41	27,09	27,39	28,26
Tx - OCP19	29,24	28,78	29,65	30,86	29,80
Custo	0,7437	0,9375	0,9117	0,5828	0,8994

Tabela 5.17: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 2 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-2,98	-3,59	-4,03	-4,52	-4,46
Tx - OCP2	-0,73	-6,39	-3,49	-5,33	-3,55
Tx - OCP3	1,17	-4,29	-3,70	-2,84	-0,49
Tx - OCP4	1,53	0,56	-0,83	2,06	-2,44
Tx - OCP5	7,46	2,92	2,47	2,40	3,86
Tx - OCP6	9,72	1,00	2,90	1,02	1,59
Tx - OCP7	10,13	5,30	4,71	5,21	4,44
Tx - OCP8	12,33	5,30	5,61	5,73	7,33
Tx - OCP9	14,15	8,42	8,35	8,32	8,62
Tx - OCP10	14,30	8,88	11,17	8,69	10,22
Tx - OCP11	17,46	11,08	10,90	11,30	10,33
Tx - OCP12	18,97	12,54	12,90	12,81	13,62
Tx - OCP13	20,02	14,94	15,13	15,06	15,55
Tx - OCP14	21,76	17,07	17,19	17,23	17,35
Tx - OCP15	21,82	19,39	19,59	19,45	19,57
Tx - OCP16	27,54	21,75	22,10	21,72	21,75
Tx - OCP17	30,31	24,07	24,12	24,10	24,30
Tx - OCP18	30,40	26,43	26,47	26,43	26,50
Tx - OCP19	30,89	28,79	28,81	28,79	28,82
Custo	0,5139	0,9368	0,9355	0,9366	0,9352
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	-3,91	-6,22	-3,19	-6,02	-3,08
Tx - OCP2	-3,75	-6,61	-4,48	-4,60	-4,53
Tx - OCP3	-2,17	-3,91	-2,38	-1,99	-3,31
Tx - OCP4	1,94	-3,37	0,68	0,04	-1,22
Tx - OCP5	2,18	-1,57	3,40	2,34	1,47
Tx - OCP6	3,09	0,62	0,90	2,25	3,62
Tx - OCP7	6,71	1,84	5,12	5,15	5,36
Tx - OCP8	9,40	3,98	5,54	6,67	6,19
Tx - OCP9	8,46	6,14	7,67	9,31	9,37
Tx - OCP10	11,23	8,23	9,27	12,05	10,50
Tx - OCP11	11,59	10,24	11,28	11,25	10,88
Tx - OCP12	14,39	12,47	13,84	14,15	13,80
Tx - OCP13	15,52	14,77	15,40	15,02	15,00
Tx - OCP14	17,45	17,04	17,22	18,04	17,49
Tx - OCP15	19,53	19,35	19,86	19,54	20,15
Tx - OCP16	21,95	21,69	21,99	22,01	24,34
Tx - OCP17	24,10	24,04	24,65	24,23	24,18
Tx - OCP18	26,50	26,41	26,95	26,44	26,65
Tx - OCP19	28,94	28,78	28,92	28,82	28,82
Custo	0,9341	0,9375	0,9317	0,9346	0,9302

Tabela 5.18: Potência e custo para cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub enxame 3 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
Tx - OCP1	-2,76	-3,47	-5,75	-3,25	-3,51
Tx - OCP2	0,96	-4,38	0,06	-1,05	-0,18
Tx - OCP3	1,59	0,79	-0,81	-0,72	0,79
Tx - OCP4	3,67	0,21	1,83	0,75	2,23
Tx - OCP5	4,75	2,32	4,17	3,00	7,20
Tx - OCP6	7,47	1,42	3,15	4,24	7,45
Tx - OCP7	8,80	5,21	4,75	2,49	7,39
Tx - OCP8	10,09	6,23	8,51	6,71	9,77
Tx - OCP9	11,50	9,64	10,13	8,56	9,98
Tx - OCP10	12,31	10,90	9,33	8,82	13,12
Tx - OCP11	16,00	11,30	12,32	11,95	14,37
Tx - OCP12	18,55	13,90	16,36	13,76	19,96
Tx - OCP13	19,79	15,22	16,43	16,08	21,46
Tx - OCP14	22,04	17,75	19,77	18,76	21,43
Tx - OCP15	24,90	19,66	22,61	23,14	21,69
Tx - OCP16	25,10	21,88	24,16	22,45	24,28
Tx - OCP17	27,78	24,09	25,27	25,22	26,76
Tx - OCP18	29,87	26,51	26,52	28,01	27,99
Tx - OCP19	31,19	28,82	28,75	29,02	29,82
Custo	0,8635	0,8824	0,8441	0,9194	0,6963
	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
Tx - OCP1	-1,33	-0,49	0,72	0,46	-1,81
Tx - OCP2	-0,53	2,00	1,81	0,16	0,56
Tx - OCP3	-0,19	2,67	2,78	1,14	1,80
Tx - OCP4	5,89	2,25	3,40	2,86	4,30
Tx - OCP5	4,75	3,69	5,84	2,44	4,07
Tx - OCP6	8,11	6,56	5,18	4,69	4,82
Tx - OCP7	9,56	9,27	7,12	7,43	6,43
Tx - OCP8	9,66	11,64	10,48	9,93	8,87
Tx - OCP9	14,01	11,76	12,53	10,79	10,86
Tx - OCP10	15,18	15,09	12,50	15,10	12,67
Tx - OCP11	17,83	14,53	15,65	16,07	15,47
Tx - OCP12	18,78	18,32	16,78	15,63	15,72
Tx - OCP13	20,88	20,64	18,08	17,63	20,11
Tx - OCP14	20,63	22,33	22,63	17,61	22,05
Tx - OCP15	22,38	24,84	23,34	21,88	23,50
Tx - OCP16	25,78	25,19	23,26	21,56	25,84
Tx - OCP17	26,75	28,23	29,33	27,20	26,30
Tx - OCP18	27,09	29,39	28,26	28,91	28,93
Tx - OCP19	30,93	31,21	31,22	30,17	30,42
Custo	0,5269	0,7069	0,7677	0,7478	0,8331

Tabela 5.19: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 1 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2 .

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	19,39	20,91	18,20	20,55	20,34
SNIR 2	18,44	20,09	<b>24,13</b>	21,70	<b>23,10</b>
SNIR 3	18,58	18,36	17,11	<b>22,82</b>	22,07
SNIR 4	18,63	19,07	20,98	22,52	19,35
SNIR 5	17,57	21,29	<b>22,75</b>	<b>23,74</b>	21,58
SNIR 6	17,39	18,77	18,77	<b>23,31</b>	17,64
SNIR 7	17,00	22,08	20,60	<b>21,66</b>	18,96
SNIR 8	18,61	21,35	22,27	22,66	19,59
SNIR 9	18,92	21,50	21,80	21,75	21,19
SNIR 10	18,74	<b>22,73</b>	20,36	20,88	19,98
SNIR 11	17,32	19,73	21,19	17,03	21,83
SNIR 12	18,57	20,84	19,17	21,64	21,14
SNIR 13	17,31	19,30	20,84	20,30	22,20
SNIR 14	17,02	21,27	19,77	20,75	19,81
SNIR 15	17,16	22,65	20,17	22,54	19,60
SNIR 16	17,36	22,20	17,60	20,71	19,53
SNIR 17	17,04	20,91	17,05	19,09	20,11
SNIR 18	17,11	19,59	<b>14,05</b>	18,36	18,74
SNIR 19	17,16	18,40	18,12	18,48	17,27

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	18,65	19,45	21,44	<b>24,31</b>	17,50
SNIR 2	<b>23,58</b>	17,07	20,86	<b>23,32</b>	22,52
SNIR 3	21,80	18,43	22,24	22,49	21,84
SNIR 4	<b>23,24</b>	17,64	19,95	22,07	22,14
SNIR 5	21,93	17,24	21,80	21,04	21,19
SNIR 6	19,14	17,93	22,09	20,97	21,64
SNIR 7	<b>22,67</b>	17,04	18,95	<b>22,79</b>	21,68
SNIR 8	18,98	17,08	20,14	<b>23,25</b>	21,35
SNIR 9	19,57	17,23	19,42	22,50	21,95
SNIR 10	21,12	17,05	20,00	<b>23,40</b>	20,81
SNIR 11	18,72	17,03	21,96	<b>23,36</b>	20,66
SNIR 12	20,53	17,01	20,56	21,54	20,56
SNIR 13	17,03	17,02	18,31	21,39	20,45
SNIR 14	19,86	17,03	20,10	19,54	20,09
SNIR 15	19,60	17,01	20,94	21,19	19,72
SNIR 16	19,41	17,00	18,72	19,23	19,51
SNIR 17	20,55	17,00	18,87	18,66	20,08
SNIR 18	19,29	17,00	17,60	17,84	18,76
SNIR 19	17,38	17,00	17,81	18,98	17,94

Tabela 5.20: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub enxame 2 para o algoritmo de múltiplos enxames do método 2 .

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	18,44	21,78	21,20	20,78	20,70
SNIR 2	19,36	17,42	20,22	18,44	20,10
SNIR 3	19,89	17,94	18,41	19,35	21,60
SNIR 4	18,83	21,14	19,64	22,62	17,97
SNIR 5	<b>23,35</b>	21,76	21,22	21,20	22,59
SNIR 6	<b>24,10</b>	17,98	19,82	17,97	18,47
SNIR 7	<b>22,88</b>	20,39	19,73	20,28	19,42
SNIR 8	<b>23,42</b>	18,38	18,64	18,80	20,36
SNIR 9	<b>23,48</b>	19,45	19,34	19,33	19,59
SNIR 10	21,77	17,78	20,05	17,57	19,08
SNIR 11	<b>23,03</b>	17,80	17,60	18,01	17,01
SNIR 12	22,54	17,03	17,37	17,30	18,09
SNIR 13	21,51	17,17	17,35	17,29	17,77
SNIR 14	21,11	17,02	17,12	17,17	17,28
SNIR 15	18,97	17,02	17,21	17,08	17,18
SNIR 16	22,50	17,05	17,39	17,02	17,03
SNIR 17	23,01	17,02	17,06	17,05	17,23
SNIR 18	20,78	17,02	17,05	17,01	17,07
SNIR 19	18,94	17,00	17,02	17,00	17,03

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	21,05	19,40	21,90	19,05	21,83
SNIR 2	19,69	17,46	19,07	18,96	18,87
SNIR 3	19,72	18,55	19,62	20,01	18,53
SNIR 4	22,22	17,40	21,05	20,40	18,99
SNIR 5	20,73	17,42	22,06	20,99	19,98
SNIR 6	19,85	17,76	17,72	19,08	20,35
SNIR 7	21,61	17,04	20,06	20,10	20,22
SNIR 8	22,35	17,18	18,50	19,65	19,08
SNIR 9	19,35	17,25	18,61	20,25	20,25
SNIR 10	20,03	17,20	18,09	20,90	19,28
SNIR 11	18,23	17,02	17,94	17,91	17,50
SNIR 12	18,82	17,01	18,30	18,61	18,22
SNIR 13	17,71	17,05	17,60	17,21	17,18
SNIR 14	17,35	17,01	17,14	17,97	17,39
SNIR 15	17,13	17,00	17,47	17,15	17,75
SNIR 16	17,22	17,00	17,27	17,28	19,62
SNIR 17	17,02	17,00	17,59	17,16	17,10
SNIR 18	17,07	17,00	17,53	17,01	17,21
SNIR 19	17,14	17,00	17,13	17,03	17,02

Tabela 5.21: SNIR de cada  $\vec{b}_p^{best}$  do sub exame 3 para o algoritmo de múltiplos exames do método 2.

	$\vec{b}_1^{best}$	$\vec{b}_2^{best}$	$\vec{b}_3^{best}$	$\vec{b}_4^{best}$	$\vec{b}_5^{best}$
SNIR 1	19,39	21,62	18,45	21,15	19,33
SNIR 2	21,78	19,18	<b>22,86</b>	21,90	21,29
SNIR 3	21,00	<b>22,83</b>	20,45	20,70	20,83
SNIR 4	21,63	20,58	21,53	20,57	20,78
SNIR 5	21,20	20,97	22,22	21,16	<b>24,26</b>
SNIR 6	22,36	18,24	19,45	20,65	<b>22,86</b>
SNIR 7	22,04	20,16	19,22	17,05	21,07
SNIR 8	21,60	19,21	21,11	19,38	21,68
SNIR 9	21,19	20,58	20,76	19,24	20,00
SNIR 10	20,10	19,73	17,89	17,44	21,21
SNIR 11	21,83	17,97	18,77	18,45	20,44
SNIR 12	22,35	18,36	20,66	18,08	<b>23,99</b>
SNIR 13	21,47	17,42	18,50	18,17	<b>23,33</b>
SNIR 14	21,55	17,67	19,60	18,60	21,06
SNIR 15	22,21	17,27	20,15	20,71	19,07
SNIR 16	20,13	17,16	19,39	17,69	19,39
SNIR 17	20,53	17,02	18,16	18,12	19,57
SNIR 18	20,30	17,09	17,05	18,56	18,45
SNIR 19	19,28	17,02	16,93	17,21	17,94

	$\vec{b}_6^{best}$	$\vec{b}_7^{best}$	$\vec{b}_8^{best}$	$\vec{b}_9^{best}$	$\vec{b}_{10}^{best}$
SNIR 1	21,07	21,53	<b>23,18</b>	<b>23,84</b>	20,97
SNIR 2	20,50	<b>22,68</b>	<b>22,90</b>	22,11	21,97
SNIR 3	19,42	21,95	22,45	21,63	21,79
SNIR 4	<b>24,10</b>	20,07	21,60	21,83	<b>22,82</b>
SNIR 5	21,39	20,02	22,53	19,81	21,02
SNIR 6	<b>23,19</b>	21,33	20,24	20,40	20,14
SNIR 7	<b>22,97</b>	22,42	20,52	21,41	20,06
SNIR 8	21,30	<b>23,09</b>	22,15	22,11	20,72
SNIR 9	<b>23,87</b>	21,38	22,37	21,05	20,86
SNIR 10	<b>23,11</b>	<b>22,84</b>	20,41	<b>23,41</b>	20,72
SNIR 11	<b>23,78</b>	20,29	21,58	22,31	21,52
SNIR 12	<b>22,66</b>	22,07	20,63	19,72	19,66
SNIR 13	22,63	22,29	19,80	19,55	21,94
SNIR 14	20,17	21,81	22,20	17,30	21,67
SNIR 15	19,69	22,12	20,66	19,32	20,88
SNIR 16	20,85	20,21	18,31	16,70	20,95
SNIR 17	19,51	20,97	22,12	20,05	19,10
SNIR 18	17,53	19,81	18,70	19,42	19,40
SNIR 19	19,04	19,30	19,33	18,32	18,54

## Capítulo 6

---

# Conclusões

---

*Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões baseadas nos resultados e nos conhecimentos adquiridos ao longo das investigações, também é proposto desenvolvimentos futuros sobre o tema.*

### 6.1 Conclusão

Neste trabalho foram investigadas a influência da determinação de parâmetros para o desempenho de algoritmos PSO e apresentada uma nova abordagem baseada em sub enxames.

Por parte dos algoritmos PSO inicialmente, só foi possível alcançar soluções válidas apresentadas pela secção 5.2 através de adaptações no algoritmo, as condições estabelecidas que caracterizam as adaptações, a condição inicial foi baseada de forma heurística na solução matricial, a estratégia de ordenar o vetor partícula surgiu da observação em que OCP's com menores atenuações requerem menores potências. Enquanto a estratégia adotada para limitar a velocidade máxima surgiu da observação em que partículas tendiam abandonar o espaço de busca até as fronteiras do espaço de busca.

Por meio das simulações os algoritmos PSO mostram-se capazes de obter soluções ótimas para a problemática da alocação de potência ao garantir a SNIR alvo em redes OCDMA com arquitetura baseada em acoplador estrela e códigos primos como apresentado pelas secções 5.5 e 5.6, entretanto é notório a influência da determinação de parâmetros investigados na secção 5.7, onde o algoritmo proposto com parâmetros diferentes dos algoritmos apresentados pelas secções era incapaz de encontrar soluções ótimas, a tabela 5.21 mostrou que em diversas execuções a solução ótima nunca foi encontrada, a função de custo apresentada no gráfico pela Figura 5.14, e a evolução da SNIR ao longo das gerações exibida

pelo gráfico da Figura 5.13 mostra que houve pouca diversidade nas buscas. Dessa forma, chega-se a conclusão que a determinação dos parâmetros afeta as respostas e soluções do problema, e mostrou-se uma tarefa importante a determinação dos parâmetros. Dessa forma, foi proposta uma nova abordagem mais flexível que tem como objetivo oferecer uma maior liberdade e flexibilidade para determinação de parâmetros, com a finalidade de evitar que os sub enxames tivessem um grande número de partículas levando a um maior custo computacional, os subenxames foram determinados com número reduzido de partículas.

Observou-se através das simulações que o algoritmos de PSO modificado baseados em múltiplos enxames propostos neste trabalho não conseguiram encontrar soluções ótimas, entretanto o algoritmo de método 2 foi capaz de abandonar a convergência que é um objetivo desejável em problemas de otimização. Como observado pelos gráficos nas Figuras 5.20 e 5.19, em que após um período de convergência uma nova solução foi encontrada, após ser encontrada a nova solução o algoritmo retomou as buscas influenciadas pela nova  $\vec{b}_{gbest}$  encontrada. A figura 5.21 exibe o comportamento do PSO modificado e sua habilidade de diversificação nas buscas, em que um sub enxame diferente encontrou uma nova melhor solução que estava sendo encontrada por outro sub enxame.

Ao comparar o desempenho através das simulações e avaliar a qualidade das soluções encontradas pelos algoritmos PSO clássico e o PSO's modificados propostos neste trabalho e apresentados no capítulo 5, concluímos que o PSO clássico pode oferecer melhores soluções com escolhas adequadas dos seus parâmetros como apresentado, entretanto, a escolha inadequada oferece soluções piores que as soluções encontradas pelos PSO's modificados. Dessa forma concluímos que para problemas de otimização também podemos utilizar o algoritmo PSO modificado como uma ferramenta auxiliar para o PSO, pois o PSO modificado permite uma flexibilidade na escolha de parâmetros para os diversos sub enxames, além disso o PSO modificado permite comparar simultaneamente diversos sub enxames sem comprometer o custo computacional, dessa forma seria possível observar quais enxames apresentam melhor desempenho e executar um PSO clássico com um número maior de partículas com os parâmetros do sub enxame com melhor resultado. Essas características podem ser melhores aproveitadas em outros problemas de otimização com maiores dimensões.

Por parte das redes OCDMA, estas apresentam viabilidade de implementação para um pequeno número de utilizadores, i.e., redes empresariais. A maior penalização em arquiteturas baseadas em acoplador em estrela é justamente a atenuação devido ao número de utilizadores no acoplador em estrela que aumenta muito a sua atenuação com o aumento de suas dimensões devido ao número maior de utilizadores. Ao considerar as características da rede como comprimentos da ligação em um OCP, atenuações provenientes da fibra, acoplador e descodificação e sensibilidade dos recetores são necessárias potências elevadas para garantir

requisitos de QoS; potências elevadas acima do limite de Brillouin inviabilizam a implementação da rede tendo em vista o aparecimento de efeitos não-lineares. Tendo em vista que o número de utilizadores em uma rede OCDMA é baixo, geralmente menor que dez, a otimização por algoritmos PSO mostra-se uma ferramenta importante para otimização da rede, possibilitando oferecer qualidade de transmissão e também eficiência energética ao garantir a SNIR alvo com a utilização de menores potências.

## 6.2 Desenvolvimentos Futuros

Visando ampliação e desenvolvimento de investigações acerca do tema, são temas correlatos de estudo para o futuro: a otimização de redes OCDMA com códigos coerentes, com multi-taxas de transmissão, a incorporação de estudos relacionados às restrições da camada física, aos efeitos de GVD, abordagens com diferentes arquiteturas de redes, a implementação de novos algoritmos baseados em PSO e também o desenvolvimento de ferramentas que possibilitem o planeamento de redes OCDMA com a utilização de algoritmos de otimização.



---

# Bibliografia

---

- [1] J. SENIOR, *Optical Fiber Communications : Principles And Practice*, 3rd ed. Pearson, 2009. [citado na p. iii, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 26]
- [2] Fábio Renan Durand, “Energy-Efficient Power Allocation for WDM/OCDM Networks With Particle Swarm Optimization,” 2013. [citado na p. iii, 7, 10, 11, 12, 16, 21, 22, 24, 25, 26, 30, 31, 33]
- [3] Naser, G. Tarhuni and Korhonen, Timo O. and Elmusrati, Mohammed S. and Mutafungwa, Edward, “Power control of optical CDMA star networks,” 2005. [citado na p. iii, 10, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 32]
- [4] A. C. Carter, “Wavelength multiplexing for enhanced fibre-optic performance,” 1986. [citado na p. 6]
- [5] H. Luo, “Burstification queue management in optical burst switching networks,” 2006. [citado na p. 6]
- [6] P. R. Prucna, *Optical Code Division Multiple Access: Fundamentals And Applications*. Taylor & Francis, 2005. [citado na p. 6]
- [7] T. Pfeiffer, “Coarse WDM/CDM/TDM concept for optical packet transmission in metropolitan and access networks supporting 400 channels at 2.5 Gb/s peak rate,” 2000. [citado na p. 6]
- [8] H. Sotobayashi, “Photonic gateway: Multiplexing format conversions of OCDM to WDM and WDM to OCDM at 40 Gb/s,” 2002. [citado na p. 6]
- [9] Glesk, I. and Baby, V. and Bres, C.S. and Prucnal, P.R., “DESIGN AND DEMONSTRATION OF A NOVEL INCOHERENT OPTICAL CDMA SYSTEM,” 2015. [citado na p. 7, 19]
- [10] J. M. Senior, “Devices for wavelength multiplexing and demultiplexing,” 1989. [citado na p. 7, 12]

- [11] Durand, Fábio R. and Abrão, Taufik, “Distributed SNIR Optimization based on Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks with Physical Constraints,” 2009. [citado na p. 8, 21, 22, 23, 25, 27]
- [12] C. Yung-Kuang, “Mach-zender fiber-gratings-based fixed and reconfigurable multichannel optical add/drop multiplexers for DWDM,” 1999. [citado na p. 8]
- [13] Garcia, L. R. and Melo, L. C. and Vechia, D. and Cavali, T. S. and Durand, F. R. and Abrão, T., “The Impact of Geographic Distribution in Passive Optical Network with Optical CDMA,” 2015. [citado na p. 8]
- [14] K. K. F. M. Madami, “Design theory of long-distance wdm dispersion-managed transmission system,” 1999. [citado na p. 8]
- [15] V. Bobrovs, S. Spolitis, G. Ivanovs, “Comparison of Chromatic Dispersion Compensation Techniques for WDM-PON solution,” 2012. [citado na p. 9]
- [16] J. C. Marshall, *Semiconductor Photodetectors*. SPIE, 2005. [citado na p. 10]
- [17] T. Miyazawa, I. Sasase, “MULTI-RATE AND MULTI-QUALITY TRANSMISSION SCHEME USING ADAPTIVE OVERLAPPING PULSE-POSITION MODULATOR AND POWER CONTROLLER IN OPTICAL CDMA NETWORKS,” 2004. [citado na p. 11]
- [18] V. Bobrovs, S. Olonkins, O. Ozolins, J. Porins, G. Lauks, “Hybrid Optical Amplifiers for Flexible Development in Long Reach Optical Access System,” 2012. [citado na p. 13]
- [19] Lee, H. H., D. and Han, J. and Chung, H. S. and Kim, K., “A Variable-Gain Optical Amplifier for Metro WDM Networks With Mixed Span Losses: A Gain-Clamped Semiconductor Optical Amplifier Combined With a Raman Fiber Amplifier,” 2005. [citado na p. 13]
- [20] Le, Hai C. and Dang, Ngoc T. and San, Vu-Van, “Dynamic Multi-domain Elastic Optical Networks with 4R Regeneration Capable Border Nodes,” 2015. [citado na p. 14]
- [21] A. J. VITERBI, *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*, 1st ed. Addison-Wesley, 1995. [citado na p. 14, 15]
- [22] Heritage, Jonathan P. and Weiner, Andrew M., “Advances in Spectral Optical Code-Division Multiple-Access Communications,” 2007. [citado na p. 15]
- [23] Kitayama, Ken-ichi, “Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion,” 1998. [citado na p. 15]

- [24] Al-Khafaji, Hamza M. R. and Ngah, Razali and Aljunid, S. A. and Rahman, T. A., "An Innovative Encoding/Decoding Architecture Based on Two-Code Keying for SAC-OCDMA Systems," 2014. [citado na p. 15]
- [25] Ibsen, M. P. C. Teh and Lee, L.B.Fu and Yusoff, Z. and Richardson, D.I., "A 16 Channel OCDMA system (4 OCDM x 4 WDM) based on Ichip, 20 Gchlp/s superstructure fibre Bragg gratings and DFB fibre laser transmitters," 2002. [citado na p. 15]
- [26] F. R. Durand, "The Effects of Power Control on the Optical CDMA Random Access Protocol," 2011. [citado na p. 17, 20]
- [27] Karbassian, M. Massoud and Ghafouri-Shiraz, Hooshang, "Analysis of Scalability and Performance in Passive Optical CDMA Networks," 2009. [citado na p. 19]
- [28] Rosas-Fernandez, J. B. and Ingham, J. D. and Penty, R.V. and White, I. H., "Scalability Techniques in Electronically Processed CDMA for Low Cost and Flexible Optical Access Networks," 2009. [citado na p. 19]
- [29] D.E. Leaird, Z. Jiang, A.M. Weiner, "Experimental Investigation of Security Issues In OCDMA," 2005. [citado na p. 19]
- [30] S. Huang, K. Baba, M. Murata, K. Kitayama, "Variable-Bandwidth Optical Paths: Comparison Between Optical Code-Labeled Path And OCDM Path," 2005. [citado na p. 20]
- [31] Fouli, Kerim and Maier, Martin, "OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges," 2007. [citado na p. 20]
- [32] Durand, F.R. and Abbade, M.L.F. and Barbosa, F.R. and Moschim, E., "Design of multi-rate optical code paths considering polarisation mode dispersion limitations," 2010. [citado na p. 20]
- [33] D. J. Richardson, *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks: Theory And Applications*. Springer Verlag And Tsinghua University Press, 2009. [citado na p. 20]
- [34] Lalmahomed, Arshad and Karbassian, Lalmahomed M. Massoud and Ghafouri-Shiraz, H., "Performance Analysis of Enhanced-MPC in Incoherent Synchronous Optical CDMA," 2010. [citado na p. 21, 23]
- [35] Cheng, Ran and Sun, Chaoli and Jin, Yaochu, "A multi-swarm evolutionary framework based on a feedback mechanism," 2013. [citado na p. 21, 29]

- [36] Huo, Chih-Li and Lien, Yean-Shain and Yu, Yu-Hsiang and Sun, Tsung-Ying, “Effectively Multi-Swarm Sharing Management for Differential Evolution,” 2012. [citado na p. 21, 34]
- [37] Zheng, Hui and Jie, Jing and Hou, Beiping and Fei, Zhengshun, “A Multi-Swarm Particle Swarm Optimization Algorithm for Tracking Multiple Targets,” 2014. [citado na p. 21, 34]
- [38] Wang, Gai-Ge and China, Xuzhou and China, Changchun and Chang, Bao and Zhang, Zhaojun, “A Multi-Swarm Bat Algorithm for Global Optimization,” 2015. [citado na p. 21, 29, 34]
- [39] Rui Li,, “MA Novel Multi-Swarm Particle Swarm Optimization algorithm Applied in Active Contour Model,” 2009. [citado na p. 21]
- [40] Yunyi Yan,, “Parameters-Optimized Multi-Subswarms Particle Swarm Optimization,” 2011. [citado na p. 21, 34]
- [41] Junliang Li,, “Multi- Swarm and Multi- Best Particle Swarm Optimization Algorithm,” 2008. [citado na p. 21]
- [42] Tarhuni, Naser G. and Elmusrati, Mohamed S. and Korhonen, Timo O. and Mutafungwa, Edward, “Multi-Access-Interference Mitigation using Power Control in Optical-CDMA Star Networks,” 2005. [citado na p. 22, 25]
- [43] R. H. Stolen, “Development Of The Stimulated Raman Spectrum In Single-Mode Silica Fibers ,” 1984. [citado na p. 26]
- [44] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, New York, 2007. [citado na p. 26]
- [45] Xiao, Xiaosheng and Gao, Shiming and Tian, Yu and Yang, Changxi, “Analytical Optimization of the Net Residual Dispersion in SPM-Limited Dispersion-Managed Systems,” 2006. [citado na p. 26]
- [46] Tao, Zhenning and Yan, Weizhen and Liu, Ling and Li, Lei and Oda, Shoichiro, “Simple Fiber Model for Determination of XPM Effects,” 2011. [citado na p. 26]
- [47] Durand, Fábio R. and Galdino, Lídia and Bonani, Luiz H. and Barbosa, Felipe R. and Abbade, Marcelo L. F. and Moschim, Edson, “The effects of polarization mode dispersion on 2D wavelength-hopping time spreading code routed networks,” 2010. [citado na p. 26]
- [48] Durand, Fábio and Abbade, M.L.F. and Barbosa, F.R. and Moschim, E., “Design of multi-rate optical code paths considering polarisation mode dispersion limitations,” 2010. [citado na p. 26]

- [49] Sanches, Anderson L. and Reis, José Valdemir, and Borges, Ben-Hur V., “Analysis of High-Speed Optical Wavelength/Time CDMA Networks Using Pulse-Position Modulation and Forward Error Correction Techniques,” 2009. [citado na p. 26]
- [50] Elkamchouchi, Hassan M. and Elragla, Hassan M. and Makar, Mina A., “POWER CONTROL IN CDMA SYSTEM USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION,” 2007. [citado na p. 30]
- [51] Abrão, Taufik and Sampaio, Lucas H. D. and Proença, Mario Lemes and Angélico, Bruno A. and Jeszensky, Paul Jean E., “Multiple Access Network Optimization Aspects via Swarm Search Algorithms,” 2013. [citado na p. 30, 31, 32]
- [52] N. Nedjah, *Swarm Intelligent Systems*. Berlin Heidelberg, 2006. [citado na p. 31, 32]
- [53] Arnab Ghosh, “A Genetic Lbest Particle Swarm Optimizer with Dynamically Varying Subswarm Topology,” 2012. [citado na p. 34]
- [54] Jzau-Sheng Lin, “A PSO-based Algorithm with Subswarm Using Entropy and Uniformity for Image Segmentation,” 2012. [citado na p. 34]
- [55] A.P. Engelbrecht,, “Enhancing the NichePSO,” 2007. [citado na p. 34]



# Anexos



## Anexo A

---

# Algoritmo Forma Matricial

---

Neste anexo encontra-se o código comentado e em linguagem MATLAB para a solução matricial do problema de alocação de potência em redes OCDMA baseada em acoplador em estrela. É ilustrado pelo anexo parâmetros com a SNIR alvo de 20 dB, número de usuários igual a 7, distâncias entre 2 e 86 km entre o transmissor e acoplador e saída do acoplador até o receptor, com perda de 5 dB no lado do receptor.

Entre as linhas 1 e 19 são declarados parâmetros com as características da rede, características dos dispositivos e também características dos códigos primos.

De forma a otimizar o processamento do código, por algumas vezes é feita alocação de memória para algumas variáveis.

O vetor de atenuações  $g_j$  em dB entre o transmissor e a saída do acoplador que corresponde a camada de acesso da rede para cada OCP é fornecido entre as linhas 27 e 31, enquanto o vetor de atenuações em termos lineares é exibido entre as linhas 35 e 39. De forma semelhante, o vetor de atenuações  $g_i$  em dB para a camada de transporte da rede, i.e., entre a saída do acoplador em estrela até o receptor é exibido entre as linhas 45 e 49, e o vetor de atenuação linear é apresentado entre as linhas 53 e 57. A matriz de interferência normalizada  $\vec{H}$  é gerada entre as linhas 61 e 81. O vetor de potência do ruído normalizado  $\vec{u}$  é exibido entre as linhas 86 e 91. A matriz  $\vec{\Gamma}^*$  é fornecida pela linha 96. A operação exibida pela linha 97 é feita por uma variável auxiliar  $Y$  e o vetor de potência otimizada em Watts  $\vec{p}^*$  é fornecido pela linha 99. Entre as linhas 110 e 112 correspondem a expressão 3.10 e é responsável por calcular a SNIR em cada OCP.

```
1 SNIR_alvo_db = 20;
2 k = 7;           % NUMERO DE USUARIOS
```

```

3  d = 14;           % INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs
   SUCESSIVOS
4  loss_dec = 5;     % PERDA DO DETECTOR [dB]
5
6  nsp = 2;         % FATOR DE RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
7  h = 6.63*10^(-34); % CONSTANTE DE PLANCK
8  fc = 193.1*10^12; % FREQUÊNCIA DA PORTADORA [Hz]
9  R = 10*10^9;     % TAXA DE TRANSMISSÃO MÍNIMA [Gbps]
10 Bo = 2*R;        % LARGURA DE BANDA ÓPTICA [Hz]
11 Gamp = 100;      % GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
12 q = 31;          % PESO DO CÓDIGO
13 oh = 0.29;       % MÉDIA DA VARIÂNCIA DE HAMMING
14
15 Nsp = nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
16 Pmax = 1.522;    % POTÊNCIA MÁX
17 Pmin = 0.1*10^-4; % POTÊNCIA MÍN
18
19 SNIR_alvo = 10^(SNIR_alvo_db/10);
20
21 % = ATENUAÇÕES DO Tx ATÉ SAÍDA DO ACOPLADOR ESTRELA ==
22
23 loss_star = 10*log10(k) - (10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA
   DO ACOPLADOR [dB]
24
25 gdb = zeros(k,1); % ALOCAÇÃO PRÉVIA DE MEMÓRIA
26
27 for i = 1 : k
28
29     gdb(i) = 0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star; % ATENUAÇÕES EM dB
30
31 end
32
33 g = zeros(k,1); % ALOCAÇÃO PRÉVIA DE MEMÓRIA
34
35 for i = 1 : k
36
37     g(i) = 10^(-gdb(i)/10); % ATENUAÇÃO LINEAR
38
39 end
40
41 % = ATENUAÇÕES DA SAÍDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATÉ Rx =

```

```

42
43 g_db = zeros(k,i);
44
45 for i = 1 : k
46
47     g_db(i) = 0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec;    % ATENUACOES
         EM dB
48
49 end
50
51 g_ = zeros(k,1);
52
53 for i = 1 : k
54
55     g_(i) = 10^(-g_db(i)/10);    % ATENUACAO LINEAR
56
57 end
58
59 H = zeros(k,k);    % ALOCACAO PREVIA DE MEMORIA
60
61 for i = 1 : k
62
63     H(1:k,i) = g(i);
64
65 end
66
67 for j = 1 : k
68
69     H(j,1:k) = (H(j,1:k)/(g(j)));
70
71 end
72
73 for i=1:k
74
75     for j=1:k
76         if i == j
77             H(i,i)=0;
78         end
79     end
80
81 end

```

```

82
83 CIR = SNIR_alvo*oh/(q^2);    % RELACAO PORTADORA
    INTERFERENCIA
84 u = zeros(k,1);
85
86 for i = 1 : k
87
88     u(i)=2*SNIR_alvo*Nsp/((q^2)*Gamp*g(i)*g_(i));
89     % u: VETOR DE POTENCIA DO RUIDO NORMALIZADO
90
91 end
92
93 I = eye (k);
94
95 C = CIR * I;
96
97 Y=inv ([I-C*H]); % Y: VARIAVEL AUXILIAR PARA INVERSAO DA
    MATRIZ
98
99 p=Y*u;    % VETOR DE POTENCIA
100
101 somatorio = 0;
102
103 for i = 1 : k
104     somatorio = somatorio + p(i)*g(i);
105 end
106
107 SNIR = zeros(k,1);
108
109
110 for i = 1 : k
111     SNIR(i) = ( Gamp*q^2*p(i)*g(i) ) / ( Gamp*oh^2*(
        somatorio - (p(i)*g(i)) ) + (2*Nsp/g_(i)) );
112 end
113
114 % SAIDAS:
115 SNIR_db=10*log10(SNIR);
116 p_dbm=10*log10(p/10^-3);

```

---

## Anexo B

---

# PSO clássico e condições para convergência

---

Este anexo apresenta as primeiras versões implementadas para o problema de alocação de potência em redes OCDMA baseadas em acoplador em estrela abordados na secção 5.2. Os códigos descritos estão em linguagem MATLAB.

As primeiras versões implementadas eram incapazes de atingir convergência ou produzir soluções válidas, dessa forma foi implementada um algoritmo com objetivo de gerar aleatoriamente partículas capazes de satisfazer as restrições e gerar soluções válidas. Este algoritmo é apresentado a seguir em linguagem MATLAB.

Nas linhas 1 e 2 são declaradas as potências máximas e mínima suportadas pelo transmissor. Na linha 5 é gerada uma matriz  $B1$  de dimensão com 7 linhas e  $10^7$  colunas com valores aleatórios entre a potência mínima e a potência máxima, cada coluna da matriz representa uma partícula. Em seguida, a matriz inicial  $B1$  é ordenada verticalmente na linha 7, o objetivo de ordenar a matriz é motivado por OCP's com menores atenuações requererem menores potências, e ao ordenar a verticalmente é garantido que as potências menores serão destinadas para OCP's com menores atenuações. Entre as linhas 13 e 24 é avaliada se a partícula é capaz de satisfazer as condições da SNIR alvo e está abaixo do limite superior de SNIR alcançável com códigos primos. O valor da função de custo da partícula é armazenado pela variável **custo**. As funções **f\_SNIR** exibida na linha 15 e **f\_CUSTO** exibida na linha 21 são apresentadas a seguir.

---

Algoritmo responsável pela geração de partículas

---

<sup>1</sup> Pmax = 0.1;

```

2 Pmin = Pmax*10^-4;
3
4
5 B1 = (Pmax-Pmin).*rand(7,10^7)+Pmin;
6
7 B2 = sort(B1,1);
8
9 numero_de_particulas = 0;
10
11 j=1;
12
13 for i=1:10^7
14
15     SNIR(i)=f_SNIR(B2(1:7,i));
16
17     if SNIR(i) == 1
18         numero_de_particulas = numero_de_particulas +1
19         particula = i;
20         B_p(1:7,j) = B2(1:7,i);
21         custo(j) = f_CUSTO(B_p(1:7,j));
22         j = j+1;
23
24     end
25
26 end

```

A função **f\_SNIR** é responsável por calcular e avaliar se a SNIR alvo é atingida, e também se está abaixo do limite superior da SNIR alcançável por códigos primos.

Entre as linhas 2 e 18 são declarados variáveis que correspondem a características da rede, características dos dispositivos e também características dos códigos primos. Entre as linhas 20 e 54 são gerados vetores com as atenuações referentes à camada de acesso e também à camada de transporte da rede, i.e.,  $g_i$  e  $g_j$ . Entre as linhas 56 e 68 é calculada a SNIR em cada OCP de acordo com a equação 3.10. Em seguida, os valores das SNIR's são agrupadas em um vetor, tem seu valor convertido para dB e avaliado na linha 73 se o valor de SNIR é válido. Quando todos os valores de SNIR são válidos a função **f\_SNIR** retorna valor 1, caso contrário, retorna valor 0.

---

### **f\_SNIR**

---

```

1 function FTH = f_SNIR (p)

```

```

2
3 nsp=2;           % FATOR DE RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
4 h=6.63*10^(-34); % CONSTANTE DE PLANCK
5 fc=193.1*10^12; % FREQUÊNCIA DA PORTADORA [Hz]
6 R=10*10^9;      % TAXA DE TRANSMISSÃO MÍNIMA [Gbps]
7 Bo=2*R;         % LARGURA DE BANDA ÓPTICA [Hz]
8 Gamp=100;       % GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
9 q=31;           % PESO DO CÓDIGO
10 oh=0.29;       % MÉDIA DA VARIÂNCIA DE HAMMING
11
12 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
13 Pmax=0.1;       % POTÊNCIA MÁX
14 Pmin=Pmax*10^-4; % POTÊNCIA MÍN
15
16 % ATENUAÇÕES DO Tx ATÉ SAÍDA DO ACOPLADOR ESTRELA
17
18 loss_star=10*log10(7)-(10*log2(7)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
19
20 g1= 0.2*02 + loss_star; % ATENUAÇÕES EM dB
21 g2= 0.2*16 + loss_star;
22 g3= 0.2*30 + loss_star;
23 g4= 0.2*44 + loss_star;
24 g5= 0.2*58 + loss_star;
25 g6= 0.2*72 + loss_star;
26 g7= 0.2*86 + loss_star;
27
28 g1= 10^(-g1/10); % ATENUAÇÃO LINEAR
29 g2= 10^(-g2/10);
30 g3= 10^(-g3/10);
31 g4= 10^(-g4/10);
32 g5= 10^(-g5/10);
33 g6= 10^(-g6/10);
34 g7= 10^(-g7/10);
35
36 % ATENUAÇÕES DA SAÍDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATÉ Rx
37
38 loss_dec = 14; % PERDA DO DETETOR [dB]
39
40 g_1= 0.2*02 + loss_dec; % ATENUAÇÕES EM dB
41 g_2= 0.2*16 + loss_dec;

```

```

42 g_3= 0.2*30 + loss_dec ;
43 g_4= 0.2*44 + loss_dec ;
44 g_5= 0.2*58 + loss_dec ;
45 g_6= 0.2*72 + loss_dec ;
46 g_7= 0.2*86 + loss_dec ;
47
48 g_1= 10^(-g_1/10);                               % ATENUACAO LINEAR
49 g_2= 10^(-g_2/10);
50 g_3= 10^(-g_3/10);
51 g_4= 10^(-g_4/10);
52 g_5= 10^(-g_5/10);
53 g_6= 10^(-g_6/10);
54 g_7= 10^(-g_7/10);
55
56 SNIR_1= ( Gamp*q^2*p(1)*g1 ) / ( Gamp*oh^2*( p(2)*g2 + p
      (3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_1) );
57
58 SNIR_2= ( Gamp*q^2*p(2)*g2 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_2) );
59
60 SNIR_3= ( Gamp*q^2*p(3)*g3 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_3) );
61
62 SNIR_4= ( Gamp*q^2*p(4)*g4 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_4) );
63
64 SNIR_5= ( Gamp*q^2*p(5)*g5 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_5) );
65
66 SNIR_6= ( Gamp*q^2*p(6)*g6 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_6) );
67
68 SNIR_7= ( Gamp*q^2*p(7)*g7 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 ) + (2*
      Nsp/g_7) );

```

```

69
70
71 SNIR = [SNIR_1;SNIR_2;SNIR_3;SNIR_4;SNIR_5;SNIR_6;SNIR_7];
72 SNIR_db = [10*log10(SNIR_1);10*log10(SNIR_2);10*log10(
           SNIR_3);10*log10(SNIR_4);10*log10(SNIR_5);10*log10(
           SNIR_6);10*log10(SNIR_7)];
73 SNIR_ok = (SNIR_db>20 & SNIR_db<27.4217);
74
75 FTH = min(SNIR_ok);

```

A função **f\_CUSTO** é responsável por calcular o valor de custo da de uma partícula de acordo com a expressão 4.5, e seu código em MATLAB é apresentado a seguir.

---

### f\_CUSTO

---

```

1 function custo = f_CUSTO (p)
2
3 nsp=2;
4 h=6.63*10^(-34);
5 fc=193.1*10^12;
6 R=10*10^9;
7 Bo=2*R;
8 Gamp=100;
9 q=31;
10 oh=0.29;
11
12 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;
13 Pmax=0.1;
14 Pmin=Pmax*10^-4;
15
16 % ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
17
18 loss_star=10*log10(7)-(10*log2(7)*log10(0.2)); % PERDA DO
           ACOPLADOR [dB]
19
20 g1= 0.2*02 + loss_star;           % ATENUACOES EM dB
21 g2= 0.2*16 + loss_star;
22 g3= 0.2*30 + loss_star;
23 g4= 0.2*44 + loss_star;
24 g5= 0.2*58 + loss_star;
25 g6= 0.2*72 + loss_star;

```

```

26 g7= 0.2*86 + loss_star ;
27
28 g1= 10^(-g1/10);           % ATENUACAO LINEAR
29 g2= 10^(-g2/10);
30 g3= 10^(-g3/10);
31 g4= 10^(-g4/10);
32 g5= 10^(-g5/10);
33 g6= 10^(-g6/10);
34 g7= 10^(-g7/10);
35
36 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA AT Rx
37
38 loss_dec=14;               % PERDA DO DECTOR [dB]
39
40 g_1= 0.2*02 + loss_dec;    % ATENUACOES EM dB
41 g_2= 0.2*16 + loss_dec;
42 g_3= 0.2*30 + loss_dec;
43 g_4= 0.2*44 + loss_dec;
44 g_5= 0.2*58 + loss_dec;
45 g_6= 0.2*72 + loss_dec;
46 g_7= 0.2*86 + loss_dec;
47
48
49 g_1= 10^(-g_1/10);         % ATENUACAO LINEAR
50 g_2= 10^(-g_2/10);
51 g_3= 10^(-g_3/10);
52 g_4= 10^(-g_4/10);
53 g_5= 10^(-g_5/10);
54 g_6= 10^(-g_6/10);
55 g_7= 10^(-g_7/10);
56
57
58
59
60 SNIR_1= ( Gamp*q^2*p(1)*g1 ) / ( Gamp*oh^2*( p(2)*g2 + p
      (3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_1) );
61
62 SNIR_2= ( Gamp*q^2*p(2)*g2 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_2) );

```

```

63
64 SNIR_3= ( Gamp*q^2*p(3)*g3 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_3) );
65
66 SNIR_4= ( Gamp*q^2*p(4)*g4 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(5)*g5 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_4) );
67
68 SNIR_5= ( Gamp*q^2*p(5)*g5 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(6)*g6 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_5) );
69
70 SNIR_6= ( Gamp*q^2*p(6)*g6 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(7)*g7 ) + (2*
      Nsp/g_6) );
71
72 SNIR_7= ( Gamp*q^2*p(7)*g7 ) / ( Gamp*oh^2*( p(1)*g1 + p
      (2)*g2 + p(3)*g3 + p(4)*g4 + p(5)*g5 + p(6)*g6 ) + (2*
      Nsp/g_7) );
73
74
75 SNIR=[SNIR_1;SNIR_2;SNIR_3;SNIR_4;SNIR_5;SNIR_6;SNIR_7];
76 SNIR_db=[10*log10(SNIR_1);10*log10(SNIR_2);10*log10(SNIR_3
      );10*log10(SNIR_4);10*log10(SNIR_5);10*log10(SNIR_6)
      ;10*log10(SNIR_7)];
77 SNIR_ok=(SNIR_db>20 & SNIR_db<27.4217);
78
79 J_custo = (1/7)*( SNIR_ok(1)*(1-p(1)/Pmax ) + SNIR_ok(2)
      *(1-p(2)/Pmax) + SNIR_ok(3)*(1-p(3)/Pmax) + SNIR_ok(4)
      *(1-p(4)/Pmax) + SNIR_ok(5)*(1-p(5)/Pmax) + SNIR_ok(6)
      *(1-p(6)/Pmax) + SNIR_ok(7)*(1-p(7)/Pmax) );
80
81
82
83      custo=J_custo;

```

---

Através de 10 execuções do algoritmo responsável pela geração de partículas foram geradas no total 627 partículas, e então armazenados o menor valor e o maior valor que ocorreram em cada OCP, i.e., o menor ( $P_{Kmin}$ ) e maior valor ( $P_{Kmax}$ ) de cada posição do vetor. Os valores armazenados são exibidos pela Tabela a seguir. Esses valores posteriormente foram utilizados para limitar a

velocidade máxima de acordo com  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ .

Tabela B.1: Valores máximos e mínimos.

OCP	Mínimo	Máximo
1	5,74570669484992e-05	0,000490013415698432
2	0,000182366643222455	0,00110016570476999
3	0,000426662927219739	0,00285156406496686
4	0,00128877079660127	0,00773479893638579
5	0,00442664593674243	0,0237620031962251
6	0,0137986540546617	0,0777087653515769
7	0,0488861870097699	0,0999657310735528

O ficheiro principal responsável por dar executar o PSO é apresentado a seguir. Da mesma forma como foi feito anteriormente, a parte inicial do código declara variáveis com as características da rede, dispositivos, código primo e parâmetros do algoritmo genético. Entre as linha 95 e 118 é chamada a função responsável pela atualização da velocidade e posição, e em seguida é feita a atualização da geração  $\mathcal{G}$ .

```

1
2 % == PARAMETROS DA REDE == %
3
4 nsp = 2;           % FATOR DE RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
5 h = 6.63*10^(-34); % CONSTANTE DE PLANCK
6 fc = 193.1*10^12; % FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
7 R = 10*10^9;      % TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [bps]
8 Bo = 2*R;         % LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
9 Gamp = 100;       % GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
10 q = 31;           % PESO DO CODIGO
11 oh = 0.29;        % MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
12
13 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
14
15
16 % = ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
17
18 loss_star=10*log10(7)-(10*log2(7)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
19
20 g1= 0.2*02 + loss_star; % ATENUACOES EM dB
21 g2= 0.2*16 + loss_star;
22 g3= 0.2*30 + loss_star;
23 g4= 0.2*44 + loss_star;

```

```

24 g5= 0.2*58 + loss_star;
25 g6= 0.2*72 + loss_star;
26 g7= 0.2*86 + loss_star;
27
28 g1= 10^(-g1/10);           % ATENUACAO LINEAR
29 g2= 10^(-g2/10);
30 g3= 10^(-g3/10);
31 g4= 10^(-g4/10);
32 g5= 10^(-g5/10);
33 g6= 10^(-g6/10);
34 g7= 10^(-g7/10);
35
36 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATE Rx
37
38 loss_dec=14;              % PERDA DO DECTOR [dB]
39
40 g_1= 0.2*02 + loss_dec;   % ATENUACOES EM dB
41 g_2= 0.2*16 + loss_dec;
42 g_3= 0.2*30 + loss_dec;
43 g_4= 0.2*44 + loss_dec;
44 g_5= 0.2*58 + loss_dec;
45 g_6= 0.2*72 + loss_dec;
46 g_7= 0.2*86 + loss_dec;
47
48
49 g_1= 10^(-g_1/10);        % ATENUACAO LINEAR
50 g_2= 10^(-g_2/10);
51 g_3= 10^(-g_3/10);
52 g_4= 10^(-g_4/10);
53 g_5= 10^(-g_5/10);
54 g_6= 10^(-g_6/10);
55 g_7= 10^(-g_7/10);
56
57
58
59 % PARAMETROS DO PSO
60
61 pop=9;                    % TAMANHO DA POPULACAO
62 G=800;                    % GERACAO
63 winicial=1;              % PESO INERCIAL INICIAL
64 wfinal=0.01;            % PESO INERCIAL FINAL

```

```

65
66 Pmax=0.1;                % POTENCIA MAX
67 Pmin=0.1*10^-4;        % POTENCIA MIN
68 t=0 ;                   % TEMPO INICIAL
69
70 B=f_MATRIX; % CHAMA A FUNCAO QUE CRIA A MATRIX
71
72 B_0 = B;
73
74
75 % i e j sao o numero de particulas.
76
77
78 custo = zeros(1,9);
79
80 for u=1:9
81     custo(u)= f_CUSTO(B(1:7,u));
82
83 end
84
85
86
87 velocidade_ = zeros(7,9); % ALOCACAO DE MEMORIA TORNA
    O ALGORITMO MAIS RAPIDO
88
89
90 b_pbest = B;
91 b_gbest=[Pmax;Pmax;Pmax;Pmax;Pmax;Pmax;Pmax];
92
93 custo_gbest=0;          % ALOCACAO DE MEMORIA TORNA
    O ALGORITMO MAIS RAPIDO
94
95 while t<G
96
97     for i=1:9
98         [velocidade_(1:7,i),B(1:7,i)] = f_VELOCIDADE(
                velocidade_(1:7,i), B(1:7,i), b_pbest(1:7,i),
                b_gbest,t);
99         custo_aux = f_CUSTO(B(1:7,i));
100
101         if custo_aux > custo(i)

```

```

102         custo(i)= custo_aux;
103         b_pbest(1:7,i) = B(1:7,i);
104     else
105     end
106
107     if custo_aux > custo_gbest
108         custo_gbest = custo_aux;
109         b_gbest = B(1:7,i);
110     else
111     end
112     b_gbest
113
114 end
115
116     t=t+1;
117     t
118 end

```

---

A função **f\_MATRIX** exibida pela linha 70 consiste em uma versão modificada do algoritmo apresentado anteriormente para a geração de partículas de soluções válidas. Seu código em MATLAB é exibido a seguir

---

#### **f\_MATRIX**

---

```

1 function B = f_MATRIX
2
3 % PARAMETROS
4
5 Pmax=0.1; % POTENCIA MAX
6 Pmin=Pmax*10^-4; % POTENCIA MIN
7
8
9 B1 = (Pmax-Pmin).*rand(7,10^7)+Pmin;
10
11 B2 = sort(B1,1);
12
13 numero_de_particulas = 0;
14
15 SNIR = zeros(1,10^7);
16
17 B_p = zeros(7,9); %primeiro indice e o numero de OCP,
    segundo indice e o numero de particulas
18

```

```

19 j=int8(1);
20
21 for i=1:10^7
22
23     if j<=9
24         SNIR(i) = f_SNIR(B2(1:7,i));
25
26         if (SNIR(i)==1)
27             numero_de_particulas = numero_de_particulas
28                 +1;
29             particula=i
30             B_p(1:7,j)=B2(1:7,i);
31             custo(j)= f_CUSTO(B_p(1:7,j));
32             j=j+1;
33
34         else
35             B=B_p;
36
37         else
38             B=B_p;
39         end
40
41     end
42
43 ok = max(SNIR);
44
45 B=B_p;
46
47 end

```

A função **f\_VELOCIDADE** exibida na linha 98 é responsável pela atualização da velocidade e posição da partícula. Entre as linhas 81 e 109 a velocidade é limitada de conforme  $V_{max} = 0,2(P_{K_{max}} - P_{K_{min}})$ . As funções **f\_CUSTO** e **f\_SNIR** são as mesmas apresentadas anteriormente. Entre as linhas 114 e 208 as posições das partículas são atualizadas de acordo com a expressão 4.1.

---

### f\_VELOCIDADE

---

```

1 % FUNCAO DE ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
2

```

```

3 function [ velocidade , b ] = fVELOCIDADE( velocidade_k , b_p ,
      bpbest , bgbest , t )
4
5 % = PARAMETROS DO PSO
6
7 w_inicial=1;           % PESO INERCIAL
8 w = w_inicial;
9 C1=1.2;                % PARAMETRO C1 DA
      ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
10 C2=1.8;                % PARAMETRO C2 DA
      ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
11 Pmax=0.1;             % POTENCIA MAX
12 Pmin=0.1*10^-4;      % POTENCIA MIN
13
14 Vmax=0.01*(Pmax-Pmin); % VELOCIDADE MAXIMA
15
16
17 % PARAMETROS
18
19 nsp=2;                % FATOR DE RUIDO DE EMISSAO
      ESPONTANEA
20 h=6.63*10^(-34);     % CONSTANTE DE PLANCK
21 fc =193.1*10^12;     % FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
22 R=10*10^9;           % TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [
      Gbps ]
23 Bo=2*R;              % LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
24 Gamp=100;            % GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
25 q=31;                % PESO DO CODIGO
26 oh=0.29;             % MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
27
28 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
29 Pmax=0.1;            % POTENCIA MAX
30 Pmin=Pmax*10^-4;    % POTENCIA MIN
31
32
33 % ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
34
35 loss_star=10*log10(7)-(10*log2(7)*log10(0.2)); % PERDA DO
      ACOPLADOR [dB]
36
37 g1= 0.2*02 + loss_star; % ATENUACOES EM dB

```

```

38 g2= 0.2*16 + loss_star ;
39 g3= 0.2*30 + loss_star ;
40 g4= 0.2*44 + loss_star ;
41 g5= 0.2*58 + loss_star ;
42 g6= 0.2*72 + loss_star ;
43 g7= 0.2*86 + loss_star ;
44
45 g1= 10^(-g1/10);           % ATENUACAO LINEAR
46 g2= 10^(-g2/10);
47 g3= 10^(-g3/10);
48 g4= 10^(-g4/10);
49 g5= 10^(-g5/10);
50 g6= 10^(-g6/10);
51 g7= 10^(-g7/10);
52
53
54 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATE Rx
55
56 loss_dec =14;             % PERDA DO DETETOR [dB]
57
58 g_1= 0.2*02 + loss_dec ;  % ATENUACOES EM dB
59 g_2= 0.2*16 + loss_dec ;
60 g_3= 0.2*30 + loss_dec ;
61 g_4= 0.2*44 + loss_dec ;
62 g_5= 0.2*58 + loss_dec ;
63 g_6= 0.2*72 + loss_dec ;
64 g_7= 0.2*86 + loss_dec ;
65
66
67 g_1= 10^(-g_1/10);        % ATENUACAO LINEAR
68 g_2= 10^(-g_2/10);
69 g_3= 10^(-g_3/10);
70 g_4= 10^(-g_4/10);
71 g_5= 10^(-g_5/10);
72 g_6= 10^(-g_6/10);
73 g_7= 10^(-g_7/10);
74
75
76 pot1_max = 4.900134156984322*(10^-4); %maxima potencia do
    OCP 1
77 pot1_min = 5.74570669484992*(10^(-5));%minima potencia do

```

```

      OCP 1
78  inter_1 = pot1_max-pot1_min;           %intervalo de
      potencias
79  v1_max = 0.2*inter_1;                 % velocidade maxima
      do OCP 1
80
81  pot2_max = 0.00110016570476999;
82  pot2_min = 0.000182366643222455;
83  inter_2 = pot2_max-pot2_min;
84  v2_max = 0.2*inter_2;
85
86  pot3_max = 0.00285156406496686;
87  pot3_min = 0.000426662927219739;
88  inter_3 = pot3_max-pot3_min;
89  v3_max = 0.2*inter_3;
90
91  pot4_max = 0.00773479893638579;
92  pot4_min = 0.00128877079660127;
93  inter_4 = pot4_max-pot4_min;
94  v4_max = 0.2*inter_4;
95
96  pot5_max = 0.0237620031962251;
97  pot5_min = 0.00442664593674243;
98  inter_5 = pot5_max-pot5_min;
99  v5_max = 0.2*inter_5;
100
101 pot6_max = 0.0777087653515769;
102 pot6_min = 0.0137986540546617;
103 inter_6 = pot6_max-pot6_min;
104 v6_max = 0.2*inter_6;
105
106 pot7_max = 0.0999657310735528;
107 pot7_min = 0.0488861870097699;
108 inter_7 = pot7_max-pot7_min;
109 v7_max = 0.2*inter_7;
110
111
112 % VELOCIDADES MAXIMAS DE CADA OCP
113
114     velocidade_k(1)=w*velocidade_k(1)+C1*rand(1)*(
        pbbest(1)-b_p(1))+C2*rand(1)*(bgbest(1)-b_p(1))

```

```

;
115
116     if velocidade_k(1)>v1_max;
117         velocidade_k(1)=v1_max;
118     else
119     end
120
121     if velocidade_k(1)<(-v1_max);
122         velocidade_k(1)=(-v1_max);
123     else
124     end
125
126
127
128     velocidade_k(2)=w*velocidade_k(2)+C1*rand(1)*(
        bpbest(2)-b_p(2))+C2*rand(1)*(bgbest(2)-b_p(2))
;
129
130     if velocidade_k(2)>v2_max;
131         velocidade_k(2)=v2_max;
132     else
133     end
134
135     if velocidade_k(2)<(-v2_max);
136         velocidade_k(2)=(-v2_max);
137     else
138     end
139
140
141
142     velocidade_k(3)=w*velocidade_k(3)+C1*rand(1)*(
        bpbest(3)-b_p(3))+C2*rand(1)*(bgbest(3)-b_p(3))
;
143
144     if velocidade_k(3)>v3_max;
145         velocidade_k(3)=v3_max;
146     else
147     end
148
149     if velocidade_k(3)<(-v3_max);
150         velocidade_k(3)=(-v3_max);
```

```
151         else
152         end
153
154
155
156
157     velocidade_k(4)=w*velocidade_k(4)+C1*rand(1)*(
        bpbest(4)-b_p(4))+C2*rand(1)*(bgbest(4)-b_p(4))
        ;
158
159         if velocidade_k(4)>v4_max;
160             velocidade_k(4)=v4_max;
161         else
162         end
163
164         if velocidade_k(4)<(-v4_max);
165             velocidade_k(4)=(-v4_max);
166         else
167         end
168
169
170
171     velocidade_k(5)=w*velocidade_k(5)+C1*rand(1)*(
        bpbest(5)-b_p(5))+C2*rand(1)*(bgbest(5)-b_p(5))
        ;
172
173         if velocidade_k(5)>v5_max;
174             velocidade_k(5)=v5_max;
175         else
176         end
177
178         if velocidade_k(5)<(-v5_max);
179             velocidade_k(5)=(-v5_max);
180         else
181         end
182
183
184
185     velocidade_k(6)=w*velocidade_k(6)+C1*rand(1)*(
        bpbest(6)-b_p(6))+C2*rand(1)*(bgbest(6)-b_p(6))
        ;
```

```
186
187     if velocidade_k(6)>v6_max;
188         velocidade_k(6)=v6_max;
189     else
190     end
191
192     if velocidade_k(6)<(-v6_max);
193         velocidade_k(6)=(-v6_max);
194     else
195     end
196
197
198     velocidade_k(7)=w*velocidade_k(7)+C1*rand(1)*(
        bpbest(7)-b_p(7))+C2*rand(1)*(bgbest(7)-b_p(7))
        ;
199
200     if velocidade_k(7)>v7_max;
201         velocidade_k(7)=v7_max;
202     else
203     end
204
205     if velocidade_k(7)<(-v7_max);
206         velocidade_k(7)=(-v7_max);
207     else
208     end
209
210
211     velocidade = [ velocidade_k(1); velocidade_k(2);
        velocidade_k(3); velocidade_k(4); velocidade_k(5)
        ; velocidade_k(6); velocidade_k(7) ];
212     b = b_p + velocidade;
213
214     fth=f_SNIR(b);
215
216     velocidade = [ velocidade_k(1); velocidade_k(2); velocidade_k
        (3); velocidade_k(4); velocidade_k(5); velocidade_k(6);
        velocidade_k(7) ];
217     b = b_p + velocidade;
218
219     end
```

## Anexo C

---

# PSO clássico

---

Neste anexo será apresentado a implementação do PSO clássico apresentado nas secções 5.3 à 5.7. Os códigos estão em linguagem MATLAB.

Diferentemente da forma para obtenção de soluções válidas apresentada anteriormente, para um número de usuários  $k \geq 7$  foi adotada uma forma baseada na função matricial para obter soluções válidas.

O ficheiro principal responsável pela execução do PSO é apresentado a seguir, tem estrutura semelhante ao ficheiro apresentado anteriormente.

---

Ficheiro Principal PSO clássico

---

```
1 k = 19;% NUMERO DE USUARIOS
2 SNIR_alvo_db = 17;% [dB]
3 d = 6;% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS [km
  ]
4
5 nsp = 2;% FATOR DE RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
6 h = 6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
7 fc = 193.1*10^12;% FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
8 R = 10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [Gbps]
9 Bo = 2*R;% LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
10 Gamp = 100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
11 q = 31;% PESO DO CODIGO
12 oh = 0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
13
14
15 %
```

```

16 Nsp = nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;% RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
17 Pmax = 1.522;% POTENCIA MAX [W] ESTABELECIDO PELO LIMITE
    DE BRILLOUIN
18 Pmin = 0.1*10^-4;% POTENCIA MIN [W]
19
20 SNIR_alvo = 10^(SNIR_alvo_db/10);% [LINEAR]
21
22
23 % ATENUACOES DO Tx AT SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
24
25 loss_star = 10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA
    DO ACOPLADOR [dB]
26
27 g=zeros(k,1);% ALOCAR MEMORIA
28
29 for i = 1 : k
30
31     g(i) = 0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star;% ATENUACOES EM dB
32
33 end
34
35 for i = 1:k
36
37     g(i) = 10^(-g(i)/10);% ATENUACAO LINEAR
38
39 end
40
41 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATE Rx
42
43 loss_dec = 5;% PERDA DO DECTOR [dB]
44
45 g_ = zeros(k,1);
46 for i = 1 : k
47
48     g_(i) = 0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec;% ATENUACOES EM dB
49
50 end
51
52 for i = 1 : k
53
54     g_(i) = 10^(-g_(i)/10);% ATENUACAO LINEAR

```

```

55
56 end
57
58 % PARAMETROS DO PSO
59
60 G = 2000;
61 t = int16(0);
62
63 %
64
65 p = f_VERSAO_MATRICIAL(k, SNIR_alvo_db, d);
66
67 B = f_MATRIX(p);
68
69 B_0 = B;
70
71 custo = zeros((k+2), 1);
72
73 for u = 1:k
74     custo(u) = f_CUSTO(B(1:k, u), SNIR_alvo_db, d);
75
76 end
77
78 velocidade_ = zeros(k, (k+2)); % ALOCACAO DE MEMORIA TORNA O
    ALGORITMO MAIS RAPIDO
79
80
81 b_pbest = B;
82
83 b_gbest = p;
84
85 B_gbest = zeros(k, G);
86
87 custo_gbest = f_CUSTO(b_gbest, SNIR_alvo_db, d); % ALOCA O
    DE MEMORIA
88
89 W = zeros(G, 1); % ALOCACAO DE MEMORIA
90
91 t_aux = 0; % t_aux uma variavel t auxiliar que permite
    manipular variaveis em double
92

```

```

93 w = 0.7;
94
95 while t<G
96
97
98     for i = 1 :(k+2)
99         [velocidade_(1:k,i),B(1:k,i)] = fVELOCIDADE(p,
100             velocidade_(1:k,i), B(1:k,i), b_pbest(1:k,i),
101             b_gbest,w);
102         custo_aux = fCUSTO(B(1:k,i),SNIR_alvo_db,d);
103
104         if custo_aux > custo(i)
105             custo(i)= custo_aux;
106             b_pbest(1:k,i) = B(1:k,i);
107         else
108             end
109
110         if custo_aux> custo_gbest
111             custo_gbest = custo_aux;
112             b_gbest = B(1:k,i);
113         else
114             end
115         b_gbest;
116         B_gbest(1:k,t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
117             EVOLUCAO DA b_gbest
118     end
119
120     t = t+1;
121     t_aux = t_aux+1;
122     t;
123 end
124
125 B_custos = zeros(G,1);% MATRIZ COM VALORES DE CUSTO DA
126     b_gbest E ALOCACAO DE MEMORIA DA MESMA
127
128 for r = 1:G
129
130     B_custos(r)=fCUSTO(B_gbest(1:k,r),SNIR_alvo_db,d);%
131         MATRIZ DE CUSTOS DE b_gbest
132
133 end

```

A função **f\_CUSTO** é responsável por calcular o valor de custo de acordo com a expressão 4.5 é apresentada a seguir

---

### f\_CUSTO

---

```

1 function custo = f_CUSTO (p,SNIR_alvo_db,d)
2
3 nsp=2;% FATOR DE RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
4 h=6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
5 fc =193.1*10^12;% FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
6 R=10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [Gbps]
7 Bo=2*R;% LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
8 Gamp=100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
9 q=31;% PESO DO CODIGO
10 oh=0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
11 k=numel(p);% NUMERO DE USUARIOS
12 % d% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS
13 loss_dec =5;% PERDA DO DECTOR [dB]
14
15 %
16 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;    % RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
17 Pmax=1.522;                  % POTENCIA MAX
18 Pmin=Pmax*10^-4;            % POTENCIA MIN
19 SNIR_alvo =10^(1.7);        %
20
21
22
23 % ATENUACOES DO Tx AT SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
24
25 loss_star =10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
26
27 g=zeros(k,1);                % ALOCAR
    MEMORIA
28
29 for i=1:k
30
31     g(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star;    % ATENUACOES EM dB
32
33 end
34
35 for i=1:k

```

```

36
37     g(i)=10^(-g(i)/10);           % ATENUACAO LINEAR
38
39 end
40
41
42 ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA A T   Rx
43
44 for i=1:k
45
46     g_(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec;   % ATENUACOES EM dB
47
48 end
49
50 for i=1:k
51
52     g_(i)=10^(-g_(i)/10);           % ATENUACAO LINEAR
53
54 end
55
56
57
58 for i=1:k
59     if p(i)<0
60         p(i)=0;
61     end
62 end
63 %}
64
65 fth = f_SNIR(p,SNIR_alvo_db,d);
66
67 soma = 0;
68
69 for i=1:k
70
71     soma = soma + fth(i)*(1-(p(i)/Pmax));
72
73 end
74
75
76 custo = soma/k;

```

77

78

79 **end**

A função **f\_VELOCIDADE** é responsável atualizar a velocidade e posição da partícula seguir

---

### **f\_VELOCIDADE**

---

```

1 function [ velocidade ,b] = f_VELOCIDADE(p, velocidade_k ,b_p ,
    bpbest , bgbest ,w)
2
3 C1=1.2;% PARAMETRO C1 DA ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
4 C2=1.8;% PARAMETRO C2 DA ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
5 Pmax=1.522;% POTENCIA MAX
6 Pmin=0.1*10^-4;% POTENCIA MIN
7 k=numel(bgbest);
8
9 p_max_min = zeros(k,2);
10
11 for i=1:k
12
13     p_max_min(i,1) = 0.79*p(i); % O MINIMO FICA NA COLUNA
        1
14     p_max_min(i,2) = 5.1*p(i); % O MAXIMO FICA NA COLUNA
        2
15
16 end
17
18 for i=1:k
19     if p_max_min(i,2) > 1.522
20         p_max_min(i,2) = 1.522;
21     else
22         end
23
24 end
25
26
27 v_max = zeros(k,1);
28 fator_velocidade = 0.2;
29
30 for i=1:k

```

```

31     v_max(i) = fator_velocidade * (p_max_min(i,2) -
        p_max_min(i,1));
32 end
33
34
35 for i=1:k
36
37     velocidade_k(i) = w * velocidade_k(i) + C1*rand(1)*(
        bpbest(i)-b_p(i)) + C2*rand(1)*(bgbest(i)-b_p(i));
38
39     if velocidade_k(i)>v_max(i)
40         velocidade_k(i)=v_max(i);
41     else
42     end
43
44     if velocidade_k(i)<-(v_max(i))
45         velocidade_k(i)=-v_max(i);
46     else
47     end
48
49
50 end
51
52 velocidade = velocidade_k;
53 b = b_p + velocidade;
54
55 end

```

A função **f\_VERSAO\_MATRICIAL** exibida na linha 65 do ficheiro principal do PSO clássico é inspirada na forma matricial apresentada anteriormente. Os valores configurados entre as linhas 11 e 16 da função **f\_VELOCIDADE** são baseados na observação dos valores encontrados através dos valores de  $P_{K_{max}}$  e  $P_{K_{min}}$  da secção 5.2. O código da função **f\_VERSAO\_MATRICIAL** segue a seguir.

---

#### f\_VERSAO\_MATRICIAL

---

```

1 function [p_mtrcl] = f_VERSAO_MATRICIAL ( k, SNIR_alvo_db, d
    )
2
3
4 nsp=2;% FATOR DE RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA

```

```

5 h=6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
6 fc=193.1*10^12;% FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
7 R=10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [Gbps]
8 Bo=2*R;% LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
9 Gamp=100;% GANHO DO AMPLIFICADOR
10 q=31;% PESO DO CODIGO
11 oh=0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
12 % k% NUMERO DE USUARIOS
13 % d% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS
14 loss_dec=5; % PERDA DO DETECTOR [dB]
15
16 %
17 Nsp = nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUIDO DE EMISSAO
    ESPONTANEA %
18 Pmax = 1.522; % POTENCIA MAX
19 Pmin = 0.1*10^-4; % POTENCIA MIN
20
21 SNIR_alvo = 10^(SNIR_alvo_db/10);
22
23 %

```

---

```

24
25 % ===== ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR
    ESTRELA =====
26
27 loss_star = 10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA
    DO ACOPLADOR [dB]
28
29 gdb=zeros(k,1); % ALOCAR
    MEMORIA
30
31 for i=1:k
32
33     gdb(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star; % ATENUACOES EM
        dB
34
35 end
36
37 g=zeros(k,1);
38

```

```

39 for i=1:k
40
41     g(i)=10^(-gdb(i)/10);           % ATENUACAO LINEAR
42
43 end
44
45
46
47 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA A T Rx
48
49
50
51 g_db=zeros(k,i);
52
53 for i=1:k
54
55     g_db(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec; % ATENUACOES EM
        dB
56
57 end
58
59 g_-=zeros(k,1);
60
61 for i=1:k
62
63     g_(i)=10^(-g_db(i)/10);       % ATENUACAO LINEAR
64
65 end
66
67
68 H=zeros(k,k);                    % ALOCACAO DE MEMORIA
69
70 for i=1:k
71
72     H(1:k,i)=g(i);
73
74 end
75
76 for j=1:k
77
78     H(j,1:k)=(H(j,1:k)/(g(j)));

```

```

79
80 end
81
82 for i=1:k
83
84     for j=1:k
85         if i==j
86             H(i , i)=0;
87         end
88     end
89
90 end
91
92 CIR=SNIR_alvo*oh/(q^2);%Relacao portadora interferencia
93
94 u=zeros(k,1);
95
96 for i=1:k
97
98     u(i)=2*SNIR_alvo*Nsp/((q^2)*Gamp*g(i)*g_(i)); % VETOR
          DE POTENCIA DO RUIDO NORMALIZADO
99
100 end
101
102 I=eye(k);
103
104 C=CIR*I;
105
106 Y=inv([I-C*H]); %inversao
107
108 p=Y*u; % vetor de potencia
109
110
111 somatorio = 0;
112
113 for i=1:k
114     somatorio = somatorio + p(i)*g(i);
115 end
116
117 SNIR=zeros(k,1);
118

```

```

119 for i=1:k
120
121     SNIR(i) =( Gamp*q^2*p(i)*g(i) ) / ( Gamp*oh^2*(
        somatorio - (p(i)*g(i)) ) + (2*Nsp/g_(i)) );
122
123 end
124
125
126 SNIR_db = 10*log10(SNIR);
127 p_dbm = 10*log10(p/10^-3);
128
129 p_mtrcl = p;
130
131 end

```

A função **f\_SNIR** é responsável por avaliar se a SNIR está entre a SNIR alvo e a SNIR máxima é semelhante ao ao código apresentado anteriormente, entretanto é apresentada para um caso geral onde  $k \neq 7$ . O código em linguagem MATLAB segue a seguir.

---

### f\_SNIR

---

```

1 function FTH =f_SNIR (p,SNIR_alvo_db,d)
2
3 % PARAMETROS
4
5 nsp=2;% FATOR DE RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
6 h=6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
7 fc =193.1*10^12;% FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
8 R=10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [Gbps]
9 Bo=2*R;% LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
10 Gamp=100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
11 q=31;% PESO DO CODIGO
12 oh=0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
13 k=numel(p);% NUMERO DE USUARIOS
14 % d% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS
15 loss_dec=5;% PERDA DO DECTOR [dB]
16
17 %
18 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo; % RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
        %
19 Pmax=1.522; % POTENCIA MAX

```

```

20 Pmin=0.1*10^-4;                                % POTENCIA MIN
21
22 SNIR_alvo=10^(SNIR_alvo_db/10);                %
23 SNIR_max = 10*log10((q*q)/(0.29*(k-1)));
24
25
26 ATENUACOES DO Tx AT SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
    =====
27
28 loss_star=10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
29
30 gdb=zeros(k,1);% ALOCAR MEMORIA
31
32 for i=1:k
33
34     gdb(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star; % ATENUACOES EM
        dB
35
36 end
37
38 g=zeros(k,1);
39
40 for i=1:k
41
42     g(i)=10^(-gdb(i)/10);% ATENUACAO LINEAR
43
44 end
45
46
47 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA AT Rx
48
49 g_db=zeros(k,i);
50
51 for i=1:k
52
53     g_db(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec; % ATENUACOES EM
        dB
54
55 end
56

```

```

57 g_=zeros(k,1);
58
59 for i=1:k
60
61     g_(i)=10^(-g_db(i)/10);% ATENUACAO LINEAR
62
63 end
64
65 somatorio = 0;
66
67 for i=1:k
68     somatorio = somatorio + p(i)*g(i);
69 end
70
71
72 SNIR=zeros(k,1);
73
74 for i=1:k
75
76     SNIR(i) =( Gamp*q^2*p(i)*g(i) ) / ( Gamp*oh^2*(
77         somatorio - (p(i)*g(i)) ) + (2*Nsp/g_(i)) );
78
79 end
80
81
82 SNIR_db=10*log10(SNIR);
83
84
85
86 FTH= (SNIR_db > SNIR_alvo_db ) & (SNIR_db < SNIR_max);
87
88 end

```

Para o caso do PSO clássico a função **f\_MATRIX** exibida na linha 67 do ficheiro principal do PSO é apresentada a seguir.

---

### **f\_MATRIX**

---

```

1 function B = f_MATRIX (p)
2
3

```

```

4 k=numel(p);
5
6 p_max_min = zeros(k,2);
7
8 for i=1:k
9
10     p_max_min(i,1) = 0.79*p(i); % O MINIMO FICA NA COLUNA
        1
11     p_max_min(i,2) = 5.1*p(i); % O MAXIMO FICA NA COLUNA
        2
12
13     %p_max_min(i,3) = int16(i); % O MAXIMO FICA NA COLUNA
        2
14
15 end
16
17 for i=1:k
18     if p_max_min(i,2) > 1.522
19         p_max_min(i,2) = 1.522;
20     else
21         end
22
23 end
24
25 for j=1:(k+2)
26
27     b=zeros(k,1);
28
29     for i=1:k
30
31         b(i) = (p_max_min(i,2)-p_max_min(i,1)) * rand
            (1) + p_max_min(i,1);
32
33     end
34
35     b=sort(b);
36     B(1:k,j)=b;
37 end
38
39
40 end

```

Para casos onde o peso inercial  $\omega[t]$  varia gradualmente de um valor maior para um valor menor como apresentado pela equação 4.4, foi implementada uma função que retorna o valor de  $\omega[t]$  de acordo com o número de geração  $\mathcal{G}$  fornecido. A função **f\_W** é apresentada a seguir.

---

**f\_W**

---

```

1
2 function [w] = f_W(G,t)
3
4
5 w_inicial=0.9;    % PESO INERCIAL INICIAL
6 w_final=0;       % PESO INERCIAL FINAL
7
8
9 w = ((w_inicial - w_final)*((G-t)/G)) + w_final ;
10
11
12 end

```

Por fim, para acompanhar a evolução da SNIR foi implementada uma função chamada **f\_EV\_SNIR** que permite armazenar o valor da SNIR em cada OCP ao longo das gerações  $\mathcal{G}$ . O código em MATLAB para a função **f\_EV\_SNIR** é apresentado a seguir

---

**f\_EV\_SNIR**

---

```

1 function [ev_SNIR] = f_EV_SNIR (B_gbest ,G,d)
2
3 nsp=2;% FATOR DE RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
4 h=6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
5 fc =193.1*10^12;% FREQUÊNCIA DA PORTADORA [Hz]
6 R=10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSÃO MÍNIMA [Gbps]
7 Bo=2*R;% LARGURA DE BANDA ÓPTICA [Hz]
8 Gamp=100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
9 q=31;% PESO DO CÓDIGO
10 oh=0.29;% MÉDIA DA VARIÂNCIA DE HAMMING
11 % d % INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS
12
13 loss_dec=5;% PERDA DO DETECTOR [dB]
14
15 %

```

```

16 Nsp=nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;    % RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
    %
17 Pmax=1.522;                    % POTENCIA MAX
18 Pmin=0.1*10^-4;                % POTENCIA MIN
19 SNIR_alvo_db = 17;
20 SNIR_alvo=10^(SNIR_alvo_db/10);    %
21 k=numel(B_gbest(1:end,1));
22
23 % %
24
25 % ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
26
27 loss_star=10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
28
29 gdb=zeros(k,1);                % ALOCAR
    MEMORIA
30
31 for i=1:k
32
33     gdb(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_star;    % ATENUACOES EM
        dB
34
35 end
36
37 g=zeros(k,1);
38
39 for i=1:k
40
41     g(i)=10^(-gdb(i)/10);                % ATENUACAO LINEAR
42
43 end
44
45 g_db=zeros(k,i);
46
47 for i=1:k
48
49     g_db(i)=0.2*(2+d*(i-1)) + loss_dec;    % ATENUACOES EM
        dB
50
51 end

```

```

52
53 g_=zeros(k,1);
54
55 for i=1:k
56
57     g_(i)=10^(-g_db(i)/10);    % ATENUACAO LINEAR
58
59 end
60
61 ev_SNIR=zeros(k,G);
62
63 for n=1:G
64
65     somatorio = 0;
66     p=B_gbest(1:k,n);
67
68     for i=1:k
69         somatorio = somatorio + p(i)*g(i);
70     end
71
72     SNIR=zeros(k,1);
73
74
75     for i=1:k
76
77         SNIR(i) =( Gamp*q^2*p(i)*g(i) ) / ( Gamp*
78             oh^2*( somatorio - (p(i)*g(i)) ) + (2*
79                 Nsp/g_(i)) );
80
81     end
82
83     SNIR_db=10*log10(SNIR);
84
85     ev_SNIR(1:k,n)=SNIR_db;
86 end
end

```

## Anexo D

---

# PSO baseado em múltiplos exames de método 1

---

Neste anexo será abordado sobre o PSO de múltiplos exames do primeiro método de atualização da velocidade. As funções `f_SNIR`, `f_CUSTO`, `f_MATRIX`, `f_VERSAO_MATRICIAL` apresentadas anteriormente são as mesmas utilizadas para o ficheiro principal do PSO de múltiplos exames de método 1.

### Ficheiro principal do PSO de múltiplos exames de método 1

---

```
1
2 % PARAMETROS
3
4
5 k = 19;% NUMERO DE USUARIOIS
6 SNIR_alvo_db = 17;% [dB]
7 d = 6;% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS [km
8     ]
9 % NUMERO DE PARTICULAS
10 k1 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 1
11 k2 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 2
12 k3 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 3
13
14 nsp = 2;% FATOR DE RUÍDO DE EMISSÃO ESPONTÂNEA
15 h = 6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
16 fc = 193.1*10^12;% FREQUÊNCIA DA PORTADORA [Hz]
17 R = 10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSÃO MÍNIMA [Gbps]
18 Bo = 2*R;% LARGURA DE BANDA ÓPTICA [Hz]
```

```

19 Gamp = 100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
20 q = 31;% PESO DO CODIGO
21 oh = 0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
22
23 loss_dec=5; % PERDA DO DECTOR [dB]
24
25 %
26 Nsp = nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;% RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
    %
27 Pmax = 1.522;% POTENCIA MAX [W] ESTABELECIDO PELO LIMITE
    DE BRILLOUIN
28 Pmin = 0.1*10^-4;% POTENCIA MIN [W]
29
30 SNIR_alvo = 10^(SNIR_alvo_db/10); % [LINEAR]
31
32
33
34 % ATENUACOES DO Tx ATE SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA
35
36 loss_star=10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
37
38 g=zeros(k,1); % ALOCAR
    MEMORIA
39
40 for i=1:k
41
42     g(i)=0.2*(2+d*i) + loss_star; % ATENUACOES EM dB
43
44 end
45
46 for i=1:k
47
48     g(i)=10^(-g(i)/10); % ATENUACAO LINEAR
49
50 end
51
52
53
54 % ATENUACOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA ATE Rx
55

```

```

56
57
58 g_=zeros(k,1);
59 for i=1:k
60
61     g_(i)=0.2*(2+d*i) + loss_dec;    % ATENUACOES EM dB
62
63 end
64
65 for i=1:k
66
67     g_(i)=10^(-g_(i)/10);           % ATENUACAO LINEAR
68
69 end
70
71 % PARAMETROS DO PSO
72 t=0;
73 G=100000;
74
75
76
77
78 p = fVERSÃO_MATRICIAL (k,SNIR_alvo_db,d);
79
80 B = fMATRIX(p,k1,k2,k3);
81
82 B_0 = B;
83
84 custo = zeros((k),1);
85
86 for u=1:k
87     custo(u)= fCUSTO(B(1:k,u),SNIR_alvo_db,d);
88
89 end
90
91
92
93 velocidade1 = zeros(k,k1);           % ALOCACAO DE
    MEMORIA TORNA O ALGORITMO MAIS RAPIDO
94 velocidade2 = zeros(k,k2);
95 velocidade3 = zeros(k,k3);

```

```

96
97 b_pbest1 = B(1:k,1:k1);
98 b_pbest2 = B(1:k,(k1+1):(k1+k2));
99 b_pbest3 = B(1:k,((k1+k2+1):end));
100
101
102
103 b_gbest = p;
104
105 B_gbest= zeros(k,G);
106
107 custo_gbest = f_CUSTO(b_gbest,SNIR_alvo_db,d); % ALOCACAO
    DE MEMORIA
108
109 W=zeros(G,1); % ALOCACAO
    DE MEMORIA
110
111 t_aux=0; % t_aux e
    uma variavel t auxiliar que permite manipular variaveis
    em double
112
113 swarm=zeros(G,1);
114
115
116 %swarm(1)=5;
117 aux_swarm=5;
118
119 while t<G
120
121
122     w=f_W(G,t_aux,0.9,0.1);
123     W(t+1)=w;
124
125     % SUB ENXAME 1
126
127     for i=1:(k1)
128         [velocidade1(1:k,i),B(1:k,i)] = f_VELOCIDADE_1(p,
            velocidade1(1:k,i), B(1:k,i), b_pbest1(1:k,i),
            b_gbest,w);
129         custo_aux = f_CUSTO(B(1:k,i),SNIR_alvo_db,d);
130

```

```

131         if custo_aux > custo(i)
132             custo(i)= custo_aux;
133             b_pbest1(1:k,i) = B(1:k,i);
134         else
135         end
136
137         if custo_aux> custo_gbest
138             custo_gbest = custo_aux;
139             b_gbest = B(1:k,i);
140             swarm(t)=1;
141         else
142         end
143         b_gbest;
144         B_gbest(1:k,t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
145         EVOLUCAO DA b_gbest
146
147     end
148
149 % SUB ENXAME 2
150
151 for i=1:(k2)
152     [velocidade2(1:k,i),B(1:k,i)] = f_VELOCIDADE_2(p,
153         velocidade2(1:k,i), B(1:k,i), b_pbest2(1:k,i),
154         b_gbest);
155     custo_aux = f_CUSTO(B(1:k,i),SNIR_alvo_db,d);
156
157     if custo_aux > custo(i)
158         custo(i)= custo_aux;
159         b_pbest2(1:k,i) = B(1:k,i);
160     else
161     end
162
163     if custo_aux> custo_gbest
164         custo_gbest = custo_aux;
165         b_gbest = B(1:k,i);
166         swarm(t)=2;
167     else
168     end
169     b_gbest;
170     B_gbest(1:k,t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
171     EVOLUCAO DA b_gbest

```

```

168     end
169
170
171 % SUB ENXAME 3
172
173     for i=1:(k3)
174         [velocidade3(1:k,i),B(1:k,i)] = f_VELOCIDADE_3(p,
175             velocidade3(1:k,i), B(1:k,i), b_pbest3(1:k,i),
176             b_gbest);
177         custo_aux = f_CUSTO(B(1:k,i),SNIR_alvo_db,d);
178
179         if custo_aux > custo(i)
180             custo(i)= custo_aux;
181             b_pbest3(1:k,i) = B(1:k,i);
182         else
183             end
184
185             if custo_aux> custo_gbest
186                 custo_gbest = custo_aux;
187                 b_gbest = B(1:k,i);
188                 swarm(t)=3;
189             else
190                 end
191                 b_gbest;
192                 B_gbest(1:k,t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
193                 EVOLUCAO DA b_gbest
194
195     end
196
197     t=t+1;
198     t_aux=t_aux+1;
199     t
200 end
201 B_custos=zeros(G,1);% MATRIZ COM VALORES DE CUSTO DA
202     b_gbest E ALOCACAO DE MEMORIA DA MESMA
203
204     for r=1:G

```

```

205     B_custos(r)=f_CUSTO(B_gbest(1:k,r),SNIR_alvo_db,d);
           % MATRIZ DE CUSTOS DE b_gbest
206
207
208 end

```

As funções de atualização da velocidade **f\_VELOCIDADE\_1**, **f\_VELOCIDADE\_2** e **f\_VELOCIDADE\_3**, tem estrutura muito semelhante, com apenas parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $\omega$  diferentes, dessa forma será apenas apresentada a função **f\_VELOCIDADE\_1** em linguagem MATLAB a seguir.

---

### f\_VELOCIDADE\_1

---

```

1 function [velocidade,b] = f_VELOCIDADE_1(p,velocidade_k ,
      b_p , bpbest , bgbest , w1)
2
3 C1=2;                                     % PARAMETRO C1 DA
      ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
4 C2=2;                                     % PARAMETRO C2 DA
      ATUALIZACAO DA VELOCIDADE
5 Pmax=1.522;                               % POTENCIA MAX
6 Pmin=0.1*10^-4;                          % POTENCIA MIN
7 k=numel(bgbest);
8
9 p_max_min = zeros(k,2);
10
11 for i=1:k
12
13     p_max_min(i,1) = 0.79*p(i); % O MINIMO FICA NA COLUNA
      1
14     p_max_min(i,2) = 5.1*p(i); % O MAXIMO FICA NA COLUNA
      2
15
16 end
17
18 for i=1:k
19     if p_max_min(i,2) > 1.522
20         p_max_min(i,2) = 1.522;
21     else
22     end
23
24 end

```

```

25
26
27 v_max = zeros(k,1);
28 fator_velocidade = 0.2;
29
30 for i=1:k
31     v_max(i) = fator_velocidade * (p_max_min(i,2) -
32         p_max_min(i,1));
33 end
34
35 for i=1:k
36
37     velocidade_k(i) = w1 * velocidade_k(i) + C1*rand(1)*
38         (bpbest(i)-b_p(i)) + C2*rand(1)*(gbest(i)-b_p(i));
39
40     if velocidade_k(i)>v_max(i)
41         velocidade_k(i)=v_max(i);
42     else
43     end
44
45     if velocidade_k(i)<-(v_max(i))
46         velocidade_k(i)=-v_max(i);
47     else
48     end
49
50 end
51
52 velocidade = velocidade_k;
53 b = b_p + velocidade;
54
55
56 for i=1:k
57     if b(i)==0
58         b(i)=0;
59     else
60     end
61 end
62
63 end

```

## Anexo E

---

# PSO baseado em múltiplos exames de método 2

---

O PSO baseado em múltiplos exames de método 2 é muito semelhante ao PSO de método 1, as funções presentes no ficheiro principal do PSO de múltiplos exames de método 2 foram apresentadas anteriormente.

### Ficheiro principal do PSO de múltiplos exames de método 2

---

```
1 k = 19;% NUMERO DE USUARIOIS
2 SNIR_alvo_db = 17;% [dB]
3 d = 6;% INCREMENTO DO COMPRIMENTO ENTRE TXs SUCESSIVOS [km
  ]
4
5                               % NUMERO DE PARTICULAS
6 k1 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 1
7 k2 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 2
8 k3 = int16(k/2);% TAMANHO DO SUBEXAME 3
9
10
11 nsp = 2;% FATOR DE RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
12 h = 6.63*10^(-34);% CONSTANTE DE PLANCK
13 fc = 193.1*10^12;% FREUQUENCIA DA PORTADORA [Hz]
14 R = 10*10^9;% TAXA DE TRANSMISSAO MINIMA [Gbps]
15 Bo = 2*R;% LARGURA DE BANDA OPTICA [Hz]
16 Gamp = 100;% GANHO DO AMPLIFICADOR [dB]
17 q = 31;% PESO DO CODIGO
18 oh = 0.29;% MEDIA DA VARIAN... DE HAMMING
19
```

```

20 loss_dec=5;% PERDA DO DECTOR [dB]
21
22 %
23 Nsp = nsp*h*fc*(Gamp-1)*Bo;% RUIDO DE EMISSAO ESPONTANEA
24 Pmax = 1.522;% POTENCIA MAX [W] ESTABELECIDO PELO LIMITE
    DE BRILLOUIN
25 Pmin = 0.1*10^-4;% POTENCIA MIN [W]
26
27 SNIR_alvo = 10^(SNIR_alvo_db/10);% [LINEAR]
28
29 % ===== ATENUACOES DO Tx AT SAIDA DO ACOPLADOR
    ESTRELA =====
30
31 loss_star=10*log10(k)-(10*log2(k)*log10(0.2)); % PERDA DO
    ACOPLADOR [dB]
32
33 g=zeros(k,1);% ALOCAR MEMORIA
34
35 for i=1:k
36
37     g(i)=0.2*(2+d*i) + loss_star; % ATENUACOES EM dB
38
39 end
40
41 for i=1:k
42
43     g(i)=10^(-g(i)/10);% ATENUAAAO LINEAR
44
45 end
46
47
48
49 % ATENUAAOES DA SAIDA DO ACOPLADOR ESTRELA AT Rx
50
51 g_=zeros(k,1);
52 for i=1:k
53
54     g_(i)=0.2*(2+d*i) + loss_dec; % ATENUAAOES EM dB
55
56 end
57

```

```

58 for i=1:k
59
60     g_(i)=10^(-g_(i)/10);           % ATENUAAAO LINEAR
61
62 end
63
64 % PARAMETROS DO PSO
65
66 G=100000;
67 %t=int16(0);
68 t=0;
69
70
71 p = f_VERSAO_MATRICIAL (k, SNIR_alvo_db ,d);
72
73 B = f_MATRIX(p, k1 ,k2 ,k3);
74
75 B_0 = B;
76
77 custo = zeros((G),1);
78
79 %{
80 for u=1:k
81     custo(u)= f_CUSTO(B(1:k,u) ,SNIR_alvo_db ,d);
82
83 end
84 %}
85
86
87 velocidade1 = zeros(k,k1);% ALOCACAO DE MEMORIA TORNA O
      ALGORITMO MAIS RAPIDO
88 velocidade2 = zeros(k,k2);
89 velocidade3 = zeros(k,k3);
90
91 b_pbest1 = B(1:k,1:k1);
92 b_pbest2 = B(1:k,(k1+1):(k1+k2));
93 b_pbest3 = B(1:k,((k1+k2+1):end));
94
95
96
97 b_gbest = p;

```

```

98
99 B_gbest= zeros(k,G);
100
101 custo_gbest = f_CUSTO(b_gbest,SNIR_alvo_db,d); % ALOCACAO
    DE MEMORIA
102
103 W=zeros(G,1);% ALOCACAO DE MEMORIA
104
105 t_aux=0;% t_aux e uma variavel t auxiliar que permite
    manipular variaveis em double
106
107 swarm=zeros(G,1);
108
109 while t<G
110
111
112     w=f_W(G,t_aux,0.9,0.1);
113     W(t+1)=w;
114
115
116
117     for i=1:(k1+k2+k3)%+k3)
118
119         it=floor(i/3)+1; % AUXILIA NA ESCOLHA
            DO INDICE DA PARTICULA DO ENXAME, O NUMERO E 3
            POIS SAO 3 ENXAMES
120
121         % ===== SUB ENXAME 1
            =====
122         if mod(i,3)==(1) %& it<=k1
123             [velocidade1(1:k,it),B(1:k,it)] =
                f_VELOCIDADE_1(p,velocidade1(1:k,it), B(1:k
                    ,it), b_pbest1(1:k,it), b_gbest,w);
124             custo_aux = f_CUSTO(B(1:k,it),SNIR_alvo_db,d);
125
126             if custo_aux > custo(it)
127                 custo(it) = custo_aux;
128                 b_pbest1(1:k,it) = B(1:k,it);
129             else
130             end
131

```

```

132         if custo_aux > custo_gbest
133             custo_gbest = custo_aux;
134             b_gbest = B(1:k, it);
135             swarm(t)=1;
136         else
137         end
138         b_gbest;
139         B_gbest(1:k, t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
140             EVOLUCAO DA b_gbest
141
142     else
143     end
144
145     % ===== SUB ENXAME 2
146     % =====
147     if mod(i,3)==(2) & it<=k1
148         [velocidade2(1:k, it), B(1:k, it)] =
149             f_VELOCIDADE_2(p, velocidade2(1:k, it), B(1:k
150                 , it), b_pbest2(1:k, it), b_gbest);
151         custo_aux = f_CUSTO(B(1:k, it), SNIR_alvo_db, d);
152
153         if custo_aux > custo(it)
154             custo(it)= custo_aux;
155             b_pbest2(1:k, it) = B(1:k, it);
156         else
157         end
158
159         if custo_aux > custo_gbest
160             custo_gbest = custo_aux;
161             b_gbest = B(1:k, it);
162             swarm(t)=2;
163         else
164         end
165         b_gbest;
166         B_gbest(1:k, t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA A
167             EVOLUCAO DA b_gbest

```

```

168 % ===== SUB ENXAME 3
169
170     if mod(i,3)==0 & it<=k1
171
172         [ velocidade3(1:k,(it-1)),B(1:k,(it-1))] =
            f_VELOCIDADE_3(p, velocidade3(1:k,(it-1)), B
            (1:k,(it-1)), b_pbest3(1:k,(it-1)), b_gbest)
            ;
173         custo_aux = f_CUSTO(B(1:k,i),SNIR_alvo_db,d);
174
175         if custo_aux > custo(i)
176             custo(i)= custo_aux;
177             b_pbest3(1:k,it) = B(1:k,it);
178         else
179             end
180
181         if custo_aux> custo_gbest
182             custo_gbest = custo_aux;
183             b_gbest = B(1:k,(it-1));
184             swarm(t)=3
185         else
186             end
187         b_gbest;
188         B_gbest(1:k,t+1)=b_gbest;           % ARMAZENA
            A EVOLUCAO DA b_gbest
189         ;
190     else
191     end
192 %%}
193 end
194
195
196
197     t=t+1;
198     t_aux=t_aux+1;
199     t;
200 end
201
202 B_custos=zeros(G,1);                       % MATRIZ COM
            VALORES DE CUSTO DA b_gbest E ALOCACAO DE MEMORIA DA

```

## MESMA

```

203
204 for r=1:G
205
206     B_custos(r)=f_CUSTO(B_gbest(1:k,r),SNIR_alvo_db,d);
           % MATRIZ DE CUSTOS DE b_gbest
207
208
209 end

```

Para obter análises sobre o comportamento do algoritmo e qual sub enxame era responsável pela  $\vec{b}_{gbest}$  foi implementada a função **f\_BUSCA** e é apresentada a seguir.

---

**f\_BUSCA**


---

```

1 function [M] = f_BUSCA(swarm)
2 m=0;
3 G=numel(swarm);
4 index=1;
5 M=zeros(G,2);
6
7 for i=1:G
8     if swarm(i) ~ =0;
9         if swarm(i) == 1
10            m=[i 1];
11        else
12            if swarm(i) == 2
13                m=[i 2];
14            else
15                m=[i 3];
16            end
17        end
18    else
19        end
20    index=index+1;
21    M(index,1:2)=m;
22 end
23
24 end

```

