

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ana Claudia da Silva Gomes

Técnicas de Inteligência Computacional  
Aplicadas à Estabilidade nos Sistemas DSL

TD:06/20015

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ana Claudia da Silva Gomes

Técnicas de Inteligência Computacional  
Aplicadas à Estabilidade nos Sistemas DSL

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica, ênfase em Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Gomes, Ana Claudia da Silva, 1974 -

Técnicas de inteligência computacional aplicadas  
à estabilidade nos sistemas dsl.

Ana Claudia da Silva Gomes. - 2015.

Orientador: Aldebaro Barreto da Rocha Klautau.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2015.

1. Modem. 2. Inteligência computacional.  
3. Otimização matemática. I. Título.

CDD 22. ed. 621.39814

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Técnicas de Inteligência Computacional Aplicadas à Estabilidade nos Sistemas DSL

**AUTOR: ANA CLAUDIA DA SILVA GOMES**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

**APROVADA EM 29/05/2015**

**BANCA EXAMINADORA:**

.....  
*Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior (UFPA) - Orientador*

.....  
*Prof. Dr. Carlos Aurélio Faria da Rocha (UFSC) - Membro externo*

.....  
*Prof. Dr. Ernesto Leite Pinto (IME) - Membro externo*

.....  
*Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira (UFPA) - Membro*

.....  
*Prof. Dr. Francisco Carlos Bentes Frey Muller (UFPA) - Membro*

**VISTO:**

.....  
**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**

**COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA**

*Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,  
e o homem que adquire conhecimento.  
(Provérbios 3:13)*

# Agradecimentos

A realização de mais esta etapa em minha vida acadêmica não seria possível sem o incentivo e a colaboração de um grupo de pessoas que auxiliaram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Pessoas estas, que já fazem parte do meu grupo de amigos.

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter colocado amigos verdadeiros e leais em meu caminho durante este período de estudo e aos meus pais e irmã, pelo incentivo e apoio contínuo. Ao meu marido Edilberto Lima pela paciência e amor durante essa jornada.

Ao meu orientador Prof. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior pela amizade, apoio e pela maneira atenciosa como conduziu este trabalho.

A todos os amigos do Laboratório de Processamento de Sinais (LAPS) pelo ambiente de verdadeira amizade e companheirismo proporcionado ao longo dos anos, ao grupo de trabalho do Projeto Ericsson em especial ao amigo Ten. Marcio Murilo Conte pela valiosa contribuição, apoio e amizade. À Kelly Souza por estar sempre disposta a ajudar durante esses anos. À amiga Ana Carolina Quintão, pelo tempo usado na revisão do texto.

Agradeço também a todos os professores do PPGEE e ao programa de bolsa de estudo do CNPQ, sem o qual seria impossível dedicação e andamento desta tese.

*Para Ana Luísa, com amor.*

*Mamãe.*

# Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Glossário	ix
Lista de Acrônimos	x
Lista de Símbolos	xiv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 As Tecnologias xDSL . . . . .	3
1.2 Fontes de Interferências nas linhas DSL . . . . .	6
1.2.1 O <i>Crosstalk</i> . . . . .	6
1.2.2 Ruído Impulsivo . . . . .	7
1.2.3 Interferência de Rádio . . . . .	7
1.3 Motivação . . . . .	8
1.4 Estado da arte . . . . .	9
1.4.1 Algoritmos Evolutivos . . . . .	10
1.5 Objetivos da Tese . . . . .	11
1.6 Contribuição da Tese . . . . .	11
1.7 Organização da Tese . . . . .	12
<b>2 Fundamentos de Sistemas DSL</b>	<b>13</b>
2.1 Introdução . . . . .	13
2.2 <i>A modulação discreta multi-ton</i> . . . . .	13
2.3 Modelo de transmissão do canal . . . . .	16



2.4	Alocação de <i>bits</i> ou <i>bitloading</i> . . . . .	17
2.5	Margem de ruído . . . . .	19
2.5.1	Margem como parâmetros do modem . . . . .	19
2.6	Conclusão . . . . .	20
<b>3</b>	<b>O problema de instabilidade nas redes DSL</b>	<b>21</b>
3.1	Introdução . . . . .	21
3.2	A instabilidade nas redes DSL . . . . .	23
3.2.1	Métricas . . . . .	24
3.2.2	Causas da Instabilidade nas redes DSL . . . . .	25
3.3	Estratégias para aumentar a estabilidade nas redes DSL . . . . .	25
3.3.1	Estratégias relacionadas ao controle da utilização da SNR . . . . .	26
3.3.1.1	<i>Stuck-at low rate</i> . . . . .	26
3.3.2	Estratégias da Camada de Enlace . . . . .	27
3.3.3	O Gerenciamento do Espectro . . . . .	27
3.3.3.1	Maximização da taxa . . . . .	29
3.3.4	Ruído Virtual / Ruído Artificial (ANVN) . . . . .	29
3.3.5	Gerenciamento Dinâmico de Linha . . . . .	29
3.4	Conclusão . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Computação Evolutiva para Otimização</b>	<b>32</b>
4.1	Introdução . . . . .	32
4.2	Algoritmos Evolutivos . . . . .	32
4.2.1	Algoritmos Genéticos . . . . .	33
4.2.1.1	Funcionamento de um algoritmo genético canônico . . . . .	34
4.2.1.2	A Representação . . . . .	34
4.2.1.3	A População . . . . .	36
4.2.1.4	A função objetivo ou avaliação ( <i>fitness</i> ) . . . . .	36
4.2.1.5	A Seleção . . . . .	36
4.2.1.6	A Recombinação ( <i>Crossover</i> ) . . . . .	37
4.2.1.7	A Mutação . . . . .	37
4.2.1.8	O Elitismo . . . . .	38

4.3	Inteligência de Enxames . . . . .	38
4.3.1	Otimização por Nuvem de Partículas (PSO) . . . . .	38
4.3.1.1	O Algoritmo PSO . . . . .	39
4.4	Comparação entre PSO e algoritmos Genéticos . . . . .	41
4.5	Otimização Multiobjetivo . . . . .	41
4.5.1	Problemas de Otimização Multiobjetivo . . . . .	42
4.5.2	A dominância de <i>Pareto</i> . . . . .	42
4.5.3	Soluções ótimas de <i>Pareto</i> . . . . .	43
4.5.4	Metas em Otimização Multiobjetivo . . . . .	43
4.6	Algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo . . . . .	44
4.6.1	Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada - NSGA-II . . . . .	44
4.6.1.1	A ordenação por dominância . . . . .	45
4.6.1.2	Torneio por Distância de multidão ( <i>Crowding Distance sorting</i> ) . . . . .	47
4.6.1.3	O <i>Crossover</i> Binário Simulado (SBX) . . . . .	50
4.6.1.4	A Mutação Polinomial . . . . .	51
4.7	Algoritmos Multiobjetivos Baseados em Enxame de Partículas . . . . .	51
4.7.1	Algoritmo Baseado em Enxame de Partículas com Construção de Velocidade: SMPSO . . . . .	53
4.8	Conclusão . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Algoritmos Híbridos Evolucionários para Maximização de Margem Multi-usário em DSL</b> . . . . .	<b>58</b>
5.1	Introdução . . . . .	58
5.2	O problema de otimização da margem de ruído . . . . .	58
5.3	O problema de otimização da margem com uma visão multiobjetivo . . . . .	61
5.4	Implementação das meta-heurísticas no problema de otimização da margem de ruído . . . . .	63
5.4.1	Codificação . . . . .	63
5.4.2	A função de Avaliação ( <i>fitness</i> ) . . . . .	64
5.4.3	Uma abordagem híbrida - Otimização local através de minimização da potência . . . . .	65
5.4.3.1	Algoritmos de Minimização de Potência . . . . .	66

5.4.4	O algoritmo genético . . . . .	66
5.4.4.1	População . . . . .	66
5.4.4.2	Seleção . . . . .	67
5.4.4.3	Operadores de <i>Crossover</i> e Mutação . . . . .	69
5.4.4.4	Execução do algoritmo genético . . . . .	69
5.4.5	O algoritmo multiobjetivo por enxame de partículas . . . . .	70
5.4.5.1	População. . . . .	70
5.4.5.2	Arquivo externo de soluções não-dominadas . . . . .	70
5.4.5.3	Atualização da velocidade e posição . . . . .	71
5.4.5.4	Avaliação da função objetivo, operador de turbulência . . . . .	71
5.4.5.5	Execução do algoritmo por enxame de partículas . . . . .	71
5.5	Conclusão . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Resultados e Simulações</b>	<b>73</b>
6.1	Introdução . . . . .	73
6.2	Configuração dos Cenários . . . . .	73
6.3	Princípio de Funcionamento . . . . .	75
6.4	Resultados Numéricos . . . . .	75
6.4.1	Análise das PSDs de transmissão . . . . .	77
6.4.2	Comparação entre o HEMO e o NRME . . . . .	80
6.4.3	Convergência . . . . .	81
6.5	Conclusão . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>85</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>87</b>
	<b>Trabalhos Publicados</b>	<b>98</b>
<b>A</b>	<b>Técnicas de Gerenciamento Dinâmico do Espectro</b>	<b>99</b>
A.1	DSM nível 1 . . . . .	99
A.2	DSM nível 2 . . . . .	100
A.2.1	Soluções Semi-distribuídas . . . . .	102

B Modos de Operação dos Modems DSL	104
C O algoritmo NRME	106
D Acessos em serviços de banda larga fixa	108

# Lista de Figuras

1.1	Distribuição da base de assinantes por tecnologia no Brasil em relação as sete tecnologias mais utilizadas. Dados de fevereiro de 2015. . . . .	2
1.2	Modelo de rede de acesso DSL, envolvendo um cenário com três usuários (CPEs), um terminal remoto (RT) e um escritório central (CO). . . . .	3
1.3	Exemplos das principais fontes de interferências nas redes DSL: o ruído de <i>crosstalk</i> , o ruído impulsivo (IN) e a interferência de rádio frequência (RFI). . . . .	6
1.4	Exemplo de ruído de crosstalk, ilustrando a incidência do Next e Fext . . . . .	7
2.1	Exemplo da modulação DMT onde o canal é dividido em um número de sub-canais paralelos e independentes. . . . .	14
2.2	Blocos da transmissão DMT. . . . .	14
2.3	Ilustração do prefixo cíclico. . . . .	15
3.1	Cenário ilustrando a utilização dos modelos de fibra ótica e serviços DSL (VDSL2 e ADSL2+). . . . .	22
3.2	Cenário ilustrando a utilização dos serviços VDSL2 e ADSL2+ em combinação com modelos de fibra ótica. . . . .	23
3.3	Instabilidade em uma rede num período de tempo de quatro horas. Durante esse monitoramento, o nível do ruído aumentou significativamente em duas ocasiões causando a degradação na transmissão, culminando com retreino do modem. . . . .	24
4.1	Fluxo de execução de um algoritmo genético canônico. . . . .	35
4.2	Fluxograma do funcionamento do <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO). . . . .	40
4.3	Exemplo de iteração do algoritmo NSGA-II . . . . .	45
4.4	A distância de multidão do algoritmo NSGA-II . . . . .	49

5.1	Escalarização não garante diversidade. . . . .	60
5.2	O algoritmo NRME converte a região de taxa obtida pelo IWF em uma região de margem, de acordo com as taxas alvo $R_n^{\min}$ especificadas. . . . .	61
5.3	A solução proposta envolve tanto o problema de otimização de margem como diversidade. . . . .	62
5.4	Síntese do fenótipo através da informação genética armazenada no <i>cromossomo</i> . . . . .	65
5.5	Fluxograma da otimização da margem utilizando o NSGA-II . . . . .	69
5.6	Fluxograma da otimização da margem utilizando o <i>Speed-constrained Multiobjective PSO</i> (SMPSO). . . . .	72
6.1	Near-far access network scenario consisting of 24 ADSL2+ users. . . . .	74
6.2	Regiões de margens para os dois conjuntos de taxas alvos. . . . .	77
6.3	(PSD)s transmitidas para o ponto de operação (6,5.6) considerando as taxas alvo: $R_{CO}^{\text{alvo}} = 4.0$ Mb/s, $R_{RT}^{\text{alvo}} = 12.0$ Mb/s. . . . .	78
6.4	(PSD)s transmitidas para o ponto de operação (6,7.1) considerando as taxas alvo: $R_{CO}^{\text{alvo}} = 4.0$ Mb/s, $R_{RT}^{\text{alvo}} = 12.0$ Mb/s. . . . .	79
6.5	O algoritmo NRME converte uma solução de maximização de taxa em outra de maximização de margem. . . . .	82
6.6	Evolução do AG em torno das gerações. . . . .	83
6.7	Evolução do PSO em torno do número das gerações. . . . .	84
C.1	O algoritmo NRME converte a região de taxa obtida pelo IWF em uma região de margem, de acordo com as taxas alvo $R_n^{\min}$ especificadas. . . . .	106

# Lista de Tabelas

1.1	Tecnologias xDSL . . . . .	5
4.1	Principais modelos de algoritmos multiobjetivos evolucionários, seus respectivos autores e classificação quanto a presença de elitismo. . . . .	56
4.2	Diferentes implementações de algoritmos multiobjetivos baseados em Enxame de Partículas . . . . .	57
5.1	Exemplo de codificação utilizando o formato real, para um cenário formado por duas linhas DSL, onde cada indivíduo da população é constituído de pesos para o problema de minimização de potência (duas primeiras colunas) e margens de ruído (duas últimas colunas) das duas linhas. . . . .	64
6.1	Parâmetros de configuração do AG . . . . .	76
6.2	Parâmetros de configuração do SMPSO . . . . .	76
D.1	Acessos em serviços de banda larga fixa no período de jan/fev de 2015. . . . .	109

# Glossário

## *crosstalk*

Ruído devido ao efeito do acoplamento magnético entre pares trançados em um mesmo *binders*. 6, 8, 10, 19, 20, 25, 28–31, 80, 101

## **downstream**

Em sistemas de comunicações o termo se refere a comunicação no sentido da operadora para usuário. 4, 72

## **upstream**

Em sistemas de comunicações o termo se refere a comunicação no sentido do usuário para operadora. 4



# Lista de Acrônimos

## A

**ADSL** *Assynchronous Digital Subscriber Lines*. 4, 7, 8, 13, 27, 29

**ADSL2** *Assynchronous Digital Subscriber Lines 2*. 4

**ADSL2+** *Assynchronous Digital Subscriber Lines 2 Plus*. 4, 7, 8, 22, 73

**AE** *Algoritmos Evolutivos*. 10, 32, 64

**AG** *Algoritmos Genéticos*. vi, 12, 32–36, 41, 55, 62, 63, 65, 68, 69, 72, 73, 80

**AM** *Amplitude Modulation*. 8

**AMA** *Automatic Margin Adaptation*. 8, 26

**AN** *Artificial Noise*. 29

**ANATEL** *Agência Nacional de Telecomunicações*. 2

**ANSI** *American National Standards Institute*. 4

## B

**BER** *Bit Error Rate*. 18, 23

## C

**CO** *Central Office*. 2, 3, 22, 72, 73, 75–79

**CPE** *Customer Premises*. 2, 3, 21, 29, 73

## D

**DLM** *Dynamic Line Management*. 29–31

**DMT** *Discrete Multitone Modulation*. 12, 13, 16–18, 20

**DSL** *Digital Subscriber Lines*. 1–4, 6–13, 15, 17–25, 27–29, 31, 55, 58, 59, 61–63, 65, 66, 69, 70, 84, 103, 104

**DSLAM** *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*. 3, 19, 22, 29  
**DSM** *Dynamic Spectrum Management*. 8, 9, 28, 29, 60, 74, 75, 106

## **F**

**FEC** *Forward Error Control*. 27  
**FEQ** *Frequency Domain Equalizer*. 15, 16  
**FEXT** *Far-end Crosstalk*. 6, 7, 79  
**FFT** *Fast Fourier Transformation*. 15  
**FTP** *File Transfer Protocol*. 21  
**FTTB** *Fiber to the Building*. 22  
**FTTH** *Fiber to the House*. 22  
**FTTN** *Fiber to the Node*. 22

## **G**

**G.FAST** *G.fast*. 4

## **H**

**HDSL** *High bit rate DSL*. 4

## **I**

**ICI** *Intercarrier Interference*. 15  
**IFFT** *Inverse Fast Fourier Transformation*. 14, 15  
**IN** *Impulse Noise*. 7  
**INP** *Impulse Noise Protection*. 27, 30, 31  
**IPTV** *Internet Protocol Television*. 2, 21, 24  
**ISB** *Iterative Spectrum Balancing*. 28, 99–101  
**ISDN** *Integrated Services Digital Network*. 3, 4  
**ISI** *Intersymbol Interference*. 15  
**ITU** *International Telecommunication Union*. 4  
**IWF** *Iterative Waterfiling*. 9, 28, 60, 74, 79, 98, 99, 105, 106

## **M**

**MA** *Margin-Adaptive*. 9, 103, 104

**MHM** *Multiuser Harmonized Margin*. 60, 105

**MIMO** *Multiple Inputs Multiple Outputs*. 16

**MM** *Margin Maximization*. 59

**MOPSO** *Multiobjective Particle Swarm Optimization*. 51–54, 62, 63, 70

**MTBE** *Mean Time Between Errors*. 24, 26, 30

**MTBR** *Mean Time Between Resynchronizations*. 24–26, 30

## N

**NEXT** *Near-end crosstalk*. 6, 7, 72

**NRME** *Newton-Raphson Margin Estimation*. 60, 71, 72, 74, 79, 105, 106

**NSGA-II** *Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada - II*. 32, 44, 45, 47, 50, 55, 66–68

## O

**OSB** *Optimal Multiuser Spectrum Balancing*. 99

## P

**PA** *Power Adaptive*. 104

**PSD** *Power Spectral Density*. 28, 58, 60, 62, 63, 69, 75, 77, 79, 100, 105

**PSO** *Particle Swam Optimization*. v, 12, 32, 38–41, 51, 53, 55, 71, 73

## Q

**QAM** *Quadrature Amplitude Modulation*. 14, 16

**QoE** *Quality of Experience*. 22, 23

**QoS** *Quality of Service*. 2, 22, 59, 76, 104

## R

**RA** *Rate-adaptive*. 103

**RDSI** *Rede Digital de Serviços Integrados*. 3

**RFI** *Radio Frequency Interferency*. 7, 8, 20, 25

**RT** *Remote Terminal*. 2, 30, 72, 73, 75–77, 79

## S

- SBX** *Simulated Binary Crossover*. 50, 68, 74
- SCALE** *Low-Complexity Distributed Algorithm*. 101, 102
- SDSL** *Symetric Digital Subscriber Lines*. 4
- SHDSL** *Single Pair High-Speed Digital Subscriber Line*. 4
- SMC** *Spectrum Management Center*. 28, 63, 99, 101, 102
- SMPSO** *Speed-constrained Multiobjective PSO*. vi, 32, 53–55, 70–72, 80
- SNR** *Signal-to-Noise Ratio*. 10, 13, 17, 19, 26, 98
- SSM** *Static Spectrum Balancing*. 27, 28

## T

- TEQ** *Time Domain Equalizer*. 15
- TRA** *Tiered Rate Adaptation*. 26

## U

- UPBO** *Upstream Power Back-off*. 79

## V

- VDSL** *Very High Speed Digital Subscriber Line*. 4, 7, 8, 10
- VDSL2** *Very High Speed Digital Subscriber Line 2*. 4, 7, 8, 22, 25, 29
- VN** *Virtual Noise*. 10, 29
- VoIP** *Voz sobre IP*. 21–23

# Lista de Símbolos

$\mathbf{H}^k$  Matriz  $N \times N$  do canal no tom  $k$  sort. 16

$\text{SNR}_n^k$  Razão sinal ruído do usuário  $n$  no tom  $k$ ; sort. 18

$b_n^k$  Número de *bits* alocado para o usuário  $n$  no tom  $k$ . 17

$\mathbf{x}^k$  Vetor contendo os sinais transmitidos no tom  $k$ . 16

$\mathbf{y}^k$  Vetor contendo os sinais recebidos no tom  $k$ . 16

$\mathbf{z}^k$  Vetor contendo o ruído aditivo (ruído de fundo mais ruído *alien*) no tom  $k$ . 16

$\Delta_f$  Espaçamento entre subcanais. 13

$\mathbf{h}_{n,m}$  Funções de transferência do canal partindo do transmissor  $n$  para o receptor  $m$  no tom  $k$ . 16

$h_{n,m}^k$  Ganho do canal de ruído de FEXT do transmissor  $m$ , para o receptor  $n$  no tom  $k$ . 18

$h_{n,n}^k$  Ganho do canal direto do usuário  $n$  no tom  $k$ . 18

$k$  índice do subcanal. 14

$\mathbf{P}$  Matriz de potência  $N \times K$ , que fornece informação sobre a potência transmitida de todos os usuários  $n$  sobre todos os tons  $k$ . 64

$\zeta^2$  Potência do ruído de fundo no tom  $k$  no receptor  $n$ . 18

# Resumo

A estabilidade da Linhas Digitais do Assinante (DSL) torna-se um grande desafio, quando os serviços conhecidos como *Triple-Play* são fornecidos. Esses serviços devem ser confiáveis, ao mesmo tempo que requerem elevada taxa de transmissão e baixa latência, para uma melhor qualidade de experiência. Entretanto as ferramentas existentes para estabilização das redes DSL, como a adaptação automática da margem (AMA), o *Interleaving*, a proteção ao ruído impulsivo (INP) e o ruído virtual (VN), geralmente causam impacto ou na taxa de transmissão de dados, ou na latência da transmissão na tentativa de melhorar a estabilidade. O presente trabalho, por outro lado, tem como objetivo apresentar uma nova abordagem para estabilização das redes DSL. Essa abordagem é baseada na coordenação multiusuário do espectro que busca mitigar o efeito da interferência de *crosstalk* de maneira que o requisito de taxa de dados factível e a restrição de potência sejam alcançados com uma margem de ruído otimizada. Como, apenas os parâmetros da camada física são ajustados, a latência não é afetada pelo método. A questão é então colocada como um problema de otimização de margem e resolvido através de algoritmos evolucionários em conjunto com técnicas de minimização de potência. Experimentos mostram que o método proposto fornece melhoras significantes em termos de margem de ruído, quando comparado com os algoritmos anteriores, aumentando a estabilidade da rede sem penalizar a taxa de bits ou a latência.

**PALAVRAS-CHAVES:** Linhas Digitais do Assinante (DSL), otimização de margem, algoritmo multiobjetivo.

# Abstract

The stability of digital subscriber lines (DSL) becomes a major challenge when triple-play services are provisioned. These services must be reliable, while requiring relatively high transmission rates and low latency for an overall improved quality of experience. However, the stabilization tools available in DSL systems such as the automatic margin adaptation (AMA), interleaving, impulse noise protection (INP) and virtual noise (VN) usually trade off bit rate or latency in an attempt of improving the stability. The current work, on the other hand, presents a novel approach to the stabilization of the DSL lines. This approach is based on multiuser spectra coordination that seeks to mitigate crosstalk interference effect such that feasible bit rate requirements and power restrictions are met with optimized noise margin. As only physical layer parameters are adjusted, latency is not affected by the method. The problem is posed as a multiuser margin optimization problem and solved by evolutionary algorithms in conjunction with power minimization techniques. Simulations show that the proposed method provides significant improvements in terms of noise margin when compared to a previous algorithm, achieving higher protection for the network without penalizing bit rate or latency.

KEYWORDS: Digital subscriber lines (DSL), margin optimization, multiobjective algorithm.

# Capítulo 1

## Introdução

No decorrer das últimas décadas houve um crescimento na demanda por variados meios de comunicação e serviços, o que culminou com a popularização da *internet* nos anos 90 [1]. No início da operação da *internet*, os provedores de serviços ofereciam taxa de transmissão de dados em torno de 9200 b/s, mas que na época, supria as necessidades de aplicações como acesso *web*, transferência de arquivos e correio eletrônico (*e-mail*) [1, 2]. Além disso, essas aplicações tipicamente exigiam requisitos moderados quanto a questões de robustez e estabilidade da rede [2].

Nesse âmbito, a família de tecnologia conhecida como linhas digitais do assinante - *Digital Subscriber Lines* (DSL) - se tornou um dos meios de maior utilização na transmissão de dados, devido principalmente ao fato do DSL utilizar como meio de acesso as estruturas de redes de telefonia convencional já existentes. Essa coexistência foi permitida em virtude do DSL utilizar técnicas de processamento de sinais com frequências de até 106 MHz sem interferir na faixa de voz (até 4 kHz). Além disso, a utilização da largura de banda do par trançado pode ser otimizada, oferecendo velocidades que variam de 128 Kb/s a 1 Gb/s, de acordo com o comprimento do par trançado utilizado [3–5].

A pré-existência da infra-estrutura de telefonia foi um grande atrativo às operadoras de serviços, pois além de tornar o DSL uma tecnologia economicamente viável, permitiu que as operadoras voltassem seus investimentos para o desenvolvimento de novos serviços e aplicações. Aliado a esse fato, os avanços obtidos nas tecnologias de acesso e nas plataformas de telefonia e vídeo foram decisivos para o surgimento de novas aplicações como: transmissão de vídeo, voz, jogos interativos, educação à distância, video-conferência, etc. A demanda culminou com o surgimento de serviços conhecidos como *Triple Play* (ou oferta tripla), combinando acesso à *internet* banda larga, telefonia e vídeo. Porém, esse tipo de serviço integrado impõe inúmeros requisitos, tornando-se um grande desafio para as operadoras [2].



Em primeiro lugar, para fornecer tais serviços houve a necessidade da taxa de transmissão de dados passar por um aumento significativo, em torno de 4.0 Mb/s, enquanto que na *internet* tradicional, a taxa de transmissão era em torno de 2.0 Mb/s [6]. Aplicações como *Internet Protocol Television* (IPTV), mostraram-se sensíveis a instabilidades durante a transmissão, as quais poderiam gerar desde a pixelização do vídeo, distorção de áudio até o congelamento da tela e perda total de áudio. De uma forma geral, os novos requisitos incluíram desde o planejamento da rede para diferentes tipos de tráfegos até alta disponibilidade, qualidade de serviços - *Quality of Service* (QoS) - personalização, e mecanismos que garantissem a qualidade na transmissão e estabilidade da rede DSL [2, 7, 8].

Dados da *Agência Nacional de Telecomunicações* (ANATEL) [9] mostram que, em relação ao mercado de assinantes de banda larga fixa no Brasil, havia cerca de 22,59 milhões de assinantes, onde 13.224.492 eram usuários da tecnologia xDSL, em comparação a outras tecnologias como modems a cabo (coaxial), fibra, ATM, etc. A Figura 1.1 ilustra essa distribuição em relação as 7 tecnologias mais utilizadas em fevereiro de 2015<sup>1</sup>.

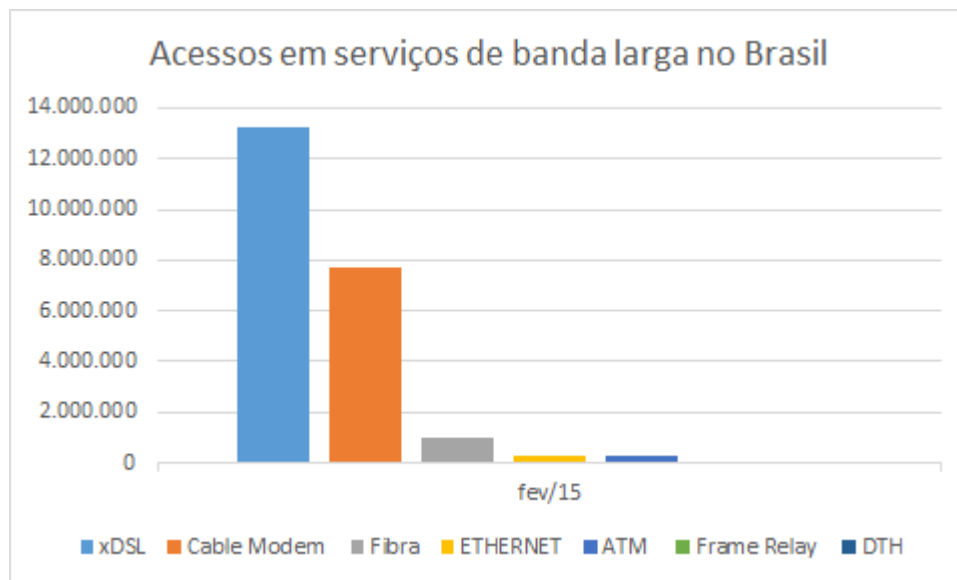


Figura 1.1: Distribuição da base de assinantes por tecnologia no Brasil em relação as sete tecnologias mais utilizadas. Dados de fevereiro de 2015.

A Figura 1.2 ilustra um modelo simplificado da rede de acesso DSL, consistindo de múltiplos pares em um *binder* (conjunto de pares trançados) que conectam o escritório central - ou provedor de serviço (*Central Office* (CO)) - a múltiplos usuários assinantes (*Customer Premises* (CPE)). Para estender sua abrangência, a CO utiliza um terminal remoto (*Remote*

<sup>1</sup>O Apêndice D, contém a distribuição completa dos acessos em serviços de banda larga fixa no Brasil no período de jan/fev de 2015.

*Terminal* (RT)), que é conectado através de fibra ótica. Dessa maneira, a CO consegue fornecer a todos os CPEs do cenário ilustrado serviços como *internet* banda larga. A transmissão que é originada no CPE para o CO, é chamada de transmissão no sentido *upstream*. Já transmissão que é originada no CO para o CPE, é chamada de transmissão no sentido *downstream*.

Um enlace, é tipicamente composto pelo modem do assinante, o meio de transporte (cabo telefônico), e um *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* (DSLAM), que é o transceptor da operadora, capaz de gerenciar várias linhas simultaneamente [5]

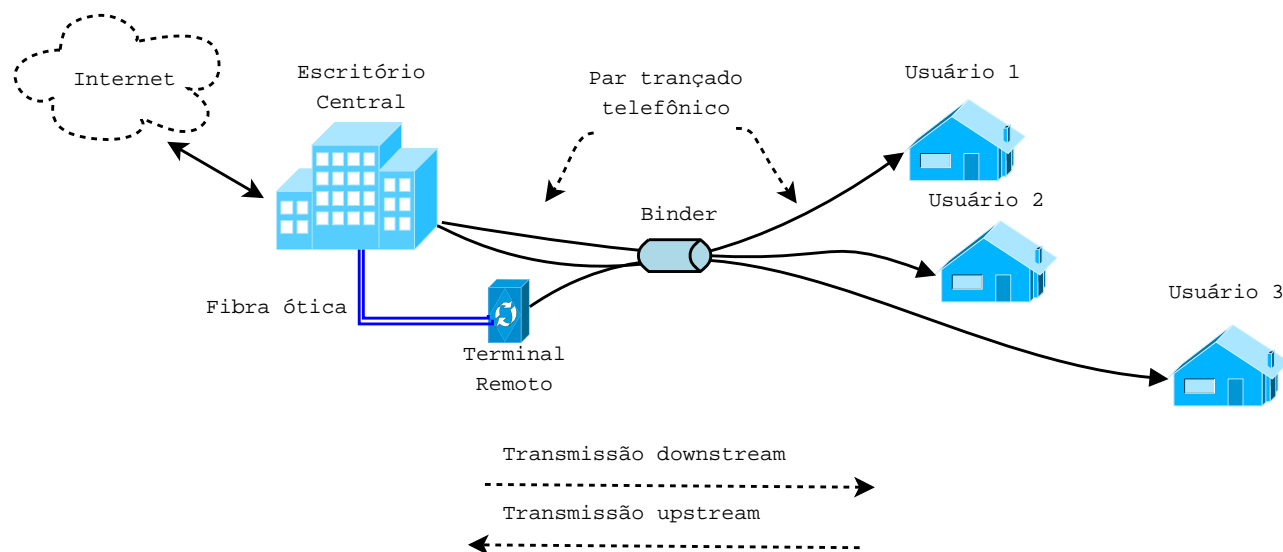


Figura 1.2: Modelo de rede de acesso DSL, envolvendo um cenário com três usuários (CPEs), um terminal remoto (RT) e um escritório central (CO).

## 1.1 As Tecnologias xDSL

Ainda por volta da década de 70 começaram os primeiros esforços na busca de uma tecnologia que substituísse a utilização dos modems analógicos, e integrasse a transmissão de dados e voz. O termo DSL foi originalmente usado para descrever a conexão de assinantes com o serviço *Integrated Services Digital Network* (ISDN) [10] (no Brasil o serviço foi conhecido como Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI)).

O ISDN, que começou a operar por volta de 1985, era um serviço comutado<sup>2</sup> fornecendo

<sup>2</sup>No serviço comutado as conexões de dados são temporárias, ou seja o *link* só é ativado quando está sendo utilizado

---

acesso no modo *full-duplex*<sup>3</sup> a uma taxa de 160 Kb/s usando uma largura de banda de 80 kHz através do par telefônico. Já os primeiros serviços DSL entraram em operação no início dos anos 90 e foram desenvolvidos pela Bellcore [2].

A padronização dos serviços DSL tem sido feita por duas instituições internacionais: o *International Telecommunication Union* (ITU) [11] e o *American National Standards Institute* (ANSI) [12], os quais têm padronizado a utilização do par trançado telefônico como meio de transporte de dados. Essa padronização iniciou com o ISDN e vai até os serviços atuais, mencionados a seguir. As tecnologias xDSL podem ser divididas quanto ao tipo de transmissão em [5]:

- **DSL Simétrico.** As taxas de transmissão de *upstream* e de *downstream* são iguais. Fazem parte do DSL simétrico os serviços:
  1. *High bit rate DSL* (HDSL) [13];
  2. *Symmetric Digital Subscriber Lines* (SDSL) e
  3. *Single Pair High-Speed Digital Subscriber Line* (SHDSL) [14].
- **DSL Assimétrico.** As taxas de transmissão de *downstream* e *upstream* são diferentes, onde tipicamente a taxa de transmissão de *downstream* é maior que a taxa de transmissão de *upstream* [5]. Fazem parte do DSL assimétrico os serviços:
  1. *Asynchronous Digital Subscriber Lines* (ADSL) [15];
  2. *Asynchronous Digital Subscriber Lines 2* (ADSL2) [16] e
  3. *Asynchronous Digital Subscriber Lines 2 Plus* (ADSL2+) [17].
- **DSL Simétrico e Assimétrico.** Operam em ambos os modos.
  1. *Very High Speed Digital Subscriber Line* (VDSL) [18],
  2. *Very High Speed Digital Subscriber Line 2* (VDSL2) [19], e .
  3. *G.fast* (G.FAST) [20].

A Tabela 1.1 [21] fornece uma visão geral das principais tecnologias xDSL existentes, bem como suas principais características.

Tabela 1.1: Tecnologias xDSL

Ano	xDSL	Padrão	Tipo	Taxa de <i>Downstream</i> Máxima	Taxa de <i>Upstream</i> Máxima	Alcance (24 AWG)	Modulação
1992	HDSL	G.991.1	Simétrico	1.544 Mb/s (T1) 2.048 Mb/s (E1)	1.544 Mb/s (T1) 2.048 Mb/s (E1)	3.6 km	2B1Q/CAP
1998	SDSL	-	Simétrico	1.544 Mb/s (T1) 2.048 Mb/s (E1)	1.544 Mb/s (T1) 2.048 Mb/s (E1)	3.0 km	2B1Q/CAP
1999	ADSL	G.992.1 (G.dmt) G.992.2 (G.lite)	Assimétrico	8.0 Mb/s 1.5 Mb/s ( <i>Lite</i> )	1.0 Mb/s 512 kb/s ( <i>Lite</i> )	3.6 km 5.4 km ( <i>Lite</i> )	DMT
2000	SHDSL	G.991.2 (G.shdsl)	Simétrico	2.3 Mb/s 5.6 Mb/s	2.3 Mb/s 5.6 Mb/s	3.3 km	TC-PAM
2001	VDSL	G.993.1 (G.vdsl)	Assimétrico e Simétrico	52 Mb/s (assimét.) 26 Mb/s (simét.)	6 Mb/s (assimét.) 26 Mb/s (simét.)	1.5 km	DMT
2003	ADSL2	G.992.3 (G.dmt.bis) G.992.4 (G.lite.bis)	Assimétrico	12 Mb/s	1.0 Mb/s	5.6 km	DMT
2003	ADSL2+	G.992.5	Assimétrico	24 Mb/s	1.0 Mb/s	6.7 km	DMT
2006	VDSL2	G.993.2	Assimétrico ou Simétrico	200 Mb/s	200 Mb/s	3.6 km	DMT
2014	G.fast	G.9700	Assimétrico ou Simétrico	500 – 1000Mb/s 150MB/s	500 – 1000Mb/s <sup>a</sup> 150 Mb/s	< 100m 250m	DMT

<sup>a</sup>Taxa de downstream+upstream

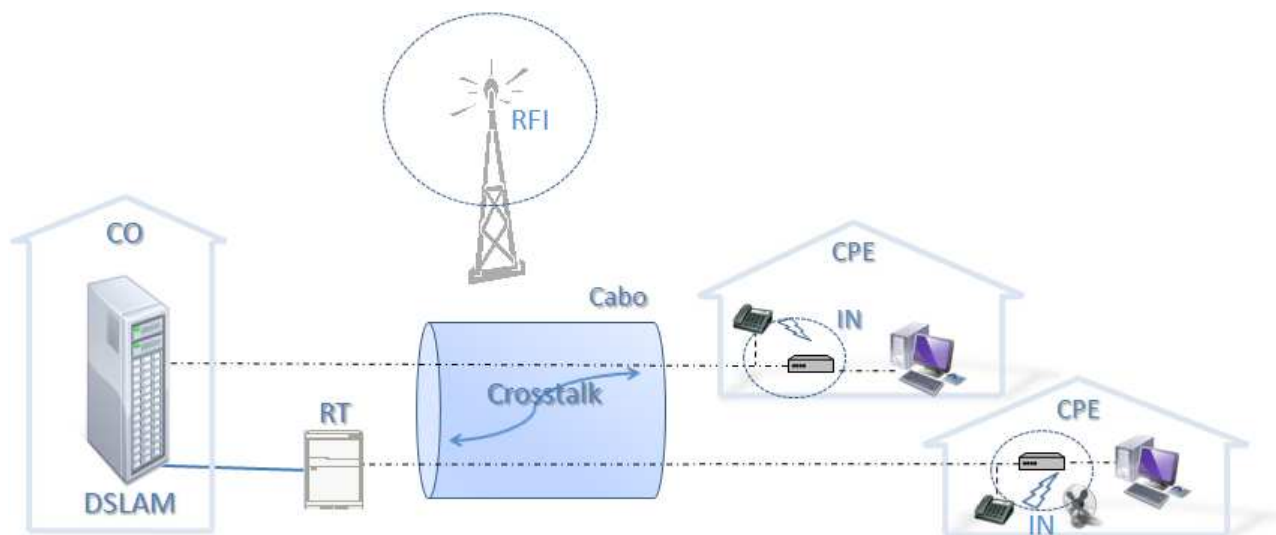


Figura 1.3: Exemplos das principais fontes de interferências nas redes DSL: o ruído de *crosstalk*, o ruído impulsivo (IN) e a interferência de rádio frequência (RFI).

## 1.2 Fontes de Interferências nas linhas DSL

Os canais DSL são atingidos por diferentes tipos de interferências (ou fontes de ruídos), como ilustra a Figura 1.3. Essas interferências são fatores limitantes na transmissão de dados, podendo causar a diminuição da taxa de dados, degradação da transmissão e, dependendo de sua intensidade, a interrupção do serviço.

### 1.2.1 O *Crosstalk*

O ruído de *crosstalk* (também conhecido como diafonia ou linha cruzada) ocorre devido ao acoplamento eletromagnético existente entre os pares adjacentes de um mesmo *binder*. Como resultado, os sinais transmitidos em um par trançado, induzem corrente nos outros pares do mesmo cabo, gerando assim interferência.

Alguns fatores são determinantes no nível do *crosstalk* como: potência do sinal interferente, o comprimento das linhas DSL e banda de frequência, dado que o nível *crosstalk* é maior nas altas frequências, onde a energia de acoplamento é maior [22].

O *crosstalk* é dividido em dois grupos: *Far-end Crosstalk* (FEXT) ou *Near-end crosstalk*

<sup>3</sup>Na transmissão *full-duplex*, tanto o transmissor quanto o receptor podem transmitir dados simultaneamente em ambos os sentidos.

(NEXT) [23], como ilustra a Figura 1.4. Considerando que um transmissor está interferindo em um receptor, o FEXT ocorre quando o transmissor e o receptor estão localizados nos extremos opostos do cabo. Já o NEXT ocorre quando tanto o transmissor quanto o receptor estão localizados no mesmo extremo do cabo.

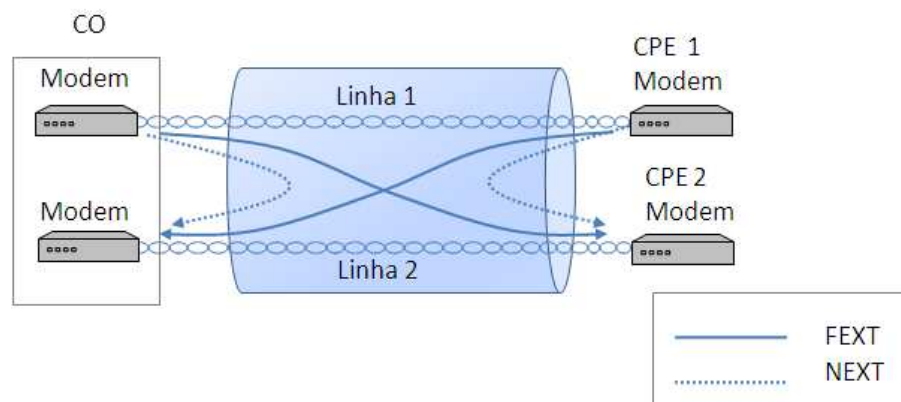


Figura 1.4: Exemplo de ruído de crosstalk, ilustrando a incidência do Next e Fext

### 1.2.2 Ruído Impulsivo

O ruído impulsivo (*Impulse Noise* (IN)) é um dos principais fatores que influenciam na estabilidade da rede DSL, é o ruído gerado por um tipo de interferência eletromagnética estocástica e não-estacionária, que consiste de ocorrências aleatórias de picos de energia, com duração média de 30 a 100 ms [10]. As causas do IN variam desde descargas elétricas, até ruídos causados pelo funcionamento de equipamentos como motores (de eletrodomésticos eletrônicos) e até mesmo pelo sinal sonoro do telefone. O principal problema do IN, está na irregularidade de ocorrência e intensidade, causando corrupção de dados que resultam, por exemplo, em perda de pacotes e imagens distorcidas (no caso de aplicações envolvendo transmissão de vídeo).

### 1.2.3 Interferência de Rádio

Os pares trançados utilizados nas redes DSL podem atuar como antenas, absorvendo a energia de transmissões de rádio. Essa energia absorvida é chamada de interferência por rádio frequência (*Radio Frequency Interferency* (RFI)) que ocorre à medida em que as frequências do sinal DSL aumentam e se superpõem as frequências de serviços de rádio [22]. Essa interferência é particularmente prejudicial em serviços como o ADSL, ADSL2+, VDSL, VDSL2 que utilizam altas bandas de frequência, apresentando uma duração maior que por exemplo o

---

ruído impulsivo. Sendo assim muitos mais símbolos são atingidos em um longo intervalo de tempo [10]. As principais fontes de RFI são as rádios AM (ou *Amplitude Modulation* (AM)) - e sistema de rádio amador (conhecido como HAM). A rádio AM ocupa frequências entre 0.55 e 1.6 MHz, o qual sobrepõe o espectro do ADSL, VDSL e seus variantes. O rádio amador opera tipicamente em frequências entre 1.8 MHz e 29 MHz, nesse caso a interferência é particularmente danosa em serviços que utilizam banda maiores que 1.8 MHz como ADSL2+, VDSL e VDSL2 [5]. A rede DSL também podem agir como fontes de interferência nos sistemas de rádio causando o chamado “ruído egresso”, que ocorre quando o sistema DSL irradia energia na faixa de rádio, o qual é considerado insignificante, exceto quando originado pelo VDSL e VDSL2 [10].

### 1.3 Motivação

A primeira defesa disponível na camada física contra os efeitos de interferências como o ruído de *crosstalk* e ruído impulsivo (e conseqüentemente contra a instabilidade), é a margem de ruído (também conhecida nos padrões DSL como *target SNR margin*). Essa margem de ruído funciona como uma fronteira de segurança do sinal transmitido. Apesar disso, devido a restrições de potência transmitida nos sistemas DSL, a taxa de dados e a margem de ruído se tornam requisitos conflitantes [24], por isso seu projeto deve ser elaborado com cuidado. Nesse sentido, existe uma técnica chamada de adaptação automática da margem - *Automatic Margin Adaptation* (AMA) - que aumenta a margem de ruído dinamicamente, na ocorrência de muitos quadros errados durante a transmissão, ou de qualquer outro indicador de instabilidade. Mas essa técnica não diminui o valor da margem ao estabilizar a transmissão, gerando assim, um problema conhecido como *stuck-at low rate* [25] (preso em um baixo valor de taxa de transmissão), que ocorre quando o modem inicializa com condições de linha próximas ao “piores caso”, mas com um alto (e desnecessário) valor de margem de ruído.

Outra abordagem utilizada na tentativa de mitigar o efeito do ruído de *crosstalk* nas linhas DSL, é o gerenciamento dinâmico do espectro - *Dynamic Spectrum Management* (DSM). O DSM tem como objetivo otimizar a transmissão, aplicando níveis de coordenação espectral às linhas, de modo que os modems se adaptem dinamicamente à capacidade seletiva em frequência do canal e do ruído [26].

Esse trabalho concentra-se no problema de otimização da margem de ruído, como meio de aumentar a estabilidade nas redes DSL. O desenvolvimento da solução para esse problema foi conduzido através da otimização de parâmetros da camada física que são configuráveis nos modems comerciais (*i.e.* otimização das margens e máscara de transmissão dos usuários DSL).

## 1.4 Estado da arte

Inicialmente os algoritmos de DSM, estavam focados na otimização do espectro para maximização de taxa [26]; nesse problema toda potência disponível é utilizada para maximizar de taxa de bits, sujeito à restrição de potência máxima disponível, enquanto mantém fixa a margem de ruído. Esse é um problema convexo [27, 28], bem definido na literatura com vários algoritmos publicados [29–34]. Com isso, as aplicações se estenderam para os problemas de minimização do consumo de potência, onde o objetivo era garantir uma taxa de dados mínima para os usuários. Esse é um problema que vem recebendo atenção ao longo dos anos e já possui alguns trabalhos na literatura que sugerem a conversão do problema de maximização de taxa em minimização de potência [25, 35, 36].

Um terceiro foco dos algoritmos de DSM, diz respeito ao tratamento da instabilidade nas linhas DSL, através da otimização da margem de ruído. O objetivo desse problema é maximizar a margem de ruído enquanto mantém fixa a taxa de bits. Esse é problema não-convexo [28] de difícil solução, porém com alguns trabalhos já publicados [24, 37–40].

Do ponto de vista de um único usuário, o problema de otimização de margem tem uma solução bem definida [37], que é baseada no algoritmo *Water-filling* [41]. Atualmente, essa solução é padronizada nos modems, como um modo de operação chamado de adaptativo em margem - *Margin-Adaptive* (MA) - que tem como objetivo, maximizar a margem de ruído utilizando para isso toda a potência disponível enquanto mantém uma taxa de dados fixa [42]. Porém, essa abordagem não se mostra eficiente no caso multiusuário, pois requer que a potência de transmissão seja aumentada de uma forma “egoísta<sup>4</sup>”, causando maior incidência de ruído de *crosstalk* nas linhas vizinhas. Dessa maneira, a otimização da margem no caso multiusuário, se tornou um tópico de grande interesse de pesquisa acadêmica [24, 37–40].

Um método baseado no algoritmo *Iterative Waterfiling* (IWF) [41], foi proposto para otimização da potência de transmissão e maximização das margens [24]. Os seus resultados se mostraram melhores do que os obtidos nos métodos anteriores, devido à esse método impor um nível de coordenação entre as linhas. Porém, sabe-se que algoritmos como o IWF (coordenação DSM de nível 1) apresentam desempenho inferior quando comparados com algoritmos que utilizam coordenação DSM de nível 2, que é acentuado nos cenários com topologia próximo-distante (*near-far*), como apresentado na Figura 1.2.

Ainda nessa linha de pesquisa, em [38] os autores propuseram a otimização da estabilidade, através de um *framework* que faz uso dos algoritmos que utilizam coordenação DSM

---

<sup>4</sup>Num cenário multiusuário, uma alocação de potência “egoísta”, é aquela onde uma linha ao alocar potência não se preocupa se causará interferência em outra linha do mesmo *binder*



de nível 2. O foco era reduzir o número de ocorrências de retreinos dos modems, que aconteciam devido a variações de ruídos não gerenciados. Porém, essa abordagem requer que longas observações sejam feitas antes que qualquer medida seja tomada. Em [36] a maximização da margem foi tratada através da minimização do consumo de potência, obtendo a partir daí valores de margem de acordo com a prioridade especificada pelo operador da rede.

Outra tentativa de aumentar a estabilidade nos sistemas DSL foi introduzir o conceito de ruído virtual - *Virtual Noise* (VN) - no padrão VDSL - VDSL [18]. O princípio do VN é definir arbitrariamente um alto nível de ruído por tom, que é utilizado durante o cálculo da relação sinal ruído - *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) - em uma dada linha durante sua inicialização. Dessa maneira é possível ajustar a margem de ruído por tom oferecendo uma maior proteção (*i.e.* maior margem de ruído) àqueles tons que têm uma alta probabilidade de serem perturbados por interferências durante a operação dos modems DSL. Entretanto, dependendo do nível de proteção necessária, esse “falso” ruído reduz a taxa de *bits* e/ou aumenta a potência transmitida (e consequentemente o ruído de *crosstalk*). Em [43], os autores propõem um algoritmo de otimização de margem utilizando um algoritmo de enxame de partículas porém, de maneira mono-objetiva.

### 1.4.1 Algoritmos Evolutivos

Desde a década de 70, os *Algoritmos Evolutivos* (AE) tem sido aplicados em diversas áreas do conhecimento como engenharia, economia, etc [44]. Especificamente na área de telecomunicações, sua utilização ganhou destaque em problemas de difícil solução como uma ferramenta de otimização com o objetivo de reduzir o espaço de busca e gerar soluções próximas do ótimo.

Em [45] foi proposto a utilização de algoritmos genéticos (AGs) para estimação da topologia de enlaces DSL. Em [46] foi utilizado um AG como ferramenta de otimização no problema de mapeamento entre as soluções teóricas de gerenciamento dinâmico de espectro (DSM) e os parâmetros de controle das densidades espectrais de potência (PSDs) de transmissão dos modems comerciais. Em [47] foi desenvolvido um método chamado de *diverseSB* para determinação de pontos de operação das redes DSL, que utiliza um processo híbrido composto de um algoritmo evolucionário multiobjetivo e algoritmos de balanceamento de espectro.

## 1.5 Objetivos da Tese

Os principais objetivos desta tese são: investigar, implementar e avaliar novas técnicas para o aumento da estabilidade nos sistemas DSL. Esse trabalho, considera o desenvolvimento teórico, implementação em *software* e testes, resumido nos seguintes tópicos:

- Discussão sobre as soluções existentes relacionada ao aumento de estabilidade nas redes DSL, enumerando suas vantagens e desvantagens, apresentando um breve histórico de aplicações dessas soluções, relatando os principais trabalhos e resultados da literatura especializada.
- Investigação do problema original de maximização de margem definido em [37] porém, expandido sua solução para o caso multi-usuário. Com base nessa investigação propor uma solução para o problema através da otimização de parâmetros da camada física (*i.e.* margem de ruído e potência de transmissão) da rede DSL, tendo como restrições básicas a taxa de dados do usuário e a potência de transmissão, que são ajustadas para melhorar a estabilidade da rede, visto que a proteção entre as linhas é aumentada, através do controle do nível de ruído;
- Implementação de simulações dos algoritmos propostos, utilizando cenários DSL que reproduzam situações mais próxima da realidade.

## 1.6 Contribuição da Tese

De maneira específica os pontos apresentados a seguir representam as contribuições originais desta tese:

- Proposição da otimização de margem de ruído através de uma abordagem multiobjetivo híbrida, capaz de manter as vantagens observadas nas demais técnicas presentes na literatura, além de tratar várias das limitações existentes nas mesmas;
- Introdução da solução proposta em dois algoritmos. As simulações realizadas mostram que os algoritmos apresentam resultados competitivos, principalmente, quanto à sua capacidade de estimar fronteiras de *Pareto* com excelentes cobertura, convergência e diversidade das soluções.

Além disso, esta tese realiza uma revisão das principais técnicas de otimização de margem de ruído em sistemas DSL.

## 1.7 Organização da Tese

Este trabalho está estruturado em duas partes. A primeira parte trata dos fundamentos dos sistemas DSL, bem como investiga o problema da instabilidade, descrevendo as suas principais causas e consequências. A primeira parte é constituída dos seguintes capítulos:

- O **Capítulo 2** fornece uma introdução das tecnologias DSL, iniciando com um breve histórico e sua evolução, enfatizando suas principais características e tipos de serviços. Além disso, são vistos os principais tipos de interferências limitantes de capacidade e de desempenho dos serviços DSL. Ainda nesse capítulo são descritos detalhes da camada física, especificamente a modulação discreta multi-tom - *Discrete Multitone Modulation* (DMT) - que é utilizada na maioria dos padrões DSL. Ao longo do texto, são discutidos aspectos importantes como o conceito de margem de ruído, que é utilizado como base para a modelagem do problema nos capítulos posteriores.
- O **Capítulo 3** inicia a discussão sobre problema de instabilidade nos sistemas DSL, descrevendo as suas principais causas e consequências. Além disso, ao longo do texto são discutidas as soluções mais citadas na literatura a saber a adaptação automática da margem e as técnicas de gerenciamento dinâmico do espectro.
- O **Capítulo 4** fornece uma visão geral sobre a otimização multiobjetivo, e seus principais conceitos. A seguir é feita uma revisão das principais estratégias evolucionárias utilizadas na solução proposta, a saber: algoritmos genéticos (*Algoritmos Genéticos* (AG)) e a otimização por enxame de partículas (PSO).

A segunda parte do trabalho é composta da descrição do problema, das técnicas evolucionárias utilizadas, experimentos realizados e resultados. Da segunda parte, fazem parte os seguintes capítulos:

- O **Capítulo 5** inicia com a investigação do problema de otimização da margem definido em [37] expandindo para o caso multiusuário. Ainda nesse capítulo são descritos os algoritmos de otimização da margem desenvolvidos durante esse trabalho.
- No **Capítulo 6** são descritos as simulações realizadas e seus resultados.
- O **Capítulo 7** conclui o desenvolvimento do texto apresentando uma discussão geral sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos de Sistemas DSL

### 2.1 Introdução

Esse capítulo se concentra nos fundamentos dos sistemas DSL, especificamente em detalhes da modulação discreta multi-tom DMT, que é utilizada na maioria dos padrões DSL. Ao longo desse capítulo são enfatizados alguns tópicos, como a margem de ruído que é a principal defesa das tecnologias DSL no tratamento da instabilidade.

### 2.2 *A modulação discreta multi-tom*

A técnica de modulação discreta conhecida como DMT (ou multiportadora), particiona o espectro de transmissão disponível, em vários subcanais (como ilustrado na Figura 2.1) paralelos e independentes de banda estreita [42]. Cada subcanal (também chamado de tom, ou subportadora) é identificado nesse trabalho por  $k$ , e é centrado em uma única frequência diferente, com espaçamento  $\Delta_f$ <sup>1</sup> entre os subcanais [5, 15].

No DMT, cada subcanal tem um carregamento de *bits* (ou *bitloading*) adaptativo, que é especificado de acordo com a razão sinal ruído (SNR)<sup>2</sup>, de cada subcanal. Dessa maneira, quanto maior for a SNR do subcanal, maior é a quantidade de *bits* alocados a esse subcanal. Já os subcanais com baixa SNR tem poucos *bits* ou mesmo nenhum *bit* alocado.

A Figura 2.2 ilustra os blocos do DMT simplificados, onde um fluxo serial de *bits*, é

---

<sup>1</sup>Para serviços DSL como ADSL, o espaçamento entre os subcanais, é de aproximadamente 4.3125KHz.

<sup>2</sup>Nos serviços DSL, a SNR de cada subcanal é avaliada durante o processo de inicialização do modem. Nesse processo a SNR é computada utilizando os valores estimados de ganho e variância do ruído de cada subcanal

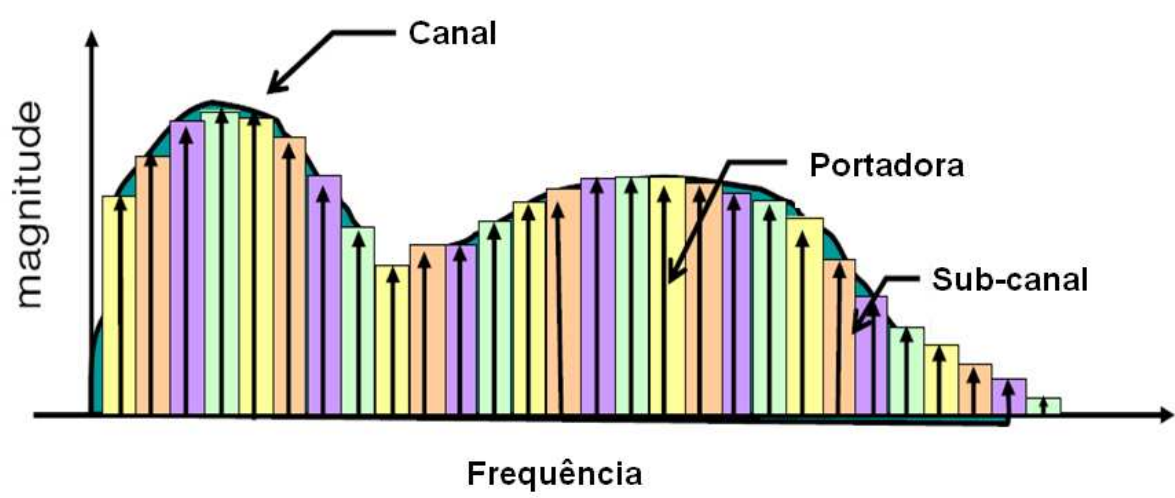


Figura 2.1: Exemplo da modulação DMT onde o canal é dividido em um número de subcanais paralelos e independentes.

inicialmente convertido em um fluxo paralelo e dividido entre os subcanais. Cada subcanal tem a dimensão da constelação previamente determinada pelo *bitloading* (descrito na seção 2.4), comportando  $2^r$  símbolos, onde  $r$  representa o número de *bits* em cada subcanal  $k$ .

Cada grupo de *bits* é mapeado em símbolos nas constelações bidimensionais QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)) e formam a entrada da transformada inversa de *Fourier* (*Inverse Fast Fourier Transformation* (IFFT)), que é aplicada com o objetivo de mapear o conjunto de símbolos QAM em um sinal no domínio do tempo. Nesse processo a simetria *Hermitiana* é utilizada para garantir que a saída da transformada seja real e possa ser transmitida pelo par trançado.

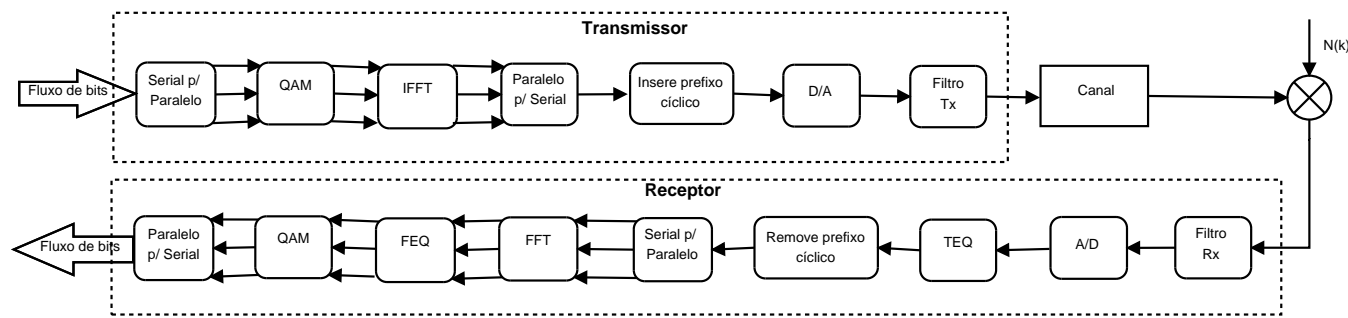


Figura 2.2: Blocos da transmissão DMT.

A saída da IFFT é convertida em um fluxo serial, no qual é inserido um prefixo cíclico, replicando as últimas  $l$  amostras do símbolo no seu início, como mostra a Figura 2.3. O valor de  $l$  é dependente do serviço e é especificado nos padrões dos serviços DSL. Dessa maneira, o prefixo cíclico cria um intervalo de guarda entre os símbolos transmitidos no domínio do tempo, com o objetivo de combater a interferência inter-simbólica (ou *Intersymbol Interference* (ISI)) que pode degradar significativamente o desempenho da transmissão caso não seja eliminada ou minimizada. É importante observar que o prefixo cíclico é adicionado antes do bloco ser transmitido.

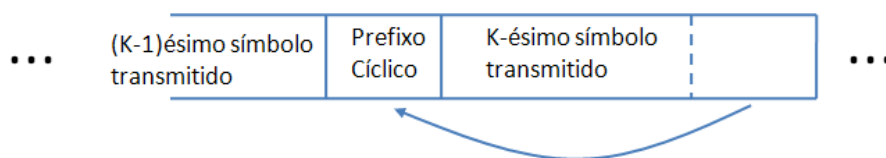


Figura 2.3: Ilustração do prefixo cíclico.

Além da ISI, a adição do prefixo cíclico combate a interferência inter-portadoras (ou *Inter-carrier Interference* (ICI)) convertendo a convolução linear do canal em uma convolução circular, e garantindo que os tons permaneçam ortogonais depois da transmissão.

As amostras resultantes no domínio do tempo são então, convertidas do formato digital para analógico para serem transmitidas. O sinal transmitido é então convoluído linearmente com a resposta ao impulso do canal. Se a resposta ao impulso for menor que a duração do prefixo cíclico então cada símbolo pode ser processado separadamente sem a presença da ISI.

Na entrada do receptor é aplicado um equalizador no domínio do tempo (ou *Time Domain Equalizer* (TEQ)) com o objetivo de encurtar a resposta ao impulso do canal para um comprimento menor ou igual ao do prefixo cíclico. Assumindo um TEQ perfeito<sup>3</sup>, este possibilita diminuir ainda mais os efeitos da ISI, uma vez que ele diminui a superposição entre os símbolos [42]. Após a equalização no domínio do tempo, o prefixo cíclico é descartado e as amostras do sinal recebido são convertidas de serial em paralelo e aplicadas a *Fast Fourier Transformation* (FFT).

Um equalizador no domínio da frequência (ou *Frequency Domain Equalizer* (FEQ)) é aplicado à saída da FFT, com o objetivo de compensar as distorções de ganho e fase introduzida nos subcanais pela linha de cobre. Para realizar essa tarefa, o FEQ primeiro estima todos os

<sup>3</sup>Dado que o TEQ encurte o canal para um tempo menor que o prefixo cíclico, a ISI é eliminada (assumindo um TEQ perfeito).

ganhos dos subcanais e após essa estimação, divide os símbolos QAM recebidos, pelos ganhos estimados do canal.

Após o FEQ, o vetor com a sequência de *bits* transmitida é recuperada pelo decodificador QAM. O fluxo de *bits* paralelo é então, multiplexado formando um único fluxo de *bits* de saída.

## 2.3 Modelo de transmissão do canal

No DMT o canal pode ser modelado como um canal de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Inputs Multiple Outputs* (MIMO)) com um valor de quantidade de  $N$  transmissores e  $N$  receptores na forma

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1^k \\ \vdots \\ y_N^k \end{bmatrix}}_{Y^k} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_{1,1}^k & \cdots & h_{1,N}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1}^k & \cdots & h_{N,N}^k \end{bmatrix}}_{H^k} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1^k \\ \vdots \\ x_N^k \end{bmatrix}}_{X^k} + \underbrace{\begin{bmatrix} z_1^k \\ \vdots \\ z_N^k \end{bmatrix}}_{Z^k}, \quad (2.1)$$

onde:

- $\mathbf{x}^k \triangleq [x_1^k, \dots, x_N^k]$  é o vetor contendo os sinais transmitidos no subcanal  $k$ ;
- $\mathbf{y}^k \triangleq [y_1^k, \dots, y_N^k]$  é o vetor contendo os sinais recebidos no subcanal  $k$ ;
- $\mathbf{z}^k \triangleq [z_1^k, \dots, z_N^k]$  é o vetor contendo o ruído aditivo (ruído de fundo mais ruído *alien*) no subcanal  $k$ ;
- $\mathbf{H}^k$  é a matriz  $N \times N$  do canal no subcanal  $k$ ;
- $\mathbf{h}_{n,m} \triangleq [h_{n,m}^1, h_{n,m}^2, \dots, h_{n,m}^k]$  denota as funções de transferência do canal partindo do transmissor  $n$  para o receptor  $m$  no subcanal  $k$ . Os vetores da diagonal principal de  $\mathbf{h}_{n,m}^k$  ( $m = n$ ) correspondem as funções de transferência diretas (ou canais diretos), enquanto os vetores ( $m \neq n$ ) representam funções de transferência do ruído de *crossstalk* entre os pares (ou canais cruzados).
- A potência transmitida de todos os usuários  $n$  sobre todos os subcanais  $k$ , é organizada em uma matriz  $P = \{s_n^k\}$  de dimensão  $N \times K$  representada por

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} s_1^1 & \cdots & s_1^K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N^1 & \cdots & s_N^K \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

O elemento  $s_n^k$  denota potência transmitida do usuário  $n$  no subcanal  $k$  dado por

$$s_n^k \triangleq E \left\{ |x_n^k|^2 \right\}, \quad (2.3)$$

Onde  $E \{ \cdot \}$  denota valor esperado. Como o DMT utiliza todos os tons com espaçamento  $\Delta_f$ , a conversão de  $s_n^k$  em valores de PSD pode ser obtida por  $s_n^k/\Delta_f$ . Como o fator de escala  $\Delta_f$  é geralmente omitido na literatura,  $P$  é comumente chamada de matriz de PSD de transmissão [23, 48].

A potência total transmitida do usuário  $n$  é dada por

$$P_n^{tot} = \sum_{k=1}^K s_n^k \quad (2.4)$$

Na prática, os serviços DSL operam sobre um conjunto de máscaras espectrais para garantir a compatibilidade com outros serviços que possam existir no mesmo *binder* [26], onde

$$s^k \leq s^{k,mask}, \quad \forall K \quad (2.5)$$

## 2.4 Alocação de *bits* ou *bitloading*

O processo de alocar um número variável de *bits* por subcanal é chamado de *bitloading*, o qual é baseado na idéia de atribuir uma quantidade ótima tanto de *bits* como de potência por subcanal, levando a uma utilização mais eficiente da capacidade do canal [42].

A quantidade de *bits* que será transmitida por cada símbolo DMT é determinada de acordo com o nível de SNR de cada subcanal. O *bitloading* do usuário  $n$  no subcanal  $k$  pode ser definido como:

$$b_n^k \triangleq \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}_n^k}{\Gamma \tilde{\gamma}_u} \right) \quad (2.6)$$

onde

- $b_n^k$  é o número de *bits* alocado para o usuário  $n$  no subcanal  $k$ ;



- $\text{SNR}_n^k$  é a razão sinal ruído do usuário  $n$  no subcanal  $k$ ;
- $\Gamma$  é o *gap* da razão sinal ruído é uma constante calculada em função da probabilidade de erro de bits máxima desejada. O  $\Gamma$  permite calcular aproximadamente a taxa de *bits* que pode ser alcançada para uma determinada  $\text{BER}^4$  (ou *Bit Error Rate* (BER)).
- $\tilde{\gamma}_u$  é a margem (ou margem da SNR), detalhada na seção 2.5.

A  $\text{SNR}_n^k$  do usuário  $n$  no subcanal  $k$  é dada por

$$\text{SNR}_n^k = \frac{s_n^k |h_{n,n}^k|^2}{\varsigma^2 + \sum_{m \neq n} |h_{n,m}^k|^2 s_m^k} \quad (2.7)$$

onde

- $h_{n,n}^k$  denota o ganho do canal direto do usuário  $n$  no subcanal  $k$ ;
- $h_{n,m}^k$  denota o ganho do canal de ruído de FEXT do transmissor  $m$ , para o receptor  $n$  no subcanal  $k$
- $\varsigma^2$  denota a potência do ruído de fundo no subcanal  $k$  no receptor  $n$ .

Substituindo se 2.7 em 2.6, tem-se

$$b_n^k \triangleq \log_2 \left( 1 + \frac{s_n^k |h_{n,n}^k|^2}{\Gamma \tilde{\gamma}_u (\varsigma^2 + \sum_{m \neq n} |h_{n,m}^k|^2 s_m^k)} \right) \quad (2.8)$$

A taxa de *bits* para o usuário  $n$  (em b/s) é dado pela soma das taxas de cada subcanal  $k$  multiplicada pela taxa de símbolos DMT, dada por

$$R_n = f_s \sum_{k=1}^K b_n^k, \quad (2.9)$$

onde

- $f_s$  representa a taxa de símbolos da modulação DMT [23].

---

<sup>4</sup>Nos serviços DSL são tipicamente projetados para operar com uma BER de  $10^{-7}$ , que corresponde ao “pior caso” [5].

## 2.5 Margem de ruído

Como citado anteriormente, a margem de ruído é a principal ferramenta da camada física para combater o efeito de interferências como o *crosstalk* e ruído impulsivo, aumentando a estabilidade nas redes DSL [49]. A implementação da margem é realizada, reservando uma porção da SNR que não será utilizada para alocar *bits* [15]. Essa porção da SNR, funciona como uma margem de segurança, indicando o quanto a linha pode suportar de aumento do ruído sem que ocorra a degradação no desempenho da transmissão.

Caso seja detectado um valor de ruído que exceda o suporte dado pela margem de segurança, ocorre o retreino do modem. Ao retreinar, o modem renegocia com o DSLAM a taxa que será utilizada. Acontece que, retreinando a linha com um alto valor de margem de ruído, pode ocorrer a geração um nível de potência superior ao necessário para alcançar determinada taxa estabelecida, induzindo a um aumento no nível ruído de *crosstalk* nas linhas vizinhas [25]. Além disso, um alto valor de margem, às vezes é pouco efetivo contra ruídos transitórios como o ruído impulsivo que acontecem aleatoriamente em uma fração de segundos.

Na prática, o modem opera com um nível de margem de ruído suficiente para manter a taxa de erro dentro de limites aceitáveis, o que significa que a margem mantém a linha mais confiável, garantindo a integridade da maioria dos dados, enquanto apenas uma pequena porção dos dados são diretamente afetados pelo ruído não-estacionário [25].

### 2.5.1 Margem como parâmetros do modem

Tipicamente os equipamentos DSL permitem o ajuste dos seguintes parâmetros [16] relacionados com a margem:

- Margem alvo (TSNRM) [17]. É o valor de margem especificada para ser usada durante a inicialização, ao executar o processo de alocação de *bits* [17]. A maioria dos modems comerciais estabelece como padrão 6 dB de margem alvo (utilizado em todos os tons), o que indica que o ruído pode crescer de um fator de 4 antes que comece a degradar a transmissão na linha [25].
- Margem Mínima (ou *Minimum SNR margin*). Esse parâmetro especifica o mínimo valor de margem, onde abaixo desse valor o modem DSL retreina. Tipicamente esse valor é de 0 dB.
- Margem Máxima (ou *Maximum SNR margin*). Esse parâmetro limita o máximo nível de margem para transmissão de dados nos serviços DSL. A máxima taxa de dados pode

ser limitada se especificada para operar abaixo da margem máxima.

A margem de ruído conhecida como SNR *margin* ou apenas “margem”, é valor de margem média que varia com o tempo devido às condições de ruído [5].

## 2.6 Conclusão

Esse capítulo teve como objetivo fazer uma revisão dos serviços DSL. Além disso foram abordados os principais tipos de interferências que atingem os serviços DSL, como o ruído de *crosstalk*, o ruído impulsivo e interferência por rádio RFI. Em termos de camada física, o capítulo revisou os principais conceitos relacionados a modulação DMT, a qual é utilizada na maioria dos padrões DSL.

O próximo capítulo se concentra no estudo do problema da instabilidade das redes DSL, ilustrando as principais causas e de que maneira a instabilidade prejudica as transmissões DSL. Além disso é feita uma revisão das principais ferramentas utilizadas para combater a instabilidade.

# Capítulo 3

## O problema de instabilidade nas redes DSL

### 3.1 Introdução

Nos estágios iniciais das redes DSL, os serviços e aplicações necessitavam de uma moderada largura de banda. Em sua maioria eram serviços que proviam o acesso à *internet*, dando suporte a aplicações do tipo *e-mail*, transferência de dados utilizando FTP - *File Transfer Protocol* (FTP) - e navegação *web*. Geralmente essas aplicações exigiam requisitos moderados quanto a estabilidade da rede, onde a perda de pacotes e o atraso na transmissão não produziam impacto tão significativo no desempenho dos serviços.

O surgimento de novas aplicações agregando voz, vídeo e dados, implicou a necessidade de criarem-se métodos mais eficientes de comunicação sobre o *link* DSL, e que garantissem o desempenho dos serviços. A Figura 3.1 ilustra um exemplo de rede de acesso DSL, onde a CPE3 contém uma gama de aplicações como jogos interativos, IPTV, Voz sobre IP (VoIP), entre outras, e que impõem inúmeros requisitos como:

- **Largura de banda.** Necessitam de uma largura de banda maior que a *internet* banda larga tradicional, para acomodar aplicações que requerem iteratividade e conteúdo de alta definição.
- **Robustez na transmissão.** Qualquer erro que aconteça durante a transmissão se torna visível ao usuário. Sequenciamento e perda de pacotes, o *jitter* e o atraso na transmissão são considerados críticos para aplicações de voz, vídeo e interativas, podendo causar desde a pixelização e distorção de áudio até o congelamento da tela e a completa perda

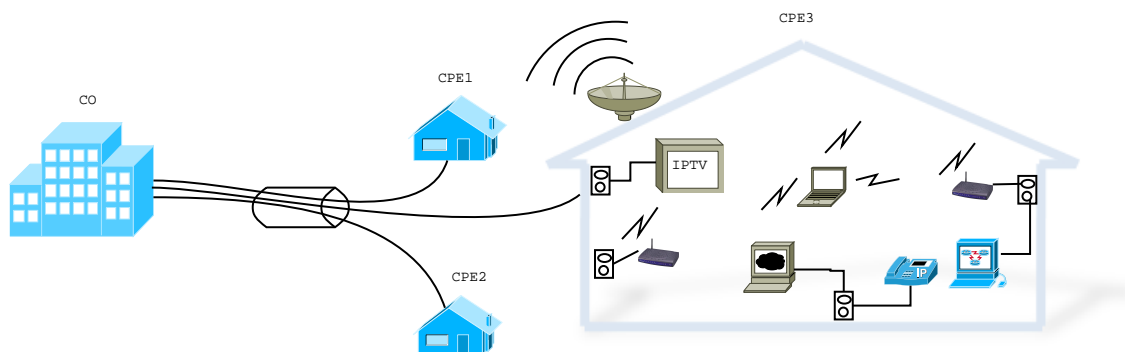


Figura 3.1: Cenário ilustrando a utilização dos modelos de fibra óptica e serviços DSL (VDSL2 e ADSL2+).

de áudio.

- **Qualidade de serviço QoS e Qualidade de experiência - *Quality of Experience* (QoE).** Diferentes serviços requerem diferentes níveis de QoS e prioridade. Por exemplo, o VoIP apresenta a maior prioridade, seguido por serviços de vídeo e tráfego *internet* banda larga [50]. Já QoE se traduz como o grau de satisfação do usuário e número de reclamações, as quais aumentam com instabilidade na rede.
- **Infraestrutura** - Devido ao fato de os aplicativos necessitarem de uma grande largura de banda, houve o encurtamento na distância da conexão entre provedor e o usuário, onde as provedoras moveram os seus equipamentos do escritório central CO para mais perto do usuário (como ilustra a Figura 3.2) através da utilização dos serviços DSL em combinação com três modelos de configuração de fibra óptica [51] descritos abaixo:
  1. **Fibra para o Nó (FTTN).** Esse modelo - *Fiber to the Node* (FTTN) - requer um multiplexador de acesso DSL-DSLAM, o qual fornecerá tanto conexões ADSL2+, como VDSL2.
  2. **Fibra para o prédio (FTTB).** *Fiber to the Building* (FTTB), é utilizado na base de um prédio com a finalidade de conectar os respectivos apartamentos usando tanto conexões ADSL2+, como VDSL2.
  3. **Fibra para a residência (FTTH).** Nesse modelo (inglês *Fiber to the House* (FTTH)) a fibra interconecta diretamente o usuário com a CO, substituindo os pares de cobre ou cabos coaxiais.

Nesse cenário, esse capítulo tem como objetivo ilustrar o problema de instabilidade nos sistemas DSL, discutindo suas principais causas e as diferentes estratégias utilizadas para aumentar a estabilidade nos sistemas DSL.

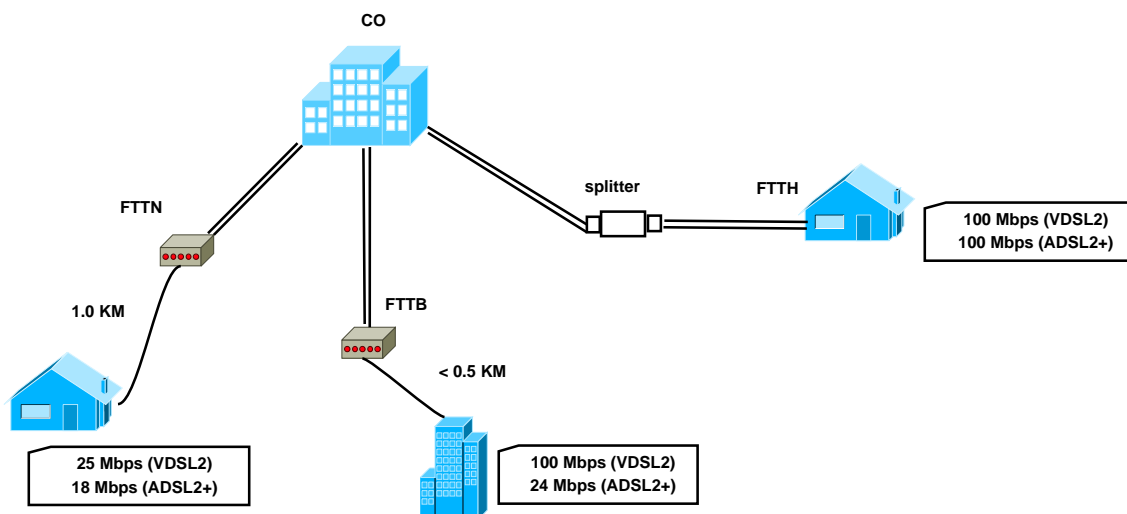


Figura 3.2: Cenário ilustrando a utilização dos serviços VDSL2 e ADSL2+ em combinação com modelos de fibra ótica.

## 3.2 A instabilidade nas redes DSL

A Figura 3.3 [52], ilustra um exemplo do comportamento de uma transmissão em uma linha instável durante um intervalo de tempo de quatro horas (entre 20:00 e 00:00). No período entre 20:00 e 21:30 ocorre uma transmissão estável com uma boa taxa de transmissão (cerca de 14.0Mbps, denotada pela área azul). Às 21:30 ocorre o aumento do nível do ruído causando o retreino do modem<sup>1</sup>. Nessa operação, o tráfego de dados no enlace é interrompido e o modem passa pelo processo de retreino.

Ao ocorrer o retreino o receptor sai do estado de *showtime* (transmitindo dados) passando para o estado *init/train*, e o modem retoma os procedimentos de inicialização como o *bitloading*.

Ao reiniciar a transmissão a taxa de transmissão diminui para 13.0 Mbps e com essa taxa o serviço passa a apresentar um certo nível de instabilidade. As 22:30 ocorre um novo aumento do nível do ruído causando novamente o retreino do modem, que é reiniciado com uma taxa de transmissão de 10.0 Mbps. Nesse ponto a taxa de transmissão é insuficiente gerando erros e degradação do serviço.

No caso de ocorrer retreino, o serviço fica interrompido tipicamente entre 20 a 30 segundos [16] [52]. Além disso, dependendo do tipo de aplicação que está sendo usada (como vídeo, VoIP) diminui a QoE do usuário, aumentando o número de reclamações.

<sup>1</sup>O retreino efetivamente ocorre quando um receptor DSL ultrapassou a BER limite [16]

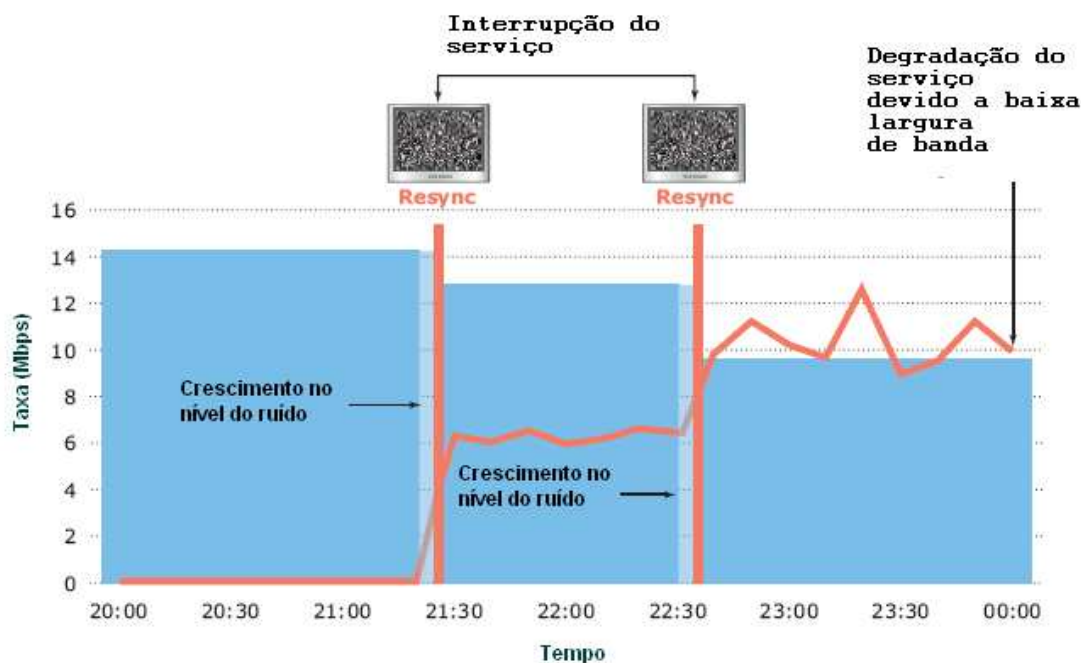


Figura 3.3: Instabilidade em uma rede num período de tempo de quatro horas. Durante esse monitoramento, o nível do ruído aumentou significativamente em duas ocasiões causando a degradação na transmissão, culminando com retreino do modem.

### 3.2.1 Métricas

A estabilidade em um sistema DSL pode ser medida em termos de contagem do número de retreinos (*Mean Time Between Resynchronizations* (MTBR)) e contagem do número de pacotes com erro (*Mean Time Between Errors* (MTBE)) ou a combinação dos dois:

- **Tempo Médio entre Erros - (MTBE).** Essa métrica é usada para avaliar a qualidade da rede e expressa o tempo médio entre dois eventos de erro.
- **Tempo Médio entre Retreinos (ou resincronizações) - (MTBR).** Essa métrica expressa o tempo médio entre dois retreinos espontâneos, ou seja, sem a interferência do usuário. Tipicamente o número aceitável é de uma reinicialização por dia.

Os valores resultantes das métricas são dependente dos serviços. Tipicamente para serviços como transmissão de vídeo, os valores que garantem um determinado nível de estabilidade, são maiores do que aqueles necessários para *internet* de alta velocidade [53]. Por exemplo, o serviço TV digital sobre IP IPTV é considerado estável em termos de MTBE, se

este for maior do que 40 minutos e instável se for menor que 8 minutos [54]. Em relação ao MTBR a estabilidade se dá em torno de 24 horas e é considerável instável se esse tempo reduzir para 12 horas [54].

### 3.2.2 Causas da Instabilidade nas redes DSL

As principais causas de instabilidades nas redes DSL estão listadas abaixo e são relacionadas com as interferências que ocorrem durante a operação da rede, até problemas gerados devido a contatos oxidados e equipamentos de baixa qualidade.

- **Ruído de *Crosstalk*.** O ruído de *crosstalk* é uma das principais causas de instabilidade nas redes DSL, o qual tipicamente aumenta quando os modems nas linhas vizinhas são ligados/desligados. Espera-se um grande ganho no desempenho das redes ao se utilizarem técnicas para o cancelamento do *crosstalk*, principalmente em serviços como o VDSL2 que tem seu desempenho limitado pelo *self-crosstalk* [55].
- **Ruído Impulsivo.** Como visto no Capítulo 2, o ruído impulsivo é tipo de ruído não estacionário que ocorre aleatoriamente, causando instabilidade nas linhas ao gerar picos de energia. Esse picos podem ser devido ao liga/desliga de interruptores, sinal sonoro do telefone, ou por interferência causada pelo motor de aparelhos eletrodomésticos (ar-condicionado, refrigeradores, ventiladores, etc).
- **Contatos oxidados e Equipamentos de baixa qualidade.** Contatos oxidados degradam a qualidade da transmissão. Já a utilização de equipamento de baixa qualidade pode resultar no aumento da recepção de interferência RFI [6].

## 3.3 Estratégias para aumentar a estabilidade nas redes DSL

As estratégias utilizadas para aumentar a estabilidade nas redes DSL, tipicamente, buscam manter um compromisso entre os seguintes aspectos [6]:

- Taxas de Dados
- Baixa latência na transmissão
- Nível de potência transmitida



Quando não ocorre esse compromisso, a rede fica susceptível ao aumento do ruído e conseqüentemente à instabilidade. As estratégias descritas a seguir tentam manter altos índices de MTBE e MTBR. Além disso, muitas delas exigem complexidades adicionais, podendo resultar em um desempenho sub-ótimo da rede.

Algumas estratégias focam no controle da SNR. Já outras técnicas como no caso do Gerenciamento Dinâmico do Espectro levam em consideração a característica de seletividade em frequência para combater as interferências e aumentar a estabilidade da rede.

### 3.3.1 Estratégias relacionadas ao controle da utilização da SNR

Essas estratégias estão relacionadas a duas técnicas conhecidas como adaptação automática da margem AMA e adaptação em camadas da taxa - *Tiered Rate Adaptation* (TRA) [25].

A técnica conhecida como AMA tem como objetivo o gerenciamento de linhas instáveis através do ajuste automático da margem alvo [25]. O AMA é constituído de perfis de linha com índices de estabilidade, que são utilizados para reconfigurar as linhas instáveis da rede. Linhas mais instáveis são ajustadas com valores de margem mais conservadores, tornando-se mais robustas ao ruído [56].

Ao invés de estabelecer perfis de margem alvo como no AMA, a técnica TRA estabelece uma margem fixa (*i.e.* 6 dB) e controla a SNR através de perfis de taxa, ou seja, a adaptação é feita através do ajuste da máxima taxa de dados que o modem pode utilizar após o retreino [25].

Tanto no AMA como no TRA, ocorre a realização de estatísticas para montar os perfis de configuração de cada método. Essas estatísticas são obtidas a partir da avaliação da rede e coleta de dados durante um determinado intervalo de tempo, onde são coletados informações sobre taxa de dados, margem, número de retreinos e erros.

#### 3.3.1.1 *Stuck-at low rate*

O problema conhecido como *Stuck-at low rate* [25] ocorre quando uma linha que já tem um alto valor de margem alvo, retreina utilizando um valor conservador de margem no cálculo do *bitloading*, limitando assim o desempenho do enlace.

Tipicamente esse problema ocorre quando o enlace é atingido por ruído impulsivo, pois como esse ruído é intenso, é possível que ao retreinar, a taxa de bits do transmissor fique limitada, até a linha ser reiniciada ou ocorrer outro retreino [56].

### 3.3.2 Estratégias da Camada de Enlace

Uma das técnicas mais utilizadas para contornar o problema do ruído impulsivo é a técnica denominada *Forward Error Control* (FEC), que consiste na introdução de símbolos redundantes ao conteúdo da mensagem original, os quais serão usados pelo decodificador para detectar erros e corrigí-los sem que haja a necessidade de retransmissão da mensagem [5]. Dessa maneira, o FEC previne que a qualidade da transmissão seja afetada pelo ruído, tornando o sinal transmitido mais robusto. Particularmente no caso do FEC como o *Reed Solomon* (sub-tipo do código cíclico BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)), a introdução de redundância é feita a blocos de bits. Por exemplo no padrão ADSL a cada conjunto de 255 *bytes*, ele utiliza 16 *bytes* para transmitir os *bits* de paridade [15].

Nos padrões DSL, a capacidade de correção de erros é medida pelos parâmetros *Delay* e proteção ao ruído impulsivo - *Impulse Noise Protection* (INP) - o qual envolve a combinação do *Interleaving* e a codificação *Reed-Solomon*. O *Interleaving* rearranja a palavra código a fim de minimizar a geração de sequência de erros. Em combinação com o *Reed-Solomon*, os erros são rearranjados e espalhados sobre várias palavras de código de maneira que possam ser recuperados [5].

O ajuste dos parâmetros do FEC e *Interleaving* são selecionados para maximizar o INP de maneira a não causar um aumento excessivo na potência transmitida. Esse ajuste aumenta a fração de paridade, permitindo que mais *bytes* sejam corrigidos, aumentando dessa maneira, a estabilidade da linha e a vazão de dados. Já ajuste do parâmetro *delay*, permite valores mais altos de INP, porém é importante notar que um *delay* muito alto pode não ser tolerado por certos tipos de aplicações.

### 3.3.3 O Gerenciamento do Espectro

Tipicamente, em um sistema DSL, cada linha tenta maximizar seu desempenho, sem considerar o desempenho das linhas vizinhas constituintes do mesmo *binder*. Porém, muitas vezes esse comportamento gera instabilidade na rede DSL, uma vez que pode aumentar a incidência de ruído de *crosstalk* nas linhas vizinhas (dado que para alcançar determinada taxa é necessário aumentar a potência de transmissão).

Uma tentativa de resolver esse problema foi através da técnica conhecida como gerenciamento estático do espectro - *Static Spectrum Balancing* (SSM). Essa técnica emprega restrições de potência transmitida a cada faixa de frequência através de máscaras espectrais fixas [57, 58]. Essas máscaras são definidas pelos padrões DSL e empregam restrições de potência transmitida que são projetadas para o chamado “pior caso” de emissão de *crosstalk* mas

que na maioria das vezes não corresponde à realidade, visto que o SSM sugere um ruído de *crossstalk* mais intenso do que ocorre em uma situação real [23, 59].

Em busca de técnicas alternativas que diminuíssem os efeitos do ruído de *crossstalk* entre os pares de um mesmo *binder*, surgiu o gerenciamento dinâmico do espectro DSM. A proposta do DSM é que ao invés de se ter máscaras fixas, se possa escolher adaptativamente os valores de PSD para todos os subcanais considerando o nível de ruído no canal. O DSM que considera um nível de coordenação espectral das linhas, possibilitando assim que os modems se adaptem dinamicamente à capacidade seletiva em frequência do canal e do ruído [26] [23] [48]. Para isso, o DSM considera aspectos multiusuários do cenário DSL, como as funções de transferência do canal. Dessa maneira os algoritmos de DSM tem como solução um conjunto de PSDs de transmissão, sendo uma para cada usuário.

Apesar de ser uma técnica promissora, os desafios do DSM estão relacionados à implementação dos algoritmos em modems comerciais onde surgem alguns problemas tais como [46, 59]: A necessidade de informação do canal; as imposições dos padrões DSL os quais não permitem que todos os subcanais tenham seus valores de *Power Spectral Density* (PSD)s alterados; além disso, esses valores de PSDs não podem ser alterados enquanto os modems estão transmitindo dados, e sim quando a linha de interesse está desativada.

Apesar desses desafios, muitos algoritmos de DSM foram desenvolvidos ao longo dos anos, sendo estes normalmente classificados de acordo com o grau de coordenação que aplicam aos múltiplos usuários da rede DSL [48] como:

- **DSM nível 0.** Corresponde ao gerenciamento estático do espectro (SSM);
- **DSM nível 1.** Nesses algoritmos, a alocação de potência é feita de forma autônoma, baseada apenas na própria condição da linha em questão, sem nenhuma coordenação com as outras linhas do *binder* [57] Como exemplo de algoritmo autônomo está o IWF [41] (detalhado no apêndice A).
- **DSM nível 2.** A alocação de potência de determinada linha é baseada não só na sua própria condição mas também na condição das outras linhas no *binder*, o que requer coordenação entre as linhas para que a alocação de potência seja ótima e a capacidade do *binder* seja maximizada. A tarefa de coordenação entre as linhas é realizada por uma central de gerenciamento do espectro - *Spectrum Management Center* (SMC) [23] - onde todo o processamento é realizado. Como exemplo de algoritmos DSM nível 2 está o *Iterative Spectrum Balancing* (ISB) [30](detalhado no apêndice A).
- **DSM nível 3:** O nível 3 corresponde a uma transmissão dos sinais feita de forma vetorizada (ou sincronizada).

### 3.3.3.1 Maximização da taxa

De uma maneira geral, o DSM tenta resolver o problema de gerenciamento de espectro formulado como um problema de maximização de taxa sujeito a restrições de potência por usuário, e definido como

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \quad & \sum_{n=1}^N \omega_n R_n \\ \text{sujeito a} \quad & \sum_{k=1}^K s_n^k \leq P_n^{max}, \text{ para } n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde

- $\omega_n$  é uma constante não negativa que permite impor diferentes prioridades ao usuário  $n$ ,
- $P_n^{max}$  e a potência de transmissão total disponível para o usuário  $n$ ,
- $R_n$  é a taxa de transmissão para o usuário  $n$ .
- $s_n^k$  é a potência de transmissão do usuário  $n$ , no subcanal  $k$ .

### 3.3.4 Ruído Virtual / Ruído Artificial (ANVN)

O ruído virtual VN foi incluído no VDSL2 como uma ferramenta de estabilidade. O VN é implementado através de uma estratégia onde o próprio circuito DSL estabelece que um determinado nível de ruído pré-programado (considerado como o pior caso) está sempre presente na transmissão. Dessa maneira, a rede DSL está sempre pronta para combater esse nível de ruído. Na prática o DSLAM encaminha para o usuário (CPE) um *profile* contendo o VN o qual é adicionado pelo CPE ao sinal recebido. O ruído virtual é considerado efetivo se existe um conhecimento prévio do nível de *crosstalk*, o que em muitos casos não acontece [60].

O ruído artificial - *Artificial Noise* (AN) - funciona com qualquer modem ADSL, porém ao contrário do VN, requer suporte específico do CPE. No caso do AN, o DSLAM, injeta ruído na linha no lado do CPE, de tal maneira que o ruído atual é mascarado pelo ruído injetado.

### 3.3.5 Gerenciamento Dinâmico de Linha

O gerenciamento dinâmico de linha - *Dynamic Line Management* (DLM) - busca diminuir a instabilidade nas redes DSL. Ele é realizado através do monitoramento e configuração de perfis. O monitoramento obtém características relativas à qualidade e estabilidade da linha

para identificar as causas de instabilidade. Após realizar essa identificação, o DLM fornece ao provedor do serviço configurações específicas (perfis) que buscam oferecer um compromisso entre estabilidade na linha e taxa de dados [6].

O ciclo de operação do DLM envolve a coleta de dados operacionais que são utilizados para analisar a condição em que a linha opera. Baseado no diagnóstico da linha analisada, é definido um modelo constituído de um conjunto de perfis de configuração para a linha, e valores de limiar das métricas MTBE e MTBR (que servirão como indicadores de estabilidade para determinado serviço). Esse modelo é então aplicado à linha a ser avaliada, a qual é inicializada com um dos perfis constituinte do modelo. A seguir as métricas MTBE e MTBR são monitoradas e seu resultado é comparado com os valores de limiar pré-definidos. Se durante esse processamento um perfil vizinho se adaptar melhor às necessidades da linha então ocorre o retreino do modem para que o novo perfil seja aplicado a linha [53]. Esse processo é repetido até ocorrer a convergência para um perfil ótimo, onde o desempenho da linha é avaliado comparando resultados antes e depois dos perfis estabelecidos [54].

A seleção do perfil é realizada de acordo com a necessidade da linha e envolve o ajuste de três aspectos principais (taxa, potência de transmissão e camada de enlace (códigos)) como descrito abaixo [6].

- **Estabilidade.** Quando uma linha está instável algumas ações podem ser tomadas, tais como: a taxa de dados pode ser reduzida, a potência transmitida aumentada ou códigos podem ser alterados como por exemplo a proteção ao ruído impulsivo (INP). O perfil de estabilidade pressupõe altos valores de MTBE e MTBR;
- **Redução de *crosstalk*.** Quando a linha alcança uma determinada taxa alvo, a potência transmitida pode ser gradualmente reduzida para reduzir a emissão de *crosstalk* nas linhas vizinhas. Essas ações pressupõe menores valores de MTBE e MTBR.
- **Upgrade.** Enquanto a linha se mantém estável, o DLM aumenta a taxa de dados gradualmente. Além disso, uma menor latência na transmissão pode ser alcançado ajustando o *Interleaver*. Essas ações pressupõe menores valores de MTBE e MTBR.

Durante o ciclo de operação o DLM também se adapta às condições variantes no tempo que possam causar instabilidade tais como: mudanças na infraestrutura através da ativação de novas linhas no mesmo *binder*, introdução de novos serviços e terminais remotos (RT) na rede.

## 3.4 Conclusão

Esse capítulo ilustrou o problema da instabilidade nas redes DSL. Como visto, o tratamento da instabilidade é um grande desafio para as operadoras, principalmente depois que os serviços *Triple Play* ganharam o mercado. Além disso esse capítulo revisou as principais causas da instabilidade, bem como seus efeitos nas redes DSL e métricas.

Finalizando, foi feito um estudo das principais ferramentas e técnicas existentes utilizadas no combate à instabilidade nas redes DSL, ilustrando suas vantagens e desvantagens. Foi visto que a margem de ruído ainda é a principal ferramenta da camada física que combate a instabilidade e, aliada ao ajuste de parâmetros como o INP e *Delay*, pode efetivamente levar a uma maior estabilidade da rede. Além disso técnicas como o Balanceamento do Espectro, buscam mitigar o efeito do *crosstalk* ao mesmo tempo que aumentar a taxa de transmissão. Outras ferramentas como o DLM atuam como uma ferramenta de monitoramento da instabilidade, diagnóstico e configuração, funcionando bem no caso de ser aplicado à uma única linha do *binder*.

O próximo capítulo se concentra na otimização multi-objetivo evolucionária aplicada ao problema de estabilidade nas redes DSL.

# Capítulo 4

## Computação Evolutiva para Otimização

### 4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo fornecer uma visão geral das técnicas de otimização utilizadas no trabalho (i.e. AG e enxame de partículas PSO), nele são descritos suas propriedades, fluxo de operação, operadores, etc. Esse capítulo explora aspectos relacionados à otimização multiobjetivo, concentrando-se nos algoritmos Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada - II (NSGA-II) e SMPSO.

### 4.2 Algoritmos Evolutivos

Desde 1950, aproximadamente, há um grande interesse no desenvolvimento de métodos de otimização que utilizem uma metáfora do processo de evolução natural [61]. Os AE são técnicas inspiradas em processos biológicos, especificamente nas dinâmicas que regem a evolução dos organismos vivos.

A idéia principal dos algoritmos evolucionários gira em torno de uma população de estruturas, inserida em um ambiente que evolui ao longo das suas gerações. A maior parte dos atuais tipos de implementação dos algoritmos evolutivos derivam de três abordagens:

- **Algoritmos genéticos.** Os trabalhos pioneiros na aplicação de técnicas de evolução artificial datam da década de 50, porém só com o avanço da computação foi que Holland [62], na década de 70, introduziu os algoritmos genéticos, com o objetivo de entender

o processo de evolução natural e empregar esse conhecimento no projeto de sistemas artificiais, utilizando mecanismos de busca baseados na seleção natural e genética [63]. Os AGs operam em populações de indivíduos representados pelos cromossomos, os quais passam pelos métodos probabilísticos de seleção, reprodução sexuada e mutação. [64,65].

- **Programação evolucionária ou evolutiva (PE)**. Introduzida por Fogel [66] na década de 60, foi originalmente proposta como uma estratégia de otimização estocástica similar aos AGs, porém, não simula os operadores genéticos como na natureza. Apenas a mutação é utilizada para simular o relacionamento entre os genitores e seus descendentes [67].
- **Estratégias evolutivas (EE)**. Proposta por Rechenberg [68] e Schwefel [69] na década de 60, surgiu originalmente para tratar problemas de otimização de parâmetros. Nas EEs a seleção dos melhores indivíduos é determinística; a recombinação é assexuada.

Entre os benefícios da utilização dos algoritmos evolutivos estão:

- Possibilitam incorporar conhecimento ao método sem explicitamente programá-lo;
- Apresentam um processamento paralelo implícito.

### 4.2.1 Algoritmos Genéticos

Em torno das técnicas evolucionárias, os AGs, são o grupo mais extenso de métodos já utilizados [70]. Devido a sua versatilidade e robustez, são utilizados em vários tipos de aplicações. De acordo com [64], o AG difere dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente em quatro tópicos:

- Os AGs buscam soluções diretamente no espaço de busca.
- A busca pelo ótimo é feita em torno de uma população de pontos e não em um ponto isolado.
- A busca é feita por amostragem, sem a necessidade de um conhecimento prévio além do valor da função objetivo.
- O AG realiza transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Entre as vantagens de utilização de um AG, destacam-se:

- Podem ser implementados em máquinas de processamento paralelo;



- Podem ser utilizados em problemas de otimização contínuos e discretos;
- Por serem estocásticos, estão menos sujeitos a ficarem presos em mínimos locais;
- Conseguem produzir novos indivíduos por meio da mutação e cruzamento.

No contexto multiobjetivo, os AGs são utilizados com os propósitos principais de:

- Guiar a busca em torno da fronteira de *Pareto* e;
- Garantir a diversidade na população [71].

#### 4.2.1.1 Funcionamento de um algoritmo genético canônico

A Figura 4.1, ilustra um diagrama do fluxo de execução de um AG canônico. Uma população é iniciada com indivíduos que são potenciais soluções. Durante cada iteração  $t$ , cada membro da população é avaliado através da função objetivo também chamada de *fitness*. Essa função calcula uma medida de aptidão que indica o quão bem adaptado ao ambiente esse membro está. No passo seguinte do AG é simulado o processo de seleção natural, onde os indivíduos com melhores *fitness*, possuem maior probabilidade de sobreviver e se reproduzirem. Esses participam a seguir, da recombinação, onde novos indivíduos são gerados através da troca de material genético de dois indivíduos pais. Alguns dos indivíduos passam por modificações através da mutação, formando potenciais novas soluções. Desse processo se forma a próxima geração em  $t + 1$ , com indivíduos da população antiga e novos. Esse fluxo se repete até que uma condição de parada seja satisfeita ou um número máximo de iterações seja alcançado.

#### 4.2.1.2 A Representação

Um ponto inicial na utilização de AG, é a representação do conjunto de parâmetros que formarão o cromossomo<sup>1</sup>, que consiste na codificação genética da informação do problema para o AG e que deve conter informação suficiente de modo que a sua qualidade possa ser avaliada depois de decodificado.

A representação é dependente do problema e sua definição é uma etapa fundamental em qualquer algoritmo evolutivo, pois dela irá depender a eficiência e complexidade do método de busca [64].

---

<sup>1</sup>Cada pedaço da representação pode ser chamada de gene, e ao valor que a decodificação de cada gene retorna dá-se o nome de alelo em analogia ao processo biológico.

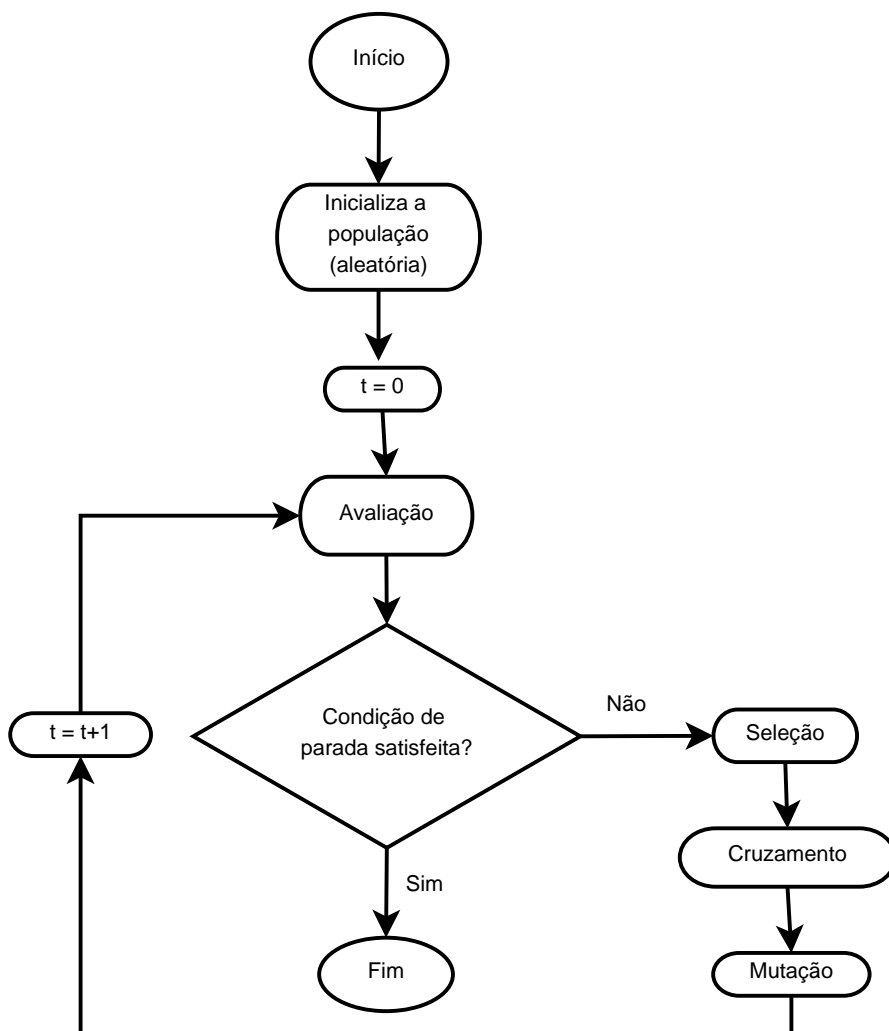


Figura 4.1: Fluxo de execução de um algoritmo genético canônico.

A representação binária é a mais utilizada; sua criação e manipulação é relativamente simples e tipicamente produz bons resultados. Esse tipo de representação foi utilizada nos trabalhos pioneiros de Holland [62]. Nessa representação cada cromossomo é um vetor de tamanho fixo, constituído de dígitos binários (0 e 1) denotando a ausência ou presença de dada característica (chamado de genótipo). Em problemas que requerem uma codificação real, a sequência de *bits* pode ser convertida para um número decimal e em seguida mapeada para um número real.

Apesar de ser muito utilizada a representação binária apresenta desvantagens, como em casos em que a representação requer uma grande precisão, sendo necessário um grande número bits para atender o requisito, o que pode dificultar a operação do AG [72].

Outras representações também são utilizadas, tais como representação de números em ponto flutuante e caracteres alfanuméricos.

### 4.2.1.3 A População

O AG fornece um procedimento iterativo de otimização, onde ao invés de trabalhar com uma única solução em cada iteração, ele trabalha com um conjunto de soluções. Cada conjunto de soluções é chamado de população [73] e cada elemento, ou indivíduo da população, representado por um cromossomo, é uma potencial solução para o problema de otimização.

O tamanho da população é um fator importante que pode afetar a eficiência do AG. Uma população pequena não garante uma boa abrangência ao espaço de busca o que afeta diretamente diversidade necessária para convergir para uma boa solução [72]. Já uma população muito grande poderá causar demora na avaliação da função de aptidão a cada iteração. É importante que o tamanho da população inicial garanta uma boa abrangência do espaço de busca e ao mesmo tempo o bom desempenho do AG.

Sua inicialização é tipicamente realizada utilizando funções aleatórias de forma a fornecer maior diversidade à população. Apesar disso, é possível que a população inicial tenha algum conhecimento prévio, ou seja, a introdução de soluções conhecidas como forma de inicialização [64].

### 4.2.1.4 A função objetivo ou avaliação (*fitness*)

O grau de aptidão de cada indivíduo na população corrente é calculado a partir da aplicação da função objetivo (*fitness*). Assim como na codificação dos cromossomos, a definição da função objetivo é dependente do problema e guia o processo de busca.

### 4.2.1.5 A Seleção

Durante a seleção são escolhidos os indivíduos da população que irão participar da reprodução. A seleção deve ser feita de maneira que os indivíduos com maior aptidão devem ter maiores chances de serem escolhidos. Considerando  $N_{um}$  o número de indivíduos em uma população e  $f_m$  a avaliação do indivíduo  $m$  na população, tem-se então que a probabilidade  $p_m$ , do indivíduo  $m$  ser selecionado é dada por:

$$p_m = \frac{f_m}{\sum_{j=1}^{N_{um}} f_j} \quad (4.1)$$

Entre os métodos de seleção mais conhecidos estão:

- **Seleção por Roleta.** Desenvolvido em [62], nesse método de seleção a população é organizada na forma de uma roleta, em que a probabilidade de um indivíduo ser

selecionado é proporcional ao seu valor de aptidão, ou seja, um indivíduo com maior aptidão ocupa uma porção maior da roleta e conseqüentemente tem maior chance de ser selecionado do que um indivíduo com menor aptidão. Uma desvantagem desse método está em casos em que um indivíduo tem desempenho muito melhor que os demais, o que pode levar a uma convergência prematura para um máximo (ou mínimo) local.

- **Seleção por Torneio.** Um número de indivíduos da população é escolhido aleatoriamente, e desse grupo é selecionado o indivíduo que tiver a melhor aptidão. A desvantagem desse método está em que indivíduos com alta aptidão podem ser perdidos, uma vez que a probabilidade de não serem escolhidos para o torneio é relativamente alta.

#### 4.2.1.6 A Recombinação (*Crossover*)

É uma abstração da reprodução sexuada biológica onde os cromossomos dos pais são recombinados (com uma probabilidade  $p_c$ ), para gerar novos cromossomos filhos. É esperado que esse processo potencialmente recombine as melhores características de seus pais. Entre os tipos de recombinação mais utilizadas estão:

- **Recombinação em um ponto.** É considerado a forma de recombinação mais simples, onde um ponto de cruzamento é escolhido de forma aleatória nos cromossomos pais, e as informações anteriores à este ponto em um dos cromossomos pais são ligadas às informações posteriores à este ponto no outro cromossomo pai, de maneira que desse cruzamento dois descendentes são gerados.
- **Recombinação multiponto.** Uma variação da técnica anterior, porém com um número fixo de pontos de corte.
- **Recombinação uniforme.** Nessa técnica é gerada uma máscara aleatória, que indica quais os genes dos dois cromossomos que serão trocados.

#### 4.2.1.7 A Mutação

Através da mutação é possível inserir mudanças aleatórias nos cromossomos dos filhos com o objetivo de garantir a diversidade da população. Essa mudança ocorre com uma probabilidade pré-estabelecida, nos indivíduos resultantes do cruzamento.

A mutação bem projetada é essencial para aumentar a diversidade na população, assegurando que o espaço de busca seja explorado em sua extensão. Além disso, sua atuação é no sentido de evitar uma convergência prematura com o surgimento de um super-indivíduo que

domina o processo de seleção. Os tipos de mutação existentes são diferenciados pela forma como a mutação altera os genes do cromossomo. Entre estes estão:

- **Mutação *flip***. Cada gene a ser mutado recebe um valor sorteado do alfabeto válido;
- **Mutação por troca**.  $n$  pares de genes são sorteados, e os elementos do par trocam de valor entre si;
- **Mutação *creep***. Um valor aleatório é somado ou subtraído do valor do gene.

#### 4.2.1.8 O Elitismo

No elitismo os melhores indivíduos são sempre mantidos a cada geração. Dessa maneira, o elitismo tem como objetivo manter a qualidade da população.

## 4.3 Inteligência de Enxames

A inteligência de enxames (ou inteligência coletiva) descreve um conjunto de técnicas baseadas no comportamento coletivo de sistemas que possuem a habilidade de perceber e modificar o seu ambiente. Os sistemas são compostos por uma população de agentes computacionais onde as inteligências individuais são somadas e compartilhadas por toda população.

Da implementação das técnicas de inteligência coletiva deriva a abordagem conhecida como otimização por Nuvem de Partículas [74, 75]

### 4.3.1 Otimização por Nuvem de Partículas (PSO)

A técnica de Otimização por Nuvem de Partículas PSO faz parte de uma grande categoria de inteligência de enxames para a resolução de problemas de otimização global. Essa meta-heurística é inspirada no comportamento social dos pássaros em bando, também chamado de consciência coletiva, onde cada elemento do grupo aprende com o comportamento dos demais componentes [74, 75]. O PSO utiliza a seguinte teoria sociocognitiva:

- Cada indivíduo de uma população possui sua própria experiência e é capaz de avaliar a qualidade desta experiência; e
- Como os indivíduos são sociais, eles também possuem conhecimentos sobre o desempenho de seus vizinhos.

Com base nessas observações, em 1995, James Kennedy, um psicólogo social, e Russell Eberhart, um engenheiro elétrico, propuseram essa nova meta-heurística, destinada à resolução de problemas irrestritos de otimização não-linear. Desde então, essa técnica tem sido explorada em uma ampla faixa de problemas [76–81], devido a características como [74, 75, 82]:

- Eficiência em lidar com os aspectos de otimização;
- Utiliza pouca memória e requer pouca velocidade de processamento;
- Simplicidade de implementação e
- Habilidade de convergência rápida para uma razoável e boa solução.

#### 4.3.1.1 O Algoritmo PSO

No PSO um enxame de partículas explora um espaço de busca  $D$ -dimensional e são atraídas por regiões de alto valor de adaptação. Nesse enxame, cada partícula pode ser considerada como uma possível solução individual e é avaliada, através de uma função objetivo que é dependente do problema chamada de aptidão ou *fitness*.

Ao iniciar o algoritmo, um enxame inicial de partículas é gerado, onde a  $i$ -ésima partícula do enxame pode ser representada por um vetor  $D$ -dimensional,  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$  com sua velocidade inicial representada por outro vetor  $D$ -dimensional  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ .

A Figura 4.2 e o Algoritmo 1 ilustram o funcionamento geral do PSO. A cada iteração  $t$  do algoritmo, cada partícula percorrerá o espaço de busca e terá a sua velocidade  $v_i(t)$  e sua posição  $x_i(t)$ , atualizadas de acordo com a sua própria experiência assim como a experiência da melhor partícula no enxame [74, 75, 83]. Ou seja, cada partícula possui memória, e a capacidade de armazenar a melhor posição já visitada. Assim, o movimento se dá em direção da melhor posição já visitada pelo conjunto, levando-se em consideração a melhor posição visitada pelo indivíduo anteriormente [84]. No PSO, cada partícula da população possui uma velocidade variável de acordo com a movimentação pelo espaço de busca. As atualizações de velocidade e posição, são realizadas através das equações (4.2) e (4.3) respectivamente.

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 r_1(t) [Pbest_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2(t) [Gbest(t) - x_i(t)] \quad (4.2)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (4.3)$$

onde  $c_1$  e  $c_2$  são constantes positivas de aceleração;  $r_1(t)$  e  $r_2(t)$  são números aleatórios, gerados com distribuição uniforme no intervalo  $[0, 1]$ .  $Pbest_i$  é a melhor posição da partícula  $i$  na

atual iteração (também chamada de componente cognitivo ou “memória” da partícula) onde  $Pbest_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$ .  $Gbest$  é a melhor posição do enxame no tempo  $t$  (também chamado de “componente social”) [83]. Os componentes cognitivos e sociais influenciam a locomoção das partículas pelo espaço de busca criando forças de atração. O processo de atualização ocorre de forma interativa até que um  $Gbest$  aceitável seja alcançado ou um número fixo de interações ( $t_{max}$ ) seja alcançado.

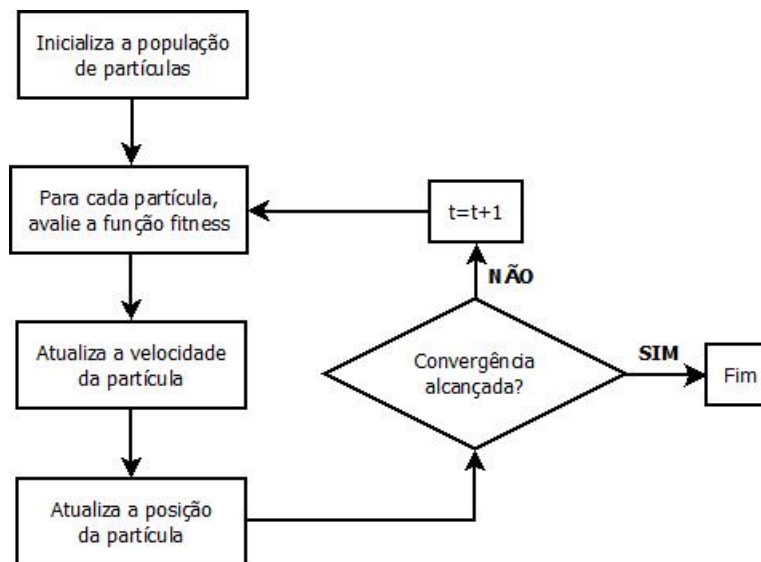


Figura 4.2: Fluxograma do funcionamento do PSO.

---

**Algorithm 1** O algoritmo por enxame de partículas

---

- 1: Inicia enxame de partículas,
  - 2: Avalia partículas,
  - 3: Atualiza  $Pbest$  e  $Gbest$ ,
  - 4: Atualiza velocidade das partículas,
  - 5: Atualiza posição das partículas,
  - 6: **enquanto** iterações **faça**
  - 7:     Avalia função *fitness*
  - 8:     Atualiza  $Pbest$ , atualiza  $Gbest$
  - 9:     Atualiza Velocidade das partículas
  - 10:    Atualiza posição das partículas
  - 11: **fim enquanto**
-

## 4.4 Comparação entre PSO e algoritmos Genéticos

Assim como o AG, o PSO é inicializado com uma população aleatória e da mesma forma realiza a busca por um resultado ótimo, através das gerações. Nas duas técnicas, a qualidade das soluções é verificada tomando como base os resultados da função objetivo.

O PSO não utiliza os operadores de mutação e recombinação explícitas. Entretanto, a aceleração da partícula em direção à melhor posição, bem como à melhor partícula da nuvem, se assemelha a função de recombinação do AG.

De acordo com [85], a maior diferença entre as técnicas está no papel da seleção natural: enquanto que no AG a morte dos indivíduos menos aptos é parte essencial da técnica, no PSO esses indivíduos são preservados durante a execução do algoritmo, de forma que o próprio indivíduo se adapta no decorrer do tempo. Nesse caso, no AG o compartilhamento da informação é realizado através dos cromossomos e considera informações do *fitness* relativo aos pais. Já no PSO o compartilhamento da informação considera apenas a própria partícula (*Pbest*) e a melhor partícula do enxame (*Gbest*). A evolução leva em consideração apenas o melhor valor.

Comparado com algoritmos genéticos, todas as partículas do PSO tendem a convergir para a melhor solução rapidamente [83].

## 4.5 Otimização Multiobjetivo

A maior parte da solução dos problemas reais envolve diferentes objetivos que devem ser atingidos simultaneamente, mas que podem ser conflitantes entre si. Um exemplo de problemas dessa natureza [86] são preço e desempenho na compra de um carro. Nesse problema os objetivos (preço mínimo e desempenho máximo) são conflitantes entre si e uma solução considerada ótima seria aquela que fornece um custo mínimo ao mesmo tempo que maximiza por exemplo, o desempenho do carro [86]. Porém, nesse problema nenhuma solução que apresente menor custo e desempenho pode ser considerada superior a outra com maior custo e desempenho. Devem ser considerados vários modelos onde os objetivos de preço e desempenho apresentem diversos valores. Esse tipo de problema é chamado de problema multiobjetivo.



### 4.5.1 Problemas de Otimização Multiobjetivo

Os problemas de otimização multiobjetivo tipicamente envolvem a minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos satisfazendo um conjunto de restrições. Formalmente, dado um vetor  $D$ -dimensional de variáveis de decisões  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_D\}$  em um espaço de soluções  $\Omega$ , a tarefa da otimização multiobjetivo é encontrar um vetor  $x^*$  que maximize (ou minimize) um conjunto de  $L$  funções objetivo  $f(x^*) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_L(x^*)\}$ , sujeito um certo conjunto de restrições [87], esse problema pode ser matematicamente formulado como:

$$\begin{aligned} \max \setminus \min \quad & f(x) \\ \text{sujeito a} \quad & g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J; \\ & h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, K; \end{aligned} \tag{4.4}$$

onde  $g_j$  e  $h_k$  são as funções de restrição de desigualdade e igualdade respectivamente,  $J$  é o número de restrições de desigualdade,  $K$  o número de restrições de igualdade,  $x_i^{inf} \leq x \leq x_i^{sup}$ .

O conjunto de funções objetivo  $f(x^*)$  está localizado em um espaço multidimensional chamado espaço de objetivos, onde para cada solução  $x^*$  no espaço de soluções, existe um ponto  $f(x^*)$  no espaço de objetivos. Essa é uma diferença fundamental em relação ao problema de otimização monoobjetivo, o qual possui um espaço de objetivos unidimensional e fornece uma única solução ao problema de otimização. No contexto multiobjetivo, uma possível solução para um determinado problema é chamado de um conjunto de soluções de *Pareto*.

### 4.5.2 A dominância de *Pareto*

Uma tarefa importante no processo de otimização multiobjetivo está relacionada com a identificação do conjunto de soluções ótimas de *Pareto*. Esse conjunto está diretamente relacionado com a definição do conceito de Dominância entre duas soluções [71]:

**Definição 4.1.** *Uma solução  $x_1$  domina uma determinada solução  $x_2$ , se atende as seguintes condições:  $x_1$  é melhor ou igual a  $x_2$  em todos os critérios, ou seja,  $f_m(x_1) \leq f_m(x_2)$  para todo  $m = 1, 2, \dots, M$ ; e  $x_1$  é estritamente melhor que  $x_2$  em pelo menos um deles, ou seja,  $f_m(x_1) < f_m(x_2)$  pelo menos para um valor de  $m = 1, 2, \dots, M$ .*

Logo, de acordo com a Definição 4.1, não existe nenhuma solução factível (em relação a  $x_1$ ), capaz de melhorar um dos objetivos do problema sem simultaneamente piorar pelo menos um dos demais [71]. Se as condições da Definição 4.1 são satisfeitas, pode-se dizer que  $x_2$  é dominado por  $x_1$ ,  $x_1$  é não dominado por  $x_2$ ; e  $x_1$  é não dominada em relação a  $x_2$ .

A relação de dominância deve satisfazer as seguintes propriedades:

1. Não é reflexiva, ou seja, uma solução não pode ser dominada por si mesma;
2. Não é simétrica, ou seja, se  $x_1$  domina  $x_2$  não implica que  $x_2$  domine  $x_1$ ;
3. Transitiva, dado que se  $x_1$  domina  $x_2$  e  $x_2$  domina  $x_3$  então  $x_1$  domina  $x_3$ .

A relação de dominância também pode ser classificada como dominância forte e fraca, onde:

**Definição 4.2.** *Uma solução  $x_1$  domina fortemente uma determinada solução  $x_2$  se é estritamente melhor que  $x_2$  para todos os critérios.*

### 4.5.3 Soluções ótimas de *Pareto*

Uma solução  $x_1^*$  é considerada com uma solução ótima de *Pareto* se não puder ser dominada por qualquer outra solução no espaço de busca. Dessa maneira  $x_1^*$  pode ser definida como

$$x_1^* = \{x_1 \in \Omega \mid \nexists x_2 \in \Omega : x_1 \text{ é dominado por } x_2\} \quad (4.5)$$

onde  $\Omega$  é o espaço de busca. Se os pontos não-dominados estão em um espaço contínuo, pode-se desenhar uma curva. O conjunto de pontos contidos na curva é chamado de frente ou fronteira de *Pareto*.

### 4.5.4 Metas em Otimização Multiobjetivo

As principais metas da Otimização Multiobjetivo são [71, 88]:

- Encontrar soluções mais próximas possível da fronteira de *Pareto*, ou seja, minimizar a distância entre as soluções pertencentes ao conjunto de *Pareto* e;
- Maximizar diversidade do conjunto de soluções encontrado.

A tarefa de maximizar a diversidade dentro do conjunto de soluções é uma meta específica para a otimização multiobjetivo. Como a otimização multiobjetivo trabalha com o espaço de soluções e o espaço dos objetivos, é desejável que as soluções estejam corretamente

distribuídas em ambos os espaços. A segunda meta é um dos motivos pelos quais as heurísticas populacionais são amplamente utilizadas em problemas de otimização multiobjetivo que requerem elevada dimensão [88].

Além disso, espera-se que tais soluções sejam alcançadas com a maior eficiência computacional possível.

## 4.6 Algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo

Ao longo dos anos, algoritmos evolutivos têm sido empregados com sucesso em muitos problemas de otimização multiobjetivo devido a várias vantagens em relação às técnicas tradicionais, entre elas [71, 88]:

- Possibilidade de trabalhar com funções objetivos e com a dominância de *Pareto*;
- Não inserem parâmetros extras ao problema;
- Com uma execução do algoritmo é possível encontrar um conjunto diversificado de soluções;

O trabalho pioneiro foi realizado em 1984 [89] chamado VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*), a partir daí vários algoritmos evolutivos multiobjetivos surgiram, como ilustra a Tabela 4.1 [90].

### 4.6.1 Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada - NSGA-II

O NSGA-II é um método de otimização multiobjetivo, proposto em [97], como uma versão modificada do algoritmo NSGA proposto em [93]. Como o próprio nome indica, o NSGA-II utiliza uma estratégia de ordenação baseada no nível de dominação entre as soluções. Dessa maneira, o NSGA-II é capaz de encontrar soluções bem espalhadas sobre a fronteira de *Pareto*, requerendo baixo esforço computacional [97].

O NSGA-II possui uma característica elitista, o que garante que as boas soluções não se perderão durante as gerações. No elitismo a melhor solução de cada geração é copiada para a geração seguinte. No contexto multiobjetivo, essa definição se estende para o conjunto

de soluções não-dominadas, que são inseridas na próxima solução, acelerando a seleção pelas melhores soluções e convergência do algoritmo.

Um dos grandes desafios da otimização multiobjetivo é preservar a diversidade em torno das soluções não dominadas [88, 97]. Essa tarefa é realizada pelo mecanismo de seleção chamado de torneio de multidão, que é baseado na distância de uma solução na vizinhança de uma multidão.

O pseudo código do NSGA-II pode ser visualizado no Algoritmo 2. A cada iteração uma população “pai”  $P_t$  é usada para dar origem a uma população “filha”  $Q_t$ , de tamanho  $N_{um}$ . A população “pai” é então, combinada com a população “filha” para formar uma população  $R_t$  de tamanho  $2N_{um}$ , onde  $R_t = P_t \cup Q_t$ . A população recém criada é então ordenada de acordo com o critério de não-dominância, formando assim diferentes frentes  $F_i$ , onde  $i = 1, 2, \dots, n$ . Uma nova população  $P_{t+1}$  é configurada, sendo formada por cada conjunto  $F_i$ , onde  $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$  e  $i = i + 1$ . Cada conjunto  $F_i$  é inserido na nova população  $P_{t+1}$  até que  $|P_{t+1}| + |F_i| < N$ . Nesse momento utiliza-se o critério de ordenação por distância de multidão, onde as soluções localizadas em uma área menos povoada são selecionadas, ou seja, as  $(N - |P_{t+1}|)$  soluções mais dispersas de  $F_i$  em  $P_{t+1}$ . É criada uma nova população “filha”  $Q_{t+1}$ , a partir de  $P_{t+1}$  utilizando os operadores de seleção por torneio, *crossover* e mutação. Esse processo é repetido até que seja atingido um número máximo de iterações (ou gerações)  $GER_{max}$  seja alcançado, ou um outro critério de parada estabelecido seja alcançado.

A Figura 4.3 ilustra uma iteração do algoritmo NSGA-II.

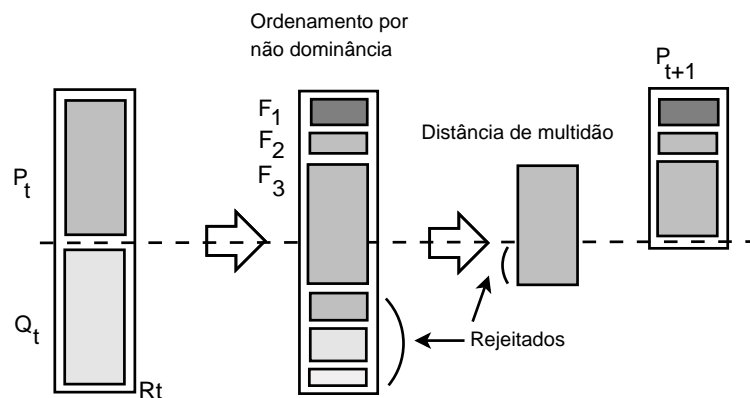


Figura 4.3: Exemplo de iteração do algoritmo NSGA-II

#### 4.6.1.1 A ordenação por dominância

Essa estratégia realiza a busca por soluções próximas à fronteira de *Pareto*. Para isso a população é ordenada de acordo com um nível de não-dominância dos cromossomos [105]. Isso

---

**Algorithm 2** NSGA-II
 

---

- 1: Gere a população  $P_0$  de tamanho  $N_{um}$ .
  - 2: Execute recombinação e mutação sobre  $P_0$ , gerando os descendentes  $Q_0$  de tamanho  $N_{um}$ .
  - 3: **para**  $g \leftarrow 0$  **até**  $GER_{max}$  **faça**
  - 4:     Ordene  $R_t \leftarrow P_t \cup Q_t$
  - 5:      $d \leftarrow +1$
  - 6:     Identificar as soluções não-dominadas  $F_1, F_2, \dots, F_k$  em  $R_t$ , através do algoritmo NSGA [105].
  - 7:     **para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $k$  **faça**
  - 8:         Calcule as distâncias de aglomeração da soluções em  $F_i$  ( [105]).
  - 9:         **se**  $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N_{um}$  **então**
  - 10:             Adicione  $F_i$  a  $P_{t+1}$ .
  - 11:         **senão**
  - 12:             Adicione a última solução  $N_{um} - |P_{t+1}|$  de  $F_i$  a  $P_{t+1}$ .
  - 13:         **fim se**
  - 14:     **fim para**
  - 15:     Execute a seleção baseada na distância de aglomerações para selecionar os cromossomos pais de  $P_{t+1}$ .
  - 16:     Execute recombinação e mutação em  $P_{t+1}$ , gerando os descendentes  $Q_{t+1}$  de tamanho  $N_{um}$ .
  - 17: **fim para**
-

é feito comparando cada cromossomo da população com os outros cromossomos da população inteira, e atribuindo um valor de dominância (ou *rank*) a cada cromossomo. Baseado nesse valor *rank* os cromossomos são então classificados em fronteiras, sendo que os melhores (ou seja os cromossomos que não são dominados por nenhum outro cromossomo na população total  $Xg$ ) ficam na primeira fronteira.

Após estabelecer o *rank* para os cromossomos da primeira fronteira, o método é repetido à segunda fronteira para determinar novas soluções não-dominadas; sendo que agora os cromossomos da fronteira atual recebem um valor de *rank* menor que o pior valor compartilhado no nível anterior. Esse processo é então repetido até que toda a população tenha um valor de *rank*. O Algoritmo 3 ilustra a ordenação por dominância [105], onde a primeira parte do algoritmo (linhas 2 – 10) é destinada a calcular para cada solução  $i$  dois valores:

- O número de soluções ( $nd_i$ ) que domina a solução  $i$  e
- O conjunto de soluções ( $U_i$ ) que são dominados por  $i$

Na segunda parte do Algoritmo 3 (linhas 12 – 22), as soluções encontradas são classificadas em uma fronteira.

#### 4.6.1.2 Torneio por Distância de multidão (*Crowding Distance sorting*)

O NSGA-II utiliza o torneio por distância de multidão (*Crowding Distance sorting*), para garantir a diversidade na fronteira calculada. A idéia é empregar uma estimativa da densidade das soluções que rodeiam cada indivíduo da população.

Inicialmente os cromossomos pertencentes à primeira fronteira são novamente ordenados. Mas dessa vez a ordenação é feita de acordo com a sua distância em relação aos pontos vizinhos na mesma fronteira. Assim, os cromossomos que estão em áreas menos povoadas do espaço de busca garantem um melhor *rank*. Além disso, é gerado um espalhamento dos resultados ao longo da fronteira de *Pareto* [105].

A Figura 4.4 [97] ilustra o cálculo da distância de multidão de um determinado ponto  $i$ , que é dado através do cálculo da distância média ( $d_i$ ) de dois pontos vizinhos ao ponto  $i$  de ambos os lados (*i.e.*  $i+1$  e  $i-1$ ), levando em consideração todos os objetivos. A distância  $d_i$ , atua como uma estimativa do tamanho do maior cubóide (mostrado nas linhas tracejadas) que inclui apenas o ponto  $i$ , excluindo qualquer outro ponto da população, sendo chamada de distância de multidão [105]. As soluções extremas em cada objetivo terão um cubóide infinito.

---

**Algorithm 3** Ordenação por Dominância
 

---

```

1: Variáveis:  $M_i$  (conjunto de soluções)
2: for all cada solução  $i \in M$  faça
3:    $nd_i = 0$ 
4:    $U_i = \emptyset$ 
5:   for all cada solução  $j \neq i$  e  $j \in M$  faça
6:     Se  $i$  domina  $j$  então  $U_p = U_p \cup \{j\}$ 
7:     Se  $j$  domina  $i$  então  $nd_i = nd_i + 1$ 
8:   fim para
9:   Se  $nd_i = 0$  então  $F_1 = F_1 \cup \{i\}$ 
10: fim para
11:  $k = 1$ 
12: enquanto  $F_k \neq \emptyset$  faça
13:    $Temp = \emptyset$ 
14:   for all cada solução  $i \in F_k$  faça
15:     for all cada solução  $j \in U_i$  faça
16:        $n_j = n_j - 1$ 
17:       Se  $n_j = 0$  então  $Temp = Temp \cup \{j\}$ 
18:     fim para
19:   fim para
20:    $k = k + 1$ 
21:    $F_k = Temp$ 
22: fim enquanto

```

---

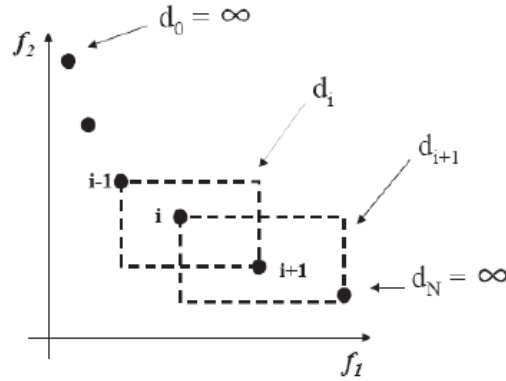


Figura 4.4: A distância de multidão do algoritmo NSGA-II

O cálculo da distância de multidão é obtido pela Eq. 4.6)(linha 10 do Algoritmo 4).

$$d_{I_i^m} = d_{I_i^m} + \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad (4.6)$$

onde

- $I_i^m$  representa a  $i$ -ésima solução na lista ordenada pelo objetivo  $m$ ;
- $f_m^{(I_{i+1}^m)}$  e  $f_m^{(I_{i-1}^m)}$  são os valores dos objetivos das soluções vizinhas à  $i$ , e;
- $f_m^{max}$  e  $f_m^{min}$  são os parâmetros dos limites máximo e mínimo em cada objetivo.

---

**Algorithm 4** Distância de aglomeração ou multidão

---

- 1: Variáveis:  $F_j$  (conjunto de soluções das fronteiras) onde  $|F_j| = 1$
  - 2: Para cada solução  $i$  em  $F_j$ ,  $\mathbf{d}_i \leftarrow 0$ ,
  - 3: **para** cada função objetivo  $f_m$  de  $m \leftarrow 1$  até  $M$  **faça**
  - 4:     Ordenar de forma decrescente as soluções por  $f_m$  na lista  $I^m$
  - 5: **fim para**
  - 6: **para** cada solução de mínimo e máximo em cada um dos  $M$  objetivos **faça**
  - 7:  $d_{I_1^m} = d_{I_l^m} = \infty$ ,
  - 8: **fim para**
  - 9: **para** as soluções  $i \leftarrow 2$  até  $l-1$  **faça**
  - 10:      $d_{I_i^m} = d_{I_i^m} + \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}}$
  - 11: **fim para**
-



### 4.6.1.3 O *Crossover* Binário Simulado (SBX)

O NSGA-II utiliza o *crossover* binário simulado [106,107] - *Simulated Binary Crossover* (SBX). O SBX produz gerações a partir o cruzamento de dois pais. No SBX, um fator de espalhamento  $\beta_i$  [71,106] é definido como a razão da diferença absoluta entre os cromossomos filhos e pais, dado por

$$\beta_i = \left| \frac{(x_i^{(2,t+1)} - x_i^{(1,t+1)})}{(x_i^{(2,t)} - x_i^{(1,t)})} \right| \quad (4.7)$$

onde  $(x_i^{(2,t)} - x_i^{(1,t)})$  é a diferença entre as soluções “pais” e  $(x_i^{(2,t+1)} - x_i^{(1,t+1)})$  é a diferença entre as soluções da nova geração.

Os filhos são criados a partir de uma função densidade de probabilidade que depende da localização dos pais e é dada por

$$P(\beta_i) = \begin{cases} 0.5(\eta_c + 1)\beta_i^{\eta_c} & \beta_i \leq 1 \\ 0.5(\eta_c + 1)\frac{1}{\beta_i^{\eta_c+2}} & \beta_i > 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

Ambas diferenças em Eq.4.7 são dependentes do índice do *crossover*  $\eta_c$  (que é um número real não negativo) o qual especifica o quão perto das de seus “pais”, estarão as novas gerações. Quanto maior o valor de  $\eta_c$ , maior é a probabilidade de soluções próximas a seus “pais”, por outro lado valores pequenos de  $\eta_c$ , indicam que as novas gerações serão geradas distantes de seus pais, com alta probabilidade. Calculando a distribuição de probabilidade associada à função de densidade da Eq. 4.8 tem-se

$$\beta_{qi} = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & u_i \leq 0,5 \\ \left[ \frac{1}{2(1-u_i)} \right]^{\frac{1}{\eta_c+1}} & u_i > 0,5 \end{cases}, \quad (4.9)$$

onde  $u$  é uma variável aleatória uniforme no intervalo  $[0, 1]$ . Com o cálculo de  $\beta_{qi}$ , é possível obter os filhos através da Eq. 4.10.

$$\begin{aligned} x_i^{(1,t)} &= 0.5 [(1 + \beta_{qi})p_1 + (1 - \beta_{qi})p_2] \\ x_i^{(2,t)} &= 0.5 [(1 - \beta_{qi})p_1 + (1 + \beta_{qi})p_2] \end{aligned} \quad (4.10)$$

#### 4.6.1.4 A Mutação Polinomial

A operação de *crossover* é seguida pela operação de mutação que utiliza a mutação polinomial, a qual permite aumentar a probabilidade de alcançar soluções próximas a de seus “pais” [107]. A mutação polinomial usa uma distribuição polinomial de probabilidade e na sua realização adota um fator de perturbação definido por

$$\delta = \frac{f_i - p_i}{\Delta_{max}}, \quad (4.11)$$

onde  $\Delta_{max}$  é uma quantidade fixa que representa a perturbação máxima permitida no valor do cromossomo pai ( $p_i$ );  $f_i$  é o cromossomo resultante da mutação realizada no cromossomo original  $p_i$ . O valor mutado é calculado com uma distribuição de probabilidade que depende do fator  $\delta$  válido no intervalo  $[-1, 1]$  de acordo com

$$P(\delta_i) = 0.5(\eta_m + 1)(1 - |\delta|)^{\eta_m}, \quad (4.12)$$

onde  $\eta_m$  é o índice de distribuição que controla o formato da distribuição. Para criação de um valor mutado, é utilizado um número aleatório  $u_i$  no intervalo  $[0, 1]$ , e em seguida é utilizada a Eq.4.13 para calcular o valor de perturbação  $\delta_i$  correspondente a  $u_i$

$$\bar{\delta} = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1, & \text{para } u_i < 0,5 \\ 1 - [2(1 - u_i)]^{\frac{1}{\eta_m+1}}, & \text{para } u_i \geq 0,5 \end{cases} \quad (4.13)$$

O valor resultante mutado é calculado por

$$f_i = p_i + \bar{\delta}\Delta_{max}. \quad (4.14)$$

## 4.7 Algoritmos Multiobjetivos Baseados em Enxame de Partículas

Devido ao sucesso de utilização do PSO em muitas aplicações de otimização mono-objetivo, surgiu a ideia de se estender a heurística do PSO para otimizar problemas com vários objetivos conflitantes, gerando dessa maneira as primeiras iniciativas dos algoritmos conhecidos genericamente como *Multiobjective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) [108]. O desafio dessas iniciativas implementações era satisfazer os três objetivos principais das aplicações multiobjetivo [108]:

- Maximizar o número de soluções no conjunto de *Pareto*,
- Minimizar a distância das soluções de *Pareto* encontradas, em relação ao verdadeiro conjunto de *Pareto* do problema e
- Maximizar o espalhamento das soluções encontradas a fim de obter uma uniformidade e boa distribuição ao longo do conjunto de soluções de *Pareto* encontrado.

Além da necessidade de se atender os requisitos citados acima, surgiram outras dificuldades nas implementações em torno das seguintes questões:

- Como manter as soluções não dominadas encontradas pelo MOPSO?
- Como determinar as partículas que serão usadas como líderes cognitivos e sociais?
- Como manter a diversidade no enxame de modo a evitar convergência para uma única solução?

A Tabela 4.2 ilustra algumas das variações de algoritmos multiobjetivos baseados em enxame de partículas desenvolvidas ao longo dos anos. A maioria dessas implementações utiliza um arquivo externo, responsável por armazenar todas soluções não-dominadas encontradas no decorrer do processo de busca do MOPSO [109,110]. Para determinar as partículas líderes, a abordagem frequentemente utilizada é a mesma já utilizada em alguns MOEAs que é estabelecer prioridade às soluções não-dominadas em relação àquelas que são dominadas [108]. Para isso, o arquivo externo de líderes é utilizado como fonte de potenciais líderes e a seleção da partícula é feita definindo uma medida de que quantifique a qualidade da solução, visto que todas as partículas do arquivo externo são de soluções não-dominadas. O líder cognitivo também é selecionado utilizando o critério de dominância, comparando a posição das partículas entre o líder cognitivo e a partícula atual.

Para a preservação da diversidade algumas implementações utilizam um estimador de densidade que classifica a região em que se encontra a solução em alta ou baixa densidade. Nesse caso, uma solução é considerada superior à outra se está localizada em uma região de baixa densidade. Para esse fim, algumas implementações utilizam o algoritmo de distância de multidão [111–113]. Um outro mecanismo utilizado para a preservação da diversidade é um operador de turbulência, também conhecido como mutação [114, 115]. Como citado na seção 4.2.1.7, a mutação tem como objetivo acelerar a busca e escapar de regiões de ótimo local, fazendo com que regiões inexploradas do espaço de busca sejam alcançadas por meio da modificação aleatória da posição das partículas do enxame [115].

O Algoritmo 5, ilustra o funcionamento de um MOPSO geral. Como ocorre no PSO, inicialmente, um enxame de partículas é gerado e os líderes cognitivos das partículas são iguais as suas posições atuais. A cada iteração do MOPSO, os líderes cognitivos e os sociais são determinados, essa determinação varia de uma implementação para outra, como exemplo de esquema tem-se o um torneio binário [116], e a seleção por roleta [111]. Em seguida ocorre a atualização de velocidade e posição e velocidade MOPSO tem sua velocidade e posição atualizados. O operador de turbulência é aplicado e em seguida ocorre a avaliação da partícula através da função de *fitness*. O enxame passa então, por uma nova determinação de soluções não-dominadas que são inseridas no arquivo externo.

---

**Algorithm 5** O algoritmo por enxame de partículas multiobjetivo SMPSO [109]

---

- 1: Inicia enxame de partículas,
  - 2: Inicia um arquivo externo de líderes,
  - 3: Qualifica líderes,
  - 4: **enquanto** iterações **faça**
  - 5:     **para** cada partícula  $\leftarrow$
  - 6:         **até** A **faça** atualiza velocidade,
  - 7:         Atualiza posição,
  - 8:         Mutaçãõ,
  - 9:         Avalia função *fitness*,
  - 10:     **fim para**
  - 11:     Atualiza arquivo de líderes,
  - 12:     Atualiza memória das partículas,
  - 13: **fim enquanto**
  - 14: Salva o arquivo de líderes com as soluções não-dominadas.
- 

#### 4.7.1 Algoritmo Baseado em Enxame de Partículas com Constrição de Velocidade: SMPSO

O SMPSO [116] surgiu como uma adaptação do então existente algoritmo MOPSO, no qual foi adicionado um mecanismo de constrição de velocidade. O objetivo foi evitar um fenômeno conhecido como explosão de velocidade [116], que ocorre quando a velocidade das partículas assumem valores muito altos ao longo das iterações, resultando em movimentos

errôneos das partículas que escapam do espaço de busca podendo causar a limitação das regiões a serem exploradas [116].

O SMPSO segue o mesmo fluxo de execução do Algoritmo 5 [116], iniciando com a geração aleatória das partículas, da posição e velocidades iniciais, e do arquivo de líderes que possui as soluções não-dominadas do enxame. O operador de turbulência é a mutação polinomial como descrito na seção 4.6.1.4, e é aplicada sobre uma porcentagem pré-definida de partículas com probabilidade  $p_m$ . Uma particularidade do SMPSO diz respeito à atualização de velocidade que é realizada através da Equação (4.15), e utiliza tanto o peso de inércia  $\omega$  quanto um fator de constrição  $\chi$  para determinar a velocidade das partículas do enxame.

$$v_{ij}(t+1) = \chi \{ \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \} \quad (4.15)$$

O coeficiente de constrição  $\chi$ , originalmente proposto em [121] é dado por

$$\chi = \frac{2}{2 - \rho - \sqrt{\rho^2 - 4\rho}} \quad (4.16)$$

onde

$$\rho = \begin{cases} c_1 + c_2, & \text{se } c_1 + c_2 > 4 \\ 1, & \text{se } c_1 + c_2 \leq 4 \end{cases} \quad (4.17)$$

O comportamento de diferentes valores para  $\rho$  foi investigado em [121], onde chegou-se ao resultado que para um  $\rho < 4$  o enxame se move em espiral ao redor do  $G_{best}$  sem uma convergência garantida. Já valores de  $\rho > 4$  garantiriam uma convergência mais rápida para o  $G_{best}$ . Se  $\rho \gg 4$ , ocorre convergência prematura.

Uma outra característica do SMPSO gira em torno dos coeficientes de aceleração  $c_1$  e  $c_2$ , que ao contrário de outros MOPSOs não são fixos e sim amostrados a cada iteração, através de uma função de distribuição uniforme dada por:

$$c_1 \sim U(c_1^{min}, c_1^{max}) \text{ e } c_2 \sim U(c_2^{min}, c_2^{max}) \quad (4.18)$$

onde  $c_1^{min}$  e  $c_1^{max}$  são valores mínimos e máximos para os coeficientes  $c_1$ ;  $c_2^{min}$  e  $c_2^{max}$  são valores mínimos e máximos para os coeficientes  $c_2$ . Após o cálculo da velocidade de cada partícula pela Equação 4.15, seu resultado é limitado através da Equação 4.19 dada por

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} \Delta_j, & \text{se } v_{ij}(t) > \Delta_j \\ -\Delta_j, & \text{se } v_{ij}(t) \leq -\Delta_j \\ v_{ij}(t), & \text{caso : contrario} \end{cases} \quad (4.19)$$

onde

$$\Delta_j = \frac{\chi_{max,j} - \chi_{min,j}}{2}, \forall j \in 1, 2, \dots, n, \quad (4.20)$$

em que  $\chi_{max,j}$  e  $\chi_{min,j}$  são valores os limites superiores e inferiores respectivamente do espaço de busca na dimensão  $j$ .

## 4.8 Conclusão

Nesse capítulo foram abordados os conceitos básicos de otimização evolutiva, concentrando-se nas técnicas de algoritmos genéticos e otimização por nuvem de partículas, onde foram vistos suas principais características e operadores de um AG clássico mono-objetivo e do PSO. Também foi abordado o conceito de otimização multiobjetivo e dominância de *Pareto*, onde além de suas características procurou-se explicitar a diferença fundamental entre a abordagem multiobjetivo e mono-objetivo. Ainda nesse capítulo, as seções 4.6.1 e 4.7.1 detalharam os algoritmos NSGA-II e SMPSO, que foram utilizados nesse trabalho como estratégias evolutivas.

O próximo capítulo se concentra na proposta para o problema de otimização da margem de ruído nas redes DSL.

Tabela 4.1: Principais modelos de algoritmos multiobjetivos evolucionários, seus respectivos autores e classificação quanto a presença de elitismo.

Sigla	Nome do Modelo	Elitista
VEGA ( <i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i> )	(Schaffer, 1984) [89]	Não
WBGA ( <i>Weight Based Genetic Algorithm</i> )	(Hajela e Lin, 1992) [91]	Não
MOGA ( <i>Multiple Objective Genetic Algorithm</i> )	(Fonseca e Fleming, 1993) [92]	Não
NSGA ( <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i> )	(Srinivas e Deb, 1994) [93]	Não
NPGA ( <i>Niched-Pareto Genetic Algorithm</i> )	(Horn et al., 1994) [94]	Não
PPES ( <i>Predator-Prey Evolutionary Strategy</i> )	(Laumanns et al.,1998) [95]	Não
REMOEA ( <i>Rudolphs Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm</i> )	(Rudolph, 2001) [96]	Sim
NSGA-II ( <i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i> )	(Deb et al., 2000 [97]);	Sim
SPEA, SPEA2 ( <i>Strenght Pareto Evolutionary Algorithm</i> ) 1 e 2	(Zitzler et al., 2001 [98];	Sim
TDGA ( <i>Thermodynamical Genetic Algorithm</i> )	(Kita et al., 1996 [99])	Sim
PAES ( <i>Pareto-Archived Evolutionary Strategy</i> )	(Knowles e Corne,1999) [100]	Sim
MOMGA-I, MOMGA-II ( <i>Multi-Objective Messy Genetic Algorithm</i> ) I e II	(Veldhuizen, 1999) [101]	Sim
Micro-GA ( <i>Multi-Objective Micro-Genetic Algorithm</i> )	(Coello, 2001) [102]	Sim
PESA-I, PESA-II ( <i>Pareto Envelope-Base Selection Algorithm</i> ) I e II	(Corne et al., 2001,2000) [103,104]	Sim

Tabela 4.2: Diferentes implementações de algoritmos multiobjetivos baseados em Enxame de Partículas

Sigla	Autor
MOPSO	(Coello e Lechuga, 2002) [109]
NPSO	(Li, 2003) [117]
Sigma MOPSO	(Mostaghim e J. Teich, 2003) [118]
AMPSO	(Pulido e Coello, 2004) [119]
MOPSO otimizado	(Sierra e Coello, 2005) [120]
MOPSO-CD	(Raquel e Naval Jr, 2005) [112]
SMPSO	(Durillo, García-Nieto, Nebro, Coello, Luna, e Alba., 2009) [116]
MOPSO-CDR	(Santana, Pontes e Bastos-Filho, 2009) [111]



# Capítulo 5

## Algoritmos Híbridos Evolucionários para Maximização de Margem Multiusuário em DSL

### 5.1 Introdução

Esse capítulo tem como objetivo descrever a abordagem adotada para o problema de maximização da margem de ruído nas redes DSL, iniciando com a descrição do problema e sua formulação matemática. A seguir é feita a apresentação do modelo de otimização utilizado, que consiste na otimização de parâmetros da camada física, *i.e.* margem de ruído e PSDs da rede DSL, tendo como restrições básicas a taxa de dados do usuário e a potência de transmissão, que são ajustados para aumentar a estabilidade da rede.

A solução proposta é então introduzida, onde empregou-se uma abordagem de otimização multiobjetivo evolucionária híbrida proporcionando um conjunto de soluções que são ótimas num sentido geral, para objetivos que normalmente são conflitantes, como no caso do problema de otimização de margem.

### 5.2 O problema de otimização da margem de ruído

Em um sistema multiusuário como a rede DSL, a margem de ruído é a principal ferramenta disponível na *camada física* para reduzir os efeitos de interferências e melhorar a estabilidade nas linhas DSL. Porém, a margem de ruído, taxa de dados e potência de trans-

missão são requisitos conflitantes na rede DSL [24], pois um alto valor de margem impacta na diminuição da capacidade de taxa devido à limitação de potência disponível. Portanto, um dos desafios da tecnologia DSL envolve obter um valor otimizado de margem de ruído e do espectro do sinal transmitido, de maneira que aumente a estabilidade da rede DSL, ao mesmo tempo que os requisitos de taxa de dados e restrição de potência sejam atendidos.

Uma abordagem comum para o problema de otimização de margem é procurar a melhor solução em um dado espaço de busca, a qual pode ser considerada como uma solução ótima quando comparada com todas soluções alternativas. Esse problema é normalmente modelado como um problema de maximização de margem - *Margin Maximization* (MM) - podendo ser definido como

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}, \gamma_1 \dots \gamma_N} \quad & \sum_{n=1}^N \mu_n \gamma_n \\ \text{sujeito a} \quad & R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ & P_n^{\text{tot}} \leq P_n^{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ & s_n^k \geq 0, \gamma_n \geq 1, \quad \forall n, k \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde

- $s_n^k$  é a PSD transmitida do usuário  $n$  no tom  $k$ ;
- $\gamma_n$  é a margem de ruído do  $n$ -ésimo usuário;
- $\mu_n$  é uma constante não negativa que representa um valor de “peso”, o qual permite ao operador ajustar a prioridade em torno dos usuários para situações, tais como aquelas em que a linha tem requisitos de QoS diferentes;
- $P_n^{\max}$  é a restrição de potência de transmissão total disponível para o usuário  $n$  e
- $R_n^{\min}$  é a restrição de taxa mínima, sobre a qual o valor de taxa  $R_n$  do usuário  $n$  não pode ser inferior.

Um processo de otimização onde ocorre a busca por um valor ótimo (máximo ou mínimo) de uma função com um único objetivo, é conhecido como otimização de objetivo único (ou mono-objetivo). Essa abordagem aplica uma “prioridade” entre os usuários no processo de otimização, que na Eq. 5.1 é garantida pelo valor de peso ( $\mu_n$ ), e introduz um conflito entre as soluções, ou seja, nenhum dos objetivos podem ser melhorado sem interferir no desempenho de pelo menos um outro objetivo [71].

Assumindo que um operador de rede deseja determinar os possíveis pontos de operação para a sua rede, de maneira que ele possa ter uma visão geral de sua operação; e que um algoritmo que solucione a Eq. 5.1 está disponível. Uma maneira de determinar esses pontos de operação é computando um objetivo por vez, o que é feito através da variação dos pesos  $\mu_n$  num número determinado de vezes, até que se ache uma solução diferente para cada execução do algoritmo. Como o relacionamento entre os valores de  $\mu_n$  e os objetivos não são lineares, não há garantia que cada resultado de simulação seja diverso ou mesmo diferente um do outro, como ilustra a Figura 5.1.

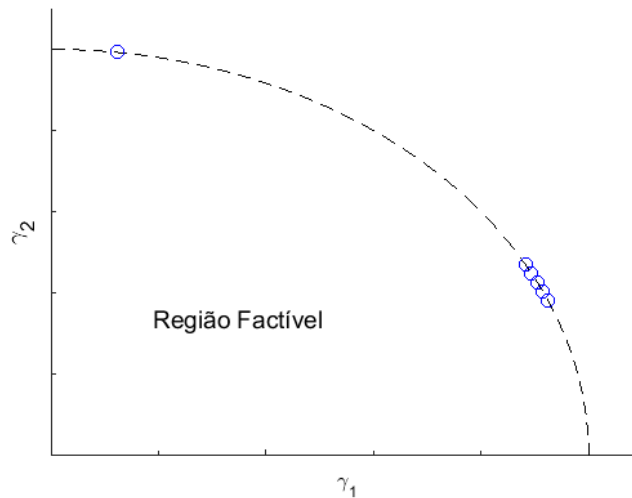


Figura 5.1: Escalarização não garante diversidade.

Uma solução para o caso mono-objetivo pode ser encontrada em [24], onde os autores propõem um método que tenta resolver o problema definido na Eq. (5.1), utilizando o algoritmo IWF [41] para calcular as margens resultantes e PSDs. Assumindo margens fixas (*e.g.*  $\gamma_n = 0$  dB), o método utiliza uma solução específica do IWF no modo adaptativo em taxa - *rate-adaptive* - de maneira que  $R_n(\gamma_n) \geq R_n^{\min} \forall n$ . Depois disso, o método utiliza um sub-algoritmo chamado *Newton-Raphson Margin Estimation* (NRME) para calcular as margens otimizadas  $\gamma_n^*$ 's usando as atualizações Newton-Raphson para obter  $R_n(\gamma_n^*) = R_n^{\min}$ , com  $\gamma_n^* > \gamma_n \forall n$ . A escolha apropriada do ponto inicial  $(R_1, \dots, R_N)$  é determinada por um algoritmo externo chamado de *Multiuser Harmonized Margin* (MHM), que geralmente calcula margens resultantes, com valores iguais para todos os usuários. Na prática o NRME converte uma solução de maximização de taxa para uma solução de maximização de margem, de maneira que se uma região de taxa do IWF é fornecida (geralmente através de uma busca utilizando força bruta), o NRME constrói a região de margem correspondente como ilustrado na Figura 5.2.

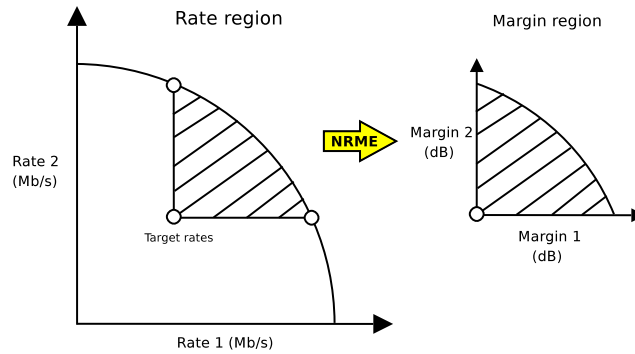


Figura 5.2: O algoritmo NRME converte a região de taxa obtida pelo IWF em uma região de margem, de acordo com as taxas alvo  $R_n^{\min}$  especificadas.

Apesar da simplicidade do IWF ser benéfica para o NRME, na literatura é bem estabelecido que o desempenho de algoritmos de DSM nível 1 (como o IWF) é inferior ao desempenho de algoritmos de nível 2 de coordenação. De fato, na literatura existem outras ferramentas de otimização de margem que utilizam o balanceamento do espectro, como em [38, 39]. Entretanto estes adotam uma abordagem diferente para resolver o problema de otimização, e não utilizam a definição do problema como em (5.1). Dessa maneira esse trabalho se atém a utilizar o NRME como algoritmo base na comparação de resultados, que será demonstrada no próximo capítulo.

### 5.3 O problema de otimização da margem com uma visão multiobjetivo

A Figura 5.2 ilustra um exemplo de regiões de taxa e de margem, onde qualquer melhora que ocorra no desempenho da função (ou objetivo) de um usuário, não pode acontecer sem que prejudique o desempenho do outro usuário. Claramente, existe um conflito de interesse entre os usuários o que caracteriza a abordagem mono-objetivo.

Esse trabalho propõe a utilização de outra abordagem para o problema de otimização da margem, que é a otimização multiobjetivo. Como visto na seção 4.5, na abordagem multiobjetivo, não há necessariamente uma solução que é considerada ótima em relação às outras, o que é devido principalmente à existência de objetivos conflitantes [61]. Ao invés de se obter uma única solução para o problema (como no caso de otimizações tradicionais de balanceamento de espectro mono-objetivo), a abordagem multiobjetivo permite que se encontre um conjunto de soluções ótimas, diversas uma das outras, em uma única execução, e que são

chamadas de solução de *Pareto* como ilustra a Fig 5.3. Essa é uma das razões pela qual a otimização multiobjetivo tem larga aplicabilidade em projeto de sistemas e planejamento em geral, suportando processos de tomada de decisões.

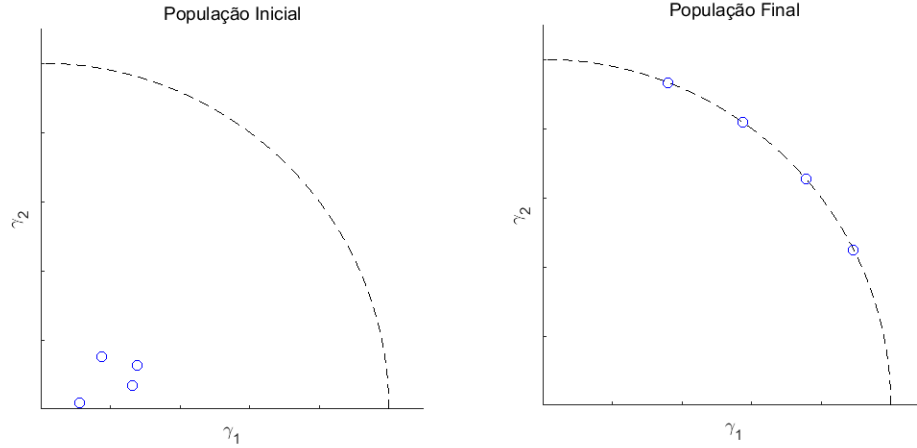


Figura 5.3: A solução proposta envolve tanto o problema de otimização de margem como diversidade.

A formulação multiobjetivo para o problema de otimização da margem corresponde a uma busca pelo conjunto de soluções ótimas de *Pareto* ( $\mathbf{P}$  e  $\gamma_1 \cdots \gamma_N$ ) de acordo com:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\mathbf{P}, \gamma_1 \cdots \gamma_N} && \gamma_n, \quad n = 1, 2, \dots, N && (5.2) \\
 & \text{sujeito a} && R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 & && P_n^{\text{tot}} \leq P_n^{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 & && s_n^k \geq 0, \gamma_n \geq 1, \quad \forall n, k
 \end{aligned}$$

Uma diferença fundamental entra as Eq.5.1 e a Eq.5.2, é o espaço de objetivos, que no caso da Eq.5.1, esse espaço é uni-dimensional. Os problemas multiobjetivo são caracterizados por possuir um espaço multidimensional de objetivos  $F^M$  [122], envolvendo a otimização de várias funções (maximização ou minimização, dependendo do problema), em torno de diferentes restrições a serem satisfeitas.

A técnica de multiobjetivo fornece maior diversidade no conjunto de soluções. Dessa maneira os operadores da rede DSL podem, por exemplo, avaliar a capacidade da rede e planejar melhor a sua utilização. Para o caso de maximização de margem definido na Eq.5.2, esse conjunto de soluções resulta na região de margem onde cada ponto (ou valor de margem) busca garantir a estabilidade da rede DSL ao mesmo tempo que atende as restrições de taxa alvo e potência transmitida definidas na Eq.5.2.

## 5.4 Implementação das meta-heurísticas no problema de otimização da margem de ruído

Nesse trabalho a solução proposta consiste em utilizar os algoritmos de balanceamento de espectro (considerados na literatura como estado da arte) em conjunto com as técnicas de otimização baseadas em computação evolutiva, em uma abordagem híbrida com o objetivo de obter soluções factíveis para o problema de otimização de margem como definido na Eq. 5.2.

Na abordagem híbrida adotada, os algoritmos evolutivos promovem uma busca global em torno das soluções enquanto que, o melhor indivíduo de cada população passa por um processo de busca local, utilizando algoritmos de balanceamento de espectro.

As técnicas de computação evolutiva utilizadas foram: algoritmos genéticos (AG) e a otimização multiobjetivo por enxame de partículas (MOPSO). A escolha dessas técnicas foi determinada pelo fato de que as mesmas apresentam comportamentos semelhantes na busca pelas melhores soluções para o problema de otimização da margem de ruído. Além disso, ambas as técnicas têm a habilidade de escapar de ótimos locais considerados menos promissores, evoluindo para regiões do espaço de busca do problema onde melhores soluções podem ser encontradas [123]. As próximas seções discutem os algoritmos propostos.

### 5.4.1 Codificação

Considerando a definição do problema como na Eq. 5.2, cada indivíduo  $x$  do algoritmo evolutivo deve conter a informação das margens de ruído dos usuários  $(\gamma_1, \dots, \gamma_N)$  e a matriz  $\mathbf{P}$  com a alocação de potência de todos os usuários, levando a seguinte representação com  $N(K + 1)$  variáveis:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} s_1^1 & \dots & s_1^K & \gamma_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ s_N^1 & \dots & s_N^K & \gamma_N \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Entretanto, como o tamanho de  $x$  é proporcional ao número de usuários da rede DSL, esse número pode ser alto e gerar problemas de escalabilidade para os operadores evolutivos. A abordagem proposta para resolver esse problema foi, ao invés de representar a matriz  $\mathbf{P}$  completa com  $NK$  variáveis, ela foi “comprimida”<sup>1</sup> em  $N$  variáveis escalares  $(\lambda_1 \cdots \lambda_N)$ .

Dessa maneira cada cromossomo  $x$  é representado pela matriz  $N \times 2$  como:

<sup>1</sup>A operação de descompressão e obtenção da matriz  $\mathbf{P}$ , é detalhada na seção 5.4.3

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \gamma_1 \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_N & \gamma_N \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

onde  $\lambda_n \in [0, 1]$  é o peso (ou prioridade) para o problema de minimização de potência do  $n$ -ésimo usuário e  $\tilde{\gamma} \in [0, 30]$  dB representa a margem de ruído do  $n$ -ésimo usuário.

Durante a implementação foi adotado o formato real para representar cada elemento de  $x_i$ , o qual utiliza tamanho mais compactos, com isso o tempo de processamento tende a ser menor. Além disso, o limite de precisão da solução obtida em codificação real é o da precisão da máquina [64]. Essa representação é exemplificada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Exemplo de codificação utilizando o formato real, para um cenário formado por duas linhas DSL, onde cada indivíduo da população é constituído de pesos para o problema de minimização de potência (duas primeiras colunas) e margens de ruído (duas últimas colunas) das duas linhas.

Indivíduo	6.213403e-01	6.228867e-01	1.751646e+01	2.961908e+01
-----------	--------------	--------------	--------------	--------------

### 5.4.2 A função de Avaliação (*fitness*)

Em torno de toda informação possível que pode ser extraída do ambiente DSL, nesse trabalho, a função de avaliação se concentra em três:

- Margem de ruído (função objetivo) -  $\gamma_n$
- Taxa de *bits* (restrição) -  $R_n$
- Potência total transmitida (restrição) -  $P_n^{tot}$

Após o processo de codificação, o cromossomo (ou partícula, no caso do MOPSO), é submetido a um processo de otimização local (detalhado na seção 5.4.3) o qual, aliado à informação do ambiente DSL<sup>2</sup> fornece como resultado os valores de PSDs e margens de ruído. A taxa de *bits* e a potência transmitida são calculadas utilizando novamente informações do ambiente DSL, onde a taxa de *bits* é estimada através da Eq. 2.9; já a potência transmitida

<sup>2</sup> Na prática, na rede DSL, toda a informação do ambiente necessária pode ser obtida através da interação SMC.

sobre uma banda de frequência particular é estimada através da Eq. 2.3. A Figura 5.4, ilustra a obtenção de margem de ruído, taxa de *bits* e potência total transmitida para o caso do AG.

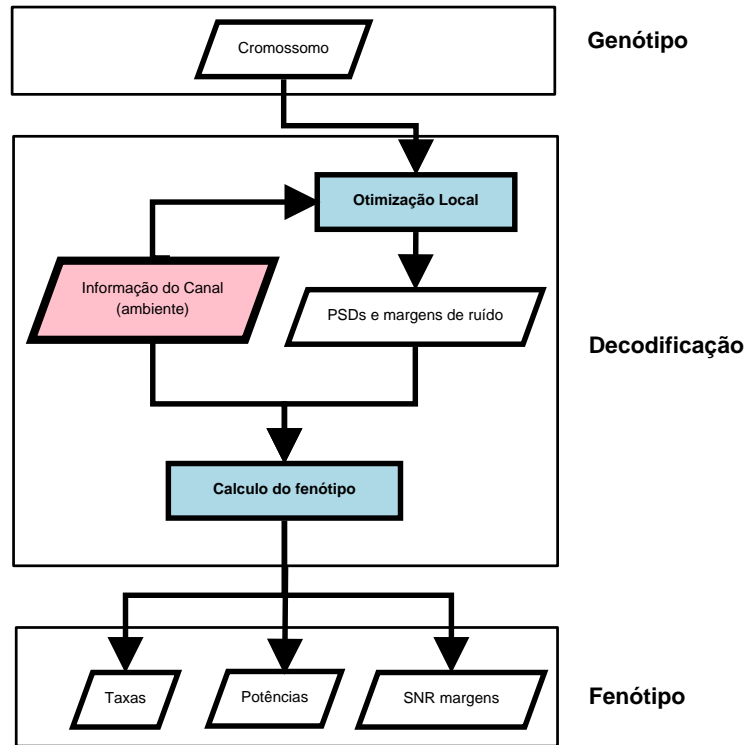


Figura 5.4: Síntese do fenótipo através da informação genética armazenada no *cromossomo*.

### 5.4.3 Uma abordagem híbrida - Otimização local através de minimização da potência

De uma maneira geral embora os AE sejam capazes de encontrar uma aproximação do ótimo global do problema, eles pecam no sentido da precisão da busca pelo ótimo [64]. Dessa maneira, uma estratégia conhecida para melhorar o desempenho na busca de soluções é utilizar uma abordagem híbrida, onde os algoritmos evolutivos promovem uma busca global em torno das populações, enquanto os métodos heurísticos, promovem uma busca local mais agressiva a cada nova solução gerada. Dessa maneira alia-se grande exploração global em torno do espaço de busca com uma boa eficiência nas buscas locais. No contexto multiobjetivo, a abordagem híbrida acentua a probabilidade de convergência do conjunto de soluções de *Pareto* do problema [71].

No contexto do trabalho desenvolvido, a matriz  $\mathbf{P}$  definida em na Eq. 2.2, contém informação sobre a potência transmitida de todos os usuários sobre todos os tons. Essa matriz naturalmente cresce de acordo com o aumento do número de usuários ( $N$ ), causando sérios



problemas de escalabilidade. Dessa maneira, foi introduzida uma abordagem híbrida, a qual consiste em uma otimização local sobre o melhor indivíduo de cada população, utilizando algoritmos multi-usuários de minimização de potência [33, 36, 124].

Nessa abordagem, a matriz de potência ( $\mathbf{P}$ ), é representada através da utilização de pesos ( $\lambda_N$ ) do problema de minimização de potência. Como resultado, houve uma grande redução no espaço de busca. Outra vantagem de utilizar algoritmos de minimização de potência é que eles já levam em consideração as restrições de taxa da Eq. 5.2, reduzindo dessa maneira a complexidade do problema de otimização de margem e deixando apenas as restrições de potência (e de maximização de margem) para o algoritmo evolutivo<sup>3</sup>.

### 5.4.3.1 Algoritmos de Minimização de Potência

A idéia principal dos algoritmos de minimização de potência é reduzir o consumo de potência ao mesmo tempo que os requisitos de taxa transmitida são garantidos [33, 36, 124]. Dessa maneira o problema de minimização da potência pode ser definido como

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{P}} \quad & \sum_{n=1}^N \lambda_n \sum_{k=1}^K s_n^k \\ \text{sujeito a} \quad & R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad p_n^k \geq 0 \end{aligned}$$

- $\lambda_n$  é o “peso” (ou prioridade), atribuído a cada usuário, o qual tem a função distribuir a potência para cada linha  $n$  DSL
- $R_n^{\min}$  corresponde à restrição de taxa do  $n$ -ésimo usuário.

Como resultado tem-se a matriz  $\mathbf{P}$  que contém a alocação de potência de todos os usuários como definido na Eq. 2.2; essa alocação é feita de maneira a satisfazer as restrições utilizando uma mínima quantidade de potência.

## 5.4.4 O algoritmo genético

### 5.4.4.1 População

Uma população, utilizando a codificação como descrita na seção 5.4.1, é inicialmente criada aleatoriamente e representada por  $\mathbf{X}_g$ , onde  $g$  é o número de gerações após a população

<sup>3</sup>O uso de maximização de taxa para otimização local também é possível. Nesse caso a abordagem seria garantir a restrição de potência, deixando a restrição de taxa para o algoritmo evolutivo.

inicial  $\mathbf{X}_0$ . Durante o processo de execução do AG, as soluções de uma população ascendente, são utilizadas na geração de uma nova população, o que é motivado pela ideia de que uma nova população possa apresentar melhores características (qualidade) que a anterior.

A tarefa de criação da população é realizada apenas no início da execução do algoritmo, quando a população inicial criada é armazenada em uma estrutura de dados como a definida na Eq. 5.4.

#### 5.4.4.2 Seleção

Durante o processo evolucionário, é necessário diferenciar as melhores soluções, o que não é possível de ser feito através da utilização de genótipos individuais, pois tipicamente essa informação genética não expressa muito bem o ambiente DSL. Ao invés disso, essa seleção pode ser feita através da avaliação do comportamento de determinado genótipo no ambiente DSL.

Essa avaliação é chamada de *fenótipo* e depende do *genótipo* e do próprio ambiente (no caso, o ambiente DSL, que depende dos ganhos dos canais, ruído, etc). Dessa maneira, o mesmo indivíduo pode manifestar diferentes *fenótipos* em diferentes ambientes.

O processo de obtenção dos fenótipos é o mesmo descrito na seção 5.4.2 e ilustrado na Figura 5.4; com os fenótipos calculados, o problema então se concentra em como selecionar os melhores fenótipos. O método utilizado foi estabelecer um *rank* de acordo com o algoritmo de soluções não-dominadas, conhecido como NSGA-II, proposto por Deb et al [105]. O NSGA-II utiliza o critério de dominância, para estabelecer a qualidade no espaço de soluções, e um operador de diversidade é usado para garantir um maior espalhamento dos resultados ao longo da fronteira de *Pareto*. Esses dois processos são descrito abaixo:

- **A ordenação não dominada - *Non-dominated sorting*.** Realiza a busca por soluções próximas à fronteira de *Pareto*. Para isso a população é ordenada de acordo com um nível de não-dominância dos cromossomos [105]. Isso é feito comparando cada cromossomo da população com os outros cromossomos da população inteira, e atribuindo um valor de dominância a cada cromossomo.

Baseado nesse valor de dominância, os cromossomos são então classificados em fronteiras, sendo que os melhores (ou seja os cromossomos que não são dominados por nenhum outro cromossomo na população total  $Xg$ ) ficam na primeira fronteira e os piores na última fronteira.

- **A ordenação por distância de aglomeração ou multidão - *Crowding Distance sorting*.** Um dos grandes desafios da otimização multiobjetivo é preservar a diversidade

em torno das soluções não dominadas [88]. Essa tarefa é realizada pelo *Crowding Distance sorting*.

Inicialmente, os cromossomos pertencentes à primeira fronteira definida no passo anterior são novamente ordenados, mas dessa vez a ordenação é feita de acordo com a sua distância em relação aos pontos vizinhos na mesma fronteira. Dessa maneira os cromossomos que estão em áreas menos povoadas do espaço de busca garantem um melhor *rank*, além disso, é gerado um espalhamento dos resultados ao longo da fronteira de *Pareto* [105].

Após estabelecer o *rank* para os cromossomos da primeira fronteira, o método é repetido com a segunda fronteira para determinar novas soluções não-dominadas, sendo que agora os cromossomos da fronteira atual recebem um valor de *rank* menor que o pior valor compartilhado no nível anterior. Esse processo é então repetido até que toda a população tenha um valor de *rank*. O cálculo da ordenação por distância de aglomeração é sumarizado no Algoritmo 6.

---

**Algorithm 6** Cálculo da ordenação por distância de aglomeração ou multidão.

---

- 1: Para cada solução  $i$  em  $F_j$ ,
  - 2:  $\mathbf{d}_i \leftarrow 0$ ,
  - 3: Para cada função objetivo  $f_m$  de  $m = 1, 2, \dots, M$
  - 4: Aplica os operadores de *crossover* e mutação sobre  $\mathbf{X}_0$ , gerando a descendência  $\mathbf{X}_1$
  - 5:  $\mathbf{t} \leftarrow 1$
  - 6: **repita**
  - 7:     Calcula as funções objetivos para todo  $x_i \in \mathbf{X}_t$  usando  $\text{SB}_{\text{alg}}$  e a informação do canal DSL.
  - 8:      $\mathbf{X}_{t+1} \leftarrow$  MOEA seleciona os  $M$  indivíduos sobre  $\mathbf{X}_t \cup \mathbf{X}_{t-1}$
  - 9:      $\mathbf{X}_{t+1} \leftarrow$  MOEA aplica os operadores de *crossover* e mutação sobre  $\mathbf{X}_{t+1}$
  - 10:     $\mathbf{t} \leftarrow \mathbf{t} + 1$
  - 11: **até** convergência
  - 12: **Retorne**  $d_i$  para cada solução  $i$  em  $F_j$
- 

O NSGA-II possui uma característica elitista o que garante que boas soluções não se perderão durante as gerações. No elitismo a melhor solução de cada geração é copiada para a geração seguinte. No contexto multiobjetivo, essa definição se estende para o conjunto de soluções não-dominadas, que são inseridas na próxima solução, acelerando a seleção pelas melhores soluções e convergência do algoritmo.

### 5.4.4.3 Operadores de *Crossover* e *Mutação*

O *crossover* permite que novas gerações sejam encontradas através da recombinação de pelo menos dois “pais”, sendo este operador é responsável pela diversidade na população [71]. Já o operador de *mutação* é responsável por alterar a posição dos genes randomicamente.

Existem várias técnicas de *crossover* no caso o NSGA-II utiliza o *crossover* binário simulado [106] - *SBX*.

A operação de *crossover* é seguida pela operação de *mutação*, como ilustra a Figura 5.5. Esse processo é executado através do operador de *mutação* polinomial (descrito na seção 4.6.1.4), o qual permite aumentar a probabilidade de alcançar soluções próximas a de seus “pais”.

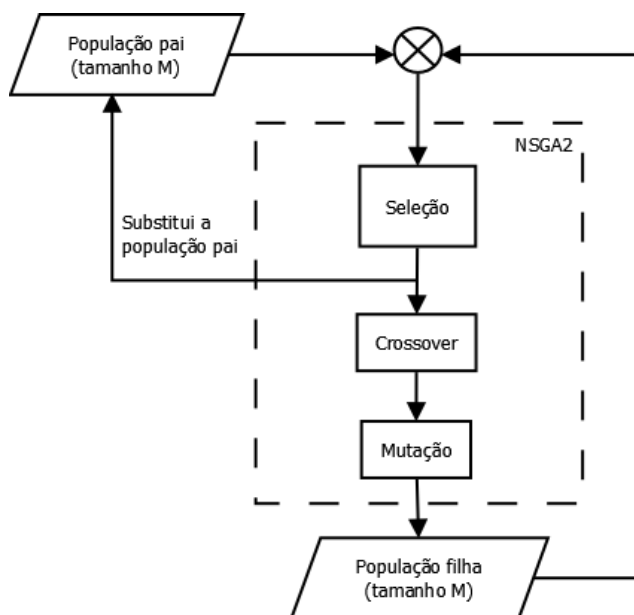


Figura 5.5: Fluxograma da otimização da margem utilizando o NSGA-II

### 5.4.4.4 Execução do algoritmo genético

A execução do AG pode ser sumarizada através da Figura 5.5, onde o processo inicia com a geração de uma população inicial  $\mathbf{X}_0$  constituída de  $M$  indivíduos que foram criados aleatoriamente. Cada indivíduo dessa população representa um cromossomo e uma potencial solução ao problema definido na Eq. 5.2. Cada cromossomo é submetido a um processo de decodificação, seguido do cálculo de seu fenótipo, como ilustra a Figura 5.4. Para cada fenótipo é então estabelecido um *rank* de acordo com o algoritmo de soluções não-dominadas. Essa população inicial é então dividida em diferentes níveis ou fronteiras de não dominância, de

acordo com a sua aptidão.

Após essa avaliação são aplicados os operadores de seleção, *crossover* e mutação para gerar a primeira população “filha” (ou primeira descendência). A população “filha” é então, reunida com seus pais, gerando uma nova população  $2M$ . Com ambas as gerações juntas, os  $M$  indivíduos selecionados irão substituir a população pai e serão capazes de propagar a sua informação genética para uma nova geração. Esse procedimento garante que boas soluções não se perderão durante as gerações o que caracteriza o elitismo. Esse processo é repetido até que soluções diversificadas e próximas do ótimo são encontradas [71].

## 5.4.5 O algoritmo multiobjetivo por enxame de partículas

### 5.4.5.1 População.

O método emprega uma população de partículas, que são geradas aleatoriamente no início da execução do algoritmo. Assim como na população do AG, as partículas do enxame contém a informação sobre cada linha DSL (i.e. matriz  $\mathbf{P}$  com a alocação de potência de todos os usuários e margens de ruído), como definido na seção 5.4.1.

### 5.4.5.2 Arquivo externo de soluções não-dominadas

Como citado na seção 4.7, os algoritmos multiobjetivos baseados em enxame de partículas utilizam um arquivo externo de líderes que armazena as soluções não-dominadas encontradas no decorrer do processo de busca do algoritmo.

Esse arquivo é utilizado durante a atualização dos líderes cognitivos, onde ocorre a comparação entre o líder cognitivo da partícula atual com o líder presente no arquivo externo, em termos de dominância de Pareto. Se a posição atual domina o líder cognitivo, então a posição atual se torna o novo líder cognitivo da partícula. Caso a posição atual seja dominada pelo líder cognitivo da partícula, nada acontece. Por fim, caso essas soluções sejam incomparáveis, a posição atual se torna o novo líder cognitivo (regra da solução mais recente). Já a seleção do líder social para cada partícula é realizada através de um torneio binário entre as soluções do arquivo externo, onde duas soluções são escolhidas aleatoriamente do arquivo externo e são então, comparadas entre si usando a distância de multidão como aptidão. O líder social escolhido como resultado final, é aquele que apresentar menor densidade.

Quando o arquivo externo se torna cheio, utiliza-se o mecanismo de *crowding distance* [105] para definir quais partículas devem ser mantidas. As soluções que habitam regiões de menor densidade no espaço objetivo são priorizadas [116].

### 5.4.5.3 Atualização da velocidade e posição

Entre os MOPSOs existente na literatura, o método utilizado foi o algoritmo SMPSO, proposto em [116] que utiliza um fator de de constrição de velocidade, como estratégia para limitar a velocidade máxima das partículas, e melhorar a capacidade de busca do algoritmo. Essa estratégia evita que a velocidade das partículas assumam um valor muito alto ao longo das iterações [121]. As atualizações de velocidade e posição, são realizadas através das equações (4.15) e (4.3).

Além do fator de constrição de velocidade, o SMPSO também utiliza outro mecanismo de controle da velocidade acumulada de cada partícula (Eq.4.19), através dos coeficientes de aceleração  $c_1$  e  $c_2$ , que não são fixos e sim amostrados a cada iteração.

### 5.4.5.4 Avaliação da função objetivo, operador de turbulência

Cada partícula do enxame pode ser considerada uma possível solução e é avaliada através da função objetivo, como descrito na seção 5.4.2. O operador de turbulência utilizado é a mutação polinomial (descrito na seção 4.6.1.4),

### 5.4.5.5 Execução do algoritmo por enxame de partículas

O processo de execução do algoritmo inicia com a geração de um enxame  $\mathbf{X}_0$ , constituído de  $M$  partículas criadas de maneira aleatória. Na primeira iteração são determinados também as constantes referentes ao SMPSO, critério de parada, os valores de mínimo e máximo paras os coeficientes  $c_1^{min}$  e  $c_1^{max}$  e  $c_2^{min}$  e  $c_2^{max}$  e inicializado o arquivo externo que armazenará as soluções não-dominadas ao longo das iterações do algoritmo. Também são obtidas as informações referentes ao ambiente DSL, necessárias para otimização local e cálculo do *fitness* como ganhos do canal, ruído, etc.

Com esses valores obtidos, a partícula é submetida à otimização local (como descrito na seção 5.4.3) e à avaliação de *fitness*. Após a avaliação do *fitness* as soluções não-dominadas são adicionadas ao arquivo externo, e são inicializados o  $Pbest_i(t)$  de cada partícula.

Com essa atualização, caso o critério de parada tenha sido atingido, a solução encontrada é apresentada. Caso contrário é selecionado o  $Gbest_i(t)$  para cada partícula  $i$ , utilizando o critério de *crowding distance*; a velocidade e posição das partículas são atualizadas a partir da Eq. 4.15 e Eq. 4.3 respectivamente. A seguir é aplicado o operador de turbulência e todas as partículas do enxame são novamente avaliadas. Após a avaliação, o arquivo externo de dominância é atualizado, assim como o  $Pbest_i(t)$  de cada partícula. A execução do PSO pode

ser resumida através da Figura 5.6.

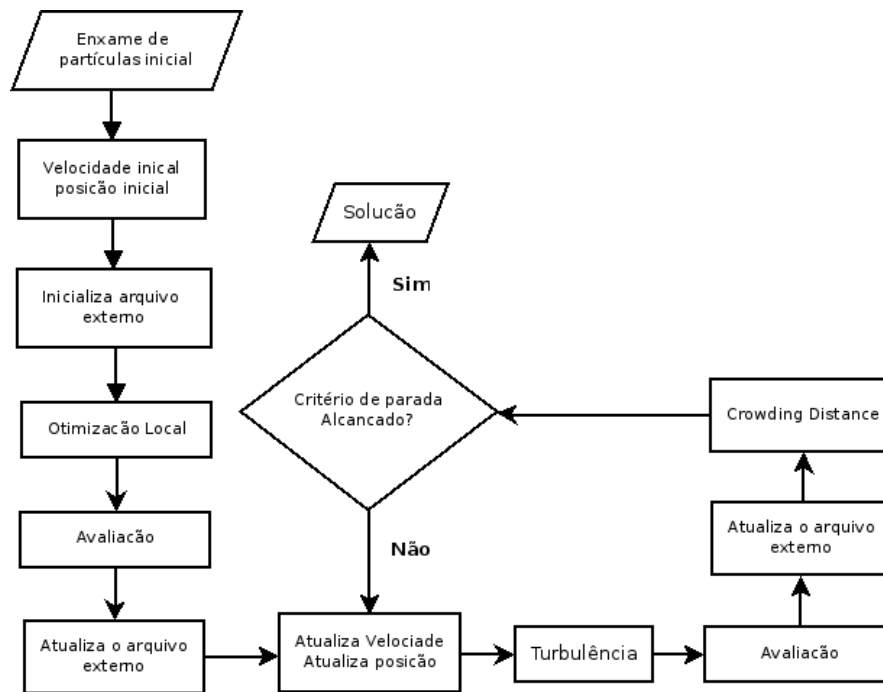


Figura 5.6: Fluxograma da otimização da margem utilizando o SMPSO.

## 5.5 Conclusão

Esse capítulo introduziu o problema de otimização de margem, o qual foi modelado como um problema de otimização multiobjetivo. O capítulo também descreveu o método proposto, e seus algoritmos. O próximo capítulo ilustrará os resultados experimentais. Além disso será realizada uma comparação de desempenho entre os resultados dos algoritmos propostos e do NRME.

# Capítulo 6

## Resultados e Simulações

### 6.1 Introdução

Nesse capítulo são apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos em torno dos algoritmos descritos no Capítulo 5. Esses experimentos incluem:

- Configuração de cenários;
- Simulações com o AG e SMPSO;
- A comparação dos resultados obtidos com o outro algoritmo de estimação de margem NRME;

Todos os experimentos foram realizados no simulador jDSLsim<sup>1</sup>, que é um simulador de sistemas DSL, escrito na plataforma JAVA. Os resultados gráficos foram gerados através o software MATLAB [125]. Os experimentos foram realizados utilizando um computador do tipo MacBook Pro, com um processador Intel Core i5 de 2.5GHz, memória de 4GB 1600 MHz DDR3.

### 6.2 Configuração dos Cenários

As simulações foram realizadas utilizando a topologia ilustrada na Figura 6.1, que consiste de 24 linhas, sendo 12 usuários conectados a um CO por um enlace de 3.0 km de

---

<sup>1</sup>O jDSLsim é um *framework* proprietário, que foi desenvolvido na Universidade Federal do Pará, Laboratório de Processamentos de Sinais LAPS, em parceria com a empresa ERICSSON



comprimento, e outros 12 usuários conectados a um RT por um enlace de 1.0 km de comprimento. O RT está localizado à 2.0 km de distância do CO. Considera-se que todos os usuários conectados no CO possuem condições idênticas de canal, ou seja, as mesmas funções de transferência do canal direto e de ruído *crosstalk*. O mesmo ocorre para os usuários conectados no RT.

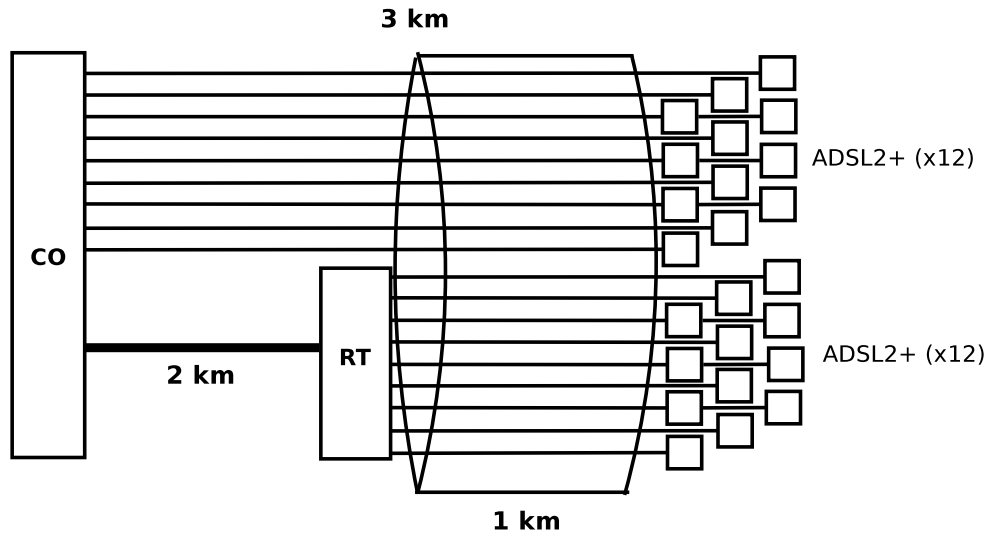


Figura 6.1: Near-far access network scenario consisting of 24 ADSL2+ users.

Nesse tipo de topologia, conhecida como *near-far*, o objeto de interesse, tipicamente se concentra em torno da transmissão *downstream*, devido a forte interferência de NEXT que é gerado pelas linhas conectadas ao RT, atingindo significativamente as linhas que estão conectadas ao CO. Essa interferência se dá devido a diferença de distâncias entre transmissores e receptores [23].

Durante as simulações, dois conjuntos de taxas alvo foram considerados:

- 2.0 e 10.0 Mb/s para os usuários conectados à CO e RT respectivamente, e
- 4.0 e 12.0 Mb/s para os usuários conectados à CO e RT respectivamente.

Todas as simulações assumem o serviço ADSL2+ [17], a mesma margem de ruído alvo para todos os tons, ruído de fundo de  $-140$  dBm/Hz, pares trançados de 26-AWG (0.4 mm), modelo de ruído ANSI A [23] e SNR-*gap* de 9.75 dB, o que leva a uma probabilidade de erro de  $P_e \leq 10^{-7}$  para QAM. A potência máxima de transmissão permitida para cada modem de 19.4 dBm e planos de frequência como definido em [17].

## 6.3 Princípio de Funcionamento

O princípio funcionamento, consiste em especificar:

- **Taxas alvo.** Um conjunto de taxas alvo para os usuários CPE;
- **A ferramenta de meta-heurística e seus parâmetros.** Especificação da ferramenta de meta-heurística (SMPSO ou AG, e os parâmetros como o tamanho da população, número de gerações, etc. Os parâmetros utilizados nos experimentos estão definidos na Tabela 6.1 e 6.2 para o AG e SMPSO, respectivamente.
- **Algoritmos de DSM.** Selecionar o algoritmo de balanceamento de espectro que será utilizado na otimização local. Para os experimentos *off-line* foram utilizados dois diferentes algoritmos de DSM:
  1. ***Iterative water-filling* (IWF [41]).** O IWF é usado para comparar os resultados do método proposto com os resultados adquiridos com o algoritmo NRME (o qual também utiliza o IWF como um sub-algoritmo). Durante as simulações com o algoritmo DSM nível 1, pode-se observar que o método proposto alcança o conjunto ótimo de pontos de *Pareto* quando ocorrem gerações suficientes. O algoritmo de IWF, escolhido foi o SCAWF [126].
  2. ***Successive convex approximation for low-complexity* (SCALE [126]).** O SCALE foi utilizado para mostrar que o método proposto apresenta um desempenho superior ao NRME, quando algoritmos DSM de nível 2 são utilizados durante a otimização local.

A formulação matemática desses algoritmos encontra-se no Apêndice A.

## 6.4 Resultados Numéricos

A Figura 6.2, ilustra as soluções factíveis de margem<sup>2</sup> de todas as gerações encontradas para cada algoritmo base (SCALE e IWF), utilizando as configurações definidas na tabela 6.1 e os dois conjuntos de taxas alvo especificados na sessão 6.2. A abscissa (eixo horizontal) contém valores de margem de ruído para os usuários conectado ao CO, enquanto que a ordenada (eixo vertical) contém valores de margem de ruído para o usuários conectados ao RT.

<sup>2</sup>A Figura 6.2 (a) e (b) ilustram a região de margem, construída com apenas as melhores soluções do conjunto de soluções factíveis. As soluções infactíveis foram descartadas dos gráficos.

Tabela 6.1: Parâmetros de configuração do AG

Parâmetro	Valor
Cromossomo	Codificação real
Tamanho da população	20 indivíduos
Seleção	Método de soluções não-dominadas
Operador de crossover	<i>SBX</i>
Taxa de Crossover	0.7
Operador de Mutação	Mutação polinomial
Taxa de Mutação	0.3
Critério de parada	100 gerações

Tabela 6.2: Parâmetros de configuração do SMPSO

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	20 indivíduos
Critério de parada	100 gerações
Topologia	População totalmente conectada
coeficientes de aceleração $c_1^{min}$ e $c_1^{max}$	1.5 e 2.5
coeficientes de aceleração $c_2^{min}$ e $c_2^{max}$	1.5 e 2.5
Peso de inércia $\omega$	0.1
Taxa de Mutação polinomial	0.3

A região de margem na Figura 6.2(a), ilustra que para cenários com requisitos de baixa taxa de dados, as diferenças de desempenho entre os algoritmos (AG+IWF), (AG+SCALE), (SMPSO+IWF) e (SMPSO+SCALE) não são tão expressivos, indicando que para esses cenários, o uso de algoritmos de DSM nível 2 ao invés de algoritmos nível 1 na otimização local não resulta em um maior benefício. Por outro lado, a Figura 6.2(b) ilustra os resultados para requisitos maiores de taxa, onde é possível notar uma diferença expressiva de desempenho entre os algoritmos (AG+IWF), (AG+SCALE), (SMPSO+SCALE) e (SMPSO+SCALE). Ou seja, nos casos que os requisitos de taxas são maiores, a otimização local com algoritmos de DSM nível 2 apresenta resultados mais significativos.

É importante notar que os gráficos são uma representação  $2D$  de um espaço  $24D$ , o que torna a diferença de desempenho ainda mais significativa. No caso, 1 dB de ganho corresponde na realidade a 24 dB para o cenário considerado.

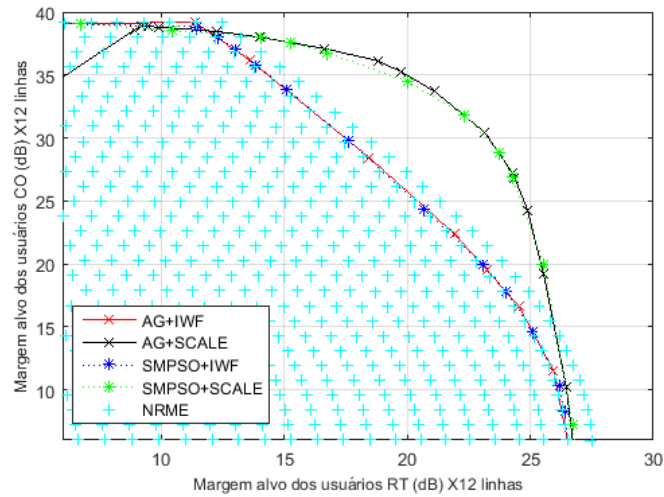
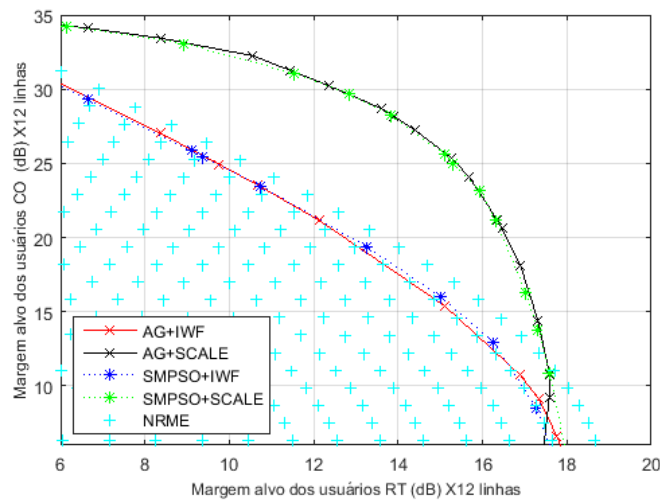
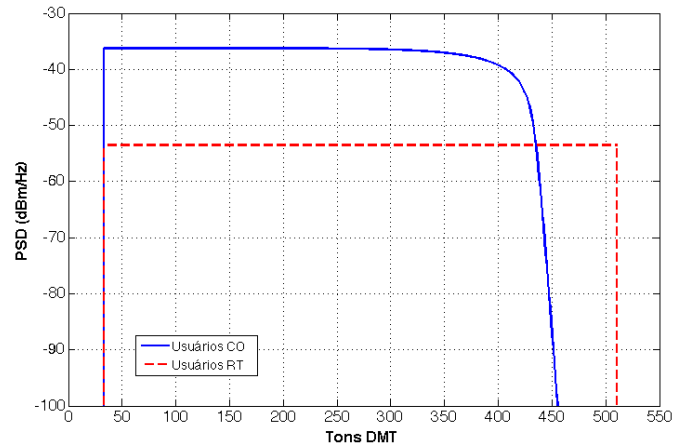
(a)  $R_{CO}^{alvo} = 2 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 10 \text{ Mb/s}$ .(b)  $R_{CO}^{alvo} = 4 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 12 \text{ Mb/s}$ .

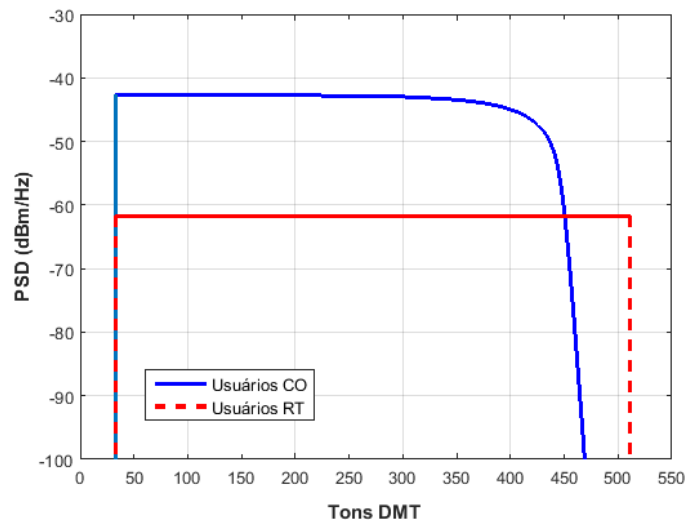
Figura 6.2: Regiões de margens para os dois conjuntos de taxas alvo.

### 6.4.1 Análise das PSDs de transmissão

As Figuras 6.3 e 6.4 ilustram as PSDs transmitidas para um determinado ponto operacional na região de margem, considerando as taxas alvo de 4.0 Mb/s para os usuários conectados ao CO e 12.0 Mb/s para os usuários conectados ao RT. A Figura 6.3 está relacionada ao caso do DSM nível 1 e representa o ponto de operação (13, 19.5) da região de margem da Figura 6.2(b), onde observa-se em ambos os casos (AG+IWF e SMPSO+IWF) que, os usuários conectados ao CO possuem as piores condições de canal, alocando mais potência nas baixas frequências e evitando as altas frequências. Já os usuários conectados ao RT, tem que limitar a sua alocação de potência para não deteriorar a transmissão dos usuários conectados ao CO.



(a) PSDs de transmissão obtida pelo algoritmo NRME e pelo algoritmo híbrido AG+IWF

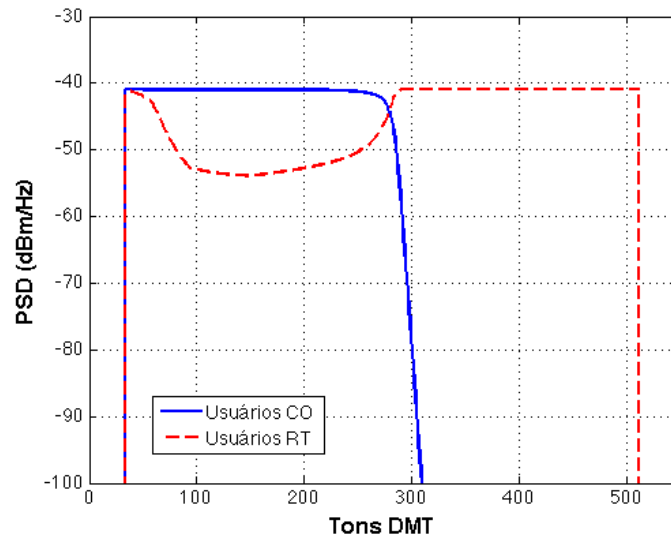


(b) PSDs de transmissão obtida pelo algoritmo híbrido SMPSO+IWF.

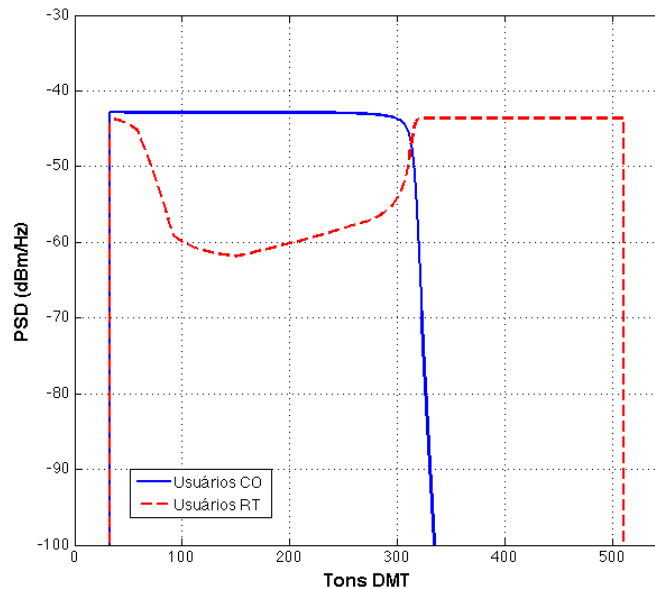
Figura 6.3: (PSD)s transmitidas para o ponto de operação (6, 5.6) considerando as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 4.0$  Mb/s,  $R_{RT}^{alvo} = 12.0$  Mb/s.

Essa política de alocação ajuda a melhorar a estabilidade da rede e a QoS dos usuários conectados ao CO, porém compromete o desempenho dos usuários conectados ao RT, uma vez que esses usuários não utilizam sua capacidade total de potência para garantir os requisitos de taxas dos usuários conectados ao CO.

A solução proposta, aborda esse problema propondo a utilização de algoritmos de DSM nível 2 na otimização local. Esse resultado pode ser visto na Figura 6.4, que ilustra as PSDs para o ponto de operação (13, 29.5), da região de margem da Figura 6.2(b). É possível observar



(a) Exemplo de PSDs resultantes do algoritmo híbrido AG+SCALE



(b) Exemplo de PSDs de transmissão resultantes do algoritmo híbrido PSO+SCALE

Figura 6.4: (PSD)s transmitidas para o ponto de operação (6, 7.1) considerando as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 4.0$  Mb/s,  $R_{RT}^{alvo} = 12.0$  Mb/s.

que a forma da PSD dos usuários conectados ao CO é similar ao caso anterior (obtida pelo DSM 1), porém necessita de menos alocação de potência. A razão é que, com a utilização dos algoritmos de DSM nível 2 na otimização local, os usuários conectados ao RT possuem o

conhecimento do canal de *crosstalk*, o que permite o cálculo da quantidade certa de potência a ser alocada sem causar interferência aos outros usuários conectados ao CO. É possível notar na Figura 6.4 que os usuários conectados ao RT evitam alocar muita potência nas baixas frequências, por se tratar da parte compartilhada do espectro. Já nas altas frequências é alocado uma quantidade maior potência, pois nesse ponto a alocação não causará interferência nos usuários conectados ao CO. Essa abordagem permite a cada usuário conectado ao RT utilizar maiores margens de ruído para o mesmo conjunto de taxas alvo.

Uma outra aplicação é utilizar o método proposto como uma alternativa ao *Upstream Power Back-off* (UPBO). Tipicamente, o UPBO reduz a potência transmitida dos enlaces curtos para reduzir a interferência de FEXT nas outras linhas [127]. O problema é que esse método também limita o seu próprio desempenho. Nesse caso, o HEMO permite um melhor equilíbrio entre margem de ruído e taxa de dados, pois ele garante uma mínima taxa de dados factível, enquanto ainda deixa espaço para variações no ruído (otimização da margem).

### 6.4.2 Comparação entre o HEMO e o NRME

Para obter as margens e as PSDs otimizadas, o NRME utiliza o IWF no modo de operação adaptativo em taxa, que tem como objetivo principal maximizar a taxa de dados, sob uma restrição de potência fixa [36]. Para cada usuário foi analisada cada combinação de potência (com passos de 0.5 dBm), a qual determina o nível d'água e taxas alcançadas no *waterfilling*. Uma margem de ruído de 6 dB foi adotada para todos os usuários.

A Figura 6.5 ilustra a região de taxa resultante, onde os pontos escuros correspondem ao conjunto de pares de taxas que satisfazem as taxas alvo definidas anteriormente (2.0 Mbp/s (RT) e 10.0 Mbp/s (CO)) e as restrições de potência. Esses pares de taxas são utilizados pelo NRME para calcular o quanto de margem de ruído pode ser aumentado e ainda garantir os requisitos de taxa. Esse procedimento do NRME é equivalente a um mapeamento de um-para-um entre região de taxa e *região de margem*.

Combinando os resultados obtidos pelo método proposto com os resultados alcançados pelo NRME na Figura 6.2, é possível observar que o método proposto, ao utilizar algoritmo de DSM nível 1 (IWF) na otimização local, alcança um desempenho similar ao obtido pelo NRME (o qual é também baseado em algoritmos de DSM nível 1). Porém, ao utilizar o algoritmo de (SCALE) na otimização local, obtém ganhos substanciais sobre o NRME. Os valores de margem de ruído exibidos na figura para o NRME, AG-SCALE e SMP-SCALE, foram obtidos considerando os pares de taxas alvo definidas (2.0 Mb/s, 10.0 Mb/s).

### 6.4.3 Convergência

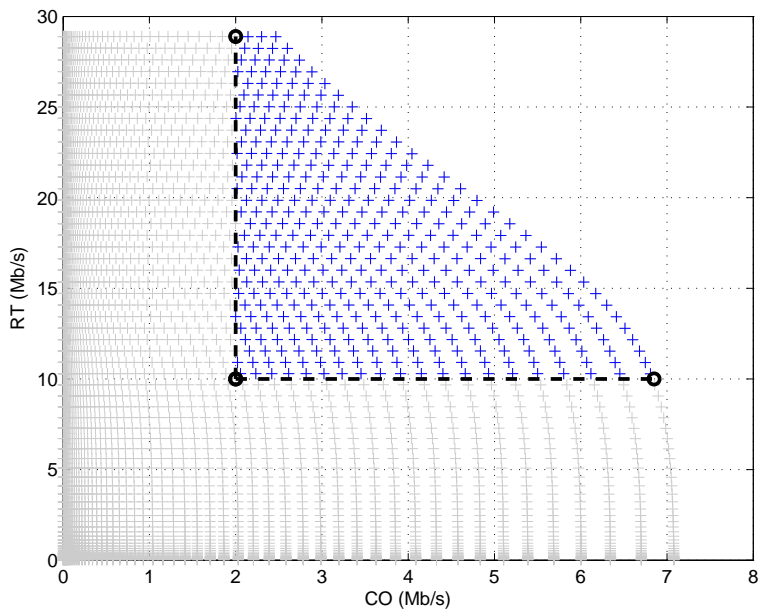
As Figuras 6.6 e 6.7 ilustram o comportamento da convergência das técnicas de otimização durante o processo de busca dos parâmetros otimizados. Os resultados consideram a evolução do AG e SMPSO híbridos, em relação à área percorrida nas gerações (considerando apenas o primeiro quadrante do plano Cartesiano), para os mesmos conjuntos de taxas alvo especificado na sessão 6.2, considerando para ambos 100 gerações e o número de 20 indivíduos (ou partículas).

De acordo com os resultados, a convergência do AG se deu de forma mais acentuada a partir da 75<sup>a</sup> geração, alcançando a fronteira ótima de Pareto em geral na 100<sup>a</sup> geração, como ilustra a Figura 6.6 (a) e (b). O SMPSO, por sua vez teve a convergência acentuada a partir da 100<sup>a</sup> geração, convergindo completamente na 120<sup>a</sup> geração na Figura 6.7(a) e (b). Além disso, apesar do AG+SCALE e SMPSO+SCALE fornecerem melhores resultados que o AG+IWF e SMPSO+IWF em relação ao problema de otimização de margens (como ilustrado na Figura 6.2), eles requerem mais iterações para convergir, uma vez que, devido à natureza complexa dos algoritmos de balanceamento do espectro, requerem coordenação multiusuário e informação completa do acoplamento do ruído de *crosstalk* em torno dos usuários, o que geralmente demanda mais iterações (para algoritmos sub-ótimos e iterativos) para alcançar o equilíbrio.

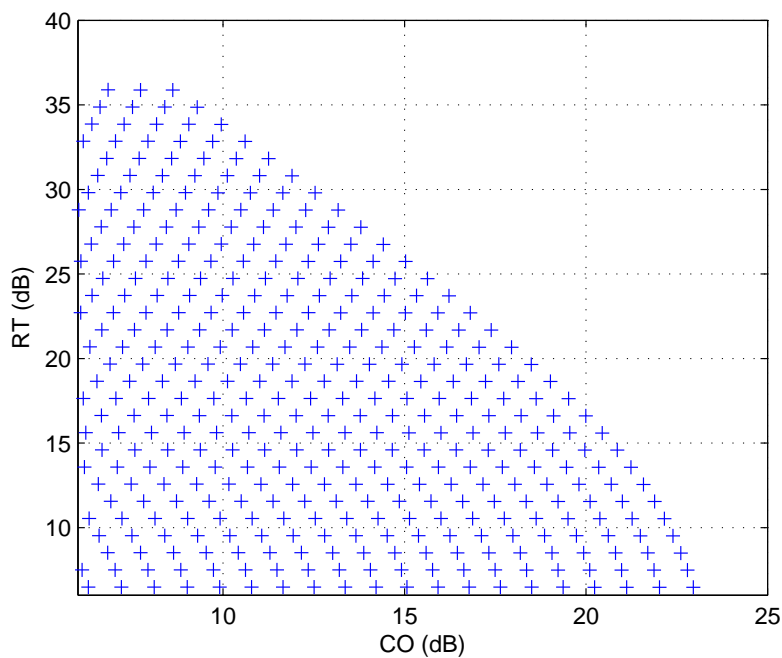
## 6.5 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da abordagem proposta a um conjunto de cenários conhecidos na literatura, para os quais existe solução para a formulação mono-objetivo. Os resultados ilustraram que os algoritmos propostos conseguem alcançar um conjunto ótimo de soluções formando dessa maneira uma alternativa viável para a otimização da margem dos usuários que, de uma maneira prática, pode ser visto como uma proteção adicional e ser usada por exemplo, para melhorar seu QoS/QoE na utilização de IPTV. No próximo capítulo são feitas algumas considerações e a conclusão do trabalho.



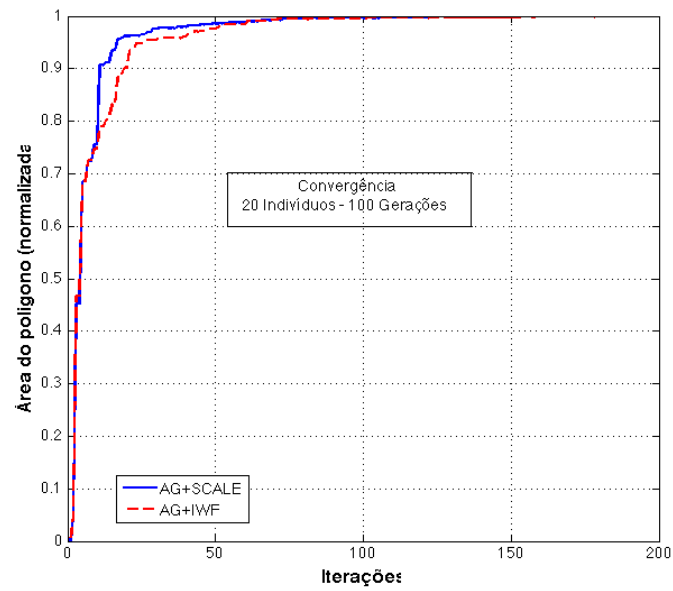


(a) Região de taxa calculada, utilizando o NRME. Os pontos azuis são as combinações de taxa que atendem as restrições de taxa (e potência), então eles podem ser utilizados pelo NRME para gerar melhores margens(positivas).

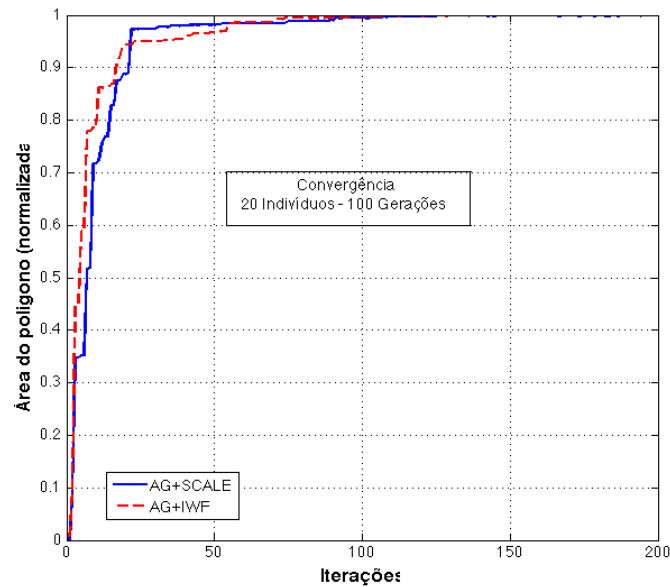


(b) Região de margem obtida pelo algoritmo NRME.

Figura 6.5: O algoritmo NRME converte uma solução de maximização de taxa em outra de maximização de margem.

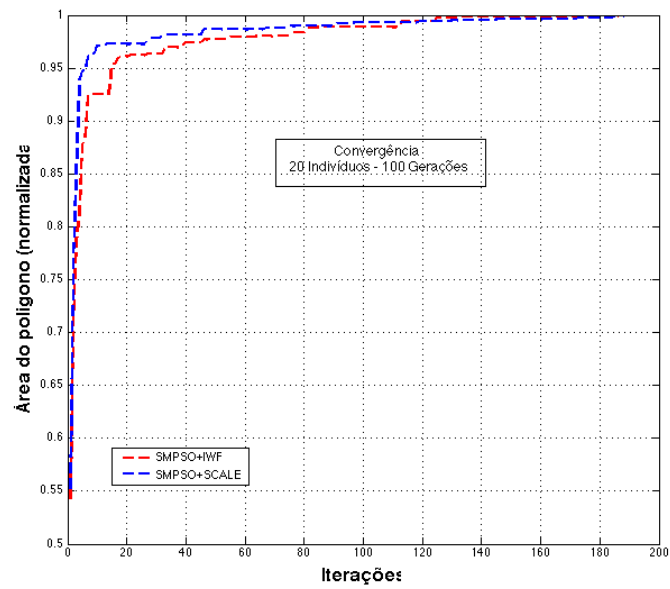


(a) Convergência para as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 2 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 10 \text{ Mb/s}$ .

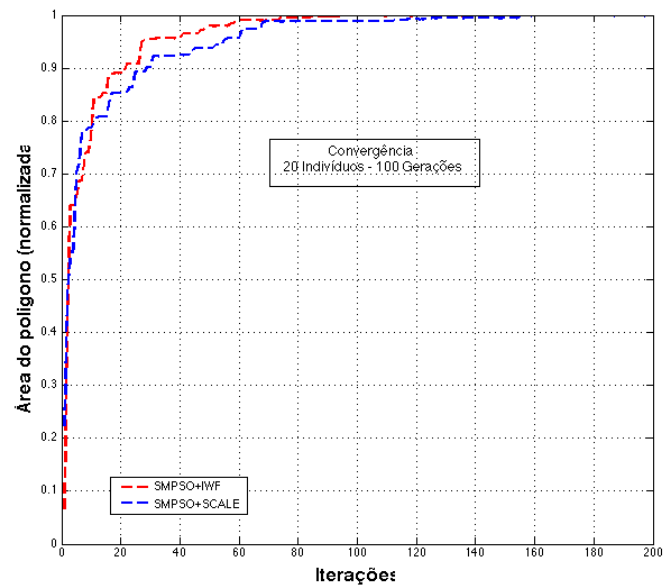


(b) Convergência para as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 4 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 12 \text{ Mb/s}$ .

Figura 6.6: Evolução do AG em torno das gerações.



(a) Convergência para as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 2 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 10 \text{ Mb/s}$ .



(b) Convergência para as taxas alvo:  $R_{CO}^{alvo} = 4 \text{ Mb/s}$ ,  $R_{RT}^{alvo} = 12 \text{ Mb/s}$ .

Figura 6.7: Evolução do PSO em torno do número das gerações.

# Capítulo 7

## Conclusões

A estabilidade nos sistemas DSL é uma questão essencial para os usuários e operadoras, especialmente quando os serviços conhecidos como *triple-play* são utilizados. Esse trabalho investigou o problema de instabilidade nos sistemas DSL, cujo objetivo foi de determinar a margem de ruído da linha do usuário DSL de forma a atender às taxas do usuário e potência de transmissão total disponível. Devido ao fato dos objetivos do problema serem conflitantes, não há uma solução que atenda a todos os objetivos simultaneamente, o que levou o problema ser modelado como sendo de otimização multiobjetivo.

Na otimização multiobjetivo, não há necessariamente uma solução que seja considerada ótima em relação às outras, o que é devido principalmente a existência objetivos conflitantes [61]. Nessa abordagem, ao invés de se obter uma única solução para o problema (como no caso de otimizações tradicionais de balanceamento de espectro mono-objetivo), são encontradas um conjunto de soluções ótimas de Pareto, que têm características diferentes em relação aos objetivos.

Além de modelar o problema por meio da otimização multiobjetivo, a solução proposta incluiu a implementação de dois algoritmos, um deles baseado no algoritmo NSGA-II e outro no algoritmo SMPSO. Ambas implementações adotam uma estratégia híbrida que consiste em uma otimização local sobre o melhor indivíduo de cada população, utilizando algoritmos multiusuários de minimização de potência disponíveis na literatura.

Os experimentos realizados mostraram que ambos os algoritmos desenvolvidos são capazes de fornecer soluções finais de qualidade quando comparadas com métodos anteriores aplicados ao mesmo problema. Além disso, há a possibilidade de escolha entre as várias soluções, o que aumenta a flexibilidade na tomada de decisão. Naturalmente, a escolha do ponto de operação a ser usado, depende do operador, o qual deve julgar quais usuários devem ter sua estabilidade aumentada.

Como trabalhos futuros aponta-se a inserção de outros algoritmos de minimização de potência na otimização local, assim como o uso de outros métodos heurísticos multiobjetivos como VEGA, MOGA, NPGA e o recente publicado algoritmo NSGA-III [128]. Além disso, a investigação de outras alternativas para o problema de instabilidade nas redes DSL, como a tecnologia de banco de filtros (FBMC) que já é utilizada como alternativa ao OFDM [129].

Além disso, a realização de testes práticos em laboratório, por meio de um aparato experimental que reproduza as condições o mais próximo da realidade possível, através da geração artificial (controlada) de tráfego de dados (como vídeo de alta definição) e também da geração de ruído.

# Referências Bibliográficas

- [1] B. M. Leiner, V. G. Cerf, D. D. Clark, R. E. Kahn, L. Kleinrock, D. C. Lynch, Jon Postel, L. G. Roberts, and S. Wolff. A Brief History of the Internet. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 39(5):22–31, Outubro 2009.
- [2] C. Hellberg, D. Greene, and T. Boyes. *Broadband Network Architectures: Designing and Deploying Triple-Play Services*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2007.
- [3] G. Ginis and K.J. Kerpez. Delivering Ultra-Fast Broadband - Technology White Paper - ASSIA, Outubro 2014.
- [4] S. Galli, G. Ginis, and M. Goldberg. Smart Vectoring, Setembro 2013.
- [5] P. Golden, H. Dedieu, and K. Jacobsen. *Fundamentals of DSL Technology*. Auerbach Publications, 2006.
- [6] Alcatel-Lucent. Dynamic Line Management for Digital Subscriber Lines, Outubro 2005.
- [7] L. Shi, C. Liu, and B. Liu. Network Utility Maximization for Triple-play Services. *Comput. Commun.*, 31(10):2257–2269, Junho 2008.
- [8] A. Maraj, A. Shehu, and R. M. Mitrushi. Studying of Different Parameters That Affect QoS in IPTV Systems. In *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics, TELE-INFO'10*, pages 107–112, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- [9] Agência Nacional de Telecomunicações ANATEL. Dados de acesso. [http://www.anatel.gov.br/dados/index.php?option=com\\_content&view=article&id=269](http://www.anatel.gov.br/dados/index.php?option=com_content&view=article&id=269), último acesso em 20/03/2015.
- [10] N. H. Nedev. *Analysis of the Impact of Impulse Noise in Digital Subscriber Line Systems*. PhD thesis, The University of Edinburgh, Março 2003.

- 
- [11] International Telecommunication Union - ITU-T. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>, último acesso em 10/11/2014.
- [12] American National Standards Institute - ANSI. <http://www.ansi.org>, último acesso em 10/11/2014.
- [13] International Telecommunications Union ITU-T. High bit rate Digital Subscriber Line (HDSL) transceivers, recommendation G.991.1, Outubro 1998.
- [14] International Telecommunications Union ITU-T. Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers, recommendation G.991.2, Fevereiro 2001.
- [15] International Telecommunications Union ITU-T. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers, recommendation G.992.1, Junho 1999.
- [16] International Telecommunications Union ITU-T. Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2), recommendation G.992.3, 2003.
- [17] International Telecommunications Union ITU-T. Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers - extended bandwidth ADSL2 (ADSL2+), recommendation G.992.5, 2005.
- [18] International Telecommunications Union ITU-T. Very high speed digital subscriber line transceivers (VHDSL), recommendation G.993.1, Junho 2004.
- [19] International Telecommunications Union ITU-T. Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VHDSL2), recommendation G.993.2, Dezembro 2011.
- [20] International Telecommunications Union ITU-T. Fast access to subscriber terminals (FAST) power spectral density specification, recommendation G.970.0, Julho 2013.
- [21] Conniq.com. xDSL Comparison. [http://www.conniq.com/xDSL\\_comparison.htm](http://www.conniq.com/xDSL_comparison.htm), último acesso em 14/10/2014.
- [22] N. Fonseca. Análise Comparativa de Algoritmos de Gerenciamento Dinâmico de Espectro (DSM) Aplicados à Linha Digital de Assinantes. Master's thesis, Universidade Federal do Pará, 2006.
- [23] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman. *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Prentice-Hall, 1999.
- [24] S. Panigrahi, Y. Xu, and T. Le-Ngoc. Multiuser Margin Optimization in Digital Subscriber Line (DSL) Channels. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 24(8):1571–1580, Agosto 2006.

- 
- [25] J. Cioffi, S. Jagannathan, W. Lee, H. Zou, A. Chowdhery, W. Rhee, G. Ginis, and P. Silverman. Greener Copper with Dynamic Spectrum Management. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), New Orleans, LA, USA*, 2008.
- [26] R. Cendrillon. *Multi-user Signal and Spectra Co-Ordination for Digital Subscriber Lines*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Dezembro 2004.
- [27] W. Yu and R. Lui. Dual Methods for Nonconvex Spectrum Optimization of Multicarrier Systems. *IEEE Transactions On Communications*, 54:1310–1322, 2006.
- [28] D. Neves, A. Klautau, M. Monteiro, E. Medeiros, J. Reis, and B. Dortschy. A Tutorial on Optimization Techniques applied to DSM Algorithms. In *Broadband Access Communication Technologies II, Proceedings of SPIE*, 2007.
- [29] R. Cendrillon, M. Moonen, J. Verliden, T. Bostoen, and W. Yu. Optimal Multi-user Spectrum Management for Digital Subscriber Lines. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, volume 1, pages 1–5, 2004.
- [30] R. Cendrillon and M. Moonen. Iterative Spectrum Balancing for Digital Subscriber Lines. In *Communications, 2005. ICC '05. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1937–1941, Maio 2005.
- [31] R. Cendrillon, G. Ginis, E. Van den Bogaert, and M. Moonen. A Near-Optimal Linear Crosstalk Precoder for Downstream VDSL. *IEEE Transactions on Communications*, 55(5):860–863, Maio 2007.
- [32] R. Moraes, A. Klautau, B. Dortschy, and J. Rius. Semi-Blind Power Allocation for Digital Subscriber Lines. In *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pages 1420–1425, 2008.
- [33] R. Moraes, A. Klautau, J. Rius, B. Dortschy, and R. Zampolo. Optimal Solution for the Fixed Margin Problem in Digital Subscriber Lines. In *ISCCSP*, pages 1395–1399, 2008.
- [34] R. Moraes, B. Dortschy, A. Klautau, and J. Rius. Semi-Blind Spectrum Balancing for DSL. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(7):3717–3727, 2010.
- [35] M. Wolkerstorfer, D. Statovci, and T. Nordstrom. Dynamic Spectrum Management for Energy-Efficient Transmission in DSL. *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems - ICCS 2008*, pages 1015–1020, Novembro 2008.
- [36] M. Monteiro, N. Lindqvist, and A. Klautau. Spectrum Balancing Algorithms for Power Minimization in DSL Networks. In *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, pages 1–5, Junho 2009.



- 
- [37] B. S. Krongold, K. Ramchandran, and D.L. Jones. An Efficient Algorithm for Optimal Margin Maximization in Multicarrier Communication Systems. In *IEEE Global Conference in Telecommunication (GLOBECOM)*, volume 1B, pages 899–903 vol. 1b, 1999.
- [38] S. Jagannathan, Chan S. Hwang, and J.M. Cioffi. Margin Optimization in Digital Subscriber Lines Employing Level-1 Dynamic Spectrum Management. *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pages 435–440, Maio 2008.
- [39] S. Jagannathan, C. S. Hwang, and J.M. Cioffi. Margin Optimization in Digital Subscriber Lines Employing Level-2 Dynamic Spectrum Management. *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pages 441–446, Maio 2008.
- [40] S. Jagannathan, C. S. Hwang, and J.M. Cioffi. Per-tone Margin Optimization in Multicarrier Communication Systems. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008.*, pages 3057–3060, Abril 2008.
- [41] W. Yu, G. Ginis, and J. M. Cioffi. Distributed Multiuser Power Control for Digital Subscriber Lines. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 20(5):1105–15, Junho 2002.
- [42] J. M. Cioffi. Notas de aula - <http://www.stanford.edu/group/cioffi/>, último acesso em 14/10/2014, 2010.
- [43] T. Meigin et al. Margin Optimization Algorithm for Digital Subscriber Lines Based on Particle Swarm Optimization. *Journal of Systems Engineering and Eletronics*, 20:1316–1323, 2009.
- [44] A. Zhou, B. Qu, H. Li, S. Zhao, P.N. Suganthan, and Q. Zhang. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):32–49, 2011.
- [45] C. Sales, R.M. Rodrigues, F. Lindqvist, J. Costa, A. Klautau, K. Ericson, J. Rius i Riu, and P. O. Börjesson. Line Topology Identification Using Multiobjective Evolutionary Computation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(3):715 – 729, Março 2010.
- [46] H. E. P. Abraham. Método de Otimização Não-Linear para Impor PSDs Arbitrárias em Modems DSL: Análise Estatística e Prática. Master's thesis, Universidade Federal do Pará UFPA, 2011.
- [47] Johelden Bezerra, Aldebaro Klautau, Marcio Monteiro, Evaldo Pelaes, Eduardo Medeiros, and Boris Dortschy. An Evolutionary Algorithm for Improved Diversity in DSL

- 
- Spectrum Balancing Solutions. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010.
- [48] T. Starr, M. Sorbara, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman. *DSL Advances*. Prentice-Hall, 2003.
- [49] J. M. Cioffi. A multicarrier prime, 1991.
- [50] E. Van Bogaert, T. Bostoen, J. Verlinden, and R. Suciú. Supporting Quality of Service in Broadband Access Networks. Technical report, Alcatel-Lucent, 2005.
- [51] S. Vanhastel and R. Hernandez. Enabling IPTV: What's Needed in the Access Network. *Communications Magazine, IEEE*, 46(8):90–95, Agosto 2008.
- [52] S. Vanhastel. DSL Line Stability - Scaling DSL for Mass-Market Triple Play, 2008.
- [53] T. Bostoen, R. Oehen, and J. Verlinden. Optimizing DSL for Multimedia Services, 2005.
- [54] Alcatel-Lucent. Maximizing DSL Performance in the Field with Dynamic Line Management, Technology White Paper - Alcatel, 2009.
- [55] J. Maes, M. Peeters, M. Guenach, and C. Storry. Maximizing Digital Subscriber line Performance. *Bell Labs Technical Report*, pages 105–114, 2008.
- [56] E. Medeiros. A Prototype for Development and Applications of Optimization Strategies in Practices xDSL Systems. Master's thesis, University of Para UFPA, 2010.
- [57] E. Van Bogaert, T. Bostoen, J. Verlinden, and R. Suciú. Dynamic Spectrum Management in Practice, 2004.
- [58] F. Smith, M. Monteiro, F. Müller, B. Dortschy, A. Klautau, and P. Pelaes. On the Effectiveness of Dynamic Spectrum Management Algorithms in xDSL Networks. *International Telecommunications Symposium (ITS)*, 2010.
- [59] P. Golden, K. Jacobsen, and H. Dedieu. *Implementation and Applications of DSL Technology*. Auerbach Publications, 2007.
- [60] M. Rafie. Minimizing Impacts of Noise for Always On services over VDSL2 Networks, 2007.
- [61] M. Gen and R. Cheng. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. John Wiley and Sons, Inc, 2000.

- 
- [62] J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
- [63] K. Deb. *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, chapter Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering Design. Wiley, 1999.
- [64] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [65] M. Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. A Bradford book. Bradford Books, 1998.
- [66] L. J. Fogel. Autonomous Automata. *Industrial Research Magazine*, 4:14–19, 1962.
- [67] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*. Oxford University Press, Oxford, UK, 1996.
- [68] I. Rechenberg. *Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem*. Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment, 1965.
- [69] H. P. Schwefel. *Evolutionsstrategie und Numerische Optimierung*. PhD thesis, Technical University of Berlin, 1975.
- [70] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa. *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer, 2008.
- [71] K. Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley, 2001.
- [72] R. Linden. *Algoritmos Genéticos - Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional*. BRASPORT, 2006.
- [73] K. Deb. Practical Optimization Using Evolutionary Methods. Technical Report 2005008, Indian Institute of Technology Kanpur, 2005.
- [74] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle Swarm Optimization. In *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4, November 1995.
- [75] A. Engelbrecht. *Computational Intelligence: An Introduction*. Wiley, 2007.
- [76] H. Chenn-Jung, C. Yi-Ta, and Y. Dian-Xiu. Implementation of Call Admission Control Scheme in Next Generation Mobile Communication Networks Using Particle Swarm Optimization and Fuzzy Logic Systems. *Expert Systems with Applications*, 35(3):1246 – 1251, 2008.

- 
- [77] W. Shih-Chang and Y. Ming-Feng. A modified Particle Swarm Optimization for Aggregate Production Planning. *Expert Systems with Applications*, 41(6):3069 – 3077, 2014.
- [78] L. Whei-Min, G. Hong-Jey, and T. Ming-Tang. Hybridizing Particle Swarm Optimization with Signal-to-Noise Ratio for Numerical Optimization. *Expert Systems with Applications*, 38(11):14086 – 14093, 2011.
- [79] S. Muthukaruppan and M.J. Er. A hybrid Particle Swarm Optimization based Fuzzy Expert System for the Diagnosis of Coronary Artery Disease. *Expert Systems with Applications*, 39(14):11657–11665, 2012.
- [80] S.Y.S. Leung, Yang Tang, and W.K. Wong. A Hybrid Particle Swarm Optimization and its Application in Neural Networks . *Expert Systems with Applications*, 39(1):395 – 405, 2012.
- [81] K. Zeng and M. Dong. A Novel Cuboid Method with Particle Swarm Optimization for Real-Life Noise Attenuation from Heart Sound Signals. *Expert Systems with Applications*, 41(15):6839 – 6847, 2014.
- [82] R. Eberhart and J. Kennedy. A New Optimizer using Particle Swarm Theory. In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, pages 39–43, Outubro 1995.
- [83] Y. del Valle, G.K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R.G. Harley. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 12(2):171–195, Abril 2008.
- [84] M. S. Lechuga. Resolución de Problemas Multi-Objetivo através de Optimización Mediante Cúmulos de Partículas. Master’s thesis, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México, 2002.
- [85] A. G. S. Mello. Otimização por Enxame de Partículas, 2014.
- [86] W. G. C. Ticona. *Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo para a Reconstrução de Árvores Logenéticas*. PhD thesis, ICMC USP, 2003.
- [87] A. Osyczka. *Multicriteria Design Optimization. Procedures and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [88] A. Abraham, L. Jain, and R. Goldberg. *Evolutionary Multiobjective Optimization. Theoretical Advances and Applications*, chapter 12. Springer, 2005.

- 
- [89] J. D. Schaffer. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithm. In *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, pages 93–100, 1985.
- [90] W. G. C. Ticona A. C. B. Delbém. Algoritmos Evolutivos para Otimização Multi-Objetivo: Algoritmos de Estimacão de Distribuicão e Aplicacões, 2008.
- [91] P. Hajela and C.-Y. Lin. Genetic Search Strategies in Multicriterion Optimal Design. *Structural Optimization*, 4:99–107, 1992.
- [92] C. M. Fonseca and P. J. Fleming. Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, discussion and generalization. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, pages 416–423, 1993.
- [93] N. Srinivas and K. Deb. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3):221–248, 1994.
- [94] J. Horn, N Nicholas, and D. E. Goldberg. A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization. In *In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pages 82–87, 1994.
- [95] M. Laumanns, G. Rudolph, and H. Schwefel. A Spatial Predator-Prey Approach to Multi-objective Optimization: A Preliminary Study. *Lecture Notes in Computer Science*, 1498:241–249, 1998.
- [96] G. Rudolph. Evolutionary Search under Partially Ordered Fitness Sets. In *In Prpceedings of the International Symposium on Information Science Innovations in Engineering of Natural and Artificial Intelligente Systems - ISI 2001*, pages 818–822. ICSC Academic Press, 2001.
- [97] K. Deb, S. Agrawal, and A Pratap. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. In *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI*, pages 849–858, 2000.
- [98] E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: empirical results (Revised Version). Technical report, Computer Engineering and Networks Laboratory (ETH Zurich), 1999.
- [99] N. Mori, J. Yoshida, H. Tamaki, and H.K. Nishikawa. A Thermodynamical Selection Rule for the Genetic Algorithm. In *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, volume 1, pages 188–, Novembro 1995.

- 
- [100] J.D. Knowles and D.W. Corne. The Pareto Archived Evolution Strategy : A New Baseline Algorithm for Pareto Multiobjective Optimization. In *In Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*, pages 98–105, 1999.
- [101] D. Veldhuizen. *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations*. PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering. Graduate School of Engineering. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999.
- [102] C. A. Coello Coello and G. T. Pulido. A Micro-Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 1993:126–140, 2001.
- [103] D. Corne, J. Knowles, and M. Oates. The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization. In Marc Schoenauer, Kalyanmoy Deb, Günther Rudolph, Xin Yao, Evelyne Lutton, JuanJulian Merelo, and Hans-Paul Schwefel, editors, *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, volume 1917 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 839–848. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [104] D. Corne, N. Jerram, D. Knowles, J Oates, and J Martin. PESA-II: Region-based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, pages 283–290. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [105] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6:182–197, April 2002.
- [106] K. Deb and R. Agrawal. Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. *Complex Systems*, 9(2):115–148, 1995.
- [107] K. Deb and M. Goyal. A Combined Genetic Adaptive Search (GeneAS) for Engineering Design. *Computer Science and Informatics*, 26:30–45, 1996.
- [108] M. R. Sierra and C. A. Coello Coello. Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the state-of-the-art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2(3):287–308, 2006.
- [109] C. A. Coello Coello and M.S. Lechuga. MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization. In *Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on*, volume 2, pages 1051–1056, 2002.

- 
- [110] S. Mostaghim and S. Hartmut. *Distance Based Ranking in Many-Objective Particle Swarm Optimization*, volume 5199 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [111] R. A. Santana, M. R. Pontes, and C. J. A. Bastos-Filho. A Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach Using Crowding Distance and Roulette Wheel. In *Intelligent Systems Design and Applications, 2009. ISDA '09. Ninth International Conference on*, pages 237–242, Novembro 2009.
- [112] C. R. Raquel and Prospero C. , Jr. An Effective Use of Crowding Distance in Multiobjective Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '05*, pages 257–264, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [113] J. Durillo, J. Garcia-Nieto, A. J. Nebro, C. A. Coello, F. Luna, and E. Alba. Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: An Experimental Comparison. In *Proceedings of the 5th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO '09*, pages 495–509, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.
- [114] L. Rachmawati and D. Srinivasan. Preference Incorporation in Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Survey. In *Evolutionary Computation. CEC. IEEE Congress on*, pages 962–968, 2006.
- [115] A. Stacey, M. Jancic, and I. Grundy. Particle Swarm Optimization With Mutation. In *Evolutionary Computation, CEC '03. The Congress on*, volume 2, pages 1425–1430 Vol.2, Dezembro 2003.
- [116] A. J. Nebro, J. J. Durillo, J. Garcia-Nieto, C. A. Coello Coello, F. Luna, and E. Alba. SMPSO: A new PSO-based Metaheuristic for Multi-Objective Optimization. In *Computational intelligence in multi-criteria decision-making, 2009. MCDM'09. IEEE Symposium on*, pages 66–73, Março 2009.
- [117] Xiaodong Li. A Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimizer for Multiobjective Optimization. In *Proceedings of the 2003 International Conference on Genetic and Evolutionary Computation: Part I, GECCO'03*, pages 37–48, Berlin, Heidelberg, 2003. Springer-Verlag.
- [118] S. Mostaghim and J. Teich. Strategies for Finding Good Local Guides in Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). In *Swarm Intelligence Symposium, 2003. SIS '03. Proceedings of the 2003 IEEE*, pages 26–33, Abril 2003.

- 
- [119] G.T. Pulido and C. A. Coello Coello. Using Clustering Techniques to Improve the Performance of a Particle Swarm Optimizer. In *Proceedings of the 6th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '04*, pages 225–237. SpringerVerlag, 2004.
- [120] M. R. Sierra and C. A. Coello Coello. Improving PSO-Based Multi-objective Optimization Using Crowding, Mutation and e-dominance. In *Proceedings of the Third International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO'05*, pages 505–519, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.
- [121] M. Clerc and J. Kennedy. The Particle Swarm - Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Sspace. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(1):58–73, Fevereiro 2002.
- [122] C. Goh and K. Tan. *Evolutionary Multi-objective Optimization in Uncertain Environments*. Polish Academy of Sciences, 2009.
- [123] R. C. Eberhart and Y. Shi. Comparison Between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming VII, EP '98*, pages 611–616, London, UK, UK, 1998. Springer-Verlag.
- [124] P. Tsiaflakis, Yung Yi, Mung Chiang, and M. Moonen. Green DSL : Energy-efficient DSM. In *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, pages 1–5, Junho 2009.
- [125] Matrix Laboratory. The MathWorks, inc. <http://www.mathworks.com/>.
- [126] J. Papandriopoulos and J. S. Evans. Low-complexity distributed algorithms for spectrum balancing in multi-user DSL networks. In *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, volume 7, pages 3270 – 3275, Junho 2006.
- [127] K. Jacobsen. Methods of Upstream Power Backoff on Very High-Speed Digital Subscriber Lines. *IEEE Communications Magazine*, Março 2001.
- [128] K. Deb and H. Jain. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 18(4):577–601, Agosto 2014.
- [129] Behrouz Farhang-Boroujeny. Filter Bank Multicarrier Modulation: A Waveform Candidate for 5G and Beyond. *Advances in Electrical Engineering*, 2014, 2014.



# Trabalhos Publicados

1. GOMES, A. C. S.; CONTE, Marcio; DORTSCHY, Boris; KLAUTAU, Aldebaro. An Hybrid Multiobjective Evolutionary Algorithm for Multiuser Margin Maximization in DSL. *International Journal of Communication Systems*, 2014.
2. GOMES, A. C. S.; MARCIO, M.; KLAUTAU, Aldebaro; DORTSCHY, Boris. An Hybrid Multiobjective Evolutionary Algorithm for Multiuser Margim Maximization in DSL. In: *IWT - International Workshop on Telecommunications*, 2011, Rio de Janeiro. *IWT - International Workshop on Telecommunications*, 2011.
3. MARCIO, M.; GOMES, A. C. S.; LINDQVIST, Neiva; DORTSCHY, Boris; KLAUTAU, Aldebaro. An Algorithm for Improved Stability of DSL Networks using Spectrum Balancing. In: *IEEE Global Communications Conference*, 2010, Miame. *IEEE Global Communications Conference*, 2010.
4. GUEDES, G.; ABRAHIM, H.; GOMES, A. C. S.; KLAUTAU JR, Aldebaro; DORTSCHY, Boris. On the Dynamic Behavior of Margin in DSL: Procedures and Tools. In: *7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, 2008, Foz do Iguaçu. *7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, 2008.
5. FONSECA, Neiva; NEVES, Darlene; GOMES, A. C. S.; CONTE, Marcio Murilo; KLAUTAU JR, Aldebaro; PELAES, Evaldo; DORTSCHY, Boris. Evaluation of DSM Performance with Mixed DSL Services and Measured Crosstalk Channels. In: *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2007, Recife. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2007.
6. BEZERRA, Joheldem; GOMES, A. C. S.; KLAUTAU, Aldebaro; PELAES, Evaldo ; DORTSCHY, Boris. The influence of DSM on legacy xDSL services. In: *I2TS'2006 - 5th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, 2006, Cuiabá. *I2TS'2006*, 2006.

# Apêndice A

## Técnicas de Gerenciamento Dinâmico do Espectro

### A.1 DSM nível 1

Nesses algoritmos, a alocação de potência é feita de forma autônoma, baseada apenas na própria condição da linha em questão, sem nenhuma coordenação com as outras linhas do *binder* [57]. Como exemplo de algoritmo autônomo está o *Iterative Waterfiling* - IWF [41].

- **IWF.** Esse algoritmo adota o conceito de “jogo não” cooperativo onde cada modem tenta maximizar sua própria taxa de dados, obedecendo porém, a restrição de potência máxima. A autonomia do algoritmo aliado à sua baixa complexidade ( $O(NK)$ ) representam as duas principais vantagens do IWF.

O método de alocação de potência busca encontrar um equilíbrio entre maximizar a taxa de dados de cada usuário e minimizar a emissão de interferência. Em particular ele tenta negociar a melhor utilização de potência e frequência com cada usuário, levando em consideração a natureza seletiva em frequência do canal.

O IWF utiliza dois estágios durante a sua execução. No estágio interno é realizada a convergência de potência, ou seja, a melhor alocação de potência para cada modem seguindo a Eq.A.1.

$$s_n^k = \max \left( W - \frac{\Gamma(\sigma_n^k + \sum_{m \neq n} s_n^k |h_{m,n}^k|^2)}{|h_{n,n}^k|^2}, 0 \right) \quad (\text{A.1})$$

onde  $\Gamma$  é o *gap* da SNR e o  $W$  é uma constante chamada de “nível d’água”, e é escolhida

de maneira que a restrição de potência seja alcançada. O IWF tenta ajustar a potencia total de cada modem ( $P_n = \sum_{k=1}^K P_n^k$ ) iterativamente, para o menor valor possível que permita ao modem atingir sua taxa alvo pré-especificada [41].

No estágio externo são calculadas as taxas associadas de cada modem. Ao final das iterações o IWF atinge o *Equilíbrio de Nash*, onde há um compromisso entre a taxa de cada modem e nível de interferência emitido nas outras linhas [41]. O Algoritmo 7 ilustra o pseudo-código do IWF.

---

**Algorithm 7** : *Iterative Waterfiling*

---

```

1: repita
2:   para cada usuário  $n \leftarrow 1$  até  $N$  faça
3:     repita  $s_n^k = s_n^k(\lambda_n), \forall k,$ 
4:       se  $f_s \sum_k b_n^k < R_n^{alvo}$  e  $\sum_k s_n^k \leq P_n,$  então
5:         aumente  $\lambda_n$ 
6:       senão
7:         diminua  $\lambda_n$ 
8:       fim se
9:     até convergência
10:  fim para
11: até convergência de taxa

```

---

## A.2 DSM nível 2

A alocação de potência é baseada não só na sua própria condição mas também na das outras linhas no *binder*. Essa tarefa requer coordenação entre as linhas para que a alocação de potência seja ótima e a capacidade do *binder* seja maximizada. Os algoritmos centralizados necessitam de uma central de gerenciamento do espectro - do inglês SMC [23] - onde todo o processamento é realizado. Como exemplo de algoritmos centralizados está o ISB [30].

- **ISB**. O ISB foi baseado no *Optimal Multiuser Spectrum Balancing* (OSB) [29], porém com uma complexidade computacional menor ( $O(KN^2)$ ) que o OSB, que é devido a utilização de decomposição dual de *Lagrange* em uma busca por linha. O ISB tem sua implementação feita em um ponto central na rede (i.e. SMC) e é utiliza a soma ponderada das taxas, o que garante que cada modem levará em consideração a interferência que

causada nos outros modems da rede quando estiver alocando seu próprio espectro. Isso permite uma alocação não egoísta, o que aumenta o desempenho da rede como um todo [26]. A restrição de potência total é incorporado no problema de otimização através da definição do *Lagrangeano* na Eq. A.2.

$$L = \sum_n \omega_n R_n - \sum_n \lambda_n \left( \sum_k P_n^k - P_n \right) \quad (\text{A.2})$$

onde  $\omega_n$  e  $\lambda_n$  são números não negativos correspondendo aos multiplicadores de *Lagrange*, escolhidos de maneira que as condições em A.3 e A.4 são satisfeitas.

$$\lambda_n \left( P_n - \sum_k P_n^k \right) = 0 \quad \forall n \quad (\text{A.3})$$

$$\omega_n \left( R_n - \sum_n b_n^k \right) = 0 \quad \forall n \quad (\text{A.4})$$

O *Lagrangeano* em A.2 é equivalente a versão *dual* do problema original definido em Eq.3.1. Ele pode ser decomposto em uma soma em torno dos tons como um sub-problema definido por

$$\max_{P_1^k \dots P_n^k} L^k = (P_1^k \dots P_n^k) \quad (\text{A.5})$$

$$L^k = \sum_n \omega_n f_s b_n^k - \sum_n \lambda_n P_n^k \quad (\text{A.6})$$

Onde  $\sum_K P^k = P$ , logo maximizando o sub-problema é equivalente a maximizar o problema dual. Observando a Eq.A.5, nota-se que as PSDs são conjuntamente, o que pode levar a uma complexidade exponencial. Uma alternativa é fazer a busca pela PSD de maneira iterativa, onde durante a busca a PSD de cada usuário é atualizada uma de cada vez<sup>1</sup>. O problema de otimização é então definido por

$$\max_{P_n^k} L^k = (P_1^k \dots P_n^k) \quad (\text{A.7})$$

O ISB itera entre as linhas, otimizando a PSD de cada linha por vez.

---

<sup>1</sup>Durante a busca pela PSD do usuário  $n$ , a PSD dos outros usuários é fixada.

## A.2.1 Soluções Semi-distribuídas

A apesar de apresentarem coordenação autônoma em parte do seu processamento, em algum momento necessitam acessar as informações fornecidas pela SMC, principalmente as informações relacionadas a função de transferência do ruído. Como exemplo de algoritmo híbrido está o algoritmo *Low-Complexity Distributed- Low-Complexity Distributed Algorithm* (SCALE) [126].

- **SCALE** [126] Esse algoritmo tem sua implementação distribuída em torno da rede, porém de tempos em tempos, acessa a SMC em busca de informações como a função de transferência do ruído de *crosstalk* de todas as linhas no *binder*, alcançando dessa maneira, um desempenho próximo do ISB, porém com baixa complexidade ( $O(NK \log K)$ ). O SCALE estabelece a relação definida por (A.8)

$$\alpha \log(z) + \beta \leq \log(1 + z) \quad (\text{A.8})$$

A inequação A.8 se torna estritamente igual em um dado valor  $z_0$  quando  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados como indicado abaixo

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{z_0}{1+z_0} \\ \beta &= \log(1 + z_0) - \frac{z_0}{1+z_0} \log z_0 \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Através da Eq.A.8, o problema original definido em 3.1 se torna um problema não-convexo da forma

$$\max_{P_1^k \dots P_n^k} \sum_n \omega_n f_s \sum_k \left[ \alpha_n^k \log_2 \left( \frac{s_n^k |h_{nn}^k|^2}{\Gamma(\sigma_n^k + \sum_m s_m^k |h_{mn}^k|^2)} \right) + \beta_n^k \right] \quad (\text{A.10})$$

Para torna-lo convexo é necessário fazer  $\tilde{p}_n^k = \ln p_n^k$ . Ao exemplo do ISB, o SCALE desacopla o problema em frequência, utilizando o *Lagrangeano* sob a forma:

$$L = \sum_n \omega_n f_s \sum_k \left[ \alpha_n^k \log_2 \left( \frac{e^{\tilde{p}_n^k} |h_{nn}^k|^2}{\Gamma(\sigma_n^k + \sum_m e^{\tilde{p}_m^k} |h_{mn}^k|^2)} \right) + \beta_n^k \right] - \sum_n \lambda_n \left( \sum_n e^{\tilde{p}_n^k} - P_n^{max} \right) \quad (\text{A.11})$$

O SCALE interage com a SMC através de troca de mensagens. O modem envia mensagem para a SMC na forma:

$$\phi_n^k = \frac{\omega_n \alpha_n^k}{s_n^k |h_{nn}^k|^2} \quad (\text{A.12})$$

fornecendo informação como por exemplo a taxa alvo obtidas; e a SMC, após o processamento das mensagens, responde ao modem com mensagens na forma:

$$\psi_n^k = \sum_{m \neq n} |h_{nm}^k|^2 \phi_m^k \quad (\text{A.13})$$

Durante o processamento do algoritmo a PSD de cada linha é refinada iterativamente através da Eq.A.14.

$$s_n^k = \frac{\omega_n \alpha_n^k}{\lambda_n + \sum_{m \neq n} h_{mn}^k \omega_n \alpha_n^k \frac{SNR_n^k(s_n^k)}{h_n^k n s_n^k}} \quad (\text{A.14})$$

onde a alocação de potência é proporcional ao ao peso  $\omega_n$  e ao  $\alpha_n^k$

O Algoritmo 8 ilustra o pseudo-código do SCALE.

---

**Algorithm 8** : *Low-Complexity Distributed Algorithm*

---

- 1: **repita**
  - 2:      $\alpha_n^k = 1, \forall k, n$
  - 3:     Contador  $c = 1$ ,
  - 4:     **repita**
  - 5:         **se**  $\text{mod}(c, D) = 0$  **então**
  - 6:             Calcular  $\alpha_n^k \forall n, k$
  - 7:         **fim se**
  - 8:         Calcular  $\phi_n^k$  e  $\psi_n^k \forall n, k$
  - 9:         **repita**
  - 10:              $p_n^k = \frac{\omega_n \alpha_n^k}{\lambda_n + \psi_n^k} \forall n, k$
  - 11:              $\lambda_n = \max(\lambda_n + \varepsilon_p(\sum_k p_n^k - P_n^{max}), 0) \forall n$
  - 12:         **até** convergência de potências
  - 13:          $c = c + 1$
  - 14:         **até** convergência de PSDs.
  - 15:          $\omega_n = \max(\omega_n + \varepsilon_r(R_n^{alvo} - f_s \sum_k b_n^k), 0) \forall n > 1$
  - 16:          $\omega_1 = 1 - \sum_2^N \omega_n$
  - 17:     **até** convergência de taxas.
-

# Apêndice B

## Modos de Operação dos Modems DSL

Tipicamente os modems DSL possuem três modos de operação:

- **Modo Adaptativo em Taxa - do inglês *Rate-adaptive* (RA).** Nesse modo de operação toda a potência disponível é utilizada para maximizar a taxa de *bits*, sujeito à restrições de potência por usuário. Esse problema é o mesmo já definido pela Equação 3.1 como

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}} \quad \sum_{n=1}^N \omega_n R_n & (B.1) \\ \text{sujeito a} \quad & \sum_{k=1}^K s_n^k \leq P_n^{max}, \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

onde

- $\omega$  é uma constante não negativa que permite impor diferentes prioridades ao usuário  $n$ ;
  - $P_n^{max}$  é a potência de transmissão total disponível para o usuário  $n$ .
- **Modo Adaptativo em Margem MA.** Nesse modo de operação, toda a potência disponível é utilizada para maximizar a margem de ruído e potência de transmissão, sujeitos à uma restrição de taxa de *bits* e potência máxima do serviço [42]. Esse problema, é o objeto de estudo definido pela Equação B.2 como:

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{P}, \gamma_1 \dots \gamma_N} \sum_{n=1}^N \mu_n \gamma_n & (B.2) \\
\text{sujeito a} \quad & R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
& P_n^{\text{tot}} \leq P_n^{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
& s_n^k \geq 0, \gamma_n \geq 1, \quad \forall n, k
\end{aligned}$$

onde

- $\gamma_n$  é a margem de ruído do  $n$ -ésimo usuário;
  - $\mu_n$  é uma constante não negativa que representa um valor de “peso”, o qual permite ao operador ajustar a prioridade em torno dos usuários para situações, tais como em que a linha tem requisitos de QoS diferentes;
  - $P_n^{\max}$  é a restrição de potência de transmissão total disponível para o usuário  $n$  e
  - $R_n^{\min}$  é a restrição de taxa mínima, sobre a qual o valor de taxa  $R_n$  do usuário  $n$  não pode ser inferior.
- **Modo Adaptativo em Potência - do inglês *Power Adaptive (PA)*.** Nesse modo de operação, o modem tenta reduzir o consumo de potência, enquanto a taxa de *bits* e a margem de ruído são mantidas fixas [42]. Esse problema é o mesmo definido pela Equação 5.5 como:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{P}} \sum_{n=1}^N \lambda_n \sum_{k=1}^K s_n^k \\
\text{sujeito a} \quad & R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad p_n^k \geq 0
\end{aligned}$$

onde

- $\lambda_n$  é o “peso” (ou prioridade), atribuído a cada usuário, o qual tem a função distribuir a potência para cada linha  $n$  DSL
- $R_n^{\min}$  corresponde à restrição de taxa do  $n$ -ésimo usuário.

A maioria dos modems das redes DSL operam em modo MA, mantendo a margem de ruído em 6 dB.



# Apêndice C

## O algoritmo NRME

Em [24] os autores propõem um método que tenta resolver o problema definido em (5.1), utilizando o algoritmo IWF [41] para calcular as margens resultantes e PSDs. Assumindo margens fixas (*e.g.*  $\gamma_n = 0$  dB), o método utiliza uma solução específica do IWF no modo adaptativo em taxa - *rate-adaptive* - de maneira que  $R_n(\gamma_n) \geq R_n^{\min} \forall n$ . Depois disso, o método utiliza um sub-algoritmo chamado NRME para calcular as margens otimizadas  $\gamma_n^*$ 's usando as atualizações Newton-Raphson para obter  $R_n(\gamma_n^*) = R_n^{\min}$ , com  $\gamma_n^* > \gamma_n \forall n$ . A escolha apropriada do ponto inicial  $(R_1, \dots, R_N)$  é determinada por um algoritmo externo chamado de MHM, que geralmente calcula margens resultantes, com valores iguais para todos os usuários.

Na prática o NRME converte uma solução de maximização de taxa para uma solução de maximização de margem, de maneira que se uma região de taxa do IWF é fornecida (geralmente através de uma busca utilizando força bruta), o NRME constrói a região de margem correspondente como ilustrado na Figura C.1.

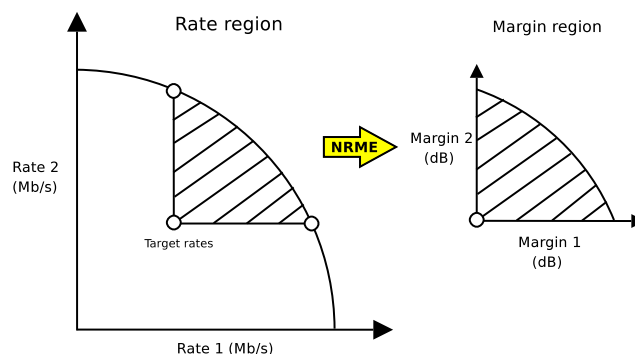


Figura C.1: O algoritmo NRME converte a região de taxa obtida pelo IWF em uma região de margem, de acordo com as taxas alvo  $R_n^{\min}$  especificadas.

Apesar da simplicidade do IWF ser benéfica para o NRME, na literatura é bem estabelecido que o desempenho de algoritmos de DSM nível 1 (como o IWF) é inferior ao desempenho de algoritmos de nível 2 de coordenação. Na literatura, existem outras ferramentas de otimização de margem que utilizam o balanceamento do espectro, como em [38, 39]. Entretanto eles adotam uma abordagem diferente para resolver o problema de otimização, e não utilizam a definição do problema como em (5.1). O Algoritmo 9 ilustra o pseudo-código do NRME.

---

**Algorithm 9** : *NRME*

---

- 1:  $R = \sum_{j=1}^k \log_2(1 + \sigma_j/\Gamma)$
  - 2:  $\gamma_M = (2^{R/K} - 1)/(2^{T/K} - 1)$
  - 3: **repita**
  - 4:    $T_{novo} = \sum_{j=1}^K \log_2(1 + \sigma_j/\gamma_M\Gamma)$
  - 5:    $\nabla = \frac{-1}{\gamma \ln 2} \sum_{j=1}^k \frac{1}{1 + \gamma_M\Gamma/\sigma_j}$
  - 6:    $M_0 = \gamma_M$
  - 7:    $\gamma_M = \gamma_M - (T_{novo} - T)/\nabla$
  - 8:   **se**  $\gamma_M < 0$  **então**  $\gamma_M = M_0/10$
  - 9:   **fim se**
  - 10: **até**  $|T_{novo} - T| > eps_{NRME}$
-

# Apêndice D

## Acessos em serviços de banda larga fixa

A banda larga fixa é prestada com a utilização de diferentes tecnologias de acesso:

- Por meios físicos confinados - *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), *Cable Modem*, Ethernet, Fibra, Frame Relay, acesso híbrido - Fibra e Cabo Coaxial (HFC), xDSL e *Power Line Communication* (PLC);
- Por satélite;
- Por ondas de rádio terrestres - espectro radioelétrico em microondas, *Fixed Wireless Access* (FWA), *Long Term Evolution* (LTE), *Spread Spectrum* e Wimax.

A Tabela D.1 ilustra a distribuição da base de acessos em serviço por tecnologia no período de jan/fev de 2015.

Tabela D.1: Acessos em serviços de banda larga fixa no período de jan/fev de 2015.

TECNOLOGIA	JAN/15	FEV/15
xDSL	13.230.110	13.224.492
ATM	242.663	257.584
<i>Cable Modem</i>	7.620.639	7.697.616
DTH	4	4
ETHERNET	296.406	292.377
Fibra	990.839	1.016.731
<i>Frame Relay</i>	19.856	22.442
FWA	73.993	79.167
HFC	27.442	28.368
LTE	152.854	167.490
MMDS	1.887	2.835
PLC	173	173
SATELITE	62.208	62.720
<i>Spread Spectrum</i>	1.382.385	1.420.783
WIMAX	11.546	12.326