



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

Método de Otimização Não-Linear para Impor PSDs Arbitrárias em Modems DSL: Análise Estatística e Prática

Harney Edison Pereira Abraham

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

2011

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

Método de Otimização Não-Linear para Impor PSDs Arbitrárias em Modems DSL: Análise Estatística e Prática

Autor(a): Harney Edison Pereira Abraham

Orientador: Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Engenharia de Telecomunicações**.

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém, PA
2011

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

**Método de Otimização Não-Linear para Impor PSDs Arbitrárias
em Modems DSL: Análise Estatística e Prática**

AUTOR(A): Harney Edison Pereira Abraham

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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 A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

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

Prof. Dr. Roberto Célio Limão
(Membro - Engenharia da Computação - UFPA)

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Membro - PPGEE - UFPA)

Dedico este trabalho à minha família e todos aqueles que me ajudaram.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo e principalmente por colocar pessoas maravilhosas no meu caminho, sempre.

À UFPA, Ericsson e ao PPGEE pelo suporte durante todo o mestrado.

Agradeço também a todos os meus amigos de trabalho que ajudaram a concretizar mais essa etapa da minha vida. Eduardo, Márcio, Ana Cláudia, Müller, dentre tantos outros do LaPS e LEA.

Finalmente, agradeço à meu orientador Aldebaro Klautau e à minha família, que foram meus principais pilares para desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar um método para solucionar o 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. O método utiliza algoritmos genéticos (AG) codificado em inteiros para solucionar o problema. O AG é responsável por achar os melhores parâmetros para representar uma PSD arbitrária, considerando as restrições impostas pelos equipamentos e padrões atuais DSL. O trabalho apresenta ainda um estudo comparativo do método proposto com um concorrente, além de um estudo estatístico do método proposto, considerando média, desvio padrão e intervalo de confiança. Adicionalmente, são apresentados dois *setups* para uso em laboratório, sendo um para medição de PSDs e o outro para funções de transferência, os quais podem ser reaproveitados em outros trabalhos.

Abstract

This work aims to present a method to solve the mapping problem between the theoretical dynamic spectrum management (DSM) solutions and the commercial DSL modems transmitting power spectrum densities (PSDs) parameters. The method uses an integer codified genetic algorithm (GA) to solve the problem. The GA is responsible for finding the fittest parameters that represents an arbitrary PSD, under the restrictions imposed by the actual DSL equipments and standards. This work shows a comparative study of the proposed method with another concurrent. A statistics study of the proposed method considering the average, standard deviation and confidence interval is done. Finally, two different laboratory setups are presented. One of them to PSD measurement and other to use in transfer function measurements. Both setups can be reused in other works.

Lista de Figuras

1.1	Número de assinantes banda larga no mundo.	18
1.2	Distribuição do mercado de banda larga no Brasil.	18
1.3	Arquitetura de um enlace DSL comum.	19
1.4	Modulação DMT.	20
1.5	Tipos the <i>crosstalk</i>	22
2.1	Etapas de um AG simples.	27
2.2	Seleção por torneio entre 6 indivíduos aleatórios de um AG.	31
2.3	<i>Crossover</i> de ponto único entre dois indivíduos aleatórios codificados binariamente.	32
2.4	<i>Mutação</i> entre dois indivíduos aleatórios codificados por inteiros.	33
3.1	Representação do problema a ser resolvido.	38
3.2	Passos para achar o Fitness de cada indivíduo.	41
3.3	Passos de execução da busca do <i>breakpoint</i> do algoritmo genético.	42
4.1	Cenário 1 para gerar as PSDs alvo utilizado nas simulações.	44
4.2	Cenário 1 para gerar as PSDs alvo utilizado nas simulações.	44
4.3	Polígono de frequência relativa para ambos os métodos.	46
4.4	Comparação das ogivas percentuais para os métodos AG e EIA sobre o mesmo conjunto de testes.	47
4.5	Comparação visual das soluções do AG e EIA para PSDs selecionadas do conjunto de testes.	48
4.6	PSD escolhida aleatoriamente para o cálculo da média por tom.	50
4.7	Intervalo de confiança de 95% para uma PSD escolhida aleatoriamente.	54
4.8	Topologia para aplicação prática de DSM em laboratório.	55

4.9	Fluxograma de otimização: passos principais para a otimização do espectro prática e seus respectivos resultados intermediários (nos blocos cinza).	55
4.10	Setup de equipamentos utilizados para medir a PSD de transmissão usado por transceptores DSL comerciais.	56
4.11	Comparação entre as PSDs medidas e as impostas	59
A.1	<i>Setup</i> de medição para funções de transferência do tipo direta e de <i>crosstalk</i> . . .	71
A.2	Medidas de função de transferências direta e de <i>crosstalk</i> para o cenário da Figura A.3. É possível notar que a influência que o Link 2 causa no Link 1 é maior do que a influência do Link 1 no 2.	71
A.3	Cenário com usuários de ADSL2+ e ocorrência de <i>crosstalk</i> entre os link 1 e 2.	72

Lista de Tabelas

1.1	Principais tecnologias DSL e os documentos de padronização.	19
1.2	Principais algoritmos DSM da literatura.	23
4.1	Tabela com resultados das médias por tom para uma PSD e tons aleatórios. . .	51
4.2	Tabela com resultados das médias por PSD escolhidas aleatoriamente do conjunto de testes.	52
4.3	Tabela com resultados do desvio padrão por tom. O resultado se mostra satisfatório uma vez que, os valores encontrados estão próximos de zero. . . .	52
4.4	Tabela com resultados do desvio padrão para 10 PSDs escolhidas aleatoriamente do conjunto de testes. É possível notar o bom desempenho do método para todos os casos, com os valores do desvio padrão ficando em torno de zero. . . .	53

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	17
1.1 Principais tecnologias DSL	18
1.2 Modelagem do sistema DSL	19
1.3 Fontes de interferência e ruído	21
1.3.1 O <i>Crosstalk</i>	22
1.4 Gerenciamento Dinâmico de Espectro - DSM	22
1.5 Motivação	23
1.6 Objetivos	24
1.7 Organização do trabalho	25
2 Algoritmo genético - AG	26
2.1 Conceito	26
2.2 Principais elementos	28
2.2.1 População de indivíduos	28
2.2.2 Grau de aptidão - <i>fitness</i>	29
2.2.3 Mecanismos de seleção	29
2.2.3.1 Seleção por torneio	30
2.2.4 Operadores Genéticos	31
2.2.4.1 <i>Crossover</i>	31
2.2.4.2 <i>Mutação</i>	32
2.2.5 Parâmetros de Controle	33

2.2.5.1	Tamanho da população	34
2.2.5.2	Taxa de <i>crossover</i>	34
2.2.5.3	Taxa de mutação	34
2.3	Resumo do Capítulo	35
3	Técnica para imposição de máscaras de PSDs em modems DSL	36
3.1	Descrição do problema	36
3.1.1	Soluções possíveis	39
3.1.1.1	Força Bruta	39
3.1.1.2	Espaçamento igual de amostras	39
3.2	Solução proposta	40
3.2.1	Modelo do AG adotado	40
3.3	Resumo do Capítulo	42
4	Resultados	43
4.1	Resultados simulados	43
4.1.1	Metodologia utilizada	43
4.1.2	Comparações com outros métodos	45
4.1.2.1	Distribuição de frequência relativa	45
4.1.2.2	Distribuição de frequência acumulada relativa	46
4.1.2.3	Correspondência entre os métodos	47
4.2	Análise Estatística do método	48
4.2.1	Metodologia utilizada	49
4.2.2	Média e desvio padrão das simulações	49
4.2.3	Intervalo de confiança do método proposto	52
4.3	Resultados práticos	53
4.3.1	Metodologia utilizada	54
4.3.2	Resultados das medições reais	56
4.4	Resumo do Capítulo	57
5	Considerações Finais	60
5.1	Conclusões gerais	60

5.2	Trabalhos futuros	61
5.3	Contribuições	61
Trabalhos Publicados Pelo Autor		65
Referências Bibliográficas		65
A Procedimento para medição de funções de transferência		69
A.1	Lista de equipamentos utilizados	69
A.2	Configuração dos equipamentos de medição	70
A.3	Breve descrição do processo de medição	70

Capítulo 1

Introdução

A infra-estrutura de cabeamento para a telefonia global vem sendo construída ao longo de várias décadas. Utilizando-se dessa infra-estrutura, a tecnologia de Linha Digital do Assinante (do inglês DSL - *Digital Subscriber Line*) é hoje em dia um dos principais meios de acesso banda larga no Brasil, Ásia e Europa, como ilustra a Figura 1.1. No Brasil, especificamente, essa tecnologia é amplamente dominante sobre outras tecnologias, como banda larga móvel, acesso via cabo (coaxial), PLC, etc., como mostra a Figura 1.2 do ano de 2010, que ilustra a distribuição de usuários de banda larga no Brasil, onde o ADSL agrega aproximadamente 8 milhões de usuários no segundo trimestre deste ano.

A arquitetura de enlace DSL é mostrada na Figura 1.3. Esse enlace é composto pelo modem do usuário (transceptor), meio de transporte (cabo telefônico) e um DSLAM (do inglês *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), o qual é o transceptor da operadora e é responsável por gerenciar e comunicar vários usuários ao mesmo tempo. É importante notar que o tráfego DSL não interfere no tráfego telefônico, sendo uma grande vantagem para as operadoras, uma vez que permite a oferta de mais serviços sobre uma infra-estrutura previamente montada (cabos telefônicos).

Sendo o DSL uma tecnologia amplamente utilizada, vários estudos são direcionados para a melhoria de sua transmissão. Dentre as várias correntes de pesquisa, pode-se destacar a que foca na estabilidade do sistema DSL em relação ao ambiente de ruído nas linhas telefônicas [1, 2]. Nesse contexto, é de suma importância tornar factível que tais estudos sejam utilizados em equipamentos comerciais.

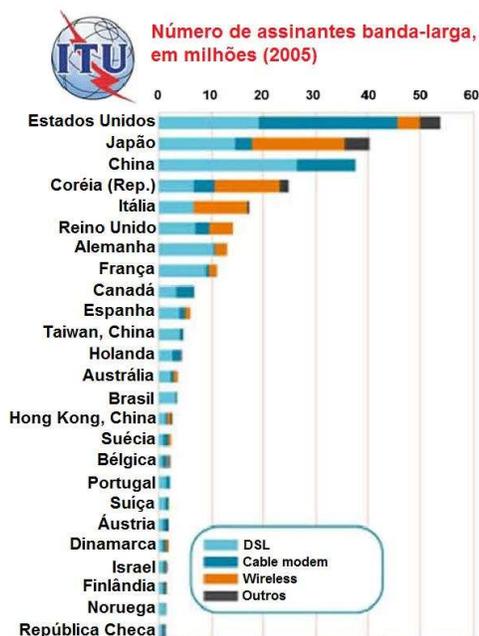


Figura 1.1: Número de assinantes banda larga no mundo. Fonte: ITU Information Society Statistics Database.

Milhares	1T09	2T09	3T09	4T09	1T10	2T10*
ADSL	7.256	7.494	7.481	7.678	7.982	8.338
TV Assinatura	2.680	2.835	3.020	3.132	3.238	3.350
Outros	424	425	500	570	570	580
Total	10.360	10.754	11.001	11.380	11.790	12.268
Acessos/ 100 hab.	5,43	5,62	5,74	5,92	6,12	6,36

Figura 1.2: Distribuição do mercado de banda larga no Brasil. Fonte: Operadoras e Associação Brasileira de Telecomunicações - ABTA.

1.1 Principais tecnologias DSL

Atualmente, as principais tecnologias DSL em uso são: ADSL [3, 4] (do inglês *Asymmetric Digital Subscriber Line*), ADSL2 [5] (do inglês *Asymmetric Digital Subscriber Line Transceivers 2*), ADSL2+ [6] (do inglês *Asymmetric Digital Subscriber Line extended bandwidth*), VDSL [7] (do inglês *Very High Speed Digital Subscriber Line*) e VDSL2 [8] (do inglês *Very High Speed Digital Subscriber Line transceivers 2*). A padronização e

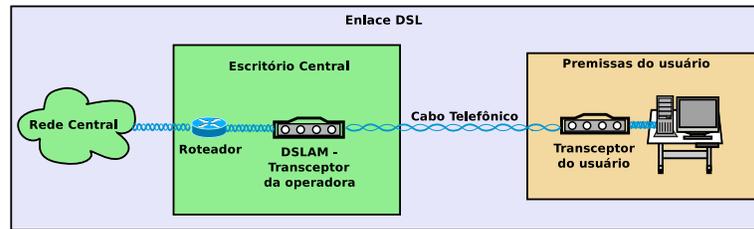


Figura 1.3: Arquitetura de um enlace DSL comum.

desenvolvimento dessas tecnologias são realizados principalmente pelo grupo ETSI TM6 (*European Telecommunications Standards Institute - Transmission and Multiplexing*), comitê ANSI (*American National Standards Institute*) e pelo grupo ITU-T 15/Question 4. A Tabela 1.1 mostra as principais tecnologias assim como a documentação de padronização de cada uma.

Tabela 1.1: Principais tecnologias DSL e os documentos de padronização.

Serviço	Padrão
ADSL	ITU-T G.992.1, ANSI T1.413 Issue 2
ADSL2	ITU-T G.992.3
ADSL2+	ITU-T G.992.5
VDSL	ITU-T G.993.1
VDSL2	ITU-T G.993.2

1.2 Modelagem do sistema DSL

Para este trabalho é assumido um modelo simplificado dos sistemas DSL. Assume-se que o sistema pode ser modelado como um *binder*¹ com N usuários.

A técnica de modulação utilizada pelo DSL é chamada de modulação discreta por tom (do inglês DMT - *Discrete multi-tone*), onde o espectro de transmissão é particionado em vários subcanais (ou tons) paralelos e independentes de banda estreita [9]. A Figura 1.4 ilustra o DMT. O espectro de transmissão é particionado em vários tons. Cada tom pode transmitir um número diferentes de bits. Adicionalmente é levado em consideração que cada usuário opera sobre um par trançado com K subcanais (tons) paralelos, livre de interferência

¹Um *binder* é um conjunto de pares trançados dentro de um cabo telefônico.

intersimbólica [9]. A alocação de bits para um usuário u no tom k pode ser modelada como descrito na Equação 1.1,

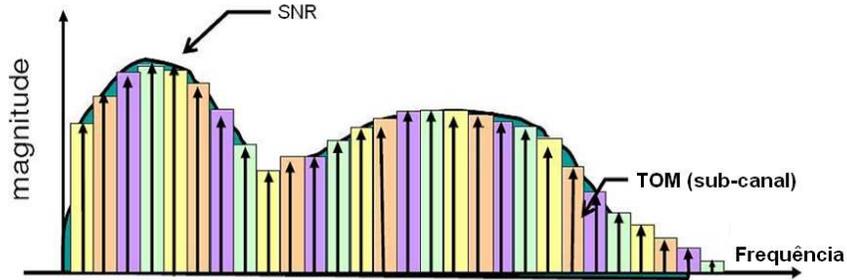


Figura 1.4: Modulação DMT. É possível notar que o espectro de transmissão é dividido em vários tons independentes para transmissão.

$$b_u^k = \log_2 \left(1 + \frac{SNR_u^k}{\tilde{\gamma}\Gamma} \right), \quad (1.1)$$

onde:

- b_u^k é o número de *bits* alocados para um usuário u no tom k .
- SNR_u^k é a razão sinal-ruído (do inglês SNR - *Signal to noise ratio*) para um usuário u no tom k . Quanto maior a SNR , mais bits poderão ser alocados para a transmissão, pois maior será a capacidade do subcanal.
- $\tilde{\gamma}$ é a margem de ruído desejada para o sistema. Pode se definir a margem de ruído como: quanto a SNR pode ser degradada sem que os modems precisem refazer a alocação de *bits* [10].
- Γ Denota o *gap* da razão sinal ruído, que é uma função da taxa de erro de *bits* (BER) desejada, tipicamente 10^{-7} . O *gap* é um indicador de quão próximo a taxa de *bits* está em relação à capacidade teórica do canal. [9].

A SNR_u^k para um usuário u no tom k é definida conforme a Equação 1.2,

$$SNR_u^k = \frac{s_u^k |h_{u,u}^k|^2}{\left(\sigma_u^k + \sum_{v \neq u} s_v^k |h_{u,v}^k|^2 \right)}, \quad (1.2)$$

onde:

- s_u^k denota a potência alocada para o usuário u no tom k .
- $|h_{u,u}^k|^2$ denota o quadrado da magnitude do ganho do canal direto para o usuário u no tom k .
- σ_u^k representa a potência do ruído de fundo para um usuário u no tom k .
- $|h_{u,v}^k|^2$ denota o quadrado da magnitude do canal de FEXT (ruído de *crosstalk*)² do transmissor v para o receptor u no tom k .

A Equação 1.1 é de grande importância para os sistemas DSL, uma vez que várias técnicas para melhoria da transmissão, buscam a otimização de alguns dos parâmetros dessa equação (margem de ruído, *bits* por tom, potência, etc.) de acordo com algumas restrições (como potência máxima de transmissão, taxa de bits máxima, etc.).

É importante observar, que as técnicas de otimização dos sistemas DSL devem considerar as condições do ambiente de transmissão (como tipos de interferências internas e externas). Para isso, alguns conceitos sobre as principais fontes de ruídos nos sistemas DSL são necessários.

1.3 Fontes de interferência e ruído

Existem várias fontes de ruídos que podem afetar os sistemas DSL. Esses distúrbios podem ser classificados como *limitante de capacidade* ou *limitante de qualidade* conforme [11].

Os ruídos limitantes de capacidade (taxa de bits por segundo), como o *crosstalk* e ruído térmico, geralmente são mais fáceis de serem previstos uma vez que na maioria dos casos variam pouco com o tempo, permitindo dessa forma, que seu impacto possa ser reduzido [12]. Já os ruídos que limitam a qualidade (taxa de erros de bits) são distúrbios geralmente intermitentes e difíceis de prever, tornado-se difícil sua mitigação. O ruído impulsivo é um exemplo dessa classe, podendo ser causado por diferentes fontes como descargas elétricas, cercas eletrificadas, acionamento de motores, lâmpadas fluorescentes, etc.

²O termo *crosstalk* será mais bem explicado na Seção 1.3.1.

1.3.1 O *Crosstalk*

O *crosstalk* (ou diafonia) ocorre devido ao acoplamento magnético proveniente de condutores no mesmo *binder*, sendo a principal fonte de ruído degradante da capacidade dos sistemas DSL [9].

Existem dois tipos de *crosstalk*: o *near-end crosstalk* (NEXT) e o *far-end crosstalk* (FEXT) como mostra a Figura 1.5. O NEXT é a interferência proveniente da reflexão do sinal transmitido em um usuário ao lado (“*near-end*”, afetando sua recepção. Enquanto que o FEXT afeta a recepção de um usuário no lado oposto da linha (*far-end*).

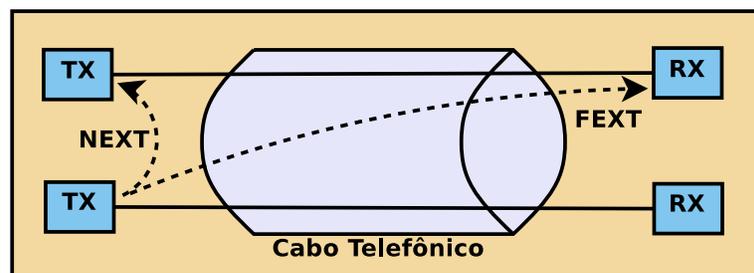


Figura 1.5: Tipos the *crosstalk*.

A interferência causada pelo NEXT em relação ao FEXT é bem maior, uma vez que no caso do FEXT o sinal sofre atenuação antes de atingir o usuário da outra ponta. Para mitigar o NEXT, as tecnologias DSL atuais utilizam técnicas de duplexação por divisão de frequência (FDD - *Frequency Division Duplex*). Já a interferência causada pelo FEXT é tida como a principal fonte de *crosstalk* nos sistemas DSL. Uma das maneiras de diminuir o efeito do *crosstalk* nas linhas DSL é através de técnicas conhecidas como Gerenciamento Dinâmico de Espectro (do inglês DSM - *Dynamic Spectrum Management*) que será mais detalhado na próxima seção.

1.4 Gerenciamento Dinâmico de Espectro - DSM

O DSM pode ser definido como um conjunto de técnicas para processamento conjunto de sinais de transmissão (ou coordenação do espectro de transmissão) [13], cujo objetivo principal é a mitigação do *crosstalk* existente em redes de acesso DSL.

Para isso, o controle feito pelo DSM basicamente ajusta o espectro de transmissão de cada usuário da rede de acordo com o nível de ruído do canal. Por exemplo, se um usuário tiver muito ruído na linha, então uma solução DSM seria, aumentar a potência de transmissão

desse usuário, enquanto que para um outro usuário com pouco ruído na linha, a solução DSM poderia reduzir a potência de transmissão.

Existem vários algoritmos DSM na literatura, porém alguns merecem destaque, como mostrado na Tabela 1.2. Esses algoritmos geram como solução um conjunto de máscaras de transmissão para cada usuário. Entende-se por máscara de transmissão a Densidade Espectral de Potência (do inglês PSD - *Power Spectral Density*) de transmissão. Dessa forma, esse trabalho considera que os algoritmos DSM têm como solução um conjunto de PSDs de transmissão, sendo uma para cada usuário.

Tabela 1.2: Principais algoritmos DSM da literatura.

Nome - Sigla	Referências
Iterative Water-Filling (IWF)	[14]
Optimal Spectrum Balancing (OSB)	[15, 16]
Iterative Spectrum Balancing (ISB)	[17]
Successive Convex Approximation for Low-complExity (SCALE)	[18]
Successive Convex Approximation for Water-Filling (SCAWF)	[18]
Autonomous Spectrum Balancing (ASB)	[19]
Semi-Blind Spectrum Balancing (2SB)	[20]

1.5 Motivação

Como introduzido anteriormente, o desempenho das comunicações sobre DSL é severamente limitado pelas interferências de *crossstalk* provenientes de pares trançados adjacentes dividindo o mesmo cabo. Por essa razão, o *crossstalk* é considerado como um dos principais obstáculos para o alcance de um melhor desempenho da rede DSL [9].

O DSM surgiu como uma promissora solução para o combate do *crossstalk*. Em torno das técnicas DSM, pode-se destacar algoritmos de maximização de taxa, explorado em *e.g.* [14, 16–18, 20, 21], ou ainda algoritmos para a minimização da potência transmitida, os quais são foco de alguns trabalhos recentes [1, 22–25]. A implementação dos algoritmos de DSM propostos envolvem alguns desafios. Primeiro, a maioria dos algoritmos DSM propostos assumem que as informações do canal de *crossstalk* estão disponíveis (uma exceção é o algoritmo “Iterative Waterfilling” - IWF [14]). Outra característica da maioria dos algoritmos de DSM é que eles não levam em consideração a implementação da camada física ou as limitações práticas

impostas pelos hardwares existentes. Por exemplo, os modems disponíveis comercialmente não podem mudar suas PSDs enquanto estão transmitindo dados (no estado de *showtime* [5]). Também, as informações de canal de *crosstalk* não estão prontamente disponíveis, e a realização de medidas em campo é impraticável e de alto custo. Dessa maneira, trabalhos recentes têm como foco o problema de estimação de canal de *crosstalk* [26,27] e seu impacto no desempenho prático do DSM [28].

Além disso, embora as PSDs não possam ser alteradas no estado de *showtime*, existe um conjunto de parâmetros padronizados chamados de *transmitter spectrum shaping* (*tss*), os quais aceitam que a PSD seja formatada em modems que implementam o padrão ADSL2 [5] e outros mais recentes, como ADSL2+ [6] e VDSL2 [8]. Usando esses parâmetros, é possível definir uma máscara limite de PSD, a qual os modems não podem exceder enquanto estiverem transmitindo. Porém é importante notar que a máscara de PSD só pode ser atualizada quando a linha de interesse estiver desativada (no estado C-IDLE [5]).

Outro problema envolvido nas implementações de DSM enquanto usando os modems de prateleira é que as soluções dos algoritmos DSM consideram a flexibilidade de escolher os valores de PSD para todos os subcanais (ou tons) do DMT. Por exemplo, assumindo o ADSL2+, uma solução DSM para *downstream*³ especifica valores de PSD para 479 tons. Esse é um problema quando se está utilizando modems comerciais, porque, de acordo com os padrões [5,6], só é possível configurar o máximo de $N = 32$ valores de PSD, o qual são interpolados [6] para definir uma máscara limite de PSD.

Neste cenário, de acordo com o conhecimento do autor, não há trabalhos anteriores considerando o mencionado problema de mapeamento para os equipamentos de prateleira.

1.6 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Proposta de um método de otimização baseado em Algoritmos Genéticos para traduzir as máscaras de PSD calculadas pelos algoritmos de balanceamento de espectro para os padrões existentes de parâmetros (*transmitter spectrum shaping*) existentes nos equipamentos atuais;

³Existem duas direções para transmissão. Uma é o *upstream* que se refere a transmissão de dados do usuário para o escritório central. E a outra é o *downstream* que se refere a transmissão de dados no sentido escritório central para o usuário (foco deste trabalho).

- Fazer uma análise estatística do método proposto utilizando medidas de média, desvio padrão e intervalo de confiança;
- Utilizar o método proposto em equipamentos reais em laboratório.

1.7 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é feita uma introdução sobre Algoritmos Genéticos. São explicados seus conceitos, funcionalidades, parâmetros e quais elementos foram utilizados nesta dissertação.
- No Capítulo 3 é descrito o método proposto, assim como uma descrição detalhada do problema para o qual o método foi desenvolvido. Além disso, são discutidas outras possíveis soluções para o problema em questão.
- No Capítulo 4 são mostrados os resultados do trabalho o qual, incluem: resultados simulados, análise estatística do método e as práticas laboratoriais realizadas.
- No Capítulo 5 são mostradas as conclusões do trabalho desenvolvido assim como as propostas para trabalhos futuros e as publicações do autor no período de desenvolvimento da dissertação.

Capítulo 2

Algoritmo genético - AG

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos básicos sobre algoritmos genéticos (AG). As seções seguintes descreverão o conceito básico de um AG assim como seus principais elementos, tais como população de indivíduos, *fitness*, mecanismos de seleção, operadores genéticos e parâmetros de controle.

2.1 Conceito

Os algoritmos genéticos (AGs) são algoritmos de busca e otimização baseados na analogia com os processos de seleção natural. Nas últimas décadas, eles tem sido usados extensivamente como ferramentas de busca e otimização para vários domínios de problemas, como ciência, comércio e engenharia. Isso se deve principalmente a sua larga aplicabilidade, facilidade de uso e perspectiva global [29].

Segundo Holland, um dos precursores no desenvolvimento dos AGs em meados dos anos 70 [30], pode-se sumarizar as etapas de um algoritmo genético simples na forma de fluxograma, como mostrado na Figura 2.1, o qual possui os seguintes componentes:

- População de indivíduos
- *Fitness*
- Operadores genéticos (*crossover* e mutação)
- Mecanismo de seleção e
- Parâmetros de controle

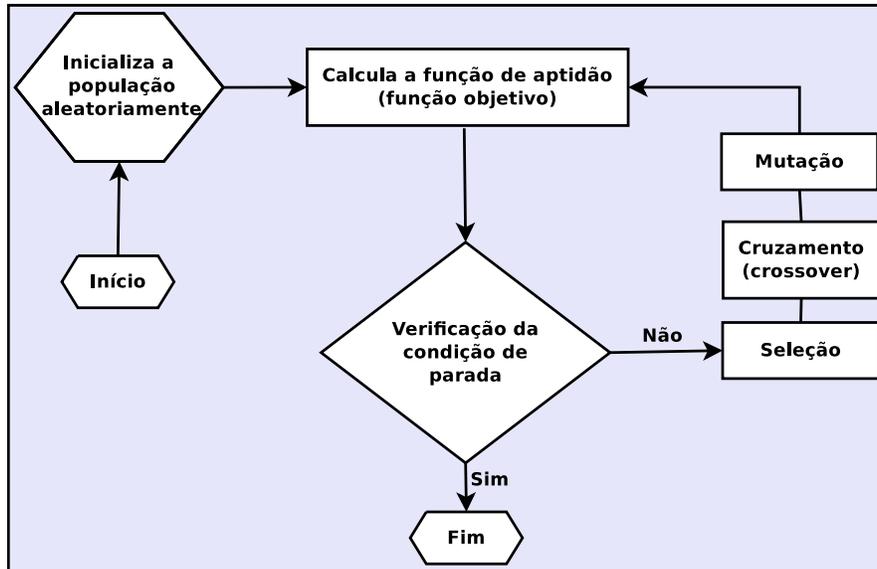


Figura 2.1: Etapas de um AG simples.

Diferentemente de outros métodos clássicos de busca e otimização, os AGs começam sua busca com um conjunto randômico de soluções, ao invés de uma só solução, conforme ilustra a Figura 2.1, adaptada de [31]. O princípio de funcionamento de um AG, consiste em um procedimento onde diferentes cromossomos (variáveis a uma solução candidata para o problema de otimização) de uma determinada população são avaliados de acordo com certo critério de desempenho (mais conhecido como “critério de *fitness*”), com o objetivo de solucionar um problema de otimização. Indivíduos da população com os melhores valores de *fitness* tendem a ficar para as próximas gerações.

Com a informação dos indivíduos mais aptos de uma população em mãos, são geradas populações mais aptas através do processo de seleção. Nesse ponto, operadores de cruzamento (*crossover*) e mutação são utilizados para manter a diversidade da população. Seguindo o fluxograma, o processo de geração de novas populações é repetido iterativamente até que um determinado critério de parada seja alcançado. Dentre os critérios de parada usuais podemos destacar: atingir um número de gerações ou avaliações, convergência do processo de otimização (sem melhora significativa na solução durante um dado número de gerações) e perda de diversidade (populações com indivíduos muito semelhantes).

2.2 Principais elementos

Esta seção descreve os elementos de um AG, onde são mostrados os principais conceitos relacionados à população de indivíduos, *fitness*, mecanismos de seleção, operadores genéticos (*crossover* e mutação) e parâmetros de controle dos AGs.

2.2.1 População de indivíduos

A menor unidade de um algoritmo genético, assim como na genética natural, é um gene. Um conjunto de genes forma um cromossomo. Podemos pensar nos cromossomos como as características principais que determinam a sobrevivência de um indivíduo num ambiente competitivo. Para um conjunto de indivíduos damos o nome de população.

Pensando nos AGs, os indivíduos representam cada possível solução para o problema a ser solucionado, o qual é geralmente formado por várias variáveis. Dessa forma, um elemento fundamental na estrutura dos AGs são os mecanismos de codificação usados para representação de tais indivíduos. Dependendo do problema, podem-se modelar as variáveis assumindo valores: contínuos (reais), binários, *Strings* e outros [32].

As formas de representação dos indivíduos mais comumente utilizadas em AGs são as codificações binárias e reais. Na primeira, para representar os indivíduos do AG, são utilizados conjuntos de valores binários, 0's e 1's. Essa codificação é ideal para problemas com variáveis discretas. No caso em que as variáveis são contínuas, uma conversão será necessária. Dependendo do número de bits usados para representar cada parâmetro que se deseja otimizar, o processo de conversão pode ser complexo. Com um grande número de bits é aumentada a precisão das respostas dadas pelo AG, porém o processo de conversão se torna mais complexo e, conseqüentemente, lento para processar [33]. Por outro lado, a codificação real utiliza valores reais para representar os parâmetros do AG (sem processo de conversão). Algumas vantagens da codificação real em relação à codificação binária podem ser destacadas em [34].

Existe ainda um terceiro tipo de representação dos indivíduos de um AG, trata-se da codificação por inteiros. Essa pode ser entendida como uma forma simplificada de codificação, onde cada indivíduo é diretamente relacionado a um número inteiro. Dependendo do problema o qual se deseja solucionar, esse tipo de codificação pode ser ideal. Um exemplo clássico do uso desse tipo de codificação é no problema do caixeiro viajante, onde cada possível solução é representada como um itinerário de cidades (representada cada uma por um inteiro) [31].

Neste trabalho será utilizada a codificação por inteiros dada a natureza do problema, onde cada indivíduo será representado por um vetor de inteiros, com genes podendo assumir

valores no intervalo de 0 à K , ordenados de forma crescente com N elementos, onde K será o limite de tons da tecnologia utilizada e N o número de elementos desejados para determinado indivíduo (descrito no Capítulo 3).

2.2.2 Grau de aptidão - *fitness*

Os AGs consideram populações de soluções aleatórias. Para avaliar tais soluções, torna-se necessário uma métrica de aptidão de cada solução em relação à função objetivo e restrições do problema o qual se deseja otimizar. O grau de aptidão ou *fitness* de uma determinada solução candidata de um AG pode ser entendido como essa métrica de avaliação [31].

O *fitness* das soluções é utilizado em conjunto com o processo de seleção para determinar os indivíduos mais aptos para as próximas gerações. É de suma importância escolher corretamente a função de avaliação que determina o *fitness* das soluções candidatas. Geralmente a própria função objetivo conjuntamente com as restrições determina essa métrica, porém, isso depende também da codificação utilizada no AG [31].

2.2.3 Mecanismos de seleção

A seleção é o processo no qual os indivíduos com os melhores valores de *fitness*, possuem a maior probabilidade de gerar um ou mais descendente para a geração seguinte. O objetivo primário desse processo, é permitir que boas soluções sejam escolhidas e eliminar soluções de baixa aptidão, geralmente mantendo o tamanho da população constante [31,34]. É importante perceber que indivíduos com baixa aptidão tem uma pequena chance de serem selecionados também, porém com uma pequena probabilidade. Isso permite que o material genético dos indivíduos com menor *fitness* ainda possa ser mantido na população para manter a diversidade das soluções.

A seleção é realizada através dos seguintes passos:

1. Identificar boas soluções da população;
2. Realizar múltiplas cópias das soluções mais aptas (com alto *fitness*) e
3. Eliminar soluções de baixo *fitness*, permitindo que várias cópias das boas soluções possam ser inseridas na população.

Após esses passos, as melhores soluções serão armazenadas em uma lista de soluções, a qual será utilizada nas operações de *crossover* e mutação.

Existem vários mecanismos de seleção para determinar os indivíduos mais aptos de determinada população, dentre eles podemos destacar: a seleção por *ranking*, por torneio, por reprodução proporcional e por genitor. Um estudo comparativo desses 4 tipos de seleção pode ser encontrado em [35]. Neste trabalho foi utilizada a seleção por torneio, detalhada a seguir.

2.2.3.1 Seleção por torneio

A seleção por torneio foi inicialmente analisada nos anos 80 [36], porém seu uso se tornou comum até os dias atuais. De forma simples, a ideia é escolher um número aleatório de indivíduos de uma população, selecionar o melhor indivíduo deste grupo para processamento genético, e repetir esse procedimento quando desejado, até que os operadores genéticos estejam completos [37], ou seja, a lista de soluções esteja completamente cheia.

Embora o processo de seleção por torneio possa ser feito com vários indivíduos ao mesmo tempo, é usual realizá-lo em pares. Um torneio é jogado entre as duas possíveis soluções, de forma que o indivíduo com maior *fitness* tem a maior probabilidade de ser adicionado à lista de soluções. Após isso, os indivíduos são recolocados na população. O processo de torneio pode ser repetido (inclusive com a mesma solução) até que seja determinada a lista de soluções somente com os indivíduos ganhadores. Tais indivíduos irão compor a nova população que irá participar do processo de *crossover* (explicado na Seção 2.2.4.1), eliminando os menos aptos. É importante notar que indivíduos com um baixo *fitness* também podem ganhar os torneios. Isso acontece porque tais indivíduos podem conter bons genes para uma possível solução e devem ser mantidos na população.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de como a seleção de indivíduos para a lista de soluções é feita através do processo de torneio. Neste exemplo, são considerados 6 possíveis indivíduos de um AG qualquer com o respectivo valor de *fitness*. Tais indivíduos participam vários torneios realizados aos pares. É interessante perceber que o mesmo indivíduo pode participar mais de uma vez. Os ganhadores de cada par irão compor a lista de soluções (ao meio na figura), sendo que os menos aptos serão eliminados da nova população. Após esse procedimento, os indivíduos da lista de soluções passarão pelos processos de *crossover* e mutação, para formar uma nova população do AG.

Em termos de cálculo de complexidade de tempo, podemos considerar que o processo de seleção por torneio é simples. Uma vez que a comparação entre os vários indivíduos pode ser realizada em um tempo constante, e n competições são necessárias para completar

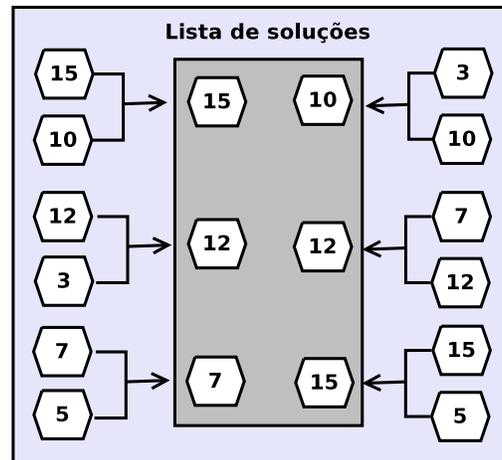


Figura 2.2: Seleção por torneio entre 6 indivíduos aleatórios de um AG. Note que somente os indivíduos com maior *fitness* irão compor a lista de soluções, posteriormente usada no *crossover* e mutação para a formação de uma nova população.

uma geração, a complexidade da seleção por torneio é $O(n)$ [37]. É importante também mencionar que esse tipo de seleção é particularmente fácil de implementar paralelamente, quando comparado aos outros métodos [38].

2.2.4 Operadores Genéticos

Os principais operadores genéticos são o cruzamento (*crossover*) e a mutação. Ambos são responsáveis pela criação de novas soluções do AG para as próximas gerações [31].

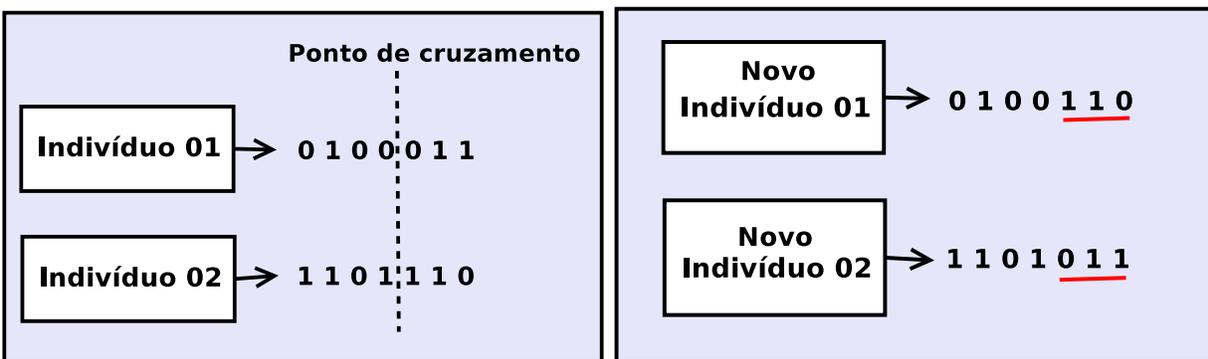
2.2.4.1 *Crossover*

Após a seleção dos indivíduos (realizada pelo mecanismo de seleção), os mesmos são recombinados através do operador de *crossover*. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população, baseados no *fitness* e seleção, e novos indivíduos são criados a partir da transmissão de material genético. Os resultados serão novos indivíduos diferentes dos pais, porém com características genéticas de ambos.

Existem vários tipos de operadores de *crossover* na literatura [39], porém em quase todos existe a troca de porções genéticas de dois indivíduos, para a formação de outros dois novos indivíduos. Um tipo clássico de operação de *crossover* é o chamado *crossover* de ponto único. Nesse caso, essa operação é feita através da escolha aleatória de um ponto do vetor que

forma o indivíduo, a partir do qual se trocam todos os genes da parte direita dos indivíduos participantes da operação [31].

Neste trabalho, o método proposto pelo autor utilizará o *crossover* de ponto único. Para entender melhor esse procedimento consideremos como exemplo a Figura 2.3. Nessa Figura temos dois indivíduos de determinado AG com a representação binária. Na parte “a” temos o valor inicial de cada indivíduo, sendo a linha pontilhada o ponto de *crossover* escolhido aleatoriamente. Na parte “b” temos o valor de cada indivíduo após a operação de *crossover*. É possível notar que os indivíduos em ‘b’ são diferentes dos em “a”, porém mantendo características dos seus pais.



(a) Antes do *Crossover*.

(b) Depois do *Crossover*.

Figura 2.3: *Crossover* de ponto único entre dois indivíduos aleatórios codificados binariamente. A linha pontilhada na figura em “a” mostra o ponto de troca. Em “b” são mostrados os novos indivíduos da população com as porções genéticas cruzadas.

2.2.4.2 *Mutação*

O operador de mutação é utilizado para inserir diversidade na população. A mutação é um operador genético exploratório, que tem por objetivo aumentar a diversidade na população inserindo genes aleatórios em alguns indivíduos. Tal operador impede que o algoritmo tenha convergência muito rápida, evitando sua estabilização em regiões de mínimos locais [31, 34].

A probabilidade de mutação p_m é responsável por controlar o processo de mutação em um AG, sendo aplicada a cada gene de um cromossomo, determinando se o gene será ou não modificado. Esse parâmetro será detalhado na Seção 2.2.5.

Para exemplificar o processo de mutação, podemos considerar a Figura 2.4. Nela temos um determinado indivíduo de uma população codificado na forma de inteiros (cada gene é um número inteiro). A Figura em “a” mostra o indivíduo antes da mutação, assim como o gene

2.2.5.1 Tamanho da população

O tamanho da população estabelece o número de indivíduos (cromossomos) de uma população. Este parâmetro afeta diretamente a eficiência e o desempenho do AG. Uma população grande oferece uma maior cobertura de domínio do problema e evita que o algoritmo tenha convergência prematura para soluções locais. Entretanto, trabalhar com grandes populações acarreta numa necessidade maior de recursos computacionais e consumo de tempo maior. Por outro lado, trabalhar com populações com poucos indivíduos torna o AG rápido, mas correndo o risco de convergir prematuramente e não atingir o resultado esperado.

Na literatura, trabalhos que mostram diferentes desempenhos de AGs trabalham com diferentes tamanhos de populações indo a valores comuns no intervalo de $[20 - 100]$ indivíduos. Dependendo do problema e de como os outros parâmetros são ajustados, o tamanho da população influenciará diferentemente no resultado do AG [38].

2.2.5.2 Taxa de *crossover*

A taxa de *crossover* ou probabilidade de cruzamento, afeta na rapidez com que os indivíduos ficam “parecidos”. Quanto maior a taxa de *crossover*, mais rápido novas possíveis soluções aparecerão na população (menos “parecidos”). No entanto, se essa taxa for muito alta, a maior parte da população será substituída, e indivíduos com alto *fitness* poderão ser perdidos. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

O valor ótimo desse parâmetro pode depender do problema que se está otimizando e da fase de execução do AG. Geralmente, a configuração da taxa de *crossover* é definida antes da execução do AG e mantida constante ao longo das gerações, porém algumas implementações usam métodos dinâmicos para ajuste desse parâmetro [34], mudando seu valor ao longo da execução do algoritmo. Valores comuns dessa taxa encontrados na literatura estão no intervalo de $[0.5 - 0.9]$ [31, 38].

2.2.5.3 Taxa de mutação

A taxa de mutação ou probabilidade de mutação é responsável por determinar a taxa em que uma mutação ocorrerá na população. A mutação evita a estagnação da população em uma mesma informação genética. Com valores altos da taxa de mutação, a busca genética tende a se transformar em uma busca aleatória, aumentando a possibilidade de uma boa solução ser perdida. Porém com valores muito baixos, a possibilidade de novos indivíduos com alto *fitness* serem introduzidos na população diminuem [32, 34].

O valor ideal da taxa de mutação depende do problema que se deseja solucionar, porém valores comuns encontrados na literatura variam de $[0.1 - 0.01]$ [31, 32, 34].

2.3 Resumo do Capítulo

Esse capítulo descreveu os Algoritmos Genéticos. Seu conceito foi mostrado, assim como uma descrição do seu processo de funcionamento. Após isso, seus principais componentes foram descritos, dentre os quais estão a população de indivíduos, *fitness*, mecanismos de seleção com ênfase no processo de seleção por torneio, operadores genéticos de *crossover* e mutação.

Esse capítulo finalizou com uma descrição dos parâmetros de controle como tamanho da população, taxa de *crossover* e taxa de mutação e suas influências na execução do AG.

No próximo capítulo tem-se a descrição do método proposto pelo autor para a imposição de PSDs em modems comerciais.

Capítulo 3

Técnica para imposição de máscaras de PSDs em modems DSL

Este capítulo descreverá a técnica proposta para a imposição de PSDs arbitrárias provenientes das soluções dos algoritmos DSM utilizando algoritmos genéticos.

Nesse capítulo é feita uma descrição do problema para qual o método foi proposto como solução; seguindo, algumas soluções possíveis para o problema são descritas; e finalmente, a solução proposta é detalhada.

3.1 Descrição do problema

Dado uma PSD calculada por algoritmos de balanceamento de espectro para transmissão de dados no sentido *downstream*, o problema de interesse é mapear essa PSD arbitrária em parâmetros que possam ser entendidos pelo transmissor. Os padrões ADSL2 e ADSL2+ também provêem métodos para mapeamento das PSDs em transmissão de *upstream*, porém esses métodos tem aplicabilidade limitada uma vez que a banda de frequência para *upstream* é estreita comparada à de *downstream* (o termo assimétrico reflete esse fato). O transmissor para *downstream* é parte integrante do equipamento DSLAM, que é alocado tipicamente na central de trabalho (como descrito no Capítulo 1, Figura 1.3). Para análise do trabalho em questão serão considerados transmissores ADSL2+, entretanto os resultados e conclusões podem ser estendidos para outras tecnologias DSL, como por exemplo, VDSL2.

Em [6] é apresentado um mecanismo para ajustar a máscara das PSDs em *downstream* através de um conjunto de N *breakpoints*, onde cada *breakpoint* consiste em uma subportadora

(subcanal) de índice t e um nível de máscara de PSD naquela subportadora. O conjunto de *breakpoints* pode ser representado como uma matriz \mathbf{B} na forma:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} t_1 & \text{PSD}_1 \\ t_2 & \text{PSD}_2 \\ \vdots & \vdots \\ t_N & \text{PSD}_N \end{bmatrix}^T, \quad (3.1)$$

onde $t_n < t_{n+1}$ e $\text{PSD}_n \in [0 - 127, 5]$ (expressados em dBm/Hz, discretizados em passos de 0,5 dBm/Hz). A constante N é dependente da implementação dos vendedores e não deve exceder $N = 32$.

Considerando $\mathbf{S}_{\text{target}} = \{s_1^{\text{target}}, s_2^{\text{target}}, \dots, s_K^{\text{target}}\}$ como a PSD alvo com k tons, calculados por algum algoritmo de balanceamento de espectro para uma linha específica. Nosso objetivo é representar $\mathbf{S}_{\text{target}}$ usando um conjunto reduzido de \mathbf{B} com N tons, onde $N \ll K$.

O conjunto \mathbf{B} é interpolado através de regras especificadas nos padrões DSL com intuito de definir uma máscara de PSD $\mathbf{S}_{\text{BP}} = \{s_1^{\text{BP}}, s_2^{\text{BP}}, \dots, s_K^{\text{BP}}\}$ abrangendo todo o plano de frequência de transmissão. Por isso, é necessário encontrar os *breakpoints* mais apropriados (t_n, PSD_n) . Assumindo que PSD_n pode ser determinado como o valor mais aproximado de $s_{t_n}^{\text{target}}$ (*Ex.* $\text{PSD}_n \simeq s_{t_n}^{\text{target}}$), o problema se converte em achar portadoras apropriadas t_n . Consequentemente, o conjunto \mathbf{S}_{BP} pode ser determinado por:

$$\mathbf{S}_{\text{BP}} = F(t_1 \cdots t_N), \quad (3.2)$$

onde $F(t_1 \cdots t_N)$ é a função de interpolação [6].

Matematicamente, esse problema pode ser descrito como

$$\{t_1^* \cdots t_N^*\} = \arg \min_{t_1 \cdots t_N} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (s_k^{\text{target}} - s_k^{\text{BP}})^2}, \quad (3.3)$$

onde $\{t_1^* \cdots t_N^*\}$ é o conjunto ótimo de *breakpoints*.

A função objetivo em (3.3) mede a distorção espectral entre a PSD alvo (proveniente dos algoritmos de balanceamento de espectro) e a PSD interpolada (usando o conjunto de *breakpoints*).

A Figura 3.1 ilustra como a escolha das portadoras t_n são importantes para reproduzir corretamente a solução DSM nos equipamentos DSL. Essa figura mostra que um *breakpoint* colocado no lugar errado pode acarretar a uma substancial distorção na máscara da PSD.

Considerando, por exemplo, os *breakpoints* em torno de 80 e 100 da linha pontilhada, podemos perceber que após os mesmos serem interpolados linearmente, existe uma grande diferença em relação a linha cheia do mesmo trecho. O ideal seria que ambas as linhas estivessem sobrepostas, uma vez que o desejado é impor no modem exatamente a mesma PSD do resultado do DSM. Nesse caso, a linha pontilhada tem uma distorção substancial quanto à azul, ocasionando numa quantidade errada de potência alocada nos tons afetados pelo erro e uma transmissão incorreta da quantidade de bits. Isso é indesejado pelas operadoras, uma vez que elas desejam controlar a taxa de bits de seus clientes.

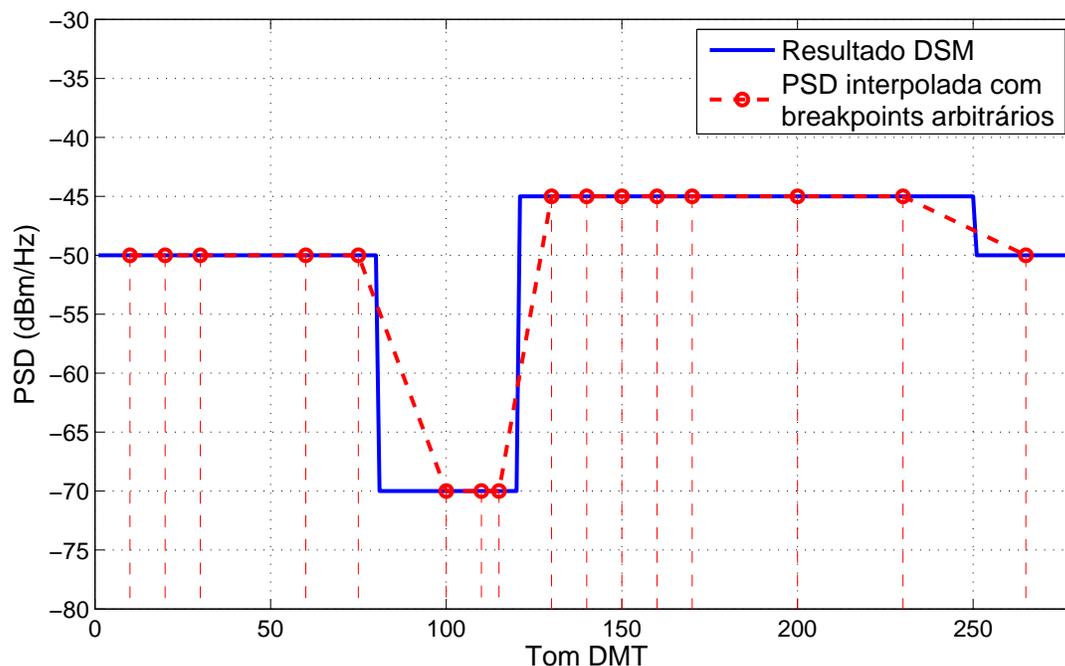


Figura 3.1: Representação do problema a ser resolvido. A curva sólida representa a saída de um algoritmo DSM. A linha pontilhada representa a PSD que resulta da interpolação de *breakpoints* escolhidos arbitrariamente (marcadores vermelhos). É importante perceber que a colocação errada dos *breakpoints* em torno dos tons 100 e 250 podem causar distorção espectral levando a resultados subótimos no caso em que esses *breakpoints* serem impostos em *hardwares* DSL comerciais.

3.1.1 Soluções possíveis

Entre as soluções possíveis para o problema estão: força bruta e espaçamento igual de amostras, as quais serão detalhadas nas próximas seções.

3.1.1.1 Força Bruta

Uma possível solução para o problema proposto é usando a força bruta, embora essa solução seja fácil de implementar, ela é impraticável devido ao alto tempo computacional gasto. Considerando a tecnologia ADSL2+ na transmissão no sentido de *downstream* ($K = 479$) e assumindo $N = 16$ (um valor comum em DSLAMs comerciais), o número de soluções candidatas para serem testadas usando a busca por força bruta é:

$$\binom{K}{N} = \frac{K!}{N!(K-N)!} \approx 4,8725 \times 10^{53}. \quad (3.4)$$

A complexidade computacional em tempo da solução por força bruta sugere o uso de métodos subótimos. Devido à subotimalidade, é importante avaliar o desempenho desses métodos em termos da distorção espectral de acordo com (3.3).

3.1.1.2 Espaçamento igual de amostras

Com o objetivo de comparar o método proposto com um patamar, um método simples foi adotado para reduzir os tons de *downstream* ADSL2+ ($K = 479$) para $N = 16$ *breakpoints*. A aproximação foi chamada de Espaçamentos Iguais de Amostras (EIA). Esse método escolhe N *breakpoints* igualmente espaçados do eixo das abscissas (tons), considerando que todos os valores no eixo das ordenadas (valores de PSD) são conhecidos. Os seguintes passos descrevem o procedimento usado no método EIA:

1. Achar o passo (S') no eixo das abscissas entre os *breakpoints*:

$$S' = \text{round}\left(\frac{K}{N}\right).$$

2. Adquirir N pontos na abscissa com o S' calculado.
3. Adquirir o valor das ordenadas associado com cada valor das abscissas achadas e criar um *breakpoint*.
4. Interpolar os *breakpoint*.

A função *round* no passo 1 aproxima o resultado do seu argumento para o inteiro mais próximo. A seguir, os valores no eixo das abscissas são associados com os respectivos valores do eixo das ordenadas para formar um *breakpoint*. Finalizando, os *breakpoints* achados são então interpolados linearmente para criar uma máscara de PSD.

3.2 Solução proposta

A solução proposta para o problema descrito na Seção 3.1, consiste de um método evolucionário baseado em algoritmo genético codificado em inteiros como descrito a seguir.

3.2.1 Modelo do AG adotado

A solução proposta realiza uma busca por conjuntos de *breakpoints*, que minimizam a distorção espectral (erro) entre uma dada máscara de PSD (alvo) e uma PSD gerada pela interpolação linear do conjunto de *breakpoints* candidatos à solução. Utilizou-se a interpolação linear, pois os equipamentos comerciais para o qual se destina o método utilizam um tipo de interpolação muito próximo ao linear [6]. Nesses equipamentos não há como escolher o tipo de interpolação a ser usada, por isso a interpolação linear foi utilizada no método proposto.

Os cromossomos para a solução baseada no AG são definidos como um vetor de genes com valores inteiros (P_i) ordenados de forma crescente (vide descrição do problema na Seção 3.1), os quais representam os tons (eixo das abscissas) $[t_1, t_2, \dots, t_n]$ onde os *breakpoints* deveriam ser colocados. O indivíduo i^{th} de uma população P é então definido como:

$$P_i = [t_1, t_2, \dots, t_n],$$

onde o valor de cada gene t é um inteiro no intervalo de $[0 - K]$. O cromossomo P_i possui N genes. Nesse trabalho adotou-se $N = 16$, e K depende da tecnologia utilizada. Utilizou-se a tecnologia ADSL2+, logo $K = 479$. Alguns possíveis indivíduos da população seriam:

$$P_1 = [13, 16, 45, 50, 56, 67, 89, 90, 112, 124, 150, 155, 189, 200, 250, 300],$$

$$P_2 = [18, 19, 56, 60, 79, 97, 109, 110, 117, 125, 150, 158, 202, 250, 302, 401],$$

$$P_3 = [48, 58, 76, 91, 109, 134, 190, 210, 219, 243, 290, 331, 366, 400, 420, 455].$$

A função de escolha usada, a qual indicará o *fitness*, para definir os melhores indivíduos candidatos a solução do problema é definida em (3.3). A Figura 3.2 ilustra o fluxograma para

chegar ao valor de *fitness* dos indivíduos onde, após os possíveis candidatos serem escolhidos, os mesmos são arredondados para valores válidos da solução (0,5 dBm/Hz). O próximo passo é interpolar os valores de cada solução. Feito isso, calcula-se o erro quadrático médio da solução de acordo com a PSD alvo (solução) desejada. O último passo é escolher os indivíduos mais aptos (aqueles com menor erro).

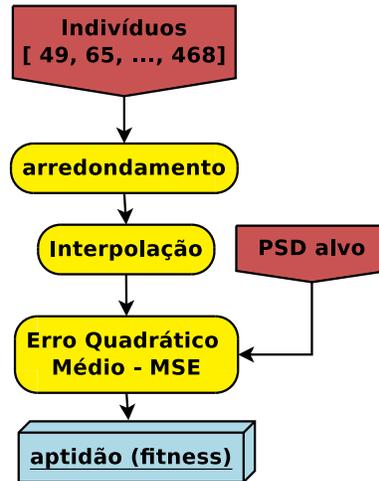


Figura 3.2: Passos para achar o Fitness de cada indivíduo.

A Figura 3.3 ilustra a execução de uma única geração no algoritmo. Primeiro a população é submetida a seleção, onde os melhores elementos, através da função de *fitness*, são preservados. Para selecionar somente um número reduzido dos melhores indivíduos, um operador de torneio é utilizado (como descrito na Seção 2.2.3). A seguir, um operador de *crossover* é responsável por combinar alguns dos cromossomos criando novos indivíduos. O *crossover* é executado randomicamente trocando a porção dos cromossomos pais. Como os cromossomos são representados por um vetor de inteiros, uma porção desse vetor é trocada entre ambos os cromossomos pais, um procedimento que é geralmente utilizado nos AGs codificados binariamente, chamado *crossover* de ponto único (Seção 2.2.4).

Finalizando, com uma pequena probabilidade, o operador de mutação é executado, pegando indivíduos da população e inserindo inteiros randômicos nos seus cromossomos, de forma a garantir a diversidade da população. Esses passos são repetidos até o número máximo de gerações ser alcançado.

Como saída do algoritmo, temos os *breakpoints* que, uma vez interpolados linearmente, irão representar melhor a forma da máscara de PSD que se deseja impor nos equipamentos.

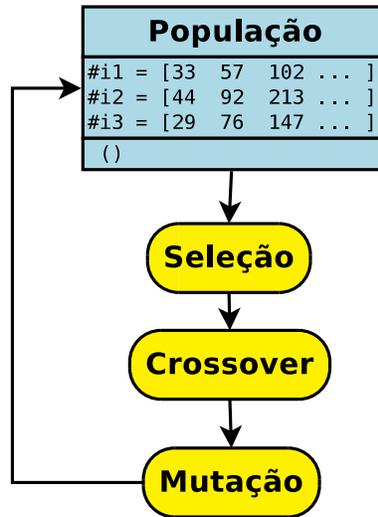


Figura 3.3: Passos de execução da busca do *breakpoint* do algoritmo genético. A execução é finalizada quando o número máximo de gerações for alcançado.

3.3 Resumo do Capítulo

Este capítulo descreveu o método proposto para a imposição de PSDs em modems comerciais. O capítulo iniciou com a descrição do problema; seguindo de algumas possíveis soluções como força bruta e método de espaçamento igual de amostras; finalmente, a solução proposta foi descrita. Nessa descrição, mostrou-se a modelagem do AG, incluindo a codificação da população e cálculo do *fitness*.

O próximo capítulo ilustrará os resultados obtidos com o método proposto.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados simulados e práticos utilizando o método proposto no capítulo anterior, assim como um estudo estatístico do mesmo. Além disso, é realizada uma comparação com o método EIA (Seção 3.1.1.2) com o objetivo de se obter uma referência.

O capítulo está dividido da seguinte forma: primeiro, na Seção 4.1 são mostradas as simulações e comparações incluindo o método proposto e o EIA; segundo, na Seção 4.2 é feita uma análise estatística do método proposto; e terceiro, os resultados práticos em laboratório são mostrados e analisados na Seção 4.3.

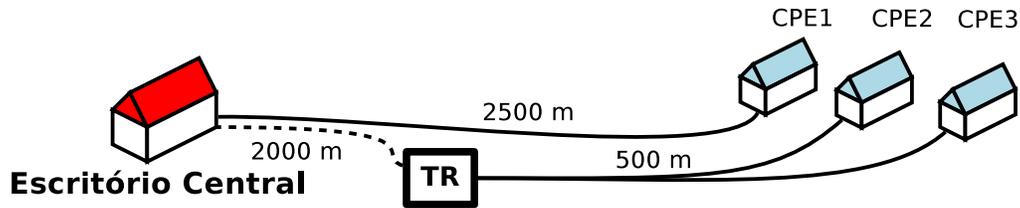
4.1 Resultados simulados

Foram realizadas simulações utilizando o método AG proposto e método EIA, descrito na Seção 3.1.1.2. Para mostrar os resultados comparativos, foram usadas a distribuição de frequência relativa e a distribuição de frequência acumulada da distorção espectral média por tom de cada método.

4.1.1 Metodologia utilizada

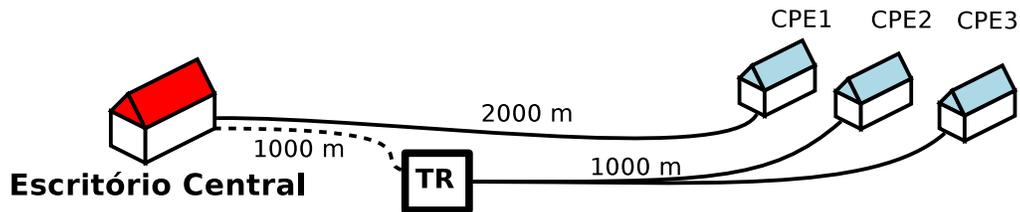
Para realizar os testes simulados, consideraram-se dois cenários típicos do DSL descritos nas Figuras 4.1 e 4.2, os quais consistem basicamente de linhas utilizando a tecnologia ADSL2+ em diferentes tamanhos, com ocorrência de *crosstalk* entre elas (conhecido como *near-far access network*). No primeiro cenário da Figura 4.1 temos três usuários, sendo dois conectados diretamente ao escritório central e um conectado à um terminal remoto (TR), que por sua vez

está conectado ao escritório central. O usuário 1 (CPE1 - *customer premisses equipment*) está distante 2500 m do escritório central, enquanto que os outros dois usuários (CPE2 e CPE3) estão distantes apenas 500 m do terminal remoto ¹. Notar ainda que os últimos 500 m de todos usuários compartilham o mesmo cabo, existindo *Crosstalk* entre eles. O segundo cenário da Figura 4.2 é parecido com o primeiro, alterando somente as distâncias usuário/escritório central, usuário/terminal remoto, e terminal remoto/escritório central, para 2000 m, 1000 m e 1000 m, respectivamente.



(a) Cenário 1

Figura 4.1: Cenário 1 para gerar as PSDs alvo utilizado nas simulações. Contém três linhas, com 2500 m (CPE1) e 500 m (CPE2 e CPE3), sendo duas delas (CPE2 e CPE3) conectadas ao Terminal Remoto e uma (CPE1) conectada diretamente com o escritório central.



(a) Cenário 2

Figura 4.2: Cenário 2 para gerar as PSDs alvo utilizado nas simulações. Contém três linhas, com 2000 m(CPE1) e 1000 m(CPE2 e CPE3), sendo duas delas (CPE2 e CPE3) conectadas ao Terminal Remoto e uma (CPE1) conectada com o escritório central.

Os cenários foram simulados considerando os modelos de pior caso para as funções de transferência direta e de *Crosstalk*. Tendo em mãos as funções de transferência calculadas segundo os modelos, foram realizadas otimizações utilizando os algoritmos DSM SCALE [18] e ISB [17, 40] para obtenção das novas PSDs para serem impostas nos modems ². O interesse deste trabalho está focado apenas nas soluções dos algoritmos DSM (PSDs resultantes).

¹Considera-se que o terminal remoto está conectado ao escritório central através de uma fibra ótica

²As simulações foram realizadas com um *framework* proprietário chamado jDSLsim desenvolvido na

Um conjunto totalizando 720 diferentes PSDs foi gerado a partir das simulações com os algoritmos DSM. Para isso, cada cenário foi simulado com 60 diferentes conjuntos de prioridade para as linhas (para maiores informações em [17, 18, 40]). Como temos 2 cenários simulados, usando 2 algoritmos DSM cada e com 3 linhas em cada cenário, temos $2 \times 2 \times 3 \times 60 = 720$ diferentes soluções (PSDs).

Com o conjunto de PSDs para teste em mãos, ou o conjunto de PSDs alvo o qual queremos moldar usando os métodos, comparou-se o desempenho dos métodos proposto e EIA em relação à distorção espectral.

4.1.2 Comparações com outros métodos

Esta seção descreverá os resultados alcançados para a comparação do método proposto com o método EIA (Espaçamento Igual de Amostras - Seção 3.1.1.2). Os resultados são analisados através da distribuição de frequência relativa e distribuição de frequência acumulada de ambos os métodos, utilizando a distorção espectral média por tom como figura de mérito. Adicionalmente, é realizada uma comparação visual entre as soluções.

4.1.2.1 Distribuição de frequência relativa

A distribuição de frequência relativa (ou histograma normalizado) de um determinado grupo de amostras pode ser encontrada da seguinte forma [41]:

- Determina-se o maior e menor número dos dados brutos e, após isso, calcula-se a diferença entre o maior e o menor daqueles números (amplitude total).
- Divide-se a amplitude total em um número conveniente de intervalos com a mesma amplitude.
- Determina-se o número de observações que estão dentro de cada intervalo de classe, ou seja, calculam-se as frequências de classe.
- Divide-se cada classe achada pelo total de dados, achando-se a frequência relativa de cada classe.

Universidade Federal do Pará, laboratório LaPS (maiores informações em <http://www.laps.ufpa.br>) em parceria com a empresa ERICSSON. Este simulador DSL é também o responsável pelo cálculo das PSDs utilizando os algoritmos DSM, e o uso do mesmo ou de como funciona está fora do escopo deste trabalho.

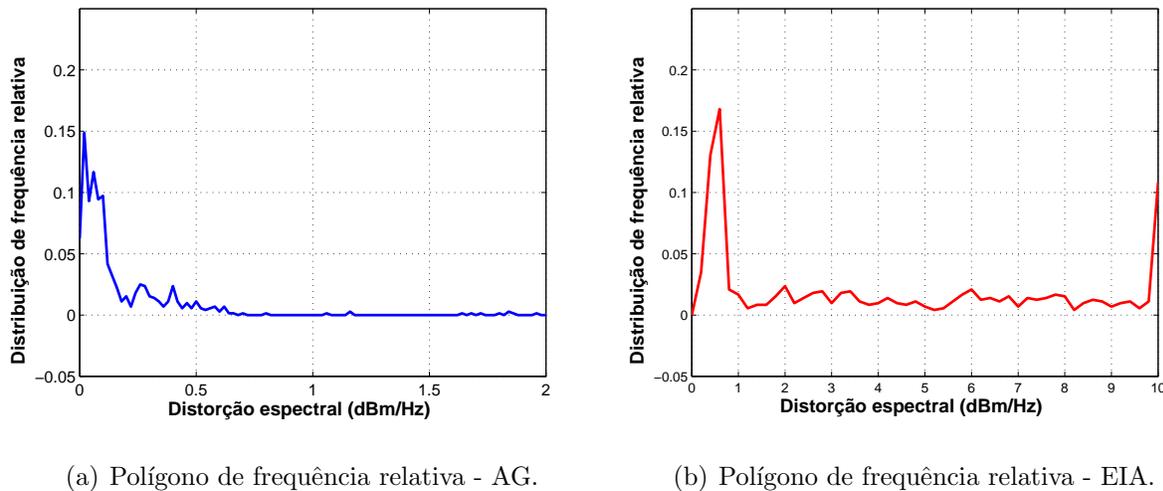


Figura 4.3: Polígono de frequência relativa para ambos os métodos. O método proposto (a) manteve a maior porção de frequência relativa do erro abaixo de 0,5 dBm/Hz (em torno de 95% dos casos). Já o método EIA concorrente (b) obteve uma variação considerável, mantendo valores altos para 0,5 dBm/Hz de erro e valores acima de 10 dBm/Hz (o pico final a direita da figura “b”). É importante notar as diferentes escalas utilizadas no eixo das abscissas para melhor mostrar os resultados obtidos.

A representação gráfica da distribuição de frequência relativa pode ser denominada como polígono de frequência relativa. A Figura 4.3 ilustra esse polígono para ambos os métodos testados utilizando o mesmo conjunto de PSDs gerado na Seção 4.1.1. De acordo com essa figura, os resultados se mostraram satisfatórios para o método proposto, uma vez que a maior porção de frequência relativa para o erro, cerca de 95% está abaixo de 0,5 dBm/Hz. Para o método EIA houve uma variação considerável do erro, inclusive para valores acima de 0,5 dBm/Hz, o qual acarreta em um problema prático no uso do método em equipamentos reais.

4.1.2.2 Distribuição de frequência acumulada relativa

Outra forma de apresentar os resultados é através da distribuição de frequência acumulada relativa ou ogiva percentual, o qual fornece uma visão mais global dos resultados obtidos para ambos os métodos. As ogivas percentuais medem a frequência total de todos os valores inferiores ao limite superior de um dado intervalo de classe relativo [41].

A representação gráfica das ogivas percentuais para ambos os métodos é mostrado na Figura 4.4. Esse resultado indica que, para 95% das PSDs testadas, o método AG apresentou

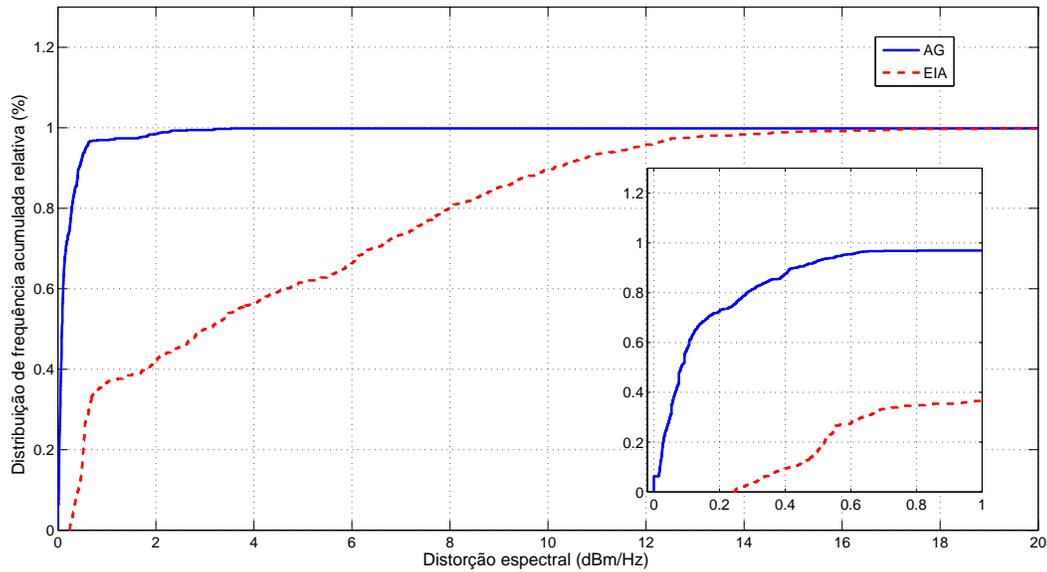


Figura 4.4: Comparação das ogivas percentuais para os métodos AG e EIA sobre o mesmo conjunto de testes. É importante notar que na maioria dos casos a distorção espectral média por tom para o AG é mantida tão baixa quanto 0,5 dBm/Hz. Para o método EIA, em comparação, o desempenho pode ser considerado baixo. Apenas 20% das PSDs alvo apresentaram um erro em torno de 0,5 dBm/Hz.

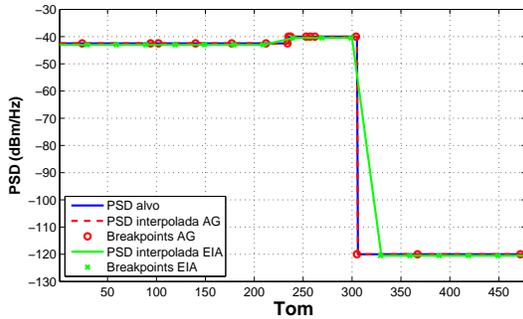
uma distorção espectral média por tom menor que 0,5 dBm/Hz. É importante notar que, como indicado na Seção 3.1, os *breakpoints* só podem assumir valores discretos em passos de 0,5 dBm/Hz, o que torna o erro quase desprezível em comparação com o método EIA. Utilizando o mesmo ponto de comparação, em somente 20% dos casos o erro para o método EIA foi menor que 0,5 dBm/Hz.

A média de todas as medidas de distorção espectral por tom (média da distorção espectral por tom pelo número de PSDs testado) para ambos os métodos são os seguintes: a abordagem baseada em AG alcançou 0,2 dBm/Hz, enquanto que a EIA alcançou 4,27 dBm/Hz, uma diferença considerável em favor da abordagem evolutiva.

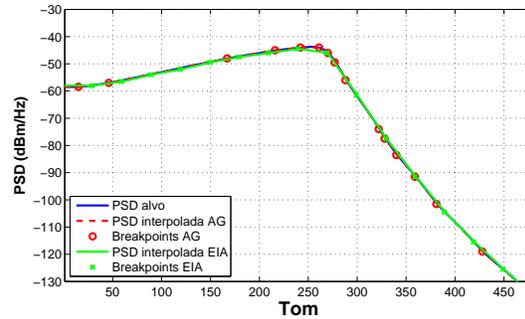
4.1.2.3 Correspondência entre os métodos

A Figura 4.5 ilustra exemplos de PSDs alvo e suas correspondentes aproximações pela escolha de *breakpoints*, obtidos por ambos os métodos: AG e EIA. É possível notar que as PSDs encontradas pelo método AG são bem próximas das PSDs alvo, enquanto

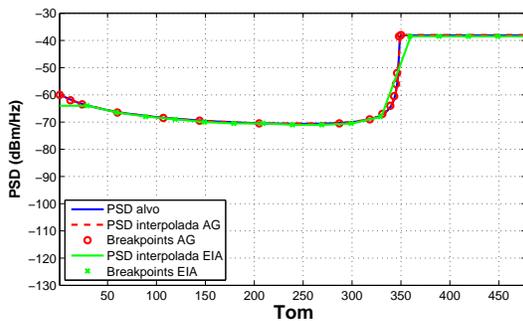
que o método EIA claramente não é robusto o suficiente para lidar com transições de nível acentuadas nas PSDs, levando a uma distorção espectral substancial (exemplos PSD 1 e PSD 4). Os pontos representam os *breakpoints* de cada método. Para o método AG os *breakpoints* estão distribuídos aleatoriamente, enquanto que para o método EIA, eles estão distribuídos igualmente espaçados. Em ambos os métodos a interpolação dos *breakpoints* é linear (conforme Capítulo 3).



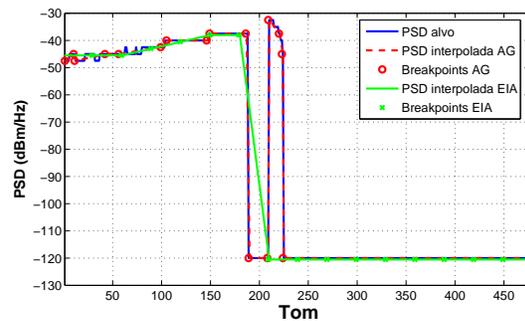
(a) Exemplo - PSD 1



(b) Exemplo - PSD 2.



(c) Exemplo - PSD 3.



(d) Exemplo - PSD 4.

Figura 4.5: Comparação visual das soluções do AG e EIA para PSDs selecionadas do conjunto de testes. É importante notar que quando a PSD apresentou transição acentuada (exemplo PSD 1 e PSD 4), o método AG proposto funcionou muito melhor que o método EIA.

4.2 Análise Estatística do método

Esta seção apresenta um estudo estatístico do método proposto. São calculadas a média e desvio padrão das soluções simuladas, além do intervalo de confiança para um conjunto de diferentes PSDs. As informações teóricas descritas neste capítulo foram retiradas de [41,42].

4.2.1 Metodologia utilizada

Para obtenção de uma análise estatística mais precisa, usou-se um grande conjunto de diferentes PSDs. Utilizou-se o mesmo conjunto de 720 PSDs, conforme a Seção 4.1.1 para os testes de média e desvio padrão, com 25 diferentes soluções do método para cada PSD.

A análise estatística através do intervalo de confiança considerou o critério dos 95% de confiança. Para o cálculo do mesmo, usou-se também 25 soluções do método AG para a PSD utilizada (aleatoriamente escolhida).

4.2.2 Média e desvio padrão das simulações

Considerando a população de 720 PSDs para o cálculo da média com 25 soluções para cada PSD, podemos pensar em várias médias populacionais.

Se pensarmos somente nos tons de cada PSD, teremos 25 soluções para cálculo da média. Matematicamente, a média por tom, dada em dBm/Hz pode ser simplesmente calculada através:

$$\mu_k = \frac{1}{M} \times \sum_{a=1}^M PSD_a^k, \quad (4.1)$$

onde μ_k corresponde á média no tom k , M é o número de soluções de diferentes PSDs levado em consideração, PSD_a^k é o nível em dBm/Hz da PSD da solução a no tom k . Adicionalmente, podemos pensar no cálculo da média por PSD. Para isso fazemos a média de todas as médias μ_k , através de:

$$\lambda_p = \frac{1}{L} \times \sum_{j=1}^L \mu_j, \quad (4.2)$$

onde λ_p é a média da PSD p , L é o número de tons e μ_j é o valor da média da PSD no tom j .

Para o calculo do desvio padrão precisamos do conceito de variância. A variância descreve o espalhamento de um conjunto de dados quadraticamente. De forma simples, podemos calcular a variância σ^2 como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{A} \times \sum_{a=1}^A (x_a - \mu)^2, \quad (4.3)$$

onde A é o número de soluções desejado, x_a é o valor da solução a e μ é o valor da média das soluções ao quadrado.

Com o valor da variância, o desvio padrão σ pode se calculado segundo:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \quad (4.4)$$

onde σ^2 é a variância da solução desejada.

Tendo esses conceitos, foram realizados os cálculos para um conjunto de PSDs aleatoriamente escolhidos entre as PSDs de teste, levando em consideração a média por tom, a média por PSD e o desvio padrão.

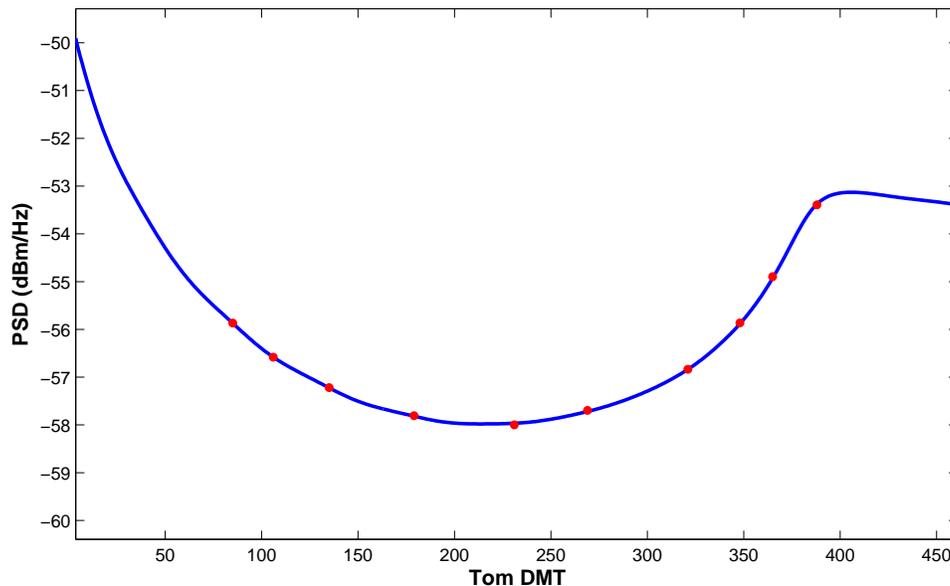


Figura 4.6: PSD escolhida aleatoriamente para o cálculo da média por tom. Os pontos vermelhos indicam os 10 diferentes *breakpoints* escolhidos para o cálculo estatístico.

No caso da média por tom, levaram-se em consideração 10 diferentes tons de uma PSDs aleatória a fim de se obter uma amostra diversa. Para a PSD escolhida, o método foi utilizado 25 vezes a fim de se obter uma quantidade de amostras razoável. O próximo passo foi interpolar as soluções obtidas pelo método, a fim de obter valores em todos os tons (479). Feito isso, escolheu-se os 10 tons para cálculo da média por tom. A Figura 4.6 ilustra a PSD escolhida, assim como os tons (em vermelho) de onde obteram-se os valores das médias. Os resultados estão expostos na Tabela 4.1, onde são mostradas as médias por tom calculadas para a PSD de teste, assim como o valor alvo do tom proveniente daquele tom (solução DSM).

Os resultados da Tabela 4.1 ilustram que o método proposto ficou bem próximo do ótimo para todos os casos de teste. No pior dos casos (tom 231), a diferença entre a média alcançada e o valor alvo foi de 0,0343.

Adicionalmente, calculou-se a média por PSD para 10 diferentes PSDs, a fim de se obter um resultado mais amplo do método. A Tabela 4.2 ilustra tais resultados, contendo

Tabela 4.1: Tabela com resultados das médias por tom para uma PSD e tons aleatórios.

Tom	Valor alvo (solução DSM) em dBm/Hz	Média encontrada (25 amostras) em dBm/Hz
85	-55,8714	-55,8672
106	-56,5793	-56,5826
135	-57,2241	-57,2200
179	-57,8173	-57,8067
231	-57,9657	-58,0000
269	-57,7180	-57,6944
321	-56,8372	-56,8340
348	-55,8815	-55,8645
365	-54,9263	-54,8970
388	-53,3756	-53,3913

as médias por PSD, assim como o valor alvo desejado (média da PSD alvo). Novamente, os resultados se mostram satisfatórios, uma vez que o valor da média do método proposto e da média alvo são bem próximos. O pior caso para a média por PSD foi para a PSD 3 que atingiu a diferença de 0,0699 em relação ao valor desejado.

O desvio padrão do método foi calculado da seguinte forma: primeiro foi escolhida uma PSD aleatória do conjunto de testes; segundo, calculou-se o desvio padrão para 10 tons aleatórios considerando 25 amostras de cada tom; finalmente calculou-se o desvio padrão médio de todos os tons para 10 diferentes PSDs.

No primeiro caso, a PSD escolhida, assim como os tons para análise, foi a mesma encontrada na Figura 4.6. Os resultados desta análise seguem na Tabela 4.3, onde o método proposto tem um bom desempenho, considerando os baixos valores de desvio padrão por tom. É possível notar que para o tom 231 o método alcançou o ótimo (zero) em relação ao desvio padrão. Nos outros casos, o valor do desvio padrão ficou próximo de zero, sendo um resultado satisfatório para o método proposto.

A Tabela 4.4 ilustra os resultados da segunda análise onde levou-se em consideração o desvio padrão médio de todos os tons, os resultados são mostrados na Tabela 4.4. Esta análise foi repetida para 10 PSDs diferentes. Novamente, podemos perceber que o desvio padrão médio encontra-se próximo a 0, significando que o espalhamento das amostras em relação à média foi baixo considerando intervalo de 0,5 dBm/Hz.

Tabela 4.2: Tabela com resultados das médias por PSD escolhidas aleatoriamente do conjunto de testes.

PSD	Valor médio alvo (solução DSM)	Média encontrada (25 amostras)
1	-55,6644	-55,6618
2	-59,3490	-59,3790
3	-129,4704	-129,5403
4	-67,8000	-67,7667
5	-109,9526	-109,9603
6	-92,7296	-92,7631
7	-63,4159	-63,4358
8	-78,5861	-78,6281
9	-89,2691	-89,3034
10	-73,0047	-73,0314

Tabela 4.3: Tabela com resultados do desvio padrão por tom. O resultado se mostra satisfatório uma vez que, os valores encontrados estão próximos de zero.

Tom	Desvio padrão para 25 amostras
85	0,0115
106	0,0081
135	0,0047
179	0,0088
231	0
269	0,0040
321	0,0150
348	0,0275
365	0,0219
388	0,0216

4.2.3 Intervalo de confiança do método proposto

Podemos definir matematicamente o intervalo de confiança por PSD como:

$$\bar{L}_k = \mu_k \pm z_c \times \frac{\sigma}{\sqrt{S}}, \quad (4.5)$$

Tabela 4.4: Tabela com resultados do desvio padrão para 10 PSDs escolhidas aleatoriamente do conjunto de testes. É possível notar o bom desempenho do método para todos os casos, com os valores do desvio padrão ficando em torno de zero.

PSD	Desvio padrão por PSD
1	0,0132
2	0,0438
3	0,0276
4	0,0190
5	0,0085
6	0,0183
7	0
8	0,0211
9	0,0168
10	0,0037

onde \overline{L}_k representa os limites de confiança para o tom k , que tem como média μ_k , desvio padrão σ e com um nível de confiança z_c . S é igual ao número de diferentes soluções calculadas pelo método proposto para a mesma PSD. Neste trabalho $S = 25$, ou seja, foram geradas 25 possíveis soluções para cada PSD. Além disso, levou-se em consideração o intervalo de confiança de 95%, utilizando $z_c = 1,96$ (valor comum na literatura) [42].

Os intervalos de confiança do método foram calculados utilizando os 25 conjuntos de 720 PSDs. Como exemplo do cálculo de um intervalo de confiança de uma PSD aleatória do conjunto das 720 PSDs, pode-se analisar a Figura 4.7. Essa figura leva em consideração a média dos valores da PSD por tom e o valor alvo que o método deveria atingir.

4.3 Resultados práticos

Depois de uma análise teórica através de simulações, esta seção descreverá alguns resultados práticos obtidos com equipamentos DSL comerciais não modificados. O principal objetivo é reproduzir uma solução de balanceamento de espectro completa (conjunto de PSDs) em *hardware*, focando no impacto do método AG proposto para busca dos *breakpoints* sobre uma medição da PSD transmitida, obtida de maneira *on-line* nos equipamentos.

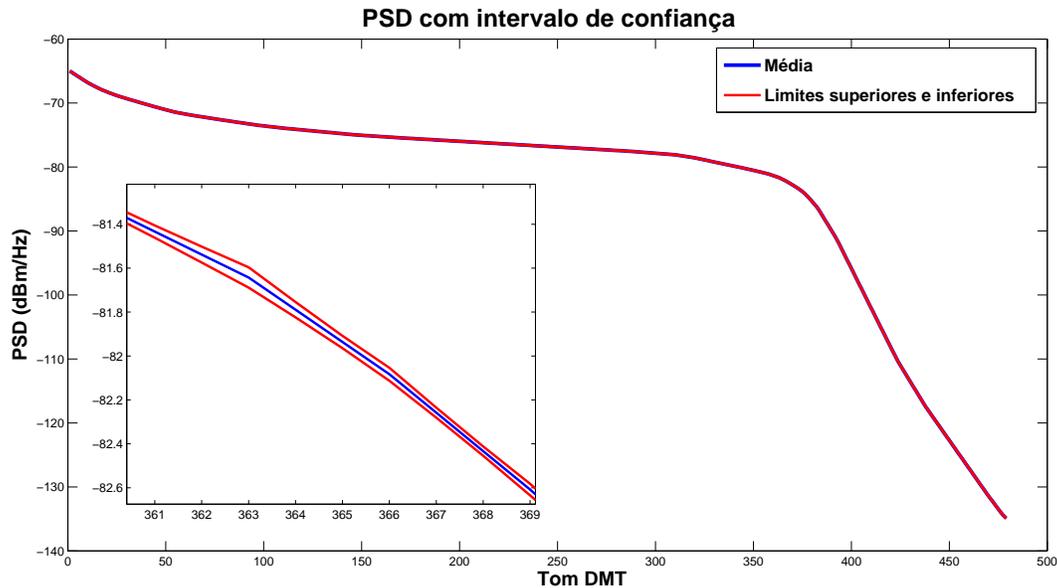


Figura 4.7: Intervalo de confiança de 95% para uma PSD escolhida aleatoriamente. Os resultados foram satisfatórios, uma vez que os intervalos superiores e inferiores foram respeitados pelo método proposto.

4.3.1 Metodologia utilizada

Para desenvolver os testes práticos, utilizou-se do seguinte cenário na Figura 4.8 que consiste de seis usuários ADSL2+ conectados ao escritório central diretamente (CPE 1, CPE 2, CPE 4 e CPE 6) ou através de terminais remotos (CPE 5 e CPE 3). Um esclarecimento importante é que as linhas foram dispostas da forma mais diversa possível para obtenção de um conjunto diverso de PSDs (soluções DSM). O algoritmo de balanceamento de espectro escolhido foi o SCALE.

Um fluxograma da otimização na prática do DSM é ilustrado na Figura 4.9. Inicialmente, é necessário prover informações de canal para os algoritmos de balanceamento de espectro. Na Seção 4.1 foram usados os modelos de função de transferência direta e de *crosstalk* de pior caso, mas na implantação prática do DSM é esperado que essa informação seja adquirida dos próprios cabos. Nesse caso, as funções diretas e de *crosstalk* foram medidas usando um analisador de redes³.

O experimento consistiu de uma otimização *off-line* das PSDs para cada linha usando

³O Apêndice A descreve o procedimento de medida das funções de transferência em laboratório.

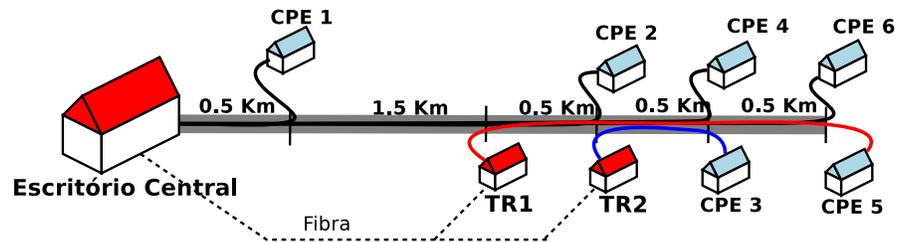


Figura 4.8: Topologia para aplicação prática de DSM em laboratório. Um cenário um tanto heterogêneo foi escolhido para proporcionar a diversidade das PSDs calculadas pelo algoritmo DSM de escolha.

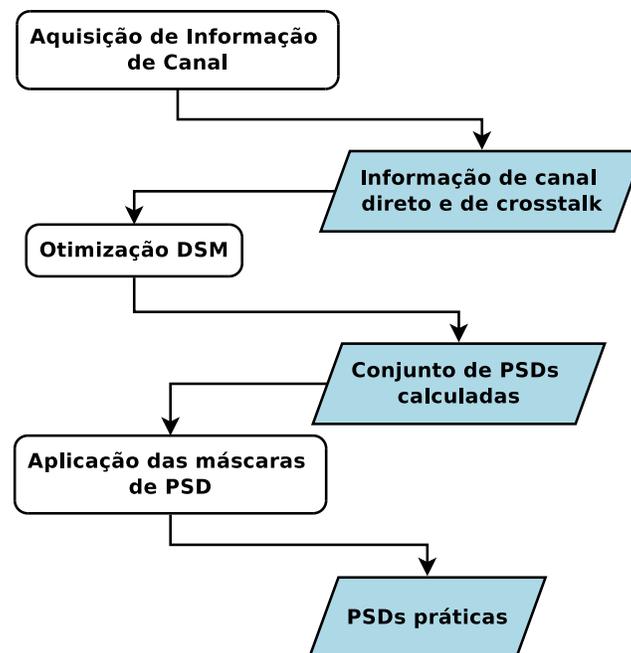


Figura 4.9: Fluxograma de otimização: passos principais para a otimização do espectro prática e seus respectivos resultados intermediários (nos blocos cinza).

o algoritmo SCALE ⁴. Essa otimização *off-line* foi responsável por calcular as PSDs alvo para serem impostas no *hardware* DSL. As PSDs calculadas foram então, alimentadas no método AG proposto, o qual buscou por *breakpoints* adequados, como descrito na Seção 3.2. Finalmente, os *breakpoints* resultantes foram configurados no DSLAM através de comandos SNMP (Simple network management protocol) e todos os transmissores foram ativados.

⁴Foi utilizado o mesmo *framework* jDSLsim para realização das otimizações na Seção 4.1, porém utilizando funções de transferências medidas.

Para comparar as máscaras de PSDs impostas e a atual máscara de PSDs de transmissão sendo utilizadas pelos transmissores, é necessário realizar medições das PSDs de transmissão, onde, o setup de medição é representado na Figura 4.10. Esse *setup* consiste dos seguintes equipamentos:

- Módulo de Potência e Controle de sonda Agilent 1142A
- Ponta de prova diferencial Agilent 1141A (com atenuador 100:1)
- Analisador de Rede/Espectro Agilent 4395A
- Transmissores comerciais não-modificados ADSL2+.

É importante esclarecer que a direção de transmissão de interesse é o *downstream* (escritório central/usuário). Além disso, todas as medições foram realizadas nos cabos no lado do DSLAM para minimizar os efeitos da atenuação do canal.

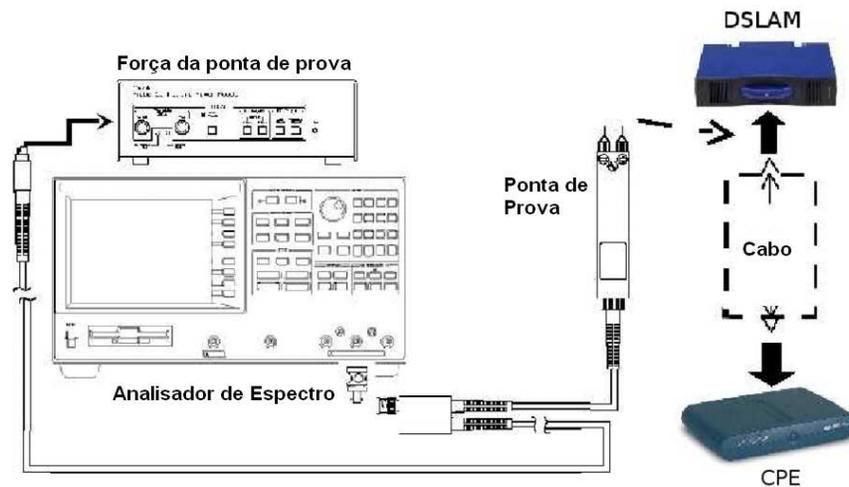


Figura 4.10: Setup de equipamentos utilizados para medir a PSD de transmissão usado por transceptores DSL comerciais. Notar que as medidas são feitas no lado da central (DSLAM).

4.3.2 Resultados das medições reais

Antes de serem mostrados os resultados, algumas considerações quanto ao ambiente prático devem ser feitas. A primeira está relacionada a faixa de tons de interesse. Uma vez que este trabalho considera somente o ADSL2+ em *downstream* (direção central / usuário),

os tons de transmissão de interesse serão de 33 – 479, pois de 1 – 32 são os tons de *upstream*. Outra consideração prática necessária é quanto ao nível de ruído considerado como ruído de *background* (ruído de fundo). Neste trabalho, qualquer valor de PSD abaixo de 80 dBm/Hz pode ser considerado como ruído de *background*. Adicionalmente, é necessário considerar que os equipamentos práticos não conseguem reproduzir com perfeição a correspondência da PSD imposta. Na prática “pequenas” distorções espectrais (em torno de 0 – 5 dB) e alguns “picos” no sinal de transmissão são aceitáveis, não comprometendo a transmissão.

A Figura 4.11 ilustra a comparação entre as PSDs impostas e medidas para cada linha no cenário experimental já descrito na Seção 4.3.1. Para todas as linhas, ambas as PSDs apresentaram bons resultados. A principal diferença ocorreu nas altas frequências e não está relacionada à escolha dos *breakpoints*, mas sim devido aos filtros de transmissão nos equipamentos DSL. Como explicado anteriormente, é importante notar que a correspondência entre o imposto e o real não é perfeita. Se pegarmos como exemplo a PSD do Link 2 da mesma figura, podemos perceber uma boa correspondência entre o imposto e medido. Na PSD do Link 3, é possível perceber claramente as considerações práticas quanto aos “picos” de potência no sinal transmitido próximos ao tom 80. Nessa mesma PSD, a principal diferença se encontra nas frequências mais elevadas devido aos filtros de transmissão. Nas PSDs dos Links 4,5 e 6 é possível notar o nível de ruído de *background* em torno de 85 dBm/Hz.

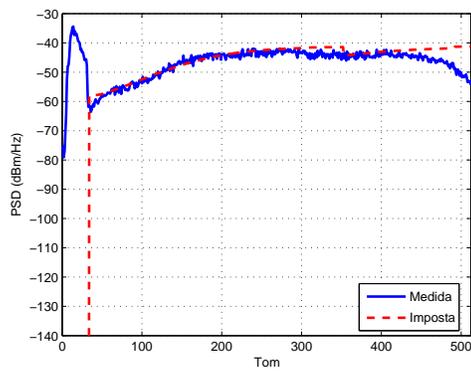
4.4 Resumo do Capítulo

Este capítulo mostrou os resultados alcançados pelo autor na dissertação quanto ao método AG proposto. Inicialmente foram realizadas simulações com o intuito de obter comparações entre o método proposto e o EIA (Seção 3.1.1.2). Essas comparações foram realizadas através da distribuição de frequência relativa e da distribuição de frequência acumulada tendo como figura de mérito a distorção espectral média por tom. No geral o método AG conseguiu valores de erro abaixo de 0,2 dBm/Hz, enquanto que o seu concorrente manteve próximo dos 5 dBm/Hz de erro.

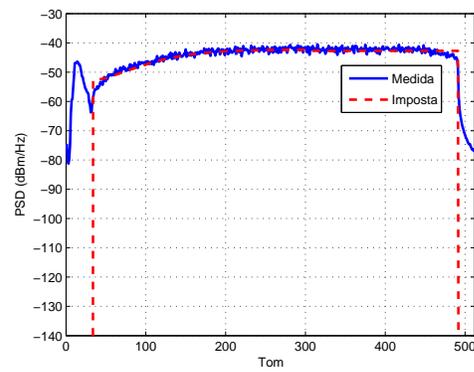
Os próximos resultados deste capítulo mostraram um estudo estatístico do método AG proposto. Tal estudo foi realizado através da média, desvio padrão e intervalo de confiança para um grande número de amostras. Novamente, os resultados mostraram-se satisfatórios, uma vez que os valores de média ficaram bem próximos do ideal, o desvio padrão ficou próximo de 0 e os intervalos de confiança respeitaram seus limites nos exemplos usados.

Finalmente, o capítulo mostrou os resultados práticos utilizando o método em laboratório. Utilizando um *setup* para a medição das PSDs de transmissão “on line” nos

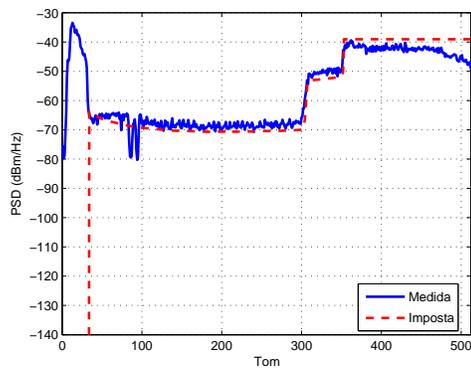
modems, foi possível visualizar os bons resultados alcançados pelo AG. Tais resultados mostraram que as soluções DSM foram bem representadas através da interpolação dos *breakpoints* achados pelo método proposto nos equipamentos reais.



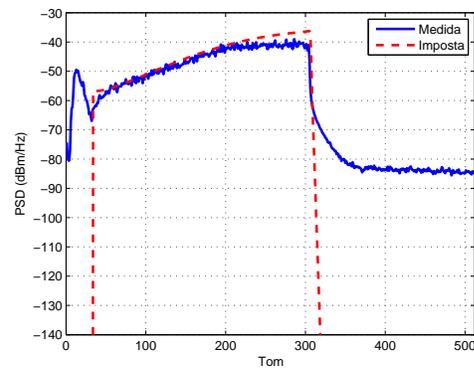
(a) Link 1.



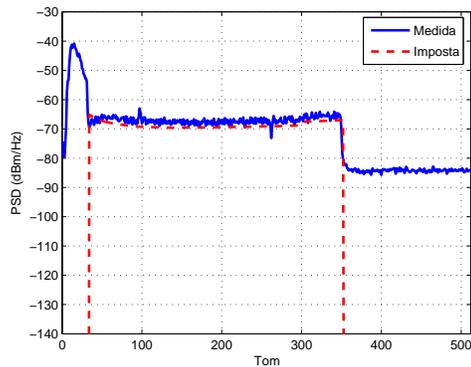
(b) Link 2.



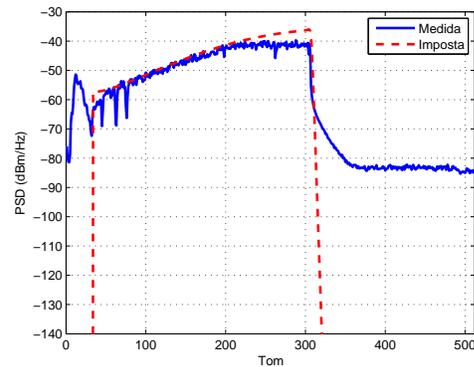
(c) Link 3.



(d) Link 4.



(e) Link 5.



(f) Link 6.

Figura 4.11: Comparação entre as PSDs medidas e as impostas. As linhas pontilhadas representam as PSDs que foram calculadas pela interpolação dos *breakpoints* providos pelo método AG proposto. As linhas cheias representam as PSDs de transmissão medidas através do *setup* experimental descrito anteriormente. Para todas as PSDs no caso de teste apresentado, a distorção espectral foi baixa. Nas altas frequências os filtros implementados nos equipamentos DSL são a causa da discrepância.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho apresentou um método baseado em algoritmos genéticos para o mapeamento de soluções DSM provenientes de algoritmos da literatura, para equipamentos comerciais. Foram descritos suas funcionalidades e aplicação em ambiente experimental com aplicação em equipamentos DSL comerciais.

Em resumo, o trabalho teve os seguintes resultados:

- Proposta de um método baseado em algoritmos genéticos para mapear as PSDs provenientes de soluções DSM para equipamentos (modems) comerciais. O método calcula os melhores *breakpoints* que, uma vez interpolados, possam representar a forma da PSD alvo. A função de *fitness* utilizada foi a distorção espectral média por tom, o qual calcula o erro quadrático médio entre os pontos da PSD alvo e da possível solução. O método proposto possibilitou o uso das soluções DSM em equipamentos de prateleira.
- Comparação do método proposto com outro método, aqui denominado espaçamento igual de amostras. Esta comparação permitiu analisar o desempenho do método em função do erro quadrático médio utilizando a distribuição de frequência relativa e distribuição de frequência acumulada relativa. O método proposto teve um comportamento superior ao seu concorrente, onde para o conjunto de testes apresentados aproximadamente 95% do erro quadrático médio manteve-se no intervalo abaixo de 0,5 dBm/Hz, um resultado animador, uma vez que os intervalos aceitos nos equipamentos são em passos de 0,5 dBm/Hz, o que torna o erro achado praticamente desprezível. Já o método de espaçamento igual de amostras apresentou um resultado

inferior, onde apenas 20% do erro quadrático médio estiveram abaixo de 0,5 dBm/Hz.

- Estudo estatístico do método proposto, onde foram calculadas a média, desvio padrão e intervalo de confiança para um grande conjunto de amostras de PSDs. Este estudo permitiu uma análise mais profunda, obtendo bons resultados para as análises feitas. O intervalo de confiança calculado foi de 95% e manteve-se dentro do esperado. A média e desvio padrão mostraram um comportamento estável para o método proposto, sem grandes variações.
- Criação de um *setup* experimental capaz de medir as PSDs em equipamentos reais. Este *setup* proporcionou o uso do método em equipamentos comerciais assim como permitiu medir as PSDs de transmissão dos modems. Os resultados mostraram que o método proposto conseguiu mapear de forma satisfatória as PSDs provenientes das soluções DSM para os equipamentos comerciais.

Finalmente é importante ressaltar que o método proposto neste trabalho conseguiu solucionar um problema comum geralmente encontrado em pesquisas: como tornar factível uma solução proveniente de pesquisas para equipamentos usados no cotidiano. Outro ponto importante deste trabalho foi o uso do método em equipamentos reais, provando assim sua concepção.

5.2 Trabalhos futuros

O trabalho apresentado abre a possibilidade para outros trabalhos futuros, como o ajuste de parâmetros do algoritmo genético utilizado, ou ainda a troca da função de *fitness*, descritos no Capítulo 3. Uma vez que, durante o desenvolvimento deste trabalho, não foram encontrados na literatura métodos concorrentes a este, é de suma importância o desenvolvimento de outras soluções para o problema.

Outra possibilidade de pesquisa é o uso de outros métodos de otimização que possam realizar a função que os algoritmos genéticos desempenharam nesta dissertação.

5.3 Contribuições

Como principais contribuições deste trabalho podemos listar:

- A principal contribuição desta dissertação foi a proposta de um método para mapear as PSDs provenientes das soluções DSM para equipamentos de prateleira. Esta contribuição

é de suma importância para aplicação do DSM na prática. A solução proposta já é usada em um *framework* desenvolvido para a empresa ERICSSON e gerou publicações em conferências internacionais como em [43, 44].

- Outra contribuição foi o *setup* para medição de PSDs em equipamentos de prateleira, o qual poderá ser aproveitado para outros trabalhos que envolvam estudos parecidos.
- Finalizando as contribuições, o Apêndice A mostra um *setup* para medição de funções de transferência em laboratório, podendo ser reutilizado.

Publicações do Autor no Período

- **“A Non-linear Optimization Method for Imposing Arbitrary PSDs to DSL Modems”**. Harney Abraham, Eduardo Medeiros, Marcio Monteiro, Aldebaro Klautau e Boris Dortschy. Em *8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS 2009*.

A thorough research in dynamic spectrum management (DSM) has been made during the last years in order to improve the performance of digital subscriber line (DSL) systems. This effort has resulted in many novel algorithms. Most of them require modifying the transmitted power spectrum densities (PSD) over the frequency range. To perform such changes, those algorithms assume a complete control of the PSDs over the tones. However, this is not true for the current deployed DSL equipments. Instead, only a limited control is permitted. The mapping between theoretical DSM solutions and the DSL equipment parameters is not trivial, but crucial for deploying DSM technology in current DSL networks. This paper presents a solution to this mapping problem that is based on genetic algorithms (GA). The GA is responsible for finding the fittest parameters that resembles an arbitrary PSD, under the restrictions imposed by current DSL standards and equipments. Simulation results and laboratory measurements with off-the-shelf modems are presented and demonstrate the technique achieves good results.

- **“DSM Performance on Practical DSL Systems Based on Estimated Crosstalk Channel Information”**. Eduardo Medeiros, Neiva Lindqvist, Marcio Monteiro, Harney Abraham, Fredrik Lindqvist, Boris Dortschy e Aldebaro Klautau. Em *17th European Signal Processing Conference - EUSIPCO 2009*.

This paper investigates practical aspects associated to the adoption of dynamic spectrum management (DSM) in existing digital subscriber lines (DSL) access networks. A standard-compliant crosstalk estimation method is utilized in order to retrieve the crosstalk channel information needed by, *e.g.*, a DSM level 2 system. A DSM application framework was developed to help testing DSM in practice and investigate the foreseen

gap between the DSM results obtained with simulations and practical achievable data rates. This framework is based on “off-the-shelf” DSL equipments and is responsible for coordinating and monitoring the test procedures via DSL standardized protocols. The work also discusses the discrepancies identified in laboratory experiments, associated to different sources of mismatch between simulations and practice.

- Guedes, G.; Abraham, H.; Gomes, A. C. S.; Klautau Jr, Aldebaro; Dortschy, Boris. “On de Dynamic Behavior of Margin in DSL: Procedures and Tools”. In: 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, 2008, Foz do Iguacu.

Triple-play services over digital subscriber lines (DSL) support voice, video and data, and demand high bit rates and line stability. The new standards ADSL2+ and VDSL2 are expected to play a significant role in this scenario. However, procedures for management of copper plants are important to properly deploy the new technologies. One of the most important parameter under the control of DSL network operators is the so-called noise *margin*. Currently, many DSL deployments adopt the same (relatively large) value of a target margin for all modems, which is highly suboptimal. But before being able to propose and evaluate new policies for dynamically adapting the margin, it is important to have procedures and simulation frameworks to estimate and control the margin. This work describes three approaches: laboratory procedures, querying DSL modems and using a time-domain simulator. The results indicate that the approaches are complementary and allow for efficiently evaluating the margin evolution under different scenarios and conditions.

Referências Bibliográficas

- [1] 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*.
- [2] S. Panigrahi, Y. Xu, and T. Le-Ngoc, “Multiuser margin optimization in digital subscriber line (DSL) channels,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, no. 8, pp. 1571–1580, Aug. 2006.
- [3] ITU-T, “Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers,” June 1999.
- [4] ANSI, “T1.413 - Network to customer installation interface - Asymmetric Digital Subscriber Lines (ADSL) Metallic Interface,” 2004.
- [5] ITU-T, “Asymmetric Digital Subscriber Line transceivers 2 (ADSL2).”
- [6] —, “Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers - Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2+).”
- [7] —, “Very high speed digital subscriber line transceivers,” June 2004.
- [8] —, “Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2),” February 2006.
- [9] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Prentice-Hall, 1999.
- [10] J. M. Cioffi, “A multicarrier prime,” 1991.
- [11] J. Cook, R. Kirkby, M. Booth, K. Foster, D. Clarke, and G. Young, “The noise and crosstalk environment for ADSL and VDSL systems,” *IEEE Commu. Mag.*, vol. 37, no. 5, pp. 73–78, May 1999.
- [12] T. Starr, M. Sorbara, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *DSL Advances*. Prentice-Hall, 2003.

-
- [13] 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.
- [14] W. Yu, G. Ginis, and J. M. Cioffi, “Distributed multiuser power control for digital subscriber lines,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 1105–15, June 2002.
- [15] R. Cendrillon, M. Moonen, W. Yu, J. Verlinden, and T. Bostoen, “Optimal spectrum management,” 2004.
- [16] R. Cendrillon, W. Yu, M. Moonen, J. Verlinden, and T. Bostoen, “Optimal multiuser spectrum balancing for digital subscriber lines,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 5, pp. 922–933, May 2006.
- [17] R. Cendrillon and M. Moonen, “Iterative spectrum balancing for digital subscriber lines,” in *Communications, 2005. ICC ’05. IEEE International Conference on*, vol. 3, May 2005, pp. 1937–1941.
- [18] 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*, vol. 7, June 2006, pp. 3270 – 3275.
- [19] R. Cendrillon, J. Huang, M. Chiang, and M. Moonen, “Autonomous spectrum balancing for digital subscriber lines,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 8, pp. 4241–4257, Aug. 2007.
- [20] 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*, 2008, pp. 1420–1425.
- [21] P. Tsiaflakis and M. Moonen, “Low-complexity dynamic spectrum management algorithms for digital subscriber lines,” in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on*, 31 2008-April 4 2008, pp. 2769–2772.
- [22] R. Moraes, A. Klautau, J. Rius, B. Dortschy, and R. Zampolo, “Optimal solution for the fixed margin problem in digital subscriber lines,” in *ISCCSP*, 2008, pp. 1395–1399.
- [23] 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*, pp. 1015 – 1020, Nov. 2008.

-
- [24] 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*, June 2009, pp. 1–5.
- [25] P. Tsiaflakis, Y. Yi, M. Chiang, and M. Moonen, "Green DSL: Energy-efficient DSM," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, June 2009, pp. 1–5.
- [26] F. Lindqvist, N. Lindqvist, B. Dortschy, P. Ödler, P. O. Börjesson, K. Ericsson, and E. Pellaes, "Crosstalk channel estimation via standardized two-port measurements," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008. Article ID 916865, 14 pages, 2008.
- [27] N. Lindqvist, F. Lindqvist, B. Dortschy, E. Pellaes, and A. Klautau, "Impact of Crosstalk Estimation on the Dynamic Spectrum Management Performance," in *IEEE Global Conference in Telecommunication (GLOBECOM), New Orleans, LA, USA*, 2008.
- [28] E. Medeiros, N. Lindqvist, M. Monteiro, H. Abraham, F. Lindqvist, B. Dortschy, and A. Klautau, "DSM performance on practical DSL systems based on estimated crosstalk channel information," in *17th European Signal Processing Conference 2009*, Glasgow, Scotland, United Kingdom, August 2009.
- [29] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [30] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
- [31] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley, 2001.
- [32] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Genetic algorithms: A survey," *Computer*, vol. 27, no. 6, pp. 17–26, 1994.
- [33] R. I. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*. 2nd, Wiley, 1998.
- [34] C. de Souza de SALES JR, "Metodologia de identificação de topologias em sistemas dsl baseadas em otimização evolucionária multiobjetivo," Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Pará, 2009.
- [35] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms Plus Data Structures Equals Evolution Programs*. Springer, 1994.

-
- [36] A. Brindle, “Genetic algorithms for function optimization,” Ph.D. dissertation, University of Alberta, 1981.
- [37] D. E. Goldberg and K. Deb, “A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms,” in *Foundations of Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1991, pp. 69–93.
- [38] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press, 1996.
- [39] W. M. Spears, “The role of mutation and recombination in evolutionary algorithms,” Ph.D. dissertation, George Mason university, 1998.
- [40] R. Lui and W. Yu, “Low-complexity near-optimal spectrum balancing for digital subscriber lines,” in *Communications, 2005. ICC '05. IEEE International Conference on*, vol. 3, May 2005, pp. 1947–1951.
- [41] M. R. Spiegel, *Estatística - Resumo da Teoria*. Mcgraw-Hill, 1972.
- [42] D. Griffiths, *Head First - Statistics*. O’Reilly Media, 2008.
- [43] E. Medeiros, N. Lindqvist, M. Monteiro, H. Abraham, F. Lindqvist, B. Dortschy, and A. Klautau, “DSM Performance on Practical DSL Systems Based on Estimated Crosstalk Channel Information,” *International Telecommunications Symposium (ITS)*, 2010.
- [44] H. Abraham, E. Medeiros, M. Monteiro, A. Klautau, and B. Dortschy, “A Non-linear Optimization Method for Imposing Arbitrary PSDs to DSL Modems,” *International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS)*, 2009.

Apêndice A

Procedimento para medição de funções de transferência

Este apêndice descreve o procedimento utilizado em laboratório para medição das funções de transferência utilizadas nos resultados da Seção 4.3. Serão mostrados na Seção A.1 os equipamentos utilizados. Na Seção A.2 é descrita a configuração dos equipamentos e, finalmente, na Seção A.3 é feita uma breve descrição do processo de medição.

A.1 Lista de equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados nas medições de função de transferência seguem abaixo:

- Analisador de redes Agilent 4395A, responsável pela captura e processamento dos dados.
- *Baluns North Hills* de 50 para 100Ω , tolerantes a faixa de frequências de 10 KHz à 20 MHz. Os *baluns* foram utilizados para fazer o casamento de impedância entre o analisador de redes e a linha, uma vez que geralmente a impedância utilizada para representar um modem é de 100Ω .
- Transmissor/Refletor modelo de teste 87521A/B, utilizado para transmitir o sinal pela linha e refletir o mesmo para a entrada do analisador de redes, com o intuito de servir de base para o cálculo da função de transferência.
- Conectores RJ-45 ou RJ-10 para conexões cabo-analisador.

- Rolo de Cabos. Durante a campanha de medições foram utilizados cabos de bitola 0.5 mm com impedância característica entre 120 e 20 Ω , tendo 50 pares trançados em cada cabo.
- Padrões de calibração do equipamento: aberto, curto, *load* e *through*.

A.2 Configuração dos equipamentos de medição

As configurações utilizadas foram:

- Frequência inicial: 4.3125 KHz;
- Frequência final: 2,208 MHz;
- Número de pontos medidos: 512;
- Largura da banda de resolução: 300 Hz.

A.3 Breve descrição do processo de medição

Após a montagem dos cenários com os cabos reais, foram feitas as medidas de função de transferências direta e de *crosstalk*. O *setup* da Figura A.1 mostra de forma representativa como os equipamentos estavam dispostos na bancada de testes. Nesse ponto é importante frisar que as medições para função de transferência direta são diferentes das de *crosstalk*. Em poucas palavras, a medição da função de transferência direta é feita no mesmo cabo (de ponta a ponta do mesmo usuário), enquanto que a de *crosstalk* é realizada aos pares (pontas de usuário diferentes), uma vez que esse tipo de função de transferência mede a influência que um usuário causa no outro, como explicado no Capítulo 1, Seção 1.3.1.

As medições foram realizadas para a faixa de frequência do ADSL2+ [6], conforme configuração da seção anterior (Seção A.2). Cada medição foi repetida cinco vezes, sendo o resultado final da medição a média das amostras. Alguns exemplos de medições de função de transferência podem ser encontrados na Figura A.2. Essa figura mostra tanto as medidas de função de transferência direta quanto as medidas de função de transferência de *crosstalk* para dois links de um cenário exemplo representado na Figura A.3.

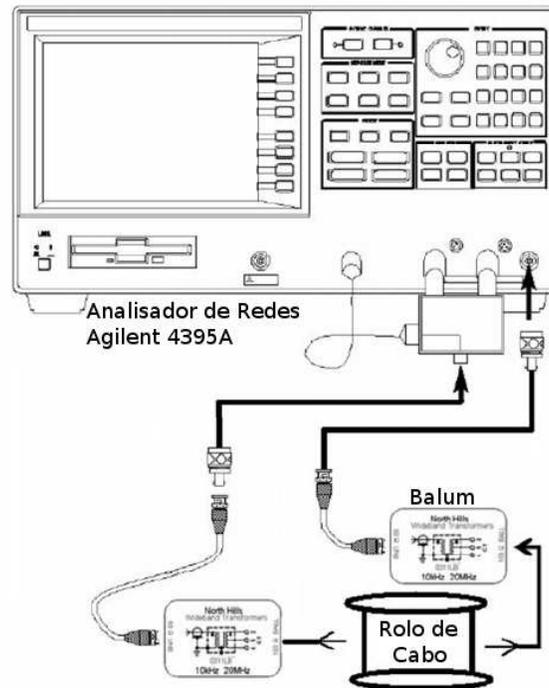


Figura A.1: *Setup* de medição para funções de transferência do tipo direta e de *crosstalk*.

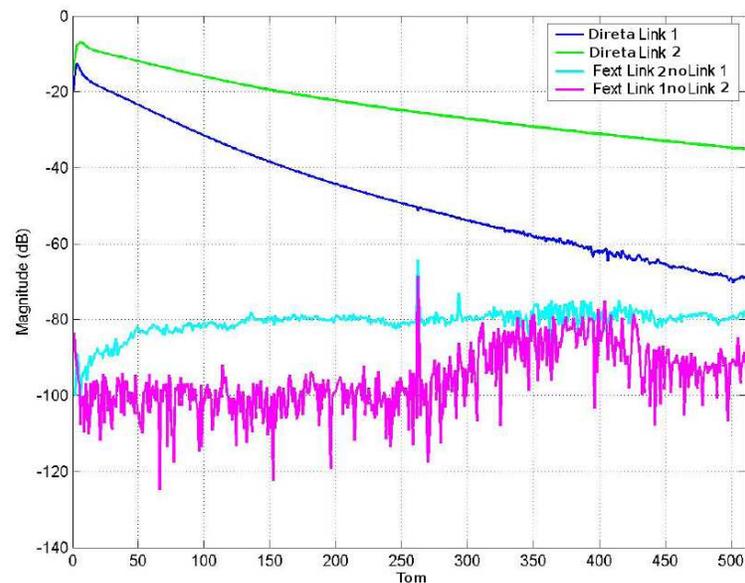


Figura A.2: Medidas de função de transferências direta e de *crosstalk* para o cenário da Figura A.3. É possível notar que a influência que o Link 2 causa no Link 1 é maior do que a influência do Link 1 no 2.

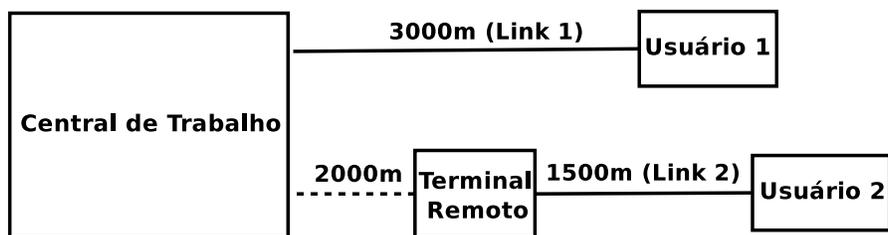


Figura A.3: Cenário com usuários de ADSL2+ e ocorrência de *crosstalk* entre os link 1 e 2.