



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

Otimização de Sistemas DSL Utilizando Técnicas de Gerenciamento de Espectro

Márcio Murilo Conte Monteiro

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

2010

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

Otimização de Sistemas DSL Utilizando Técnicas de Gerenciamento de Espectro

Autor: Márcio Murilo Conte Monteiro

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: **Telecomunicações**.

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá

Belém, PA

2010

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

**Otimização de Sistemas DSL Utilizando Técnicas de
Gerenciamento de Espectro**

AUTOR: Márcio Murilo Conte Monteiro

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. Antônio Marcos de Lima Araújo
(Membro - IESAM)

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

Prof^a. Dr^a. Carolina de Mattos Affonso
(Membro - UFPA)

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

Agradecimentos

À Deus, pois tudo que eu tenho alcançado de bom na vida não foi por meus méritos próprios, mas sim porque foi da vontade Dele.

À minha família, em especial meu pai (Mario) e minha mãe (Rosângela) por todo o amor e apoio que têm me dado durante a vida.

À Bruna, por sua compreensão, apoio e amor.

Ao Prof. Aldebaro Klautau, que tem sido um grande orientador nos últimos 6 anos. Eu aprendi muito do que sei hoje com ele, tanto tecnicamente como sobre vida. Obrigado pelo apoio, entusiasmo e por acreditar em mim.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa DSM: Neiva, Cláudia, Johelden, Müller, Diogo, Gustavo, Fernanda, Harney, Eduardo e Igor, trabalhar com vocês tem sido um enorme prazer.

E finalmente aos meus colegas do Laboratório de Processamento de Sinais (LaPS). A companhia de vocês tem feito o trabalho nesse laboratório não somente um experiência recompensadora, mas também muito agradável.

Resumo

Esta dissertação apresenta contribuições à algumas modalidades de gerenciamento de espectro em redes DSL que tem recebido pouca atenção na literatura: minimização de potência e maximização de margem de ruído. Com relação a minimização de potência, cerca de 60% da potência total consumida pelos modems DSL é utilizada na transmissão. A contribuição dessa dissertação nesse âmbito foi provar matematicamente que os algoritmos de maximização de taxa também podem ser usados para minimizar potência. Dessa forma, praticamente se elimina o atraso histórico entre o estado da arte em maximização de taxa e minimização de potência, colocando-os no mesmo nível de desenvolvimento. A segunda contribuição dessa dissertação é sobre a modalidade de maximização de margem de ruído, de modo a otimizar a estabilidade em redes DSL. Nessa linha de pesquisa, essa dissertação apresenta um novo algoritmo para a maximização de margem multiusuário, que apresenta desempenho superior a um algoritmo publicado anteriormente na literatura especializada.

Palavras chave: Linha digital do assinante (DSL), gerenciamento dinâmico de espectro, otimização não linear, minimização de potência, maximização de margem.

Abstract

This dissertation presents contributions to some strategies of spectrum management which have received few attention in the literature: power minimization and noise margin maximization. Regarding power minimization, about 60% of the total power drained by the DSL transceivers are used in the transmission. The contribution of this dissertation with respect to this field was to prove mathematically that the algorithms of rate maximization can also be used to minimize power. This way, the development gap between these two modes of operation vanishes, turning them in the same level of development. The second contribution of this dissertation is about the noise margin maximization, in order to optimize the stability of DSL networks. In this direction, this dissertation presents a new algorithm of multiuser margin maximization, which shows superior performance when compared to a previous algorithm published in the specialized literature.

Keywords: Digital Subscriber Lines (DSL), dynamic spectrum management, non-linear optimization, power minimization, margin maximization.

Lista de Figuras

1.1	Assinaturas de acesso banda larga no mundo. Fonte: ITU Information Society Statistics Database.	18
1.2	Assinaturas de acesso banda-larga no Brasil. Fonte: Teleco, operadoras e ABTA.	18
1.3	Exemplo de arquitetura de rede de acesso utilizando DSL.	19
1.4	NEXT.	20
1.5	FEXT.	20
1.6	Evolução da tecnologia DSL.	22
2.1	Modelo de rede de duas portas.	26
4.1	Rede com topologia próximo-distante.	39
4.2	Região de taxa para 4 algoritmos: ISB, SCALE, IWF e SCAWF.	40
4.3	Região de potência para o <i>Ponto A</i> ($R_{co} = R_{rt} = 8 \text{ Mb/s}$, ponto interior na região de taxa).	40
4.4	Melhor uso de potência para cada algoritmo operando no Ponto A.	41
4.5	Convergência do algoritmo IsbMin para uma solução conhecida.	42
4.6	Convergência do algoritmo ScaleMin para uma solução conhecida.	43
5.1	Avaliação de factibilidade para dois conjuntos diferentes de margens.	52
5.2	Rede de acesso no estilo próximo-distante.	53
5.3	Região factível encontrada usando o Algoritmo 2, considerando o algoritmo base IWF. As cores de fundo representam os valores da função objetivo.	54
5.4	Soluções do MMM para diferentes pesos $\vec{\mu}$ e algoritmos base. Todas elas convergiram para a frente de Pareto. A solução do MHM também é mostrada para comparação.	56

5.5	PSDs de uma típica topologia DSL <i>próximo-distante</i> , correspondendo a prioridade P2 (margens iguais), perfil A.	57
5.6	Comparação entre o MMM, usando o ISB como seu algoritmo base, e o algoritmo MHM, para todos os perfis de taxa (A, B e C), quando considerando apenas os casos onde as margens devam ser iguais.	58

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros para um cabo 26-AWG.	25
4.1	Valores da potência mínima alcançada por cada algoritmo operando no Ponto A.	41
5.1	Número de iterações para se atingir a convergência (perfil A).	57

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	17
1.1 Interferências em Ambientes DSL	18
1.2 Tecnologias DSL	21
1.3 Organização do Trabalho	22
2 Modelo de Canal	24
2.1 Caracterização da Linha	24
2.1.1 Constantes Primárias RLCG do Cabo	24
2.1.2 Modelagem “ABCD”	25
2.2 Função de Transferência de Crosstalk	27
2.2.1 NEXT	27
2.2.2 FEXT	27
3 Gerenciamento de Espectro	29
3.1 O Modelo DSL Adotado	29
3.2 O Problema de Gerenciamento de Espectro	31
3.2.1 Maximização de Taxa	32
3.2.2 Minimização de Potência	33
3.2.3 Maximização de Margem	33
4 Minimização de Potência Transmitida	35
4.1 Introdução	35

4.2	Dualidade Entre Maximização de Taxa e Minimização de Potência	37
4.3	Resultados Numéricos	38
4.3.1	Aplicando Minimização de Potência	39
4.3.2	Convergência em Minimização de Potência	42
4.4	Conclusões	43
5	Maximização de Margem	45
5.1	Introdução	45
5.2	Definição do Problema	47
5.3	O Método Proposto	48
5.3.1	O Algoritmo MMM	48
5.3.2	Um Algoritmo Eficiente para Verificar Factibilidade	50
5.4	Resultados de Simulação	52
5.4.1	Margens Factíveis	53
5.4.2	Desempenho para Diferentes Algoritmos Base	55
5.4.3	Comparação com o estado da arte	56
5.5	Conclusões	57
6	Considerações Finais	59
6.1	Conclusões Gerais	59
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros	60
	Trabalhos Publicados Pelo Autor	63
	Referências Bibliográficas	63

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, quase todo escritório e residência em áreas industrializadas estão conectados à rede telefônica global, infra-estrutura essa que veio sendo construída por mais de um século, com um investimento acumulado de mais de um trilhão de dólares [1]. Por essa razão, a tecnologia DSL (do inglês *Digital Subscriber Line*), que utiliza cabos telefônicos na transmissão, é hoje em dia o principal meio de acesso banda larga no Brasil, Europa e Ásia, como mostrado na Figura 1.1.

Em relação ao Brasil especificamente, a Figura 1.2 apresenta dados mais recentes, mostrando que no último trimestre de 2009, a tecnologia DSL representava sozinha cerca de 67% da fatia do mercado brasileiro (7,7 milhões de usuários), em comparação a outras tecnologias, como banda larga móvel, modems a cabo (coaxial), PLC, etc.

A Figura 1.3 mostra um exemplo comum de arquitetura de rede de acesso, onde um usuário se conecta a rede central (que pode ser, por exemplo, a internet) através de um enlace DSL. Esse enlace é composto pelo modem do assinante (transceptor do usuário), o meio de transporte (cabo telefônico) e um *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* (DSLAM), que faz o papel do transceptor da operadora e é capaz de se comunicar e gerenciar várias linhas simultaneamente. O valor de mercado de um DSLAM com interface IP e suporte a 12 linhas custa em média 100 euros (cerca de 240 reais), enquanto que um modem de assinante custa atualmente cerca de R\$ 85,00. Isso dá uma ideia de como é economicamente vantajoso oferecer serviços DSL. Não é à toa que DSL tem sido recomendada para países em desenvolvimento [2]. Além disso, o tráfego DSL não interfere nos serviços de telefonia tradicionais, por tanto não apresenta nenhum risco às operadoras.

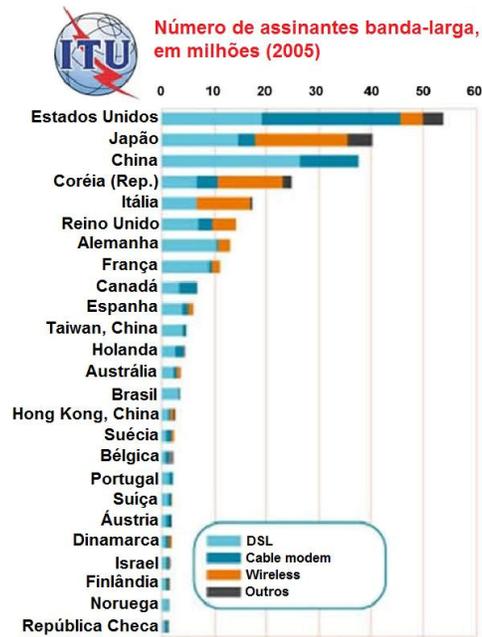


Figura 1.1: Assinaturas de acesso banda larga no mundo. Fonte: ITU Information Society Statistics Database.

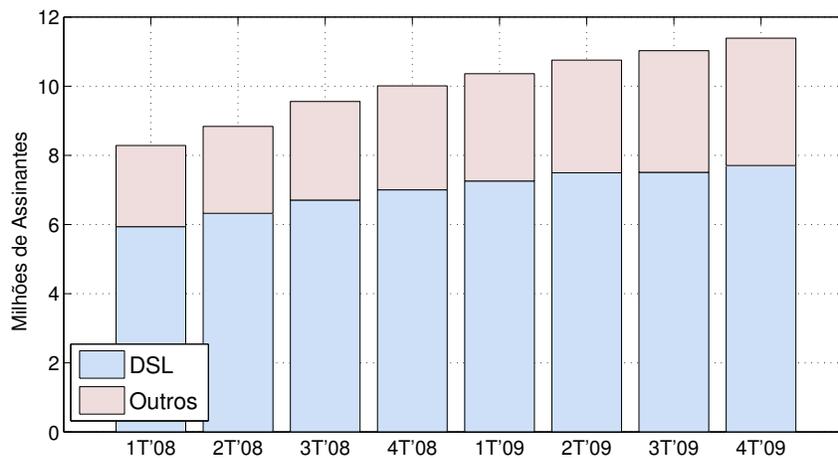


Figura 1.2: Assinaturas de acesso banda-larga no Brasil. Fonte: Teleco, operadoras e ABTA.

1.1 Interferências em Ambientes DSL

A transmissão de dados em cabos telefônicos, porém, sofre de várias fontes de interferências e ruídos que não estavam necessariamente previstos no projeto inicial dessas

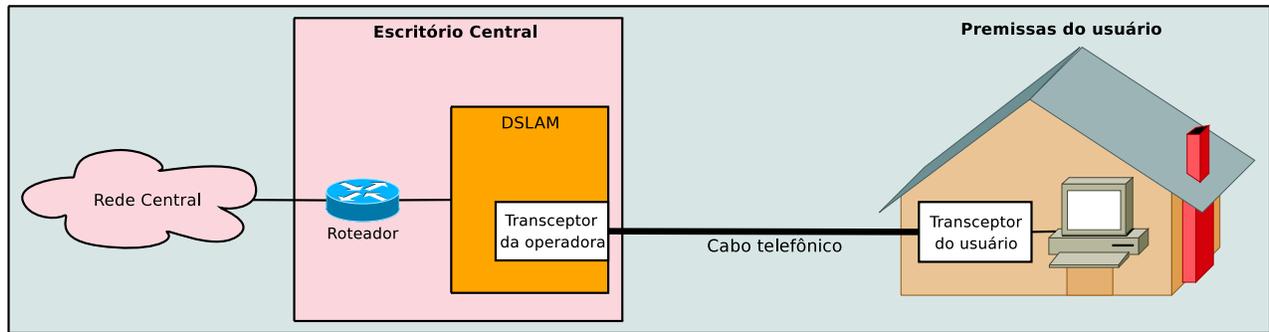


Figura 1.3: Exemplo de arquitetura de rede de acesso utilizando DSL.

redes. Esses distúrbios podem, inclusive, até comprometer o uso do par trançado para o novo fim que se destina (a transmissão de dados em alta velocidade). Dessa forma, esses distúrbios foram classificados em [3] como *limitantes de qualidade* ou *limitantes de capacidade*.

Os ruídos que limitam a qualidade de sistemas DSL (em taxa de erros de bits) são ruídos geralmente intermitentes, geograficamente variados e difíceis de prever sua ocorrência. Um exemplo dessa natureza são os ruídos impulsivos, geralmente originados de descargas elétricas, cercas eletrificadas, acionamento de motores, lâmpadas fluorescentes, etc. Já os ruídos limitantes de capacidade, como o ruído térmico e o *crosstalk*, geralmente variam pouco com o tempo e, por isso, são mais fáceis de serem previstos, permitindo que seu impacto possa ser mitigado.

Crosstalk

O *crosstalk* é o acoplamento magnético que ocorre entre pares telefônicos adjacentes e é considerado o maior vilão limitante de capacidade dos sistemas DSL, em termos de taxa de transmissão ou raio de alcance, e por isso merece uma atenção especial.

O *crosstalk* é dividido de acordo com qual extremidade da linha está localizado o receptor que recebe a interferência, existindo portanto dois tipos, denominados de *near-end crosstalk* (NEXT) e *far-end crosstalk* (FEXT). O NEXT é a interferência proveniente da reflexão do sinal transmitido em um usuário adjacente, ou o usuário “ao lado” (*near-end*), afetando sua recepção como mostrado na Figura 1.4. O FEXT, por outro lado, afeta a recepção de um usuário na outra extremidade da linha, ou “usuário afastado” (*far-end*), como mostrado na Figura 1.5.

A intensidade da interferência de NEXT é bem maior que a de FEXT, visto que esse último é bastante atenuado antes de atingir o receptor da outra ponta. As tecnologias atuais de

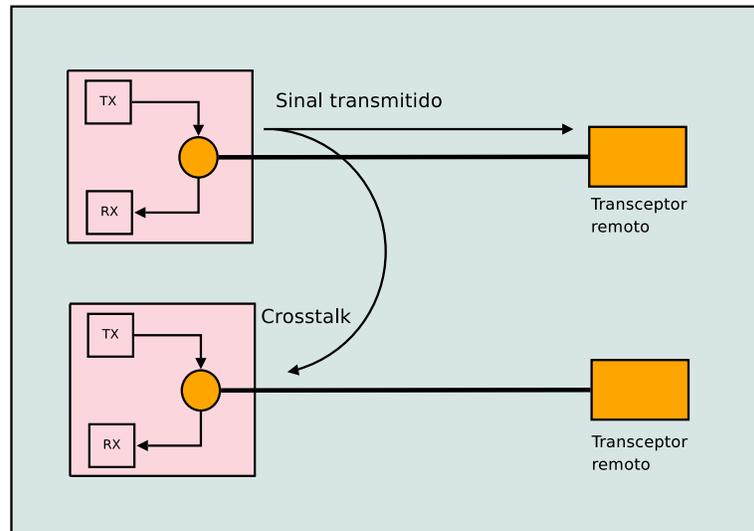


Figura 1.4: NEXT.

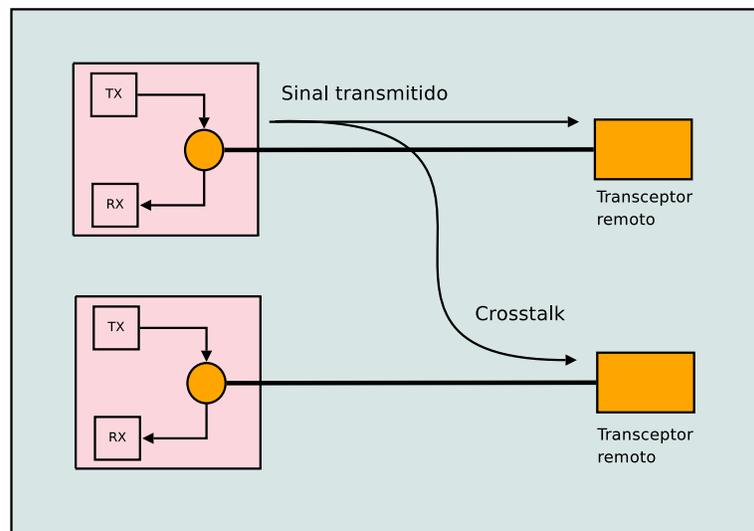


Figura 1.5: FEXT.

DSL evitam o NEXT utilizando técnicas de duplexação por divisão em frequência (FDD). Por esse motivo, costuma-se desprezar os efeitos do NEXT em simulações de sistemas DSL. Sendo assim, o FEXT é tido como a principal fonte de interferência de *crosstalk*. No Capítulo 2, o modelo de *crosstalk* adotado nesta dissertação será apresentado com mais detalhes técnicos.

1.2 Tecnologias DSL

Atualmente existem inúmeras variantes da tecnologia DSL, o que reflete as necessidades diferenciadas de taxa de dados dos assinantes, como usuários domésticos, empresas de tamanho pequeno ou médio, escolas, etc. Em relação aos serviços exclusivamente assimétricos, as principais tecnologias DSL são:

- ADSL (Assymmetric DSL) [4];
- ADSL2 (ADSL versão 2) [5]; e
- ADSL2+ (ADSL2 com banda estendida) [6].

O ADSL suporta um raio de cobertura de até 5 km e taxas de transmissão de até 8 Mb/s na direção *downstream* (que corresponde a transmissão em direção ao assinante) e até 1 Mb/s na direção *upstream* (transmissão do assinante para a rede). Seu uso é recomendado para usuários domésticos e empresas de pequeno porte, que possuem uma demanda maior de *download* do que de *upload*. O ADSL2, por sua vez, melhorou o desempenho e interoperabilidade do ADSL, fornecendo suporte para novas aplicações e serviços, podendo alcançar taxas de até 12 Mb/s na direção *downstream*, dependendo do tamanho do enlace e outros fatores. Por fim, o ADSL2+ melhorou ainda mais o ADSL2, aumentando sua largura de banda de *downstream* de 1,1 MHz para 2,2 MHz, o que se reflete em taxas de transmissão de até 25 Mb/s nessa direção.

Em relação a serviços empresariais, as principais tecnologias DSL são:

- VDSL (Very high speed DSL) [7]; e
- VDSL2 (VDSL versão 2) [8].

O VDSL pode ser configurado tanto para serviços simétricos quanto assimétricos, podendo alcançar taxas de dados de até 52 Mb/s na direção *downstream*. Porém, o raio de alcance dessa tecnologia fica em torno de 1,2 km. O VDSL é particularmente útil para suprir serviços com alta vazão de dados como hotéis, prédios comerciais e apartamentos, sem a necessidade de uma nova infraestrutura além da rede telefônica pré-existente. Além disso, a tecnologia VDSL também é ideal para campus de universidades e parques empresariais, onde as distâncias para os roteadores de borda são pequenas.

Por fim, surgiu o VDSL2, que é atualmente a tecnologia mais moderna de DSL, podendo alcançar taxas de até 100 Mb/s. Quando surgiu, seu objetivo era garantir o bom desempenho

para linhas maiores que as suportadas pelo VDSL, como uma evolução da tecnologia ADSL2+, e também para linhas menores, como uma evolução do VDSL. Enquanto que o raio de alcance do VDSL gira em torno de 1,2 km, o alcance do VDSL2 pode ser estendido a até 2,4 km. Mas para distâncias acima disso, a tecnologia ADSL2+ ainda é mais recomendada.

A Figura 1.6 mostra a evolução das principais tecnologias DSL, em termos de taxas de bits máximas suportadas. Para comparação, foi incluído no gráfico o HDSL (High bit rate DSL), uma das primeiras versões de sistema DSL que surgiu no mercado.

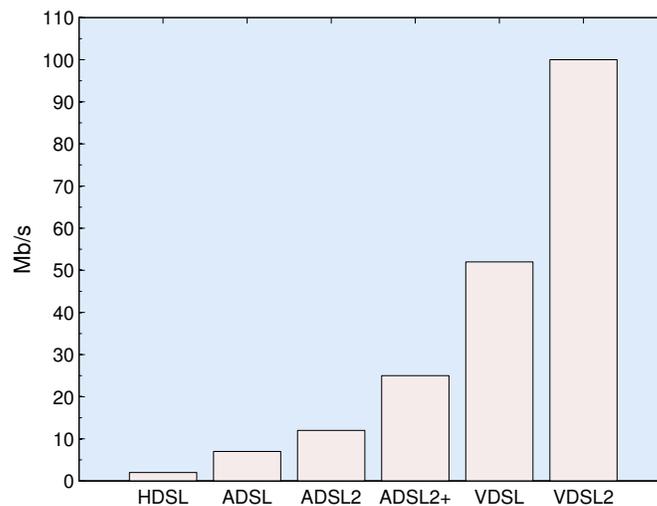


Figura 1.6: Evolução da tecnologia DSL.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 apresenta os modelos matemáticos adotados na modelagem do canal DSL utilizado na geração dos resultados que serão apresentados posteriormente. Esse capítulo é importante apenas para aqueles leitores que desejam reproduzir os resultados dessa dissertação e pode ser ignorado sem comprometer o entendimento do restante do trabalho.
- O Capítulo 3 apresenta um modelo de sistema (simplificado) de transmissão DSL e descreve o problema de gerenciamento de espectro, apresentando as formulações de otimização utilizadas para mitigar os efeitos de interferências como *crosstalk*. Nesse

capítulo são apresentados de maneira sucinta as três modalidades de gerenciamento de espectro para DSL: maximização de taxa, minimização de potência e maximização de margem de ruído.

- O Capítulo 4 apresenta a primeira contribuição desta dissertação, mostrando que muito do desenvolvimento em gerenciamento de espectro com foco em maximização de taxa pode também ser utilizado em minimização de potência. Essa equivalência é provada matematicamente utilizando a teoria de Lagrange e demonstrada na prática através de simulações. O material contido nesse capítulo foi publicado em [9].
- O Capítulo 5 apresenta a segunda contribuição desta dissertação, descrevendo uma nova técnica de maximização de margem utilizando coordenação multiusuário. Como mostrado nos resultados desse capítulo, a nova técnica proposta supera consideravelmente o desempenho de uma técnica anterior publicada na literatura especializada. O conteúdo desse capítulo foi submetido à publicação em [10].
- O Capítulo 6 apresenta as considerações finais e ideias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelo de Canal

É fundamental para simulações de sistemas cabeados se ter em mãos modelos de canal que traduzam com boa aproximação as características de transmissão desse meio. Este capítulo apresenta o modelo de canal adotado durante as simulações que seguem nesta dissertação. Este modelo foi definido e está melhor detalhado no padrão ANSI T1.417 [11] e no clássico livro de Thomas Starr e John Cioffi chamado “*Understanding Digital Subscriber Line Technology*” [1] (sem tradução no Brasil). Porém, por conveniência, é apresentado neste capítulo um resumo desse modelo, incluindo os parâmetros utilizados durante as simulações, de modo que um leitor interessado possa reproduzir os resultados apresentados nesta dissertação.

Este capítulo está dividido da seguinte maneira: a Seção 2.1 descreve basicamente como as funções de transferência diretas são calculadas; a Seção 2.2 descreve o modelo utilizado no cálculo das funções de transferência de *crosstalk* em um cabo de pares trançados.

2.1 Caracterização da Linha

Os órgãos T1E14 e ETSI fizeram vários testes e medições com cabos de comprimento e bitola variáveis, e, por fim, desenvolveram os modelos de canal que apresentaremos a seguir. A caracterização de linha adotada neste trabalho admite pares trançados telefônicos 26-AWG feitos de cobre.

2.1.1 Constantes Primárias RLCG do Cabo

As constantes primárias de resistência (R , Ω/km), indutância (L , H/km), capacitância (C , F/km) e condutância (G , Mho/km) são usadas para modelar a maioria das linhas de

Tabela 2.1: Parâmetros para um cabo 26-AWG.

Resistência (valor)	r_{0c} 286,176 Ω/km	a_c 0,14769620		
Indutância (valor)	l_0 675,369 $\mu\text{H}/\text{km}$	l_∞ 488,952 $\mu\text{H}/\text{km}$	b 0,929	f_m 806,339 kHz
Capacitância (valor)	c_∞ 49 nF/km			
Condutância (valor)	g_0 43 nMho/km	g_e 0,70		

transmissão. Parâmetros secundários como impedância, atenuação e fase, bem como os parâmetros do modelo de duas porta, podem ser calculados através dessas constantes primárias RLCG.

Os modelos de R, L, C e G para cabos de par trançado de cobre são dados por:

$$R(f) = \sqrt[4]{r_{0c}^4 + a_c \cdot f^2} \quad (2.1)$$

$$L(f) = \frac{l_0 + l_\infty \left(\frac{f}{f_m}\right)^b}{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^b} \quad (2.2)$$

$$C(f) = c_\infty \quad (2.3)$$

$$G(f) = g_0 \cdot f^{g_e} \quad (2.4)$$

Para um cabo de par trançado do tipo 26-AWG, os parâmetros RLCG são calculados de acordo com a Tabela 2.1 [11].

2.1.2 Modelagem “ABCD”

A Figura 2.1 mostra um modelo geral de um circuito linear de duas portas. Essa figura e as equações seguintes utilizam transformadas de Fourier da voltagem e da corrente, portanto esses valores são expressos em função da frequência. As voltagens e as correntes dependem das impedâncias da fonte (Z_S , porta 1) e da carga (Z_L , porta 2). Os valores V_1 , V_2 , I_1 e I_2 se relacionam entre si através da expressão matricial:

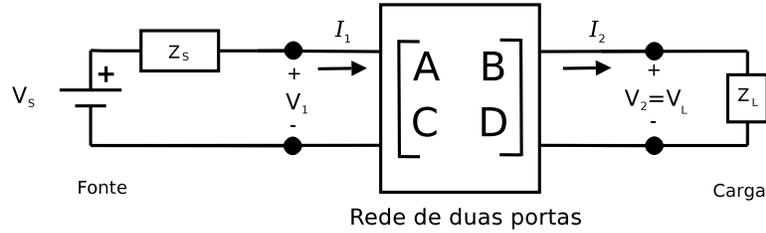


Figura 2.1: Modelo de rede de duas portas.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

onde os valores de A, B, C e D dependem apenas da rede e não das conexões externas e podem ser definidos como [1]:

$$A = \cosh(\gamma d) \quad (2.6)$$

$$B = Z_0 \sinh(\gamma d) \quad (2.7)$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma d) \quad (2.8)$$

$$D = \cosh(\gamma d), \quad (2.9)$$

onde Z_0 representa a impedância característica da linha, γ é a constante de propagação e d é o comprimento do par trançado.

A impedância característica Z_0 em uma certa frequência $\omega = 2\pi f$ é dada por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2.10)$$

Já a constante de propagação γ por unidade de comprimento para o par trançado em uma dada frequência $\omega = 2\pi f$ pode ser expressa como

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}. \quad (2.11)$$

Finalmente, a função de transferência $H(f) = \frac{V_L(f)}{V_S(f)}$, em termos dos parâmetros ABCD, pode ser calculada da seguinte forma:

$$H(f) = \frac{Z_L}{A \cdot Z_L + B + C \cdot Z_S \cdot Z_L + D \cdot Z_S}. \quad (2.12)$$

2.2 Função de Transferência de Crosstalk

O modelo de *crosstalk* utilizado nesta dissertação é chamado de *1% do pior caso*. Esse modelo tem esse nome porque, na média, 1% de todos os casos testados para elaborar esse modelo apresentou ganhos de crosstalk maiores (piores) que os previstos pelo mesmo.

2.2.1 NEXT

Tomando como referência um cabo com 50 pares trançados, o acoplamento eletromagnético denominado *near-end crosstalk* (NEXT) que interfere em outro par no mesmo cabo pode ser modelado como [1]

$$|H_{NEXT}(f)|^2 = X_{49} \times \left(\frac{N}{49}\right)^{0.6} \times f^{\frac{3}{2}} \quad (2.13)$$

onde $X_{49} = \frac{1}{1.13 \times 10^{13}}$ é o coeficiente de acoplamento para 49 interferentes, N é o número de interferentes no cabo e f é a frequência em Hz [12].

Um sinal com densidade espectral de potência $PSD_{Sinal}(f)$ injetará um nível de NEXT no receptor de outra linha localizado na mesma extremidade do cabo (*near-end*) de acordo com a seguinte equação:

$$PSD_{NEXT}(f) = PSD_{Sinal}(f) \times |H_{NEXT}(f)|^2 . \quad (2.14)$$

2.2.2 FEXT

Da mesma forma, tomando com base a mesma referência (um cabo com 50 pares), o acoplamento por *far-end crosstalk* (FEXT) em outro par no mesmo cabo pode ser modelado como

$$|H_{FEXT}(f)|^2 = |H_{Canal}(f)|^2 \times \left(\frac{N}{49}\right)^{0.6} \times k \times d \times f^2 \quad (2.15)$$

onde $|H_{Canal}(f)|^2$ é a função de transferência direta do canal, $k = 8 \times 10^{-20}$ é o coeficiente de acoplamento para 49 interferentes por FEXT, N é o número de interferentes no cabo, d é a distância de acoplamento e f é a frequência em Hz.

Um sinal com densidade espectral de potência $PSD_{Sinal}(f)$ injetará um nível de FEXT no receptor de outra linha localizado na outra extremidade do cabo (*far-end*) de acordo com a seguinte equação:

$$PSD_{FEXT}(f) = PSD_{Sinal}(f) \times |H_{FEXT}(f)|^2 . \quad (2.16)$$

Capítulo 3

Gerenciamento de Espectro

Sistemas DSL, bem como qualquer tecnologia atual de transmissão de dados, são sistemas bastante complexos, com muitos fatores (variáveis) a serem considerados. Tentar entendê-los por completo é inevitavelmente uma tarefa árdua. Historicamente, a estratégia adotada para entender, implementar e otimizar sistemas de comunicação tem sido dividi-los em camadas, com interfaces comuns entre elas (ex: modelo OSI). Isso permite projetar cada camada de maneira independente das demais. E cada camada pode ser subdividida em subcamadas (problemas) menores. Dessa forma, é possível isolar certos fenômenos e tratá-los individualmente.

Neste trabalho, ignora-se de certa forma a complexidade dos sistemas de comunicação e adota-se modelos mais simples. Sendo assim, esse capítulo é dedicado a apresentar a modelagem de redes DSL adotada durante as análises e simulações contidas nesse trabalho.

3.1 O Modelo DSL Adotado

Os sistemas DSL representados neste trabalho presumem a utilização do esquema de modulação multiton discreto (*discrete multi-tone* - DMT), dividindo a faixa de espectro disponível em K sub-portadoras (tons). Considera-se ainda uma rede com N transmissores e N receptores que compartilham o mesmo **cabo**, que neste trabalho denomina um agrupamento de N pares trançados, adjacentes uns aos outros e sujeitos a interferência eletromagnética entre si (*crosstalk*).

É comum, portanto, modelar a transmissão DSL no domínio da frequência como um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*multiple-input multiple-output* - MIMO). Como os sistemas DSL adotam duplexação por divisão em frequência (FDD), pode-se

desprezar a interferência NEXT entre transmissores e receptores da mesma extremidade do cabo. Além disso, admite-se completo sincronismo na transmissão entre todos os transmissores, o que permite desconsiderar interferência inter-portadoras entre usuários diferentes. Dessa forma, pode-se processar os tons de maneira independente da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} y_1^k \\ \vdots \\ y_N^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}^k & \cdots & h_{1,N}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1}^k & \cdots & h_{N,N}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^k \\ \vdots \\ x_N^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1^k \\ \vdots \\ z_N^k \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

onde $x_n^k \in \mathbb{C}$ denota o sinal emitido pelo transmissor n na k -ésima portadora, $y_n^k \in \mathbb{C}$ é o sinal percebido pelo receptor n no tom k . O termo $z_n^k \in \mathbb{C}$ representa o ruído aditivo Gaussiano no receptor n e $h_{i,j}^k$ representa a função de transferência do canal direta quando $i = j$ e de FEXT para $i \neq j$. É também comum utilizar sua forma compacta

$$\mathbf{Y}^k = \mathbf{H}^k \cdot \mathbf{X}^k + \mathbf{Z}^k. \quad (3.2)$$

A potência do sinal do usuário n no tom k pode ser descrita através densidade espectral de potência, comumente conhecida por PSD (do inglês *power spectrum density*), dada por:

$$s_n^k = \mathbb{E} \left\{ |x_n^k|^2 \right\} \Delta_f, \quad (3.3)$$

onde $\mathbb{E} \{ \cdot \}$ denota o valor esperado e Δ_f é a largura de banda da portadora (geralmente 4,3125 kHz). Para facilitar notação, neste trabalho será usada a representação matricial \mathbf{P} para a alocação de potência de todos os usuários em todos os tons, como disposto na equação (3.4).

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} s_1^1 & \cdots & s_1^K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N^1 & \cdots & s_N^K \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

A potência transmitida pela linha n pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_n^{\text{tot}} = \sum_{k=1}^K s_n^k \quad (3.5)$$

Dada as suposições acima, o número (teórico) de bits que o usuário n consegue transportar no tom k utilizando modulação QAM não codificada é:

$$b_n^k \triangleq \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}_n^k}{\gamma_n \Gamma} \right), \quad (3.6)$$

onde SNR_n^k denota a razão sinal-ruído no receptor n para o tom k , γ_n é a margem de ruído do n -ésimo usuário e Γ é uma constante calculada em função da probabilidade de erro de bits máxima desejada (ex: $\Gamma = 9.8$ dB resulta em uma probabilidade de erro $P_e \leq 10^{-7}$ para uma constelação 4-QAM [5]).

De acordo com (3.1) e (3.3), a SNR_n^k pode ser definida como

$$\text{SNR}_n^k = \frac{|h_{n,n}^k|^2 s_n^k}{\sum_{m \neq n} |h_{n,m}^k|^2 s_m^k + \sigma_n^k}, \quad (3.7)$$

onde σ_n^k representa a potência do ruído percebida pelo receptor n no tom k , que é dada por

$$\sigma_n^k = \text{E} \left\{ |z_n^k|^2 \right\} \Delta_f. \quad (3.8)$$

Por fim, a taxa teórica possível para o usuário n (em bits/s) é calculada da seguinte forma:

$$R_n = F_s \sum_{k=1}^K b_n^k, \quad (3.9)$$

onde F_s é a taxa de símbolos da modulação DMT [1].

3.2 O Problema de Gerenciamento de Espectro

Geralmente em uma rede DSL cada usuário tem seus requisitos de taxa e estabilidade a serem atendidos. Caso esses requisitos não estejam sendo satisfeitos, é necessário aumentar a potência do sinal transmitido, de modo que constelações com mais bits possam ser transmitidas, ou que a distância entres os pontos das constelações sejam maiores, garantido uma menor probabilidade de erros de bits no receptor (assumindo um canal AWGN). Agir de tal maneira gera, porém, um efeito colateral negativo: o aumento da interferência (*crosstalk*) nas linhas vizinhas, degradando seus desempenhos. Essas linhas vizinhas, por sua vez, podem aumentar a potência de sua própria transmissão, gerando um efeito em cascata que culmina com a instabilidade da rede e a degradação dos serviços oferecidos pela operadora DSL.

A alternativa tradicional para esse problema tem sido o gerenciamento *estático* do espectro, o qual sugere máscaras espectrais idênticas à todos os usuários. De modo a garantir um amplo uso dessas máscaras, elas foram projetadas levando-se em conta o cenário de pior

caso de interferência descrito no Capítulo 2. Por essa razão, o gerenciamento estático de espectro tem sido considerado muito conservador, com desempenho muito aquém do esperado da tecnologia DSL.

A solução em voga na literatura pra superar esse problema tem sido o gerenciamento dinâmico de espectro, que admite máscaras espectrais diferentes para cada usuário, que são calculadas por meios de processos de otimização que levam em conta as características peculiares das topologias DSL, como as funções de transferência diretas e de *crosstalk*, mostrados na Equação (3.1). Essa seção tem por objetivo descrever esses processos de otimização.

3.2.1 Maximização de Taxa

A formulação do problema de gerenciamento de espectro para maximização de taxa pode ser representada como

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \quad & \sum_{n=1}^N \omega_n R_n \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{k=1}^K p_n^k \leq P_n^{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ & p_n^k \geq 0, \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde ω_n é uma constante não-negativa relacionada ao usuário n , definindo seu peso ou prioridade na otimização, e P_n^{\max} é a potência de transmissão total disponível para o usuário n .

Inicialmente, o foco da pesquisa em gerenciamento dinâmico de espectro era apresentar ganhos em taxa para os sistemas DSL. Entre todos os algoritmos apresentados na literatura, merecem destaque:

1. Iterative Water-Filling (IWF, [13]);
2. Optimal Spectrum Balancing (OSB, [14, 15]);
3. Iterative Spectrum Balancing (ISB, [16]);
4. Generalized Iterative Spectrum Balancing (GISB, [17]);
5. Successive Convex Approximation for Low-complExity (SCALE, [18]);
6. Successive Convex Approximation for Water-Filling (SCAWF, [18]);
7. Band Preference Spectrum Management (BPSM, [19]);

8. Autonomous Spectrum Balancing (ASB, [20]);
9. Semi-Blind Spectrum Balancing (2SB, [21]);
10. Particle Swarm Optimization Spectrum Balancing (PSO, [22]); e
11. Broadcast Channel Optimal Spectrum Balancing (BC-OSB, [23]).

Devido ao grande número de publicações em maximização de taxa (a listagem acima não é completa), esta dissertação não abordará esse tema, por considera-lo já suficientemente explorado.

3.2.2 Minimização de Potência

O modo de operação adaptativo em potência pode ser expresso como um problema de minimização da forma

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{P}} \quad & \sum_{n=1}^N \lambda_n \sum_{k=1}^K p_n^k \\
 \text{s.a.} \quad & R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 & p_n^k \geq 0,
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

onde λ_n é uma constante não-negativa que define a prioridade do usuário n na otimização, e R_n^{\min} é a taxa de dados mínima requerida pelo n -ésimo usuário.

Como mencionado anteriormente, em contraste com a formulação de maximização de taxa, o problema de minimização de potência procura reduzir o consumo de potência utilizada para garantir uma taxa de dados mínima para os usuários [24].

Esse modo de operação tem recebido pouca atenção na literatura e só recentemente cresceu o interesse em minimização de potência. O Capítulo 4 apresenta uma contribuição relevante nessa área, eliminando o atraso “histórico” em relação às técnicas de maximização de taxa, mostrando como essas últimas podem ser usadas para fins de minimização de potência.

3.2.3 Maximização de Margem

Por fim, o modo de operação adaptativo em margem pode ser expresso como um problema de maximização da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{P}, \gamma_1, \dots, \gamma_N} \sum_{n=1}^N \mu_n \gamma_n & (3.12) \\
& s.t. \quad R_n \geq R_n^{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
& \quad \quad P_n^{\text{tot}} \leq P_n^{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
& \quad \quad p_n^k \geq 0, \quad \gamma_n \geq 1,
\end{aligned}$$

onde μ_n é uma constante não-negativa que define a prioridade do usuário n na maximização de margem. R_n^{\min} define a taxa de dados mínima requerida pelo n -ésimo usuário e P_n^{\max} é a restrição de potência associada ao mesmo usuário. A variável γ_n representa a margem de ruído utilizada na transmissão do usuário n .

Como o leitor pode perceber, o problema de maximização de margem possui mais variáveis e restrições que os problemas descritos anteriormente. Portanto, o problema de maximização de margem é mais complexo e difícil de resolver.

Esse modo de operação também tem recebido muito pouca atenção na literatura, apesar dos grandes benefícios que sua solução pode trazer em redes DSL. Esse problema é descrito com mais detalhes no Capítulo 5, onde é apresentado um novo algoritmo para maximização de margem de ruído.

Capítulo 4

Minimização de Potência Transmitida

Técnicas de balanceamento de espectro otimizam a transmissão e podem melhorar significativamente os serviços providos usando DSL. Na literatura, a otimização conjunta da transmissão de várias linhas DSL tem sido tipicamente formulada como um problema de maximização de taxa. Todavia, existe um crescente interesse em reduzir o consumo de potência em redes de telecomunicações. Poucos trabalhos na literatura especializada tem investigado algoritmos de minimização de potência quando comparados com os número de trabalho dedicados a maximização de taxa. Alguns autores sugeriram que métodos de maximização de taxa poderiam ser convertidos em algoritmos de minimização de potência. Essa relação, porém, não tem sido formalmente demonstrada e, conseqüentemente, faltam resultados na área com relação ao que pode ser conseguido com algoritmos de minimização de potência multiusuário. Este capítulo é dedicado a diminuir essa lacuna. Primeiramente, a dualidade entre os problemas de maximização de taxa e minimização de potência é provada para o caso multiusuário. Em seguida, versões convertidas de alguns algoritmos sub-ótimos de maximização de taxa são aplicados com propósitos de minimização de potência e avaliados através de simulações.

4.1 Introdução

A comunicação através de redes DSL pode ser severamente limitada pela interferência destrutiva de *crosstalk* entre pares trançados adjacentes. Essa interferência mútua entre os sistemas vizinhos é considerada como um dos distúrbios dominantes que afetam o desempenho desses sistemas. O gerenciamento dinâmico de espectro (do inglês *dynamic spectrum management* - DSM) surgiu como uma estratégia promissora para a mitigação ou cancelamento

do *crosstalk* nas redes DSL. Por essa razão, métodos de gerenciamento de espectro têm sido investigados como uma solução alternativa para otimizar o uso do espectro, explorando técnicas de coordenação multiusuário, que, conseqüentemente, são capazes de melhorar o desempenho dessas redes, uma vez que efeitos do *crosstalk* são reduzidos [25–27].

A pesquisa em DSM abrange duas diferentes técnicas. A mais avançada delas chama-se *cancelamento de crosstalk*, também chamada de vetorização [28], que procura fornecer uma transmissão completamente livre de *crosstalk*. Essa técnica, porém, tem um custo computacional relativamente alto e requisitos de co-localização de vários transmissores e receptores que são difíceis de controlar na prática. Por essa razão, este tipo de técnica não será abordada neste trabalho. A outra técnica é chamada de *balanceamento de espectro* (BE) e consiste de algoritmos baseados na cooperação espectral multiusuário, sendo possível a adaptação dinâmica das PSDs de transmissão de acordo com as condições vigentes do canal [13, 15, 16, 18, 20, 21, 29, 30]. Isso pode ser feito atualmente através dos DSLAMs (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), equipamento localizado na operadora que fornece interfaces suficientes para modelar as PSDs de transmissão dos modems através de máscaras espectrais.

No âmbito do gerenciamento de espectro, existem três modos de operação que são de interesse: *adaptativos em taxa* (RA), *adaptativos em potência* (PA) e *adaptativos em margem* (MA) [31]. (Mais detalhes no Capítulo 3, mas especificamente na Seção 3.2).

Neste trabalho, a equivalência entre os problemas de maximização de taxa (MaxT) e minimização de potência (MinP) é formalmente definida e provada. Mais especificamente, a teoria de dualidade de Lagrange [32] é usada para formalizar tal equivalência. Em seguida, quatro algoritmos de DSM, a princípio projetados para resolver o problema de maximização de taxa, são escolhidos para exemplificar como um algoritmo de MaxT pode ser facilmente convertido para também resolver o problema de minimização de potência.

Este capítulo é organizado da seguinte maneira: na Seção 4.2 a dualidade entre os problemas de MaxT e MinP é formalizada e provada; com base nessa equivalência, a Seção 4.3 apresenta simulações que evidenciam os ganhos em potência quando tal equivalência é explorada, utilizando algoritmos considerados estado da arte em maximização de taxa; e, por fim, conclusões e comentários finais são fornecidos na Seção 4.4.

4.2 Dualidade Entre Maximização de Taxa e Minimização de Potência

Nessa seção enfatizamos a dualidade entre os problemas de maximização de taxa e minimização de potência, representados em (3.10) e (3.11), respectivamente. Essa afirmação é formalizada no seguinte teorema, baseado teoria de dualidade de Lagrange [32].

Teorema 1

Qualquer técnica para resolver o problema de maximização de taxa expresso da forma (3.10) pode ser aplicada para resolver o problema de minimização de potência expresso em (3.11).

Prova: Considere L_{ra} o Lagrangiano associado ao problema de maximização de taxa (3.10), e similarmente L_{pa} como o Lagrangiano associado ao problema de minimização de potência (3.11). Dessa forma, as funções Lagrangianas correspondentes podem ser expressas da seguinte forma:

$$L_{\text{ra}}(\mathbf{P}, \vec{\lambda}) = \sum_n \omega_n R_n - \sum_n \lambda_n (-P_n^{\max} + \sum_k p_n^k) \quad (4.1)$$

$$L_{\text{pa}}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) = \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k + \sum_n \omega_n (R_n^{\min} - R_n), \quad (4.2)$$

onde \mathbf{P} é uma matriz $N \times K$ representando a alocação de potência p_n^k de todos os N usuários em todos os K tons. Para L_{ra} o vetor $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ denota as variáveis de Lagrange associadas as restrições e $\vec{\omega} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$ representam constantes não-negativas (pesos). Já para L_{pa} , $\vec{\lambda}$ e $\vec{\omega}$ têm os papéis invertidos.

Expandindo e re-arrumando os termos levam a

$$\begin{aligned} L_{\text{ra}}(\mathbf{P}, \vec{\lambda}) &= \sum_n \omega_n R_n - \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k + \sum_n \lambda_n P_n^{\max} \\ L_{\text{pa}}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) &= -\sum_n \omega_n R_n + \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k + \sum_n \omega_n R_n^{\min}. \end{aligned}$$

A alocação ótima de potência \mathbf{P}^* para cada problema é dada por:

$$\mathbf{P}_{\text{ra}}^* = \arg \max L_{\text{ra}}(\mathbf{P}, \vec{\lambda}) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{P}_{\text{pa}}^* = \arg \min L_{\text{pa}}(\mathbf{P}, \vec{\omega}). \quad (4.4)$$

Note que os termos $\sum_n \lambda_n P_n^{\max}$ e $\sum_n \omega_n R_n^{\min}$ não dependem de valores de p_n^k . Portanto, pode-se seguramente removê-los dos Lagrangianos L_{ra} e L_{pa} sem afetar a otimização. Sendo assim, L_{ra} e L_{pa} podem ser redefinidos como:

$$L_{ra}(\mathbf{P}, \vec{\lambda}) = \sum_n \omega_n R_n - \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k \quad (4.5)$$

$$L_{pa}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) = -\left(\sum_n \omega_n R_n - \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k\right). \quad (4.6)$$

Naturalmente, se $\vec{\omega}$ arbitrariamente se tornar a variável de Lagrange em L_{ra} ao invés de $\vec{\lambda}$, a seguinte equivalência se torna evidente:

$$L_{ra}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) = -L_{pa}(\mathbf{P}, \vec{\omega}). \quad (4.7)$$

Dessa maneira, utilizando (4.7) conclui-se a prova que observando que

$$\arg \min L_{pa}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) = \arg \max -L_{pa}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) = \arg \max L_{ra}(\mathbf{P}, \vec{\omega}) \quad (4.8)$$

Portanto, a solução ótima do problema de minimização de potência \mathbf{P}_{pa}^* pode ser obtida através da otimização do Lagrangiano de maximização de taxa:

$$\mathbf{P}_{pa}^* = \arg \max L_{ra}(\mathbf{P}, \vec{\omega}). \quad (4.9)$$

□

Na próxima seção, os algoritmos de gerenciamento de espectro ISB [16], SCALE [18], IWF [13] e SCAWF [18], que são baseados na formulação de maximização de taxa e considerados sub-ótimos, são estendidos para o problema de minimização de potência. A “conversão” desses algoritmos é feita baseando-se apenas no Teorema 1 apresentado acima.

4.3 Resultados Numéricos

Essa seção apresenta os resultados de simulação que demonstram numericamente o Teorema 1. As simulações conduzidas aqui usam como cenário uma rede de acesso com topologia próximo-distante (*near-far*), como apresentado na Figura 4.1. Esse cenário consiste de cabos 26 AWG e transceptores localizados na central (CO), no terminal remoto (RT) e nas premissas do usuário (CP). A direção de transmissão *downstream* é o objeto de interesse. Todas as unidades transceptoras DSL correspondem a modems ADSL2+ [6]. As simulações de gerenciamento dinâmico de espectro adotam ruído de fundo AWGN de -140 dBm/Hz,

SNR-gap de 9.8 dB, margem de ruído de 6 dB e potência de transmissão total para cada modem de 19.4 dBm (87.09 mW).

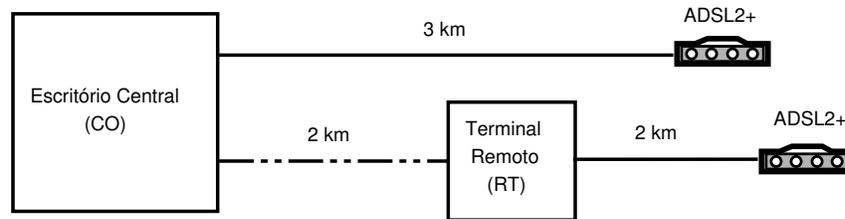


Figura 4.1: Rede com topologia próximo-distante.

Primeiramente, o desempenho de quatro algoritmos de maximização de taxa (ISB, SCALE, IWF e SCAWF) é avaliado observando suas respectivas regiões de taxa¹. Essas regiões ou curvas são levantadas executando-se repetidas vezes o algoritmo DSM em questão, mas variando os pesos ω_n 's dos usuários. A próxima etapa consiste em escolher um **perfil de taxa** possível (localizado no interior da região de taxa). Em seguida a versão de minimização de potência desses algoritmos é aplicada de modo a minimizar a potência total requerida para garantir a operação da rede no perfil de taxa escolhido.

Em contraste com as regiões de taxas obtidas utilizando a versão de maximização de taxa dos algoritmos, agora a região de potência é usada para comparar e avaliar os diferentes algoritmos de minimização de potência e, em seguida, selecionar um **perfil de potência** adequado. Similarmente às regiões de taxa, as regiões de potência são levantadas executando repetidas vezes o algoritmo DSM, mas variando os pesos λ_n 's dos usuários.

Finalmente, essa seção é concluída com uma breve análise sobre a convergência dos algoritmos ISB e SCALE quando estendidos para o problema de minimização de potência. Esses algoritmos “modificados” são chamados aqui de IsbMin e ScaleMin, respectivamente.

4.3.1 Aplicando Minimização de Potência

A Figura 4.3 exibe a região de taxa para 4 algoritmos de gerenciamento de espectro: ISB, SCALE, IWF e SCAWF. Considere a situação onde os usuários da rede DSL devam operar no ponto de operação indicado pelo *Ponto A* na Figura 4.2, ou seja, o CO e o RT devem transmitir ambos em 8 Mb/s na direção de *downstream*. Sendo assim, o desempenho

¹Região de taxa é o conjunto com a combinação das taxas de dados que podem ser alcançadas [12].

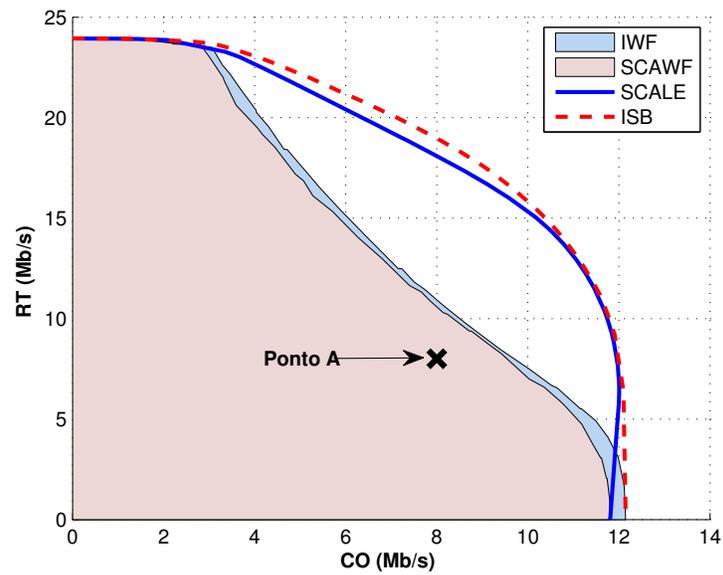


Figura 4.2: Região de taxa para 4 algoritmos: ISB, SCALE, IWF e SCAWF.

em potência transmitida é ilustrado na Figura 4.3, que apresenta as regiões de potência para cada algoritmo, considerando o perfil de taxa adotado.

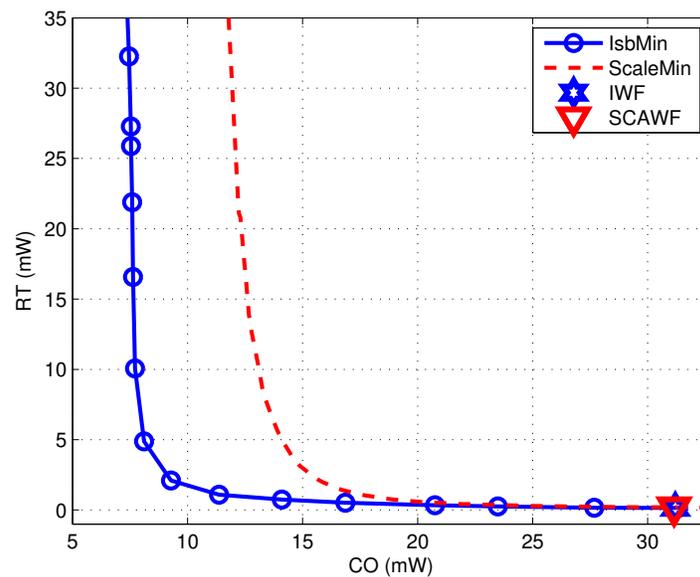


Figura 4.3: Região de potência para o *Ponto A* ($R_{co} = R_{rt} = 8$ Mb/s, ponto interior na região de taxa).

Da Figura 4.3 é possível escolher o melhor perfil de potência para cada algoritmo (é

assumido que o termo ‘melhor’ corresponda a potência total mínima conjunta). De acordo com as simulações conduzidas, esses perfis são mostrados na Figura 4.4 e seus valores são detalhados na Tabela 4.1, na qual mostra-se que o IsbMin pode usar até 35.6% menos potência que o ScaleMin, e 63.4% menos que IWF e SCAWF para o perfil de taxa representado pelo Ponto A. Deve-se enfatizar que uma vez que a solução ótima [33] para o problema de maximização de taxa multiusuário em DSL tem um custo computacional muito alto, apenas algoritmos sub-ótimos foram analisados e, conseqüentemente, eles apresentam desempenhos diferentes.

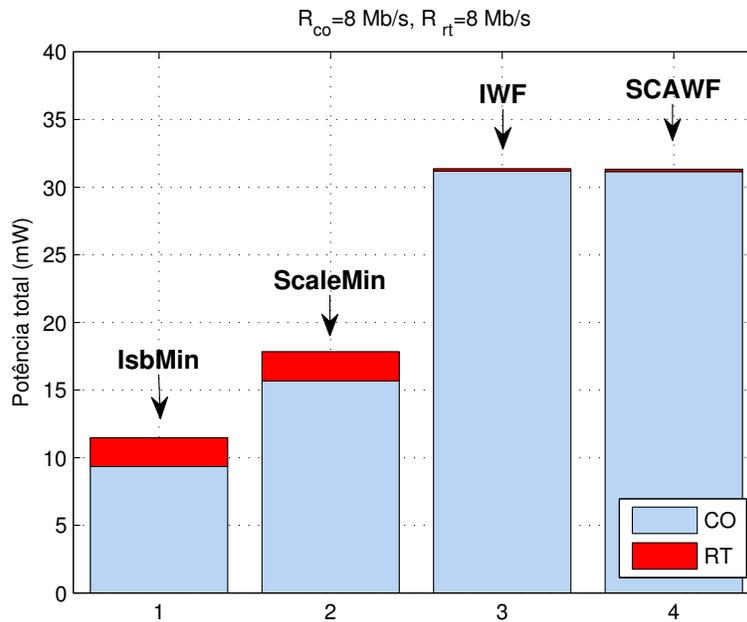


Figura 4.4: Melhor uso de potência para cada algoritmo operando no Ponto A.

Tabela 4.1: Valores da potência mínima alcançada por cada algoritmo operando no Ponto A.

Algoritmo	CO (mW)	RT (mW)	Total (mW)
IsbMin	9.3426	2.1304	11.4730
ScaleMin	15.6746	2.1559	17.8305
IWF	31.1975	0.1611	31.3586
SCAWF	31.1509	0.1796	31.3305

4.3.2 Convergência em Minimização de Potência

A convergência para a solução final utilizando algoritmos citados anteriormente, que são todos iterativos, é mais lenta quando aplicados para minimização de potência do que para resolver o problema de maximização de taxa. Isso ocorre porque as restrições do problema de minimização de potência (taxas de bits) são muito sensíveis às variações de PSDs que ocorrem em cada iteração, onde a alteração da PSD de um único usuário afeta as taxas de bits de todos os outros usuários, de acordo com o modelo adotado em (3.6).

Aqui, serão analisadas apenas as convergências dos algoritmos IsbMin e ScaleMin, pois são os algoritmos que apresentaram o melhor desempenho tanto em taxa de bits como na eficiência energética do sinal transmitido. A Figura 4.5 mostra a convergência do algoritmo IsbMin para uma solução conhecida. Experiências internas mostraram que a versão de maximização de taxa do algoritmo ISB leva em média apenas duas iterações para convergir para a solução final. Todavia, quando aplicado ao problema de minimização de potência, como o mostrado na Figura 4.5, um número bem maior de iterações é necessário. Nesse caso específico, **17 iterações** foram necessárias para alcançar 99% da solução final conhecida.

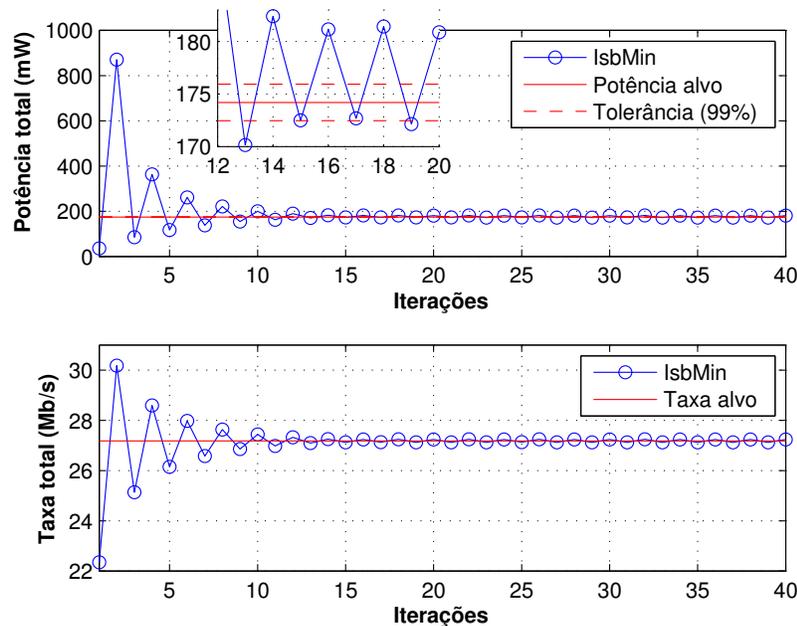


Figura 4.5: Convergência do algoritmo IsbMin para uma solução conhecida.

Um comportamento parecido foi verificado para o algoritmo ScaleMin. Enquanto o algoritmo equivalente para o problema de maximização de taxa leva em média 140 iterações para alcançar seu valor máximo de taxa de bits, sua versão de minimização de potência levou

cerca de **600 iterações** para alcançar 99% do mínimo.²

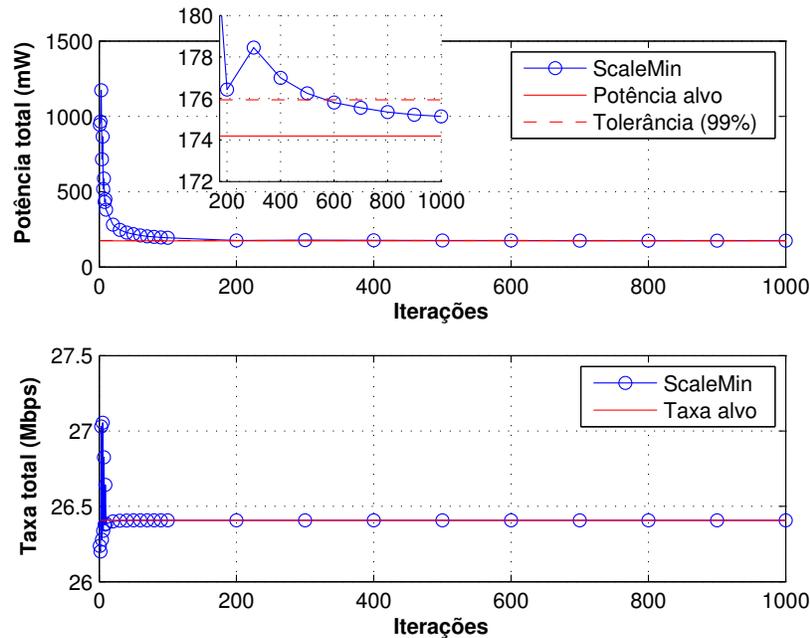


Figura 4.6: Convergência do algoritmo ScaleMin para uma solução conhecida.

4.4 Conclusões

Este capítulo formalizou e explorou a dualidade entre os problemas de maximização de taxa e minimização de potência para o gerenciamento de espectro em redes DSL. Este capítulo também apresentou resultados de simulações mostrando as vantagens dessa dualidade, que vai ao encontro das necessidades atuais de se reduzir potência em redes de telecomunicações. Os algoritmos ISB e SCALE foram convertidos para resolver o problema de minimização de potência e seus desempenhos foram avaliados. Como esperado, esses algoritmos alcançaram melhorias significantes sobre as soluções de *water-filling*, como IWF e SCAWF, com respeito a eficiência energética em um cenário multiusuário. As simulações numéricas mostraram que versões estendidas do ISB podem reduzir a potência transmitida em 63.4% quando comparado com a solução dos algoritmos de *water-filling*. Esses ganhos em uma grande rede DSL seriam benéficos para as operadoras DSL, uma vez que o *crosstalk* médio presente na

²Vale ressaltar que apesar do SCALE necessitar de mais iterações (trocas de PSDs nos modems) que o ISB, sua complexidade é bem menor, sendo que cada iteração do SCALE é processada bem mais rápido que uma iteração do ISB.

rede seria reduzido, aumentando a capacidade em número de usuários e, de certa forma, a estabilidade das mesmas. Além do mais, essas reduções no consumo de potência podem levar a cortes substanciais em energia, tornando o par trançado ecologicamente mais correto para a transmissão de dados.

Capítulo 5

Maximização de Margem

O gerenciamento apropriado da margem de razão da sinal-ruído é importante para melhorar a estabilidade de redes DSL e aumentar a satisfação dos clientes em relação a serviços como *triple-play*. Este capítulo apresenta um novo algoritmo para otimização multiusuário de margem, que se beneficia da semelhança entre os problemas de minimização de potência e maximização de margem. O método proposto, chamado *maximização de margem multiusuário* (MMM), é um *meta* algoritmo que invoca repetidamente um algoritmo *base* de balanceamento de espectro. Esse algoritmo base corresponde a algoritmos de gerenciamento dinâmico de espectro de nível 1 ou 2, e é responsável por parte do processo de otimização do espectro. Resultados de simulação demonstram o desempenho do algoritmo proposto para dois diferentes algoritmos base: *iterative water-filling* (IWF) e *iterative spectrum balancing* (ISB). Os resultados mostram que o método proposto é capaz de projetar de maneira mais eficiente o uso das margens e do espectro, promovendo melhorias no desempenho quando comparado com um algoritmo anterior de maximização de margem que é restrito apenas à coordenação DSM de nível 1.

5.1 Introdução

A demanda de acesso banda larga utilizando DSL tem crescido significativamente nos últimos anos. Fornecer serviços avançados como *triple-play* (voz, vídeo e dados) pelo mesmo canal DSL exige alta qualidade de serviço, que pode ser traduzido em baixa latência, altas taxas de dados e estabilidade da transmissão.

A instabilidade nos sistemas DSL é principalmente causada por ruídos ou interferências difíceis de prever com precisão, como ruído impulsivo (causado por dispositivos próximos aos

modems DSL, como televisores, fornos microondas, acionamento de motores, lâmpadas, etc.) e interferências de *crosstalk* variantes no tempo, provenientes da ativação/desativação de linhas vizinhas. A margem de ruído, também conhecida como margem alvo da razão sinal-ruído (*target signal-to noise ratio margin* - TARSNRM) nos vários padrões DSL, é uma das primeiras defesas do sistema contra a instabilidade, pois ela funciona como uma margem de segurança no sinal transmitido, conferindo maiores distâncias entre os pontos das constelações QAM.

Como a instabilidade vem se tornando um problema recorrente em provedores DSL, uma solução bastante comum é aumentar a margem de ruído das linhas instáveis até se alcançar a estabilidade desejada. Todavia, esse procedimento termina por diminuir a capacidade da rede em termos de taxa de transmissão de dados e/ou por aumentar a potência transmitida, elevando os níveis gerais de *crosstalk* na rede. Portanto, é de interesse prático desenvolver melhores alternativas. Uma delas é utilizar balanceamento de espectro para otimizar a transmissão dos modems, permitindo que margens maiores possam ser utilizadas sem sacrificar taxa de dados do próprio usuário ou das linhas vizinhas (devido ao aumento de potência egoísta).

Alguns trabalhos anteriores na literatura investigaram a maximização de margem. Para o caso de um único usuário (otimização individual), o problema tem uma solução bem estabelecida [34], que utiliza minimização de potência para obter uma PSD de transmissão. Dada essa PSD, os valores de potência alocados em todas as subportadoras são multiplicados por um fator escalar tal que toda potência disponível é utilizada. No entanto, essa abordagem não é eficiente para o cenário multiusuário, pois esse aumento “egoísta” de potência eleva os níveis de *crosstalk* de uma maneira destrutiva.

Em [35] os autores propuseram um método chamado Margem Harmonizada Multiusuário (do inglês *Multiuser Harmonized Margin* - MHM), o qual explora características particulares do algoritmo de alocação de potência *water-filling* para otimizar as PSDs e maximizar as margens. Todavia, é de conhecimento comum que algoritmos DSM de nível 1 são superados pelos algoritmos de nível 2 (onde esse número indica o nível de coordenação entre os modems). Essa diferença no desempenho é acentuada, por exemplo, em cenários do tipo próximo-distante (*near-far*), nos quais o canal de *crosstalk* de algumas linhas pode ser maior do que os ganhos diretos de outras.

Em [30] os autores propuseram um *framework* de otimização de estabilidade baseado em estatísticas empíricas que faz uso de algoritmos DSM de nível 2. Seu objetivo é reduzir o número de ocorrências de retreino devido a variações no espectro do ruído. O meta-algoritmo MMM proposto neste capítulo também pode se beneficiar dos algoritmos de nível 2, mas ele tenta resolver o problema original de maximização de margem [34] (estendido para o caso multiusuário). Dessa forma, o algoritmo proposto fornece proteção maximizada com as taxas

de dados asseguradas (quando isto for matematicamente possível).

O restante desse capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 5.2 apresenta a formulação do problema de otimização de margem multiusuário; a Seção 5.3 descreve o método proposto; a Seção 5.4 apresenta resultados de simulações, mostrando o desempenho do método proposto e também comparando-o com um outro método da literatura especializada.

5.2 Definição do Problema

Na formulação do problema de otimização de margem de ruído, usaremos o mesmo modelo de sistema descrito anteriormente na seção 3.1.

O modo de operação adaptativo em margem dos modems DSL tem o objetivo de otimizar a margem de ruído e o espectro do sinal transmitido de modo a melhorar a estabilidade, porém respeitando as restrições de potência e garantindo taxa de dados especificadas. Dessa forma, o problema de maximização de margem pode ser expresso da seguinte forma:

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

onde μ_n é uma constante não-negativa que define a prioridade do usuário n na maximização de margem. R_n^{\min} define a taxa de dados mínima requerida pelo n -ésimo usuário e P_n^{\max} é a restrição de potência associada ao mesmo usuário.

Como demonstramos no Capítulo 4, os problemas de maximização de taxa e minimização de potência são duais entre si. Portanto, ambos os problemas podem ser resolvidos utilizando o mesmo algoritmo. Infelizmente, isso não pode ser dito para o problema de maximização de margem, uma vez que esse último possui maior complexidade (maior número de variáveis e restrições). Nas formulações tradicionais de maximização de taxa e minimização de potência (como descritas no Capítulo 3), existem NK variáveis desconhecidas e N restrições. No problema de maximização de margem, existem $N(K + 1)$ variáveis (adicionando as N margens γ_n) e o dobro de restrições ($2N$). Sendo assim, dada essa incompatibilidade na dimensão dos problemas, não existe nenhuma extensão direta entre as

soluções de maximização de taxa/minimização de potência e o problema de otimização de margem.

Felizmente a maximização de margem, como foi formulada em (5.1), ainda permanece na classe dos problemas de escala intermediária [36], podendo ser resolvido usando computadores pessoais de propósito geral. Na sequência, é apresentado um método que tenta resolver esse tipo de problema de otimização.

5.3 O Método Proposto

O Lagrangiano associado com o problema (5.1), já com os termos constantes eliminados, é definido da seguinte maneira:

$$L_{\text{ma}}(\mathbf{P}, \vec{\gamma}, \vec{\lambda}, \vec{\omega}) = \sum_n \mu_n \gamma_n - \underbrace{\sum_n \omega_n R_n + \sum_n \lambda_n \sum_k p_n^k}_{\text{Lagrangiano da minimização de potência}}, \quad (5.2)$$

onde $\vec{\gamma} = \{\gamma_1, \dots, \gamma_N\}$ representa o conjunto das margens de ruído dos N usuários, $\vec{\omega} = \{\omega_1, \dots, \omega_N\}$ denota o vetor das variáveis Lagrangianas associadas com as restrições de taxa, e $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ denota o vetor das variáveis de Lagrange associadas às restrições de potência.

Como apontado em (5.2), parte do Lagrangiano L_{ma} é numericamente idêntico ao Lagrangiano associado ao problema de minimização de potência. Com base nisso, o método proposto resolve parte do problema de otimização de margem através de um estágio de minimização de potência. A tarefa restante é, então, procurar de maneira eficiente as margens γ_n 's adequadas (otimizadas). O procedimento que realiza tal tarefa é descrito a seguir.

5.3.1 O Algoritmo MMM

Em poucas palavras, dadas as prioridades μ_n 's para os usuários (definidas, por exemplo, pelo operador da rede) o algoritmo MMM retorna os valores otimizados de \mathbf{P} e $\vec{\gamma}$ que otimizam o problema (5.1).

O leitor deve observar que a função objetivo em (5.1) é uma função linear da forma $g(\vec{\gamma}) = \gamma_1 \mu_1 + \dots + \gamma_N \mu_N$. Sendo assim, a direção de crescimento (considerando uma otimização irrestrita) é dada pelo gradiente:

$$\vec{\nabla}_g = \left\{ \frac{\partial g(\vec{\gamma})}{\partial \gamma_1}, \dots, \frac{\partial g(\vec{\gamma})}{\partial \gamma_N} \right\} = \{\mu_1, \dots, \mu_N\}. \quad (5.3)$$

A execução do MMM pode ser interpretada como uma navegação na região factível de margem na direção fornecida pelo gradiente da função objetivo. A *região de margem* é semelhante a região de taxa, mas o n -ésimo eixo Cartesiano é a margem γ_n ao invés de R_n (de mesma forma, pode-se mostrar uma *região de potência*). Portanto, os μ_n 's especificados correspondem a uma reta na região de margem e o MMM procura uma solução ao longo dessa reta. O ponto chave é que as margens não podem ser imediatamente aumentadas sem incorrer que as PSDs violem as restrições de potência.

De modo a encontrar valores de margem que maximizem a função objetivo em (5.1), mas que obedeçam as restrições, o algoritmo proposto utiliza uma busca por bissecção [37] sobre as margens $\vec{\gamma}$. Essa busca é guiada pelo gradiente $\vec{\nabla}_g$ e converge para um *ótimo local* (não necessariamente o ótimo restrito ou o ótimo global).

Os algoritmos DSM são tipicamente sub-ótimos. Portanto, o ótimo restrito depende do algoritmo base adotado e deve ser distinguido do ótimo global. Quando utilizando um algoritmo base ótimo, como por exemplo o *optimal spectrum balancing* (OSB) [33], o ótimo restrito e o ótimo global coincidem. Como indicado pelos resultados apresentados na Seção 4.3, os ótimos locais encontrados pelo MMM representam soluções ainda sim muito boas e, mais importante, elas convergem para a frente de *Pareto* [38] da região de margem.

No final do algoritmo MMM, o melhor conjunto factível $\vec{\gamma}$ encontrado é selecionado. Em seguida, a matriz \mathbf{P}^* correspondente, representando os valores otimizados de potência, é calculada utilizando algoritmos de minimização de potência. O MMM é resumido no Algoritmo 1.

A variável auxiliar $\alpha \in \mathbb{R}^+$ é usada para obter uma transformação linear entre o espaço da bissecção (unidimensional) e os N distintos valores de margem. O intervalo de busca da bissecção é determinado pelas variáveis α_{\max} e α_{\min} , as quais são os limites superiores e inferiores, respectivamente. O critério de parada é controlado pela constante de precisão Δ_{α}^{\min} , que representa a diferença mínima entre α_{\max} e α_{\min} requerida para terminar a busca. Os elementos de $\vec{R}^{\min} = \{R_1^{\min}, \dots, R_N^{\min}\}$ correspondem as taxas mínimas de dados definidas pelo operador da rede. O vetor com as potências máximas permitidas $\vec{P}^{\max} = \{P_1^{\max}, \dots, P_N^{\max}\}$ é considerado como sendo implicitamente definido, de acordo com os padrões DSL.

O procedimento de bissecção é guiado por uma subrotina chamada VerificaçãoDeFactibilidade que, como o nome sugere, verifica se um certo vetor $\vec{\gamma}$ é factível ou não, isto é, se é possível projetar \mathbf{P} utilizando as margens de ruído $\vec{\gamma}$ de modo que as restrições de taxa e potência sejam satisfeitas.

Boa parte do custo computacional do Algoritmo 1 depende dessa subrotina para testar a factibilidade, a qual requer algumas execuções do algoritmo base de gerenciamento de espectro,

Algoritmo 1: O algoritmo MMM

```

1 Inicialize  $\alpha_{\max}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\Delta_{\alpha}^{\min}$ 

2 repita
3    $\alpha \leftarrow (\alpha_{\max} + \alpha_{\min})/2$ 
4    $\vec{\gamma} \leftarrow \alpha \cdot \vec{\nabla}_g$ 
5    $\vec{\lambda} \leftarrow \text{VerificaçãoDeFactibilidade}(\vec{\gamma}, \text{SB}_{\text{alg}})$ 
6   se  $\vec{\lambda} \neq \emptyset$  então
7      $\alpha_{\min} \leftarrow \alpha$ 
8   senão
9      $\alpha_{\max} \leftarrow \alpha$ 
10 até  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) < \Delta_{\alpha}^{\min}$  ;
11  $\mathbf{P} \leftarrow \text{Execute SB}_{\text{alg}}(\vec{\gamma}, \vec{R}^{\min}, \vec{\lambda})$ ;
12 retorna  $\mathbf{P}$ ,  $\vec{\gamma}$ 

```

denominado por SB_{alg} . Portanto, foi essencial desenvolver um algoritmo com certa eficiência para realizar essa tarefa, que é descrita e discutida a seguir.

5.3.2 Um Algoritmo Eficiente para Verificar Factibilidade

O algoritmo *VerificaçãoDeFactibilidade* procura verificar se um conjunto de margens é factível e é baseado em algoritmos de minimização de potência. Ele não procura projetar as PSDs, mas apenas informar se as margens de entrada permitem que um algoritmo de minimização de potência encontre uma solução que obedeça as restrições do problema de otimização de margem (restrições de taxa e potência). Nesse caso, as margens podem ser consideradas factíveis.

De maneira mais formal, para um dado SB_{alg} , \vec{R}^{\min} e \vec{P}^{\max} , um conjunto de margens de ruído $\vec{\gamma}$ é considerado factível se, e somente se, existe um conjunto de PSDs \mathbf{P} que corresponda a uma solução dentro do quadrante imposto pelas restrições $0 < P_n^{\text{tot}} \leq P_n^{\max}, \forall n$. Esse *quadrante factível* é representado na Figura 5.1 para $P_n^{\max} = 87$ mW (19.4 dBm) e denotado pela letra A. A Figura 5.1 mostra dois exemplos de verificações de factibilidade utilizando $N = 2$ usuários. O procedimento conclui que a escolha de $\gamma_1 = \gamma_2 = \alpha$ é factível enquanto

$\gamma_1 = \gamma_2 = \beta$ não é. O próximo parágrafo explica o algoritmo.

O primeiro ponto importante a se verificar é que não é necessário levantar a região de potência inteira para determinar com certeza se um conjunto $\vec{\gamma}$ é factível ou não. A subrotina VerificaçãoDeFactibilidade invoca o algoritmo base para obter uma solução e SB_{alg} irá retornar PSDs que podem alcançar as taxas alvos, mas ocasionalmente podem violar as restrições de potência. Portanto, a verificação tem que variar os λ_n 's (linha 9) até concluir que as margens $\vec{\gamma}$ são factíveis ou não. A subrotina proposta de avaliação de factibilidade é resumida no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: VerificaçãoDeFactibilidade

Entrada: $\vec{\gamma}$, SB_{alg}

Saída: $\vec{\lambda}$

```

1  $\lambda_i \leftarrow 1 \quad \forall i \in \{1 \dots N\}$ 
2 repita
3   P  $\leftarrow$  execute  $SB_{\text{alg}}(\vec{\gamma}, \vec{R}^{\min}, \vec{\lambda})$ 
4   se  $P_i^{\text{tot}} \leq P_i^{\text{max}}, \quad \forall i \in \{1 \dots N\}$  então
5     retorna  $\vec{\lambda}$ 
6   senão se  $P_i^{\text{tot}} > P_i^{\text{max}}, \quad \forall i \in \{1 \dots N\}$  então
7     retorna  $\emptyset$ 
8   senão
9      $\lambda_i \leftarrow \lambda_i + \varepsilon(P_i^{\text{tot}} - P_i^{\text{max}}) \quad \forall i \in \{1 \dots N - 1\}$ 
10 até convergir ;
11 retorna  $\emptyset$ 

```

A implementação atual do Algoritmo 2 inicializa todos os λ_n 's com valores iniciais iguais (linha 1). De modo a explicar o Algoritmo 2 de maneira mais didática, a Figura 5.1 é usada. É conveniente assumir dois exemplos, cada um representando um distinto ponto de partida obtido de “prioridades” iniciais λ_i para todos os N usuários (linha 1). Se esse ponto de partida cair no hiperplano factível (quadrante A na Figura 5.1, linha 4 no Algoritmo 2), as margens de entrada $\vec{\gamma}$ são classificadas como sendo factíveis e o algoritmo termina. De mesma forma, se o ponto de partida cair no hiperplano não factível (quadrante C, linha 6), devido as características da região de potência, é possível classificar as margens de entrada $\vec{\gamma}$ como não factíveis. Caso contrário, se o ponto de partida cair nos outros dois quadrantes uma busca através da atualização dos λ_i 's (linha 9) é necessária até que se alcance os quadrantes A ou C.

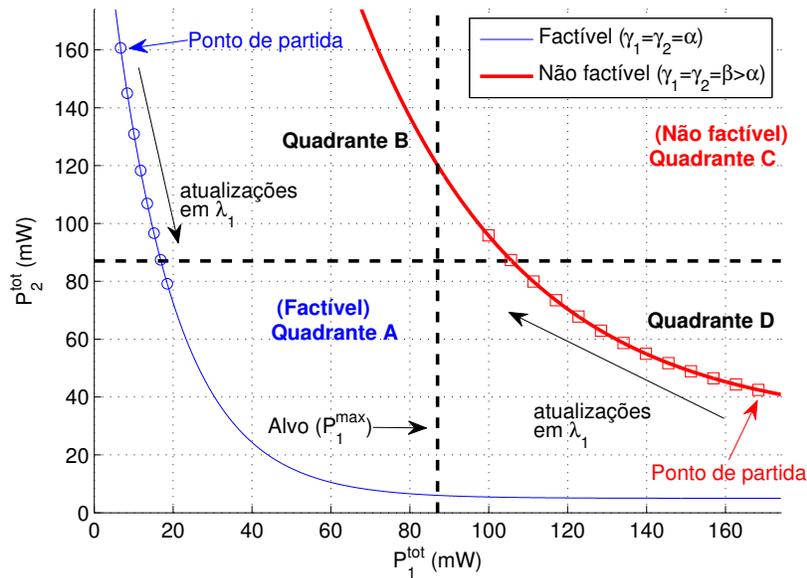


Figura 5.1: Avaliação de factibilidade para dois conjuntos diferentes de margens.

A atualização dos λ_n 's (linha 9) é feita através do método do gradiente descendente, onde ε é um valor de passo suficientemente pequeno. Entretanto, outros métodos poderiam ser utilizados, como por exemplo, a bissecção.

No caso factível da Figura 5.1, para um dado $\gamma_1 = \gamma_2 = \alpha$, o ponto de partida caiu no quadrante B. Depois de algumas atualizações em λ_1 , o ponto de partida moveu-se para o quadrante (factível) A, o qual é uma condição de saída para o Algoritmo 2 (linhas 4 e 5). No caso não factível, que supõe margens maiores ($\gamma_1 = \gamma_2 = \beta$, onde $\beta > \alpha$), o ponto de partida caiu no quadrante D. Novamente, atualizações no λ_1 são necessárias, uma vez que ainda não é possível dizer se $\vec{\gamma}$ é factível ou não nesse ponto de partida. Depois de algumas atualizações em λ_1 , o ponto de partida moveu-se para o quadrante C (não factível). Então, $\gamma_1 = \gamma_2 = \beta$ é considerado não factível.

5.4 Resultados de Simulação

Nesta seção, resultados numéricos obtidos através de simulações de computador são apresentadas de maneira a avaliar o desempenho do método MMM proposto. O cenário de teste adotado é mostrado na Figura 5.2 e consiste de um cenário com 2 usuários ADSL2+ [6] em uma rede de acesso no estilo próximo-distante. A transmissão na direção *downstream* é objeto de interesse. Apesar de simples, esse cenário de 2 usuários promove uma boa interpretação

dos resultados baseada na visualização na região de margem de dois usuários (gráfico 2-D). Um ruído de fundo de -140 dBm/Hz, taxa de símbolo de $F_s = 4000$ símbolos/seg e modelo de ruído ANSI A [39] foram adotados. Todas as linhas supõem cabos 26 AWG, $\Gamma = 9.75$ dB e potência máxima permitida na direção *downstream* de 19.4 dBm.

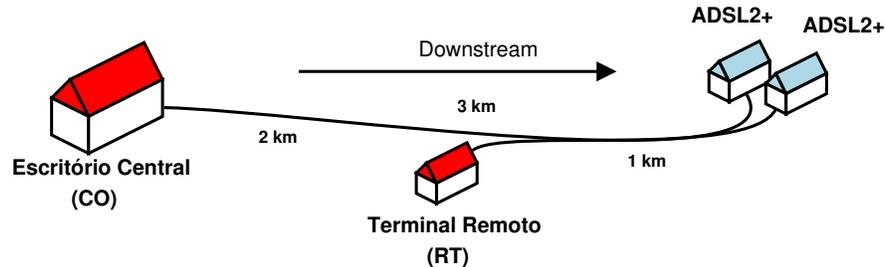


Figura 5.2: Rede de acesso no estilo próximo-distante.

Para as simulações, o algoritmo MMM foi testado com dois algoritmos base:

- Iterative Water-Filling (IWF, [13]) - DSM nível 1.
- Iterative Spectrum Balancing (ISB, [16, 40]) - DSM nível 2.

Além disso, três diferentes perfis de taxa (A, B e C) foram escolhidos durante os testes para a linha conectada ao escritório central (CO) e ao terminal remoto (RT), respectivamente, como: **A**) 2.0 e 10.0 Mb/s; **B**) 4.0 e 15.0 Mb/s; e **C**) 6.0 e 20.0 Mb/s. O perfil A é explorado com mais detalhes de modo a demonstrar a (sub-) otimalidade e convergência do método MMM proposto. Logo após, os resultados são estendidos para os perfis B e C.

5.4.1 Margens Factíveis

Primeiramente, essa subseção apresenta um resultado para ajudar a entender o problema. Com a subrotina descrita no Algoritmo 2 que verifica a factibilidade, foi avaliado (por força bruta) todos os pontos factíveis de margem para o perfil A, considerando o IWF como algoritmo base. As margens γ_n 's estão representadas em dB (a notação é γ_n^{dB}) e variam de 0 a 40 dB em espaçamentos de 0.5 dB. A Figura 5.3 mostra a região factível resultante através de sua envoltória convexa. Presumindo as prioridades $\mu_1 = \mu_2 = 1$, a Figura 5.3 também usa um mapa de cores para indicar o valor da função objetivo em escala linear (nesse caso, $g(\vec{\gamma}) = 10^{\frac{\gamma_1^{\text{dB}}}{10}} + 10^{\frac{\gamma_2^{\text{dB}}}{10}}$) para todos os pares de margens verificados. Os pontos fora da região factível podem alcançar um valor maior de função objetivo $g(\vec{\gamma})$, mas não obedecem os requisitos de taxa e/ou potência.

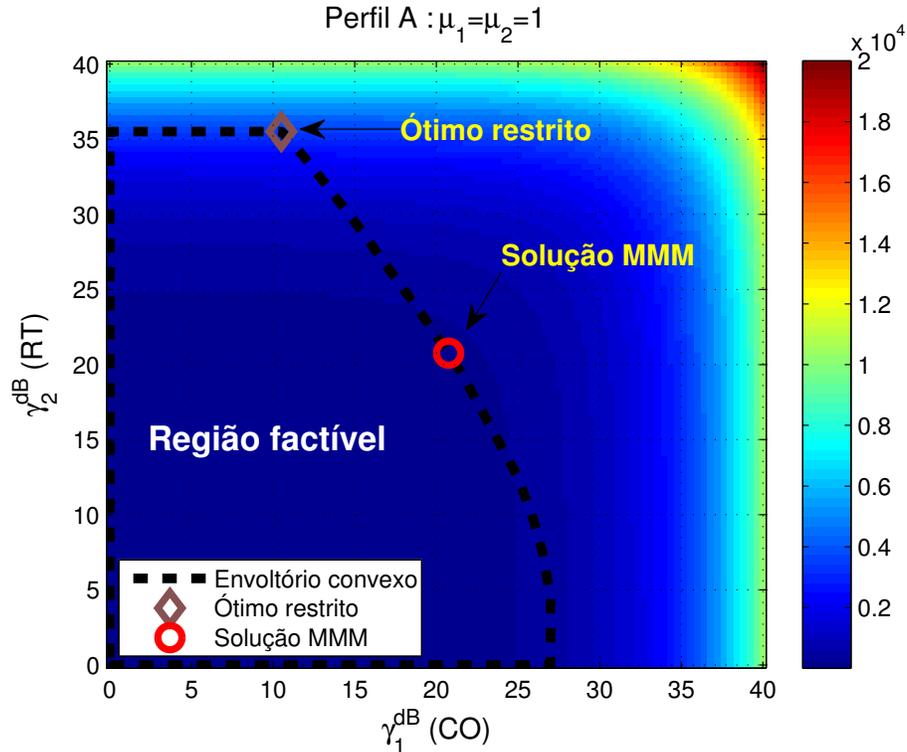


Figura 5.3: Região factível encontrada usando o Algoritmo 2, considerando o algoritmo base IWF. As cores de fundo representam os valores da função objetivo.

A região factível não depende das prioridades μ_n . Por outro lado, alterar as prioridades μ_n 's pode deslocar o ótimo restrito $\vec{\gamma}_*$ para uma posição diferente na região factível. A Figura 5.3 indica esse ótimo, o qual maximiza a função objetivo para $\mu_1 = \mu_2 = 1$ e não necessariamente está localizado na linha $\gamma_2^{\text{dB}} = \gamma_1^{\text{dB}}$ que guiou o MMM.

Do ponto de vista do operador da rede, procurar $\vec{\gamma}_*$ talvez não seja a melhor alternativa. O algoritmo MMM não procura achar $\vec{\gamma}_*$. Ao invés disso, ele fornece uma solução que obedece a proporção indicada pelas prioridades μ_n 's. Por exemplo, a Figura 5.3 ilustra a solução do MMM, a qual apresenta a mesma margem para ambos os usuários (dado que $\mu_1 = \mu_2 = 1$ nesse caso). Em outras palavras, o foco do algoritmo MMM é alcançar a frente de Pareto do conjunto factível, na direção do gradiente. Conseqüentemente, o MMM permite achar margens que são proporcionais as prioridades μ_n 's especificadas. Essa característica é útil do ponto de vista prático e também possui um custo computacional menor do que procurar o ótimo restrito usando, por exemplo, um método de direções factíveis [36].

Resultados como o da Figura 5.3 dão uma informação valiosa com respeito a frente de Pareto ótima de um certo algoritmo base de gerenciamento de espectro (em relação a Figura 5.3, o algoritmo IWF). Para simplificação das figuras, será utilizado apenas a envoltória

da região factível para representar toda a região de margem, pois ela indica a frente ótima de Pareto de um dado algoritmo base.

5.4.2 Desempenho para Diferentes Algoritmos Base

Nessa subseção estende-se os resultados obtidos com o MMM para incluir coordenação de DSM nível 2. Para tanto, escolheu-se o algoritmo ISB porque ele tem apresentado bom desempenho quando usado tanto com propósitos de maximização de taxa quanto para minimização de potência [9]. Com isso em mente, repetiu-se o procedimento de força bruta para levantar a região factível do algoritmo ISB (perfil A).

Dessa forma, a Figura 5.4 mostra o envoltório convexo das regiões factíveis usando os algoritmos base IWF e ISB, juntos com as soluções finais encontradas pelo MMM para três diferentes prioridades:

- P1: $\mu_1 = 0.4$ e $\mu_2 = 0.6$
- P2: $\mu_1 = 0.5$ e $\mu_2 = 0.5$
- P3: $\mu_1 = 0.6$ e $\mu_2 = 0.4$

É importante notar que, como dito anteriormente, as soluções finais do MMM mostradas na Figura 5.4 convergiram para a frente de Pareto ótima em todos os casos. Esses resultados também enfatizam a vantagem dos algoritmos DSM nível 2 sobre os de nível 1. Como o esperado, o MMM apoiado pelo ISB (DSM nível 2) como seu algoritmo base forneceu melhorias consideráveis quando comparado com o MHM (DSM nível 1). Porém, mesmo quando restrito apenas a usar DSM nível 1, o MMM (apoiado pelo IWF) também apresenta vantagens: a possibilidade de ajustar diferentes prioridades ou “níveis de QoS” entre os usuários através dos pesos μ_n , enquanto o MHM sempre converge para um ponto com margens iguais para todos os N usuários.

Apesar de seu bom desempenho, o MMM tem um custo computacional maior quando comparado com seus similares de maximização de taxa e minimização de potência. Para ilustrar isso, a Tabela 5.1 apresenta o número de iterações de bisseção usadas pelo MMM para convergir para a solução final. Em média, 15 iterações foram necessárias para se atingir a convergência. Dado que cada iteração requer várias execuções do algoritmo base, o método MMM proposto é indicado para ser utilizado apenas com algoritmos base de baixa complexidade.

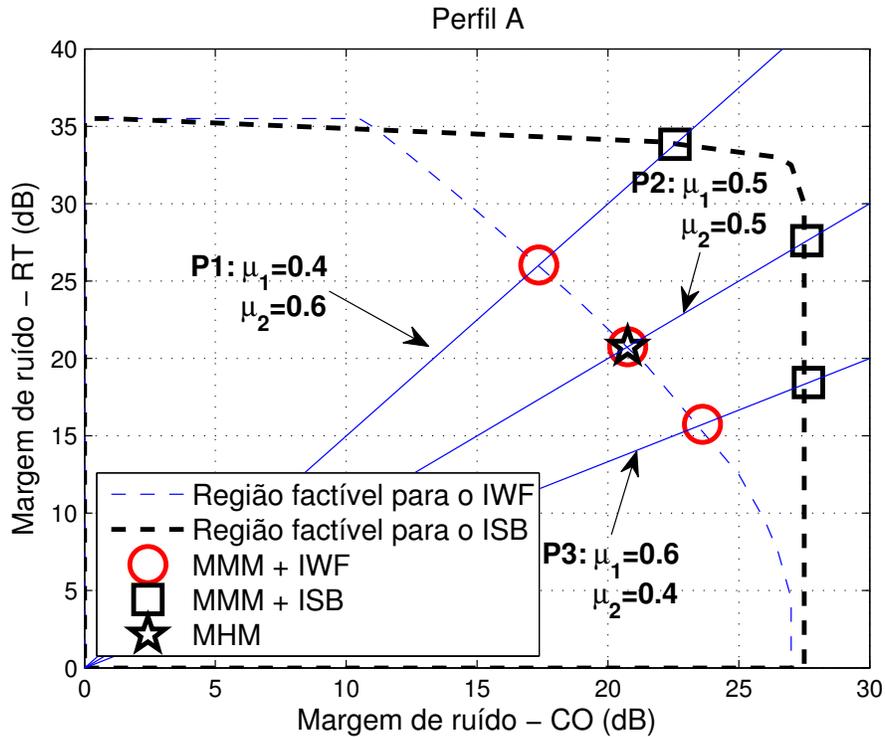


Figura 5.4: Soluções do MMM para diferentes pesos $\vec{\mu}$ e algoritmos base. Todas elas convergiram para a frente de Pareto. A solução do MHM também é mostrada para comparação.

5.4.3 Comparação com o estado da arte

Agora, restringindo a atenção para os pontos com margens iguais, a Figura 5.5 mostra as PSDs de transmissão para a prioridade P2 do perfil A. Devido sua longa linha, o transmissor localizado no escritório central (CO) é capaz de usar somente as baixas frequências. Na solução do MHM, os transmissores do CO e do RT (terminal remoto) usam em parte a mesma faixa de frequência, causando uma mútua interferência por *crosstalk*, principalmente do RT para o CO. Por outro lado, na solução do MMM apoiada pelo algoritmo base ISB, o transmissor do RT evita transmitir em baixas frequências, protegendo o receptor do CO de *crosstalk*. Esses resultados mostram que o MMM, se beneficiando da coordenação de nível 2 fornecida pelo algoritmo ISB, é capaz de melhor projetar o uso do espectro quando comparado com o MHM, que é restrito a coordenação de nível 1.

Por fim, a Figura 5.6 mostra os pontos de operação para margens iguais para os três diferentes perfis de taxa A, B e C. A melhoria relativa (em dB) no valor da margem pelo MMM sobre o MHM é de aproximadamente 32, 48 e 114%, respectivamente. Isso indica que a solução proposta é eficaz mesmo quando altas taxas devem ser providas.

Tabela 5.1: Número de iterações para se atingir a convergência (perfil A).

	MMM+IWF	MMM+ISB
P1	15	13
P2	12	20
P3	15	14

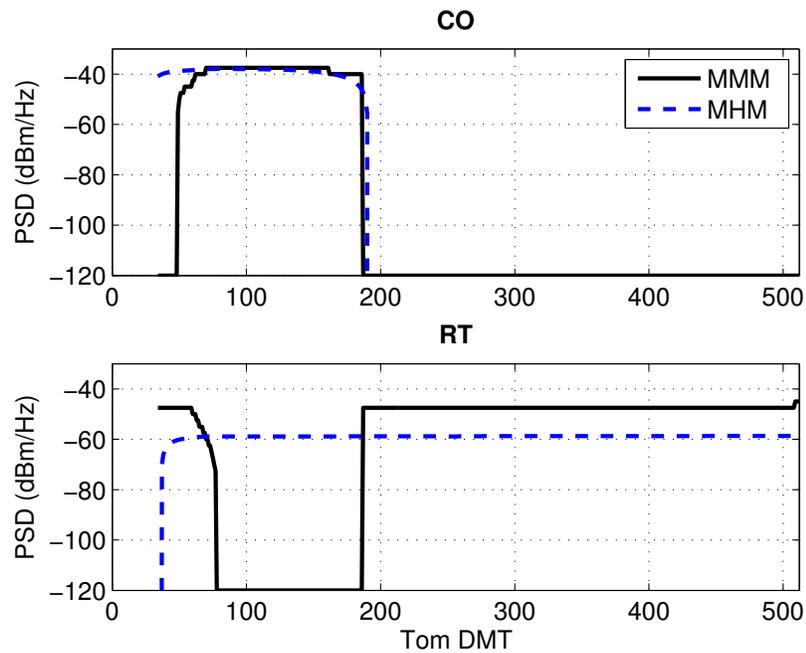


Figura 5.5: PSDs de uma típica topologia DSL *próximo-distante*, correspondendo a prioridade P2 (margens iguais), perfil A.

5.5 Conclusões

Esse capítulo explorou a relação entre os problemas de minimização de potência e de maximização de margem para ambientes DSL multiusuários. Essa formulação foi usada para derivar um novo algoritmo chamado MMM que, com a assistência do algoritmos base de gerenciamento de espectro, é capaz de prover soluções melhoradas ao problema de otimização de margem.

Existem outros métodos para melhorar a estabilidade em redes DSL que não são baseados em gerenciamento de espectro. Trabalhos futuros incluem uma comparação

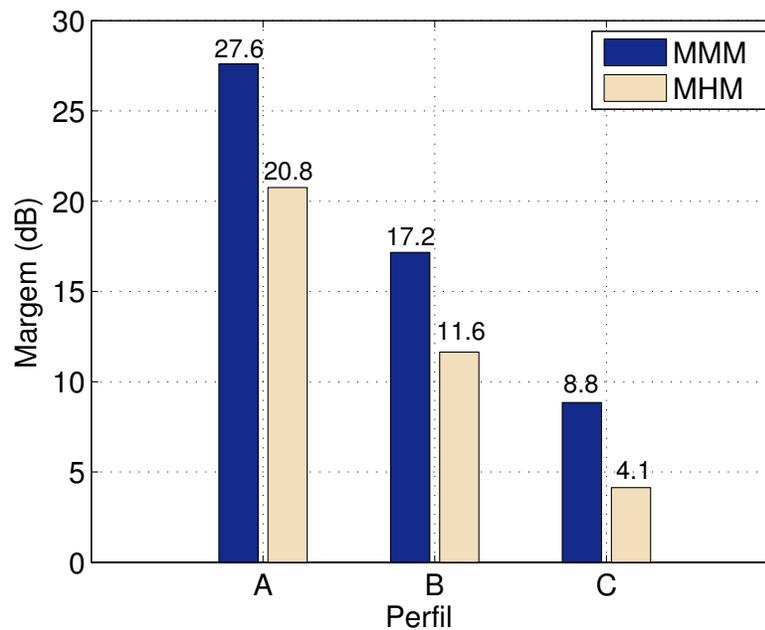


Figura 5.6: Comparação entre o MMM, usando o ISB como seu algoritmo base, e o algoritmo MHM, para todos os perfis de taxa (A, B e C), quando considerando apenas os casos onde as margens devam ser iguais.

sistemática dos resultados obtidos com o MMM e esses outros métodos de estabilização. Também, uma vez que o MMM pode ser compatível com os padrões DSL atuais, os benefícios de sua adoção serão ilustrados em laboratório utilizando modems DSL não modificados, usando os métodos descritos em [41,42] para estimar o canal de *crossstalk* e impor as máscaras de PSD nos modems DSL, respectivamente, como já tem sido feito para maximização de taxa em [43].

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões Gerais

Já é consenso entre os especialistas em DSL que as técnicas de gerenciamento dinâmico de espectro são capazes de melhorar o desempenho de redes DSL em geral, pois essas técnicas são capazes de projetar a transmissão de modo a utilizar melhor o espectro e combater o *crosstalk*. Muitos trabalhos têm apresentado essas melhorias de desempenho como ganhos na taxa de transmissão de dados. Essa modalidade de otimização foi importante pra fazer um certo *marketing* a respeito da capacidade da tecnologia DSL. Mas para as operadoras, outras modalidades como minimização de potência ou maximização de margem são mais interessantes, pois apresentam taxas de dados fixas, como ocorre na prática. Portanto, nessa dissertação, apresentou-se também as vantagens das técnicas de gerenciamento dinâmico de espectro como ganhos na potência transmitida e na margem de ruído utilizada, sem prejudicar a taxa de dados.

Em relação à otimização da potência transmitida, o Capítulo 4 formalizou e explorou a dualidade entre os problemas de maximização de taxa e minimização de potência, apresentando resultados de simulações que mostraram reduções expressivas (63.4%) na potência transmitida sem reduzir a taxa de transmissão. Esses ganhos em uma grande rede DSL seriam benéficos para as operadoras DSL, uma vez que o *crosstalk* médio presente na rede seria reduzido, podendo aumentar a capacidade da rede em número de usuários e/ou a estabilidade das mesmas. Além do mais, essas reduções no consumo de potência podem levar a cortes substanciais em energia, tornando o par trançado ecologicamente mais correto para a transmissão de dados.

Em relação à otimização de margem de ruído, o Capítulo 5 explorou a semelhança entre

os problemas de minimização de potência e de maximização de margem. Esse fato foi usado para derivar um novo algoritmo chamado MMM que, com a assistência do algoritmos base de gerenciamento de espectro, é capaz de prover soluções muito boas ao problema de otimização de margem. Graças a dualidade entre minimização de potência e maximização de taxa (provada no Capítulo 4), o *portfólio* de algoritmos que podem ser usados como base para o MMM é enorme. Sendo assim, uma operadora DSL pode ser capaz de oferecer proteção e estabilidade maximizadas para seus clientes, garantindo ainda uma vazão mínima pré-estabelecida e sem a necessidade de alterar parâmetros nas camadas de enlace e de rede, que aumentariam a latência da transmissão.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, o autor dessa dissertação propõe as seguintes linhas de pesquisa:

- Sobre minimização de potência, seria interessante haver trabalhos que mostrassem a aplicação das técnicas descritas nesta dissertação em redes DSL reais, que, além de mostrar os ganhos em energia elétrica, também avaliassem se há de fato ganhos em estabilidade, como muitos autores esperam.
- Existem outros métodos para melhorar a estabilidade em redes DSL que não são baseados em gerenciamento de espectro, como por exemplo *Automatic Margin Adaptation* (AMA) e *Virtual Noise* (VN), entre outros. Trabalhos futuros poderiam fazer uma comparação sistemática dos resultados obtidos com o MMM e esses outros métodos de estabilização.
- Uma vez que o MMM pode ser compatível com os padrões DSL atuais, os benefícios de sua adoção podem ser ilustrados em laboratório utilizando modems DSL não modificados ou até mesmo em redes reais, usando os métodos descritos em [41, 42] para estimar o canal de *crosstalk* e impor as máscaras de PSD nos modems DSL, respectivamente, como já tem sido feito para maximização de taxa em [43].
- Ainda sobre o MMM, o algoritmo que verifica a factibilidade poderia ser melhorado de modo a diminuir sua complexidade. O estado da arte, nesse caso, seria um algoritmo com complexidade polinomial.

Publicações do Autor no Período

Artigos de Conferência

- **“An Algorithm for Improved Stability of DSL Networks using Spectrum Balancing”**. Marcio Monteiro, Ana Gomes, Neiva Lindqvist, Boris Dortschy e Aldebaro Klautau. Em *IEEE Global Communications Conference - GLOBECOM 2010*.
- **“Spectrum Balancing Algorithms for Power Minimization in DSL Networks”**. Marcio Monteiro, Neiva Lindqvist e Aldebaro Klautau. Em *IEEE International Conference on Communications - ICC 2009*.
- **“Convergence Analysis of Spectrum Balancing Algorithms for DSL Networks”**. Marcio Monteiro, Cleyton Muto, Francisco Müller e Aldebaro Klautau. Em *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT 2009*.
- **“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*.
- **“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*.

Artigos de revista

- **“Impact of Crosstalk Channel Estimation on the DSM Performance for DSL Networks”**. Neiva Lindqvist, Fredrik Lindqvist, Marcio Monteiro, Boris Dortschy,

Evaldo Pelaes e Aldebaro Klautau. Em *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* (aceito).

Referências Bibliográficas

- [1] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Prentice-Hall, 1999.
- [2] N. Kashif and R. Broos, “DSL for emerging countries,” White paper, Alcatel, 2004.
- [3] 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.
- [4] ITU-T, “Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers,” June 1999.
- [5] —, “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] 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.
- [10] M. Monteiro, A. Gomes, N. Lindqvist, B. Dortschy, and A. Klautau, “An algorithm for improved stability of DSL networks using spectrum balancing,” in *IEEE Globecom 2010 - Symposium on Selected Areas in Communications (submitted)*, Miami, Florida, USA, 2010.
- [11] ANSI Standard T1.417-2003, “Spectrum management for loop transmission systems,” 2003.
- [12] T. Starr, M. Sorbara, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *DSL Advances*. Prentice-Hall, 2003.

-
- [13] 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.
- [14] R. Cendrillon, M. Moonen, W. Yu, J. Verlinden, and T. Bostoen, "Optimal spectrum management," 2004.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Forouzan and L. Garth, "Generalized iterative spectrum balancing and grouped vectoring for maximal throughput of digital subscriber lines," in *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE*, vol. 4, dec. 2005, pp. 5 pp. –2363.
- [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] W. Lee, Y. Kim, M. Brady, and J. Cioffi, "Spe09-6: Band-preference dynamic spectrum management in a dsl environment," in *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, 27 2006–dec. 1 2006, pp. 1 –5.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] M. Tang, C. Long, and X. Guan, "An optimal spectrum-balancing algorithm for digital subscriber lines based on particle swarm optimization," *International Journal of Communication Systems*, vol. 21, pp. 971–985, 2008.
- [23] V. Le Nir, M. Moonen, J. Verlinden, and M. Guenach, "Optimal power allocation for downstream xdsl with per-modem total power constraints: Broadcast channel optimal

- spectrum balancing (bc-osb),” *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 2, pp. 690–697, feb. 2009.
- [24] 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.
- [25] K. B. Song, S. T. Chung, G. Ginis, and J. M. Cioffi, “Dynamic spectrum management for next-generation DSL systems,” *IEEE Commu. Mag.*, vol. 40, no. 10, pp. 101–109, Oct. 2002.
- [26] J. Verlinden, T. Bostoen, and G. Ysebaert, “Dynamic spectrum management for digital subscriber lines - edition 2,” June 2005.
- [27] Dynamic Spectrum Management Technical Report, “ATIS committee NIPP pre-published document ATIS-PP-0600007,” May 2007.
- [28] G. Ginis and J. Cioffi, “Vectored transmission for digital subscriber line systems,” *IEEE Commu. Mag.*, vol. 20, no. 5, pp. 1085–1104, june 2002.
- [29] D. Statovci, T. Nordstrom, and R. Nilsson, “Dynamic Spectrum Management for Standardized VDSL,” *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2007. Honolulu, Hawaii, USA)*, Apr. 2007.
- [30] S. Jagannathan, C. S. Hwang, and J. Cioffi, “Margin optimization in digital subscriber lines employing level-1 dynamic spectrum management,” *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pp. 435–440, May 2008.
- [31] E. V. den Bogaert, T. Bostoen, J. Verlinden, R. Cendrillon, and M. Moonen, “ADSL transceivers applying DSM and their nonstationary noise robustness,” *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2006. Article ID 67686, 8 pages, 2006.
- [32] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [33] R. Cendrillon, M. Moonen, J. Verliden, T. Bostoen, and W. Yu, “Optimal Multi-user Spectrum Management for Digital Subscriber Lines,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 1, 2004, pp. 1–5.
- [34] B. Krongold, K. Ramchandran, and D. Jones, “An efficient algorithm for optimal margin maximization in multicarrier communication systems,” in *IEEE Global Conference in Telecommunication (GLOBECOM)*, vol. 1B, 1999, pp. 899–903 vol. 1b.

-
- [35] 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.
- [36] D. G. Luenberger and Y. Ye, *Linear and Nonlinear Programming*. Springer, 2008.
- [37] J. D. Faires and R. L. Burden, *Numerical Methods*, 3rd ed. Brooks Cole, 2002.
- [38] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley, 2001.
- [39] ETSI std. TS 101 270-1, "Very high speed digital subscriber lines (VDSL); functional requirements," 2003.
- [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] F. Lindqvist, N. Lindqvist, B. Dortschy, P. Ödling, 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.
- [42] H. Abraham, E. Medeiros, M. Monteiro, A. Klautau, and B. Dortschy, "A non-linear optimization method for imposing arbitrary PSDs to DSL modems," in *8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS 2009*, Florianópolis, Brazil, Dec. 2009.
- [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," in *17th European Signal Processing Conference 2009*, Glasgow, Scotland, United Kingdom, August 2009.