

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DA REDE DE
ACESSO METÁLICA PARA O PROVIMENTO DE SERVIÇOS
SUPPORTADOS PELA TECNOLOGIA ADSL**

SANDRO DE CASTRO MONTEIRO

**ORIENTADOR: PROF. DR. CÁSSIO GONÇALVES DO RÊGO
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO HENRIQUE C. PORTELA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO PPGENE.DM-038A/07
BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2007**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DA REDE DE
ACESSO METÁLICA PARA O PROVIMENTO DE SERVIÇOS
SUPPORTADOS PELA TECNOLOGIA ADSL**

SANDRO DE CASTRO MONTEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE SUBMETIDA
AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE
DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rêgo, DELT/UFMG
(Orientador)

Prof. Dr. Antonio José Martins Soares, ENE/UnB
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Luis Fernando Ramos Molinaro, ENE/UnB
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 21 DE SETEMBRO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

MONTEIRO, SANDRO DE CASTRO

Modelo de Avaliação da Capacidade a Rede de Acesso Metálica para o Provimento de Serviços Suportados pela Tecnologia ADSL [Distrito Federal] 2007. xv, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, Comunicação(2007). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Modelo de avaliação	2. Sistema ADSL
3. Taxa de transmissão	4. Rede de acesso
I. ENE/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEIRO, S. C. (2007). Modelo de Avaliação da Capacidade da Rede de Acesso Metálica para o Provimento de Serviços Suportados pela Tecnologia ADSL. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-038A/07, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Sandro de Castro Monteiro.

TÍTULO: Modelo de Avaliação da Capacidade da Rede de Acesso Metálica para o Provimento de Serviços Suportados pela Tecnologia ADSL.

GRAU: Mestre ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho modelo dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Sandro de Castro Monteiro
Rua Buriti, lotes 2/4, bloco B, apt. 204.
CEP 71910-180, Brasília, DF, Brasil.

Ao meu pai, por ter sido um incansável incentivador aos estudos e à constante aquisição de conhecimento, deixando um legado de ensinamentos que vou levar para toda minha vida. Muito obrigado pai!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio e educação que sempre me deram.

À minha esposa Carla, que compreendeu minhas ausências, e prestou o apoio e o carinho necessários em todos os momentos.

Às minhas filhas, Bruna e Eduarda, que mesmo com apenas 6 anos de idade, entenderam a importância desse trabalho e colaboraram muito, tendo paciência nas horas em que eu não podia brincar com elas por estar estudando.

À Brasil Telecom S.A. pela oportunidade e apoio oferecido para que eu realizasse esse curso.

À Coordenação do Curso do Mestrado Profissionalizante da UnB, pelo apoio dispensado durante toda a realização do curso.

Ao Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rêgo, que venceu a distância, sempre dispensando a atenção necessária, provendo o apoio e as orientações fundamentais para elaboração desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Carvalho, pela valiosa orientação prestada nesse trabalho; pela amizade; pelo apoio moral e intelectual; pelas horas de dedicação, abrindo caminhos rumo ao aprendizado consistente, ao raciocínio crítico e analítico.

Ao Eng. Francisco Aurélio Sampaio Santiago, pelo incentivo que constantemente promove ao crescimento e valorização profissional, onde um dos exemplos é o apoio ao mestrado profissionalizante da BrasilTelecom.

Ao Eng. Dirval Antônio Peres, por sempre acreditar nas nossas iniciativas e pelo importante apoio prestado à realização desse trabalho.

Ao Eng. Alexander Castro, que incentivou e apoiou a execução dos testes que foram fundamentais para esse trabalho.

Ao Eng. Ivo Celso de Andrade Duarte, pelo apoio prestado.

À Furukawa S.A. pelo apoio na execução dos testes que foram realizados na sua fábrica em Curitiba.

Ao Prof. Sebastião do Nascimento Neto, pela ajuda e apoio dispensados, acreditando no nosso trabalho, e ajudando fortemente para viabilizar a execução dos testes.

Ao colega de trabalho Evandro Bender, pela sua paciência, ajuda e orientações prestadas, que foram muito importantes na elaboração desse trabalho.

Aos colegas de trabalho Jorge Irineu Demétrio e Luís Carlos Henn, pelo enorme apoio prestado na execução dos testes, pela colaboração no fornecimento de material bibliográfico e conhecimentos passados em cima de suas longas experiências trabalhando com rede externa e transmissão.

Aos Engenheiros Leonardo Silvério e Antônio, que sempre estiveram à disposição para prestar as informações requisitadas, fornecendo importantes conhecimentos sobre os cabos telefônicos.

À equipe da GWork, que nos apoiou e ajudou na execução dos testes em campo.

RESUMO

MODELO DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DA REDE DE ACESSO METÁLICA PARA O PROVIMENTO DE SERVIÇOS SUPORTADOS PELA TECNOLOGIA ADSL.

Autor: Sandro de Castro Monteiro

Orientador: Cássio Gonçalves do Rêgo

Co-Orientador: Paulo Henrique Portela de Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, setembro de 2007

A tecnologia das linhas digitais de assinantes – DSL (*Digital Subscriber Line*) tem sido uma boa solução para atender a demanda de serviços de dados, permitindo a transmissão em altas taxas sobre a mesma rede de acesso utilizada pelo sistema de telefonia convencional, que opera em frequências abaixo de 4 kHz. Mas os sinais DSL trabalham com frequências superiores e sua transmissão sobre os pares de cobre sofre altas perdas e provoca fortes induções nos demais pares do cabo, reduzindo a taxa de bits transmitidos e impondo limites sobre o comprimento da rede. Dessa forma, é importante que as operadoras de telecomunicações conheçam esses limites para utilizar ao máximo a rede para os serviços DSL, garantindo os níveis de qualidade do serviço. Este trabalho propõe um modelo para avaliar a capacidade da rede de pares metálicos para os serviços que utilizam o sistema ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), sendo esse o tipo de DSL mais popular por oferecer acesso à *internet* e sinais de TV para clientes residenciais a baixo custo. A avaliação é feita em cima da taxa máxima transmitida pelo ADSL no sentido estação-cliente, considerando as perdas no canal, o ruído térmico, as interferências provocadas pelo tráfego de sinais ADSL e HDSL nos outros pares do cabo, e algumas topologias características da rede de cabos de cobre. Os parâmetros do modelo são obtidos a partir de medidas executadas sobre os principais tipos de cabos. Algumas simulações são feitas com o modelo para analisar a capacidade da rede para os serviços ADSL, e seus resultados são comparados com medidas da taxa de transmissão realizadas na rede real. Os resultados mostram o modelo como uma boa ferramenta para a estimativa inicial da máxima taxa de transmissão de bits dos serviços ADSL, estabelecendo o comprimento máximo da rede para cada serviço considerando a taxa requerida.

ABSTRACT

MODEL OF EVALUATION OF THE METALLIC ACCESS NETWORK CAPACITY FOR THE PROVISIONS OF SERVICES SUPPORTED FOR ADSL TECHNOLOGY.

Author: Sandro de Castro Monteiro

Supervisors: Cássio Gonçalves do Rêgo

Paulo Henrique Portela de Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, September, 2007

The digital subscriber lines - DSL technology has been a good solution to support the service data demand, by transmitting data in high bit rate through the same access network used for POTS (Plain Old Telephone System). This network is formed with pairs of copper cables which were originally installed for voice signal's traffic and works with low frequencies (below 4 kHz). However DSL signals work with frequencies above 4 kHz and the traffic over copper pair has high losses and originates hard induction on other cable pairs. These effects can reduce the bit rate imposing hard limits to the network length. So, it is important that telecommunication operators know about these limits to use the maximum of the network for DSL services to guarantee the quality of the services. The presented work proposes a model for evaluating the copper pair network capacity for service over ADSL system, since this is the most popular type of DSL, which offers *internet* access and TV signals for residential customers with low cost. The evaluation is made over the maximum downstream bit rate that ADSL system can pass through copper pairs considering the losses in the channel, thermal noise, interferences from traffic of ADSL and HDSL signals on others pairs, and some topological characteristics of the copper cables network. The model parameters are taken from real measures on the principal types of the cables. Some simulations are made with the presented model to analyze the network capacity for ADSL services. Its simulations are compared with real measures of the bit rate transmission on the network, and the results show the model as a good tool for initial estimate of the maximum bit rate ADSL services, establishing the network length for each service from required bit rate.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – A REDE DE ACESSO METÁLICA E AS LINHAS DIGITAIS DE ASSINANTES.....	7
2.1 – O PAR METÁLICO COMO CANAL DE TRANSMISSÃO.....	7
2.2 – OS CABOS TELFÔNICOS.....	11
2.3 – COMPOSIÇÃO DA REDE DE ACESSO.....	14
2.4 – AS LINHAS DIGITAIS DE ASSINANTES.....	15
2.5 – ADSL – ASYMMETRIC DIGITAL SUBSCRIBER LINE.....	18
3 – MODELO PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE DA REDE.....	22
3.1 – MODELO DO CANAL DE TRANSMISSÃO.....	22
3.2 – MODELAGEM PARA A DIAFONIA.....	29
3.2.1 – Levantamento da constante de acoplamento de paradiafonia.....	36
3.2.2 – Levantamento da constante de acoplamento de telediafonia.....	38
3.3 – MODELAGEM DO RUÍDO NO CANAL.....	41
3.4 – CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO.....	43
3.5 – CÁLCULO DA TAXA DE BITS TRANSMITIDOS.....	43
4 – ESTUDO DE CASOS: SIMULAÇÕES.....	47
4.1 – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	47
4.2 - SIMULAÇÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DOS CABOS SOBRE A TAXA DE TRANSMISSÃO DO ADSL.....	49
4.3 - SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA SOBRE OS SINAIS ADSL.....	53
4.4 - SIMULAÇÃO QUANTO AOS TIPOS DE SERVIÇOS QUE PODEM SER OFERECIDOS – UM EXEMPLO.....	59
5 – VALIDAÇÃO DO MODELO E SUGESTÕES DE APLICAÇÃO.....	61
5.1 - CASO 1 – TESTES CONSIDERANDO AMOSTRAS DE PARES DA REDE.....	61

5.2 - CASO 2 – TESTES NA REDE PARA ANALISAR OS EFEITOS DA OCUPAÇÃO COM SINAIS ADSL.....	67
5.3 - SUGESTÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	70
6 – CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais tipos de cabos telefônicos.....	13
Tabela 2.2 - Principais tipos de DSL.....	17
Tabela 3.1 - Módulo da atenuação em dB para 1 km de cada cabo analisado.	23
Tabela 3.2 - Valores obtidos para <i>Ach</i>	23
Tabela 3.3 - Comprimento dos lances de cabos utilizados nos testes.	35
Tabela 3.4 - Valores obtidos para a constante de acoplamento de paradiafonia (<i>kp</i>)......	36
Tabela 3.5 - Valores obtidos para a constante de acoplamento de telediafonia (<i>kt</i>)......	39
Tabela 4.1 - Configurações de rede com combinações de cabos	52
Tabela 4.2 - Exemplo de configurações de cabos em seis rotas distintas	59
Tabela 5.1 - Medidas de dispersão para a amostra de noventa clientes.	63
Tabela 5.2 - Medidas de dispersão para a amostra de trinta clientes.....	64
Tabela 5.3 - Medidas de dispersão para a amostra de centro e trinta e cinco clientes.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do circuito equivalente de uma linha de transmissão.	9
Figura 2.2 - Representação dos dois tipo de diafonia: paradiafonia e telediafonia.	10
Figura 2.3 - Exemplo do agrupamento de pares dentro do cabo [26].	12
Figura 2.4 - Formação básica dos cabos telefônicos [22].	13
Figura 2.5 - Composição básica da rede de acesso metálica.	14
Figura 2.6 - Diagrama de blocos o ambiente operacional de uma xDSL.....	16
Figura 2.7 - Divisão do espectro de frequências pela FDM.	18
Figura 2.8 - Divisão do espectro de frequências dos pares metálicos em 256 subcanais pela técnica DMT.....	19
Figura 2.9 - Ação dos separadores (<i>splitters</i>) na linha ADSL.....	20
Figura 2.10 - Esquema básico de um sistema ADSL.	21
Figura 3.1 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $Hch(f)^2$ considerando 1 km de cabo CT-APL-40.	24
Figura 3.2 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $Hch(f)^2$ considerando 1 km de cabo CTP-APL-40.....	25
Figura 3.3 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e calculados para $Hch(f)^2$ considerando 1 km de cabo CTP-APL-65.....	25
Figura 3.4 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $Hch(f)^2$ considerando 1 km de FE.	26
Figura 3.5 - Comparação entre os valores simulados de $Hch(f)^2$ para 1 km de cada cabo analisado.	27
Figura 3.6 - Comparação entre os valores simulados de $Hch(f)^2$ para o cabo CTP-APL-40 a partir do valor de Ach calculado nesse trabalho, e o valor de Ach do mesmo tipo de cabos fabricado na Europa, apresentado por Barton [1].....	28
Figura 3.7 - Diagrama de blocos da rede com combinação de cabos.....	29
Figura 3.8 - Diagrama de blocos para o modelo da diafonia.....	30
Figura 3.9 - Montagem feita para os testes executados para levantar os parâmetros dos modelos da paradiafonia e telediafonia considerando uma bobina de cabo telefônico.	32
Figura 3.10 - Montagem feita para os testes executados para levantar os parâmetros dos modelos da paradiafonia e telediafonia considerando dois tipos de cabo.	33

Figura 3.11 - Gerador de ruído ADSL e HDSL.	33
Figura 3.12 - Densidade espectral de potência do ruído ADSL medida na saída do gerador.....	34
Figura 3.13 - Densidade espectral de potência do ruído HDSL medida na saída do gerador.....	34
Figura 3.14 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CT-APL-40.	37
Figura 3.15 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-40.	37
Figura 3.16 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-65.	38
Figura 3.17 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de kt calculado, e a medida considerando o cabo CT-APL-40 com 2 km de comprimento.	40
Figura 3.18 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de kt calculado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-40 com 2 km de comprimento.	40
Figura 3.19 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de kt calculado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-65 com 2 km de comprimento.	41
Figura 4.1 - Simulação da densidade espectral de potência do sinal ADSL2+ utilizada nas simulações.	48
Figura 4.2 - Simulação da densidade espectral de potência do sinal HDSL utilizadas nas simulações.	49
Figura 4.3 - Variação da taxa de bits em função da distância, sem considerar a diafonia. .	50
Figura 4.4 - Simulação da SNR e eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CT-APL-40.	51
Figura 4.5 - Simulação da SNR e Eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CTP-APL-40.	51
Figura 4.6 - Simulação da SNR e Eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CTP-APL-65.	52
Figura 4.7 - Resultado das simulações das taxas de transmissão para cada uma das configurações de rede da Tabela 4.1.	53

Figura 4.8 - Esquemático da paradiáfonia provocada por sinais ADSL no lado do <i>modem</i> do cliente.	54
Figura 4.9 - Esquemático para a telediafonia provocada por sinais ADSL no lado do <i>modem</i> do cliente.....	54
Figura 4.10 - Simulação das taxas de transmissão dos sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CT-APL-40.....	55
Figura 4.11 - Simulação das taxas de transmissão dos sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CTP-APL-40.	56
Figura 4.12 - Simulação das taxas de transmissão de sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CTP-APL-65.	56
Figura 4.13 - Sobreposição entre os espectros de frequência HDSL e do canal de descida do ADSL2+.	58
Figura 4.14 - Serviços que podem ser oferecidos até a extremidade de cada uma das rotas listadas na Tabela 4.2, considerando as taxas máximas alcançadas na periferia das rotas.	60
Figura 5.1 - Valores para as taxas de transmissão no canal de descida, obtidos a partir das medidas de campo e da simulação executada com o modelo de cálculo proposto, considerando uma amostra de noventa clientes.....	62
Figura 5.2 - Valores das taxas de transmissão no canal de descida para a amostra de trinta clientes, obtidos a partir das medidas e da simulação.	64
Figura 5.3 - Resultados obtidos para as taxas de transmissão no canal de descida, a partir das medidas e da simulação, considerando uma amostra de cento e trinta e cinco clientes e 20% de ocupação dos pares com HDSL.....	65
Figura 5.4 - Comparação entre os resultados da aproximação quadrática dos valores medidos para a amostra de cento e trinta e cinco clientes, e a respectiva simulação.....	66
Figura 5.5 - Montagem dos vinte e quatro <i>modems</i> ADSL no armário de distribuição para executar os testes de carregamento do grupo de pares do cabo.	68
Figura 5.6 - Valores das taxas de descida medidos com o <i>modem</i> e a respectiva aproximação linear, e os valores dessas taxas obtidos a partir do modelo de cálculo proposto aqui, considerando o carregamento dos pares com sinais ADSL.	69
Figura 5.7 - Exemplo de mapeamento da área de atendimento através da aplicação do modelo de cálculo utilizando uma ferramenta de informações geográficas.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Rate
bps	Bits por segundo
CT-APL-40	Cabo Telefônico com capa de alumínio polietileno laminado, e condutores de 0,40 mm isolados com papel
CTP-APL-40	Cabo Telefônico com capa de alumínio polietileno laminado, e condutores de 0,40 mm isolados com polietileno
CTP-APL-65	Cabo Telefônico com capa de alumínio polietileno laminado, e condutores de 0,65 mm isolados com polietileno
DMT	Discrete Multitone
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
FDM	Frequency Division Multiplexing
FE	Fio Externo
HDSL	High Bit Rate Digital Subscriber Line
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SLA	Service Level Agreements
SNR	Signal to Noise Ratio
TCP	Transmission Control Protocol
VDSL	Very High Data Rate Digital Subscriber Line
VoIP	Voice over internet protocol

1. INTRODUÇÃO

No início do acesso à *internet* para clientes residenciais, os usuários se conectavam a partir de *modems* que discavam para um determinado provedor, utilizando o sistema de telefonia fixa, onde taxas de transmissão de 9.200 bps eram aceitas com grande naturalidade. Com o passar do tempo, as necessidades dos clientes foram mudando, e novas tecnologias eram esperadas para aumentar as velocidades de conexão. Essa demanda incentivou a indústria a buscar soluções para oferecer taxas de transmissão mais altas, de forma ágil e com baixo custo de implantação. Para isso, a rede de cabos de pares metálicos demonstrava ser o meio de transmissão mais interessante, pois já havia sido construída com grande capilaridade para atender a demanda da telefonia e, portanto, utilizando-a, as operadoras de telecomunicações evitariam os custos adicionais de implantação da rede de acesso, necessitando apenas de investimentos em equipamentos que permitissem a conexão em maior velocidade ao longo desses cabos. Nessa busca, surgiram as linhas digitais de assinantes, conhecidas de forma genérica como xDSL (*Digital Subscriber Line*), onde o “x” define um tipo específico de linha. O avanço da eletrônica vem possibilitando a implementação de técnicas de modulação cada vez mais sofisticadas, que estão sendo aplicadas pelas linhas digitais, viabilizando o tráfego de sinais com taxas de transmissão cada vez maiores sobre os pares metálicos.

Diante desse cenário, a tecnologia ADSL (*Asymmetrical Digital Subscriber Line*) ganhou grande força no mercado, permitindo o tráfego de dados em taxas que chegam a 24 Mbps, simultaneamente à transmissão dos sinais de voz, ambos trafegando sobre o mesmo par de fios de cobre. O sistema ADSL está transformando a antiga rede telefônica, que estava limitada a voz e dados em baixas taxas de transmissão, em um sistema poderoso, capaz de levar serviços de voz, dados e vídeo para uma boa parte da população.

A concorrência com as empresas de TV a cabo está fazendo com que as operadoras de telefonia fixa reforcem os investimentos na tecnologia ADSL, utilizando-a para oferecer a seus clientes o pacote de serviços de voz, *internet* e conteúdo de TV sobre sua rede metálica. Nesse caminho, as operadoras de telefonia fixa levam uma grande vantagem por possuírem uma rede com maior capilaridade, e uma enorme base de clientes de telefonia, sendo esses potenciais usuários desses novos serviços. Além do combate à concorrência da

TV a cabo, oferecer serviços de acesso à *internet* em altas taxas de transmissão ajuda as operadoras a reter seus clientes, evitando que esses substituam seus telefones fixos por celulares, considerando que está sendo agregado um acesso de alta velocidade ao mesmo par de fios que já vem sendo utilizado para a telefonia. Esse fato também reforça os investimentos das operadoras sobre o ADSL.

Considerando que a rede de cabos metálicos foi construída durante muitos anos prevendo os tráfegos de voz e dados em baixas velocidades, e agora, a necessidade do mercado está exigindo a transmissão de dados em taxas cada vez maiores sobre essa mesma rede, ficam as questões para os engenheiros das operadoras: essa rede suporta o tráfego de sinais em taxas tão altas? Quais as taxas de transmissão que podem ser oferecidas com garantia de qualidade? Quais os pontos da rede que estão habilitados para a comercialização desses serviços? Existe um limite para a ocupação da rede com os novos serviços? As respostas a essas questões significam um dos grandes desafios atuais para a área técnica das operadoras de telefonia fixa, pois as equipes de vendas precisam dessas respostas de forma ágil e eficiente, abrangendo toda a rede na área analisada considerando que não há muito tempo a esperar em função do rápido avanço da concorrência.

Na tentativa de responder essas questões são realizadas medidas na rede utilizando equipamentos que testam um par de cada vez, ou no máximo cem pares de uma única vez, obedecendo a modularidade máxima dos blocos terminais. Esse processo apresenta alto custo e necessita de muito tempo, pois os testes são demorados, servindo apenas como análises pontuais da rede, e conseqüentemente não atendendo as necessidades de análise das operadoras. Outra alternativa é o teste realizado pelos equipamentos de gerência das próprias linhas digitais, porém essa opção fica limitada a testar apenas os pares da rede que já possuem os serviços das DSL's, não permitindo a análise completa da rede. Dessa forma, fica a necessidade do desenvolvimento de ferramentas para uma análise ampla e rápida da capacidade da rede de cabos metálicos para o provimento de serviços suportados pela tecnologia ADSL. Para isso, é necessário entender as limitações que o canal de transmissão composto pelos pares metálicos impõe ao tráfego de sinais como o ADSL, assim como analisar o comportamento desses sinais e suas características. Vários trabalhos vêm sendo publicados com estudos sobre essa questão.

Nessa linha, encontra-se o trabalho publicado por Barton [1], em 1991. Esse trabalho faz uma análise da relação sinal-ruído na entrada do receptor a partir das características dos sinais transmitidos, estando esses modulados em constelações específicas de QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), considerando também as perdas nos cabos e os efeitos da telediafonia, sendo essa um tipo de interferência provocada nos pares dos cabos em função do fluxo dos sinais em altas taxas. Barton complementa esse trabalho em outra publicação [2] onde são apresentados os resultados das simulações das taxas de transmissão sobre os pares metálicos, considerando algumas constelações de QAM, elegendo o 16-QAM como o tipo de modulação que apresenta melhor desempenho. No mesmo ano, Werner [3] apresentou um modelo para dimensionar as perdas nos pares de cobre, assim como a capacidade desse canal. Este trabalho foi focado no tipo de linha digital conhecida como HDSL (*High Bit Rate DSL*).

Em 1995, Barton e Honig [4] publicaram um artigo sobre a transmissão de sinais nos pares metálicos, porém agora já considerando a técnica de modulação multicanal, conhecida como DMT (*Discrete Multitone*), que é utilizada atualmente pelos sistemas ADSL. Nesse trabalho são encontradas algumas simulações para analisar os efeitos do tráfego simultâneo de vários tipos de linhas digitais em um mesmo cabo. Os resultados demonstram a existência de incompatibilidades entre algumas linhas digitais, em função da sobreposição dos espectros de frequência. Pollet *et al* [5] apresentaram um estudo sobre os efeitos dos parâmetros dos cabos na banda do espectro de frequências utilizado pelo ADSL. Esse trabalho segue a linha desenvolvida por Barton [1], utilizando uma expressão empírica que modela o canal de transmissão formado pelos pares metálicos, e considerando os efeitos da telediafonia e o ruído branco. Kerpez *et al* [6] desenvolveram um estudo sobre as interferências entre os vários tipos de linhas digitais, porém agora considerando a paradiafonia, sendo essa outro tipo de interferência entre os pares dos cabos, ainda não abordada nos trabalhos publicados por Barton anteriormente. Nesta abordagem, eles apresentam as incompatibilidades entre os espectros de frequência de vários tipos de linhas digitais. Esse trabalho apresenta também algumas possibilidades de utilização de códigos de correção de erros para reduzir os efeitos dessas interferências.

Cook e Shepard [7] fizeram considerações quanto à distribuição dos pares de assinantes, desde a estação telefônica até as caixas terminais, considerando os pontos que possibilitam a flexibilidade na distribuição da rede. Foram apresentados os efeitos nocivos à transmissão

provocados pelos filtros passivos utilizados como separadores de sinais no sistema ADSL, sugerindo a aplicação de filtros ativos para essa finalidade. Cook *et al* [8] também demonstraram suas preocupações com a incompatibilidade espectral entre alguns tipos de linhas digitais, considerando o ambiente inteiro da rede de cabos metálicos, desde a estação telefônica até o cliente. Eles propõem a elaboração de um plano de utilização de frequências para as linhas digitais, como forma de reduzir a sobreposição entre os espectros dos sinais transmitidos em um mesmo cabo.

Em 1998, a Telebrás, até então Empresa estatal que definia as normas do sistema de telefonia no Brasil, atenta às perspectivas de crescimento das linhas digitais, publicou sete normas [9] - [15], e um manual [16], contendo os resultados do estudo sobre a capacidade da rede de cabos instalada no Brasil até aquela época, para tráfego das linhas digitais de assinantes. Esse estudo é baseado nas topologias da rede, em testes de qualificação dos pares e também procedimentos de manutenção para permitir o bom desempenho da rede para esse tipo de transmissão. O resultado desse trabalho apontou que apenas 60% da rede instalada na época apresentavam viabilidade para o provimento dos serviços ADSL.

Em junho de 1999, a ITU (*International Telecommunication Union*) publicou a recomendação G.992.1 [17], que padroniza o sistema ADSL em funcionamento hoje. É possível observar que os trabalhos publicados antes dessa recomendação, buscavam melhorias na aplicação do ADSL, sendo possível identificar na G.992.1 várias contribuições desses artigos, como por exemplo a utilização da técnica DMT e da modulação QAM adaptativa, a previsão de uma otimização da densidade espectral de potência para reduzir os efeitos de interferência, e a definição do código de correção de erros. Os trabalhos publicados após a G.992.1, passaram a incluir as condições definidas por ela em suas análises e resultados, como o trabalho de Zeng e Cioffi [18], que apresenta o estudo sobre a compatibilidade espectral entre alguns tipos de linhas digitais, considerando o espectro de frequências do ADSL previsto na G.992.1, analisando apenas os efeitos da paradiáfonia no trabalho.

Em [19], Garms *et al* apresentam um estudo sobre a capacidade da rede para o provimento dos serviços ADSL considerando a atenuação nos pares metálicos, o ruído branco e as perdas provocadas pelo descasamento de impedância decorrente da ligação em paralelos de alguns pares da rede. Nesse trabalho é feita a classificação das centrais telefônicas conforme

suas capacidades de transmissão para o ADSL. Haykin [20] apresenta uma análise abordando o mesmo tipo de interferência citado por Zeng e Cioffi [18], reforçando a condição dos pares metálicos como filtros passa-baixa, e fazendo uma abordagem para o cálculo da capacidade da rede a partir da equação da capacidade do canal apresentada por Shannon [21], porém prevendo ajustes na relação sinal-ruído considerando as características reais da rede e dos sinais transmitidos.

Bingham publicou um livro [22] com uma abordagem bastante ampla e detalhada sobre o sistema ADSL, partindo do conceito da modulação multicanal, e apresentando um estudo bem abrangente sobre os efeitos das interferências provocadas pelos sinais ADSL nos pares metálicos, ressaltando o compromisso entre o comprimento da rede, sua ocupação com linhas digitais, e a capacidade de transmissão. Bingham insere os parâmetros do tipo de modulação utilizado pelo ADSL na relação sinal-ruído, aproximando a abordagem de Haykin para uma aplicação ainda mais prática. Cayres [23] apresentou os resultados de algumas simulações realizadas a partir das abordagens de Barton [1] e Pollet [5], assim como os resultados de testes realizados com um tipo de cabo de fabricação especial para o tráfego de linhas digitais, citando como resultado o alcance da taxa de 5 Mbps em até 4 km desse cabo especial.

Apesar dos excelentes resultados que os trabalhos citados apresentam ao prover o entendimento sobre o comportamento da rede para o tráfego de sinais ADSL, ainda há a necessidade de um modelo para uma análise abrangente de uma determinada rede, considerando suas características reais com relação aos comprimentos e tipos de cabos envolvidos.

A partir dos resultados das publicações citadas anteriormente, o presente trabalho propõe um modelo matemático que permita estimar a capacidade da rede metálica em transmitir sinais ADSL, em termos da máxima taxa de transmissão possível de ser alcançada, considerando os comprimentos e tipos de cabos instalados, e a ocupação dos pares da rede com outras linhas digitais. Dessa forma, conhecendo-se esses parâmetros, será possível fazer uma análise geral da rede através da estimativa dos seus limites para o provimento dos vários serviços ADSL, desde que sejam conhecidas respectivas taxas mínimas de transmissão exigidas. O modelo matemático a ser utilizado aqui é composto de algumas equações citadas por autores referenciados anteriormente, porém, os parâmetros dessas

equações serão obtidos a partir de medidas realizadas nos principais tipos de cabos instalados atualmente na rede brasileira. Com isso pretende-se promover os ajustes dessas equações na busca de obter resultados mais próximos da realidade da rede instalada no Brasil.

O texto desta dissertação está organizado como descrito a seguir: no capítulo 2 é feita uma breve apresentação da rede de acesso metálica, através dos estudos sobre o par metálico como canal de transmissão, os principais tipos de cabos utilizados instalados hoje no Brasil, e a composição básica da rede formada por esses cabos. Ainda nesse capítulo, é feita uma breve abordagem sobre as linhas digitais de assinantes, enfatizando a ADSL. O capítulo 3 traz o desenvolvimento do modelo proposto, onde são apresentadas as equações utilizadas, bem como os resultados dos testes executados para adaptar os parâmetros dessas equações aos cabos analisados. No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações realizadas a partir do modelo, visando analisar o comportamento da transmissão dos sinais ADSL, considerando os efeitos do canal de transmissão constituídos pelos pares metálicos, e das interferências provocadas pelo tráfego de sinais HDSL e ADSL nos demais pares dos cabos. Para validar o modelo, no capítulo 5 são apresentadas as comparações entre os resultados de medidas em campo, e os simulados a partir do modelo.

2 A REDE DE ACESSO METÁLICA E AS LINHAS DIGITAIS DE ASSINANTES

As linhas digitais de assinantes utilizam a rede de acesso metálica já existente para os serviços de telefonia, sendo essa composta basicamente pelos cabos telefônicos, que por sua vez são constituídos a partir de um agrupamento de pares de fios de cobre, chamados aqui de pares metálicos. Esses cabos estão instalados em canalizações subterrâneas e postes ao longo das cidades, formando uma enorme rede, com grande capilaridade. Nesse capítulo será feito um estudo do par metálico como canal de transmissão, sendo apresentadas também as principais características e topologia da rede de cabos formados por esses pares. Além disso, será feita uma abordagem sobre os tipos de linhas digitais de assinantes, com ênfase na ADSL.

2.1 O PAR METÁLICO COMO CANAL DE TRANSMISSÃO

Os pares de fios de cobre que compõem os cabos telefônicos foram por muitos anos utilizados como canal de transmissão apenas para o tráfego do sinal de voz do sistema de telefonia. Com o advento da fibra óptica, muitos achavam que esse canal estava próximo de ficar como última opção de forma de acesso para clientes com interesse em serviços de transmissão de dados. Através da melhor utilização do espectro de frequências dos pares de cobre, proporcionada pela tecnologia das linhas digitais de assinantes, foi possível reverter esse quadro, estando hoje esses pares metálicos em posição de destaque para aplicações de acesso em altas taxas de transmissão, principalmente para clientes residenciais.

O par metálico é visto como uma linha de transmissão [23], e como tal, suas características básicas podem ser entendidas através da teoria pertinente. Dessa forma, é apresentado a seguir um breve resumo sobre as características desse par a partir do estudo das linhas de transmissão. Não é objetivo desse trabalho realizar um estudo profundo sobre o assunto, mas sim apresentar seus conceitos básicos que serão úteis para o entendimento dos capítulos seguintes.

Os pares metálicos constituem linhas de transmissão homogêneas e de pares simétricos. Uma linha é dita homogênea quando suas características elétricas são uniformemente

distribuídas ao longo do seu comprimento; e de pares simétricos, quando a mesma é constituída por condutores iguais e simétricos em relação à terra [23]. Uma linha composta de fios de cobre possui entre esses uma capacitância C , e ao longo deles uma indutância L , provocada pelos efeitos eletromagnéticos oriundos do fluxo da corrente elétrica ao longo da linha. Duplicando o comprimento da linha, duplicam-se também os valores da capacitância e da indutância associadas. Isso ocorre porque esses parâmetros estão uniformemente distribuídos ao longo do comprimento da linha. Assim, conhecendo-se esses valores por unidade de comprimento e também o comprimento total da linha, é possível calcular sua capacitância e sua indutância totais [24].

Além da capacitância e da indutância, a linha de transmissão apresenta ainda uma resistência R , associada às perdas nos condutores, e uma condutância G , associada à condutividade do dielétrico utilizado para separar os condutores [24]. Os parâmetros C , L , R e G são denominados de parâmetros distribuídos ou primários da linha, comumente expressos em F/km , H/km , Ω/km e mho/km , respectivamente. Esses estão diretamente relacionados com as características construtivas da linha, como diâmetro do condutor e tipo e espessura do material isolante [23].

Considerando uma linha de transmissão de comprimento z , tendo conectado em uma extremidade um gerador V_g , e na outra uma carga Z_L , pode-se representar uma secção Δz da linha pelo seu circuito equivalente, através de seus parâmetros concentrados, conforme apresentado na Figura 2.1, o qual possui características de um filtro passa-baixa [25]. Isto explica o porquê dos pares metálicos serem um excelente canal de transmissão para os serviços da telefonia convencional, onde o tráfego ocorre na frequência de voz ocupando o espectro até 4 kHz.

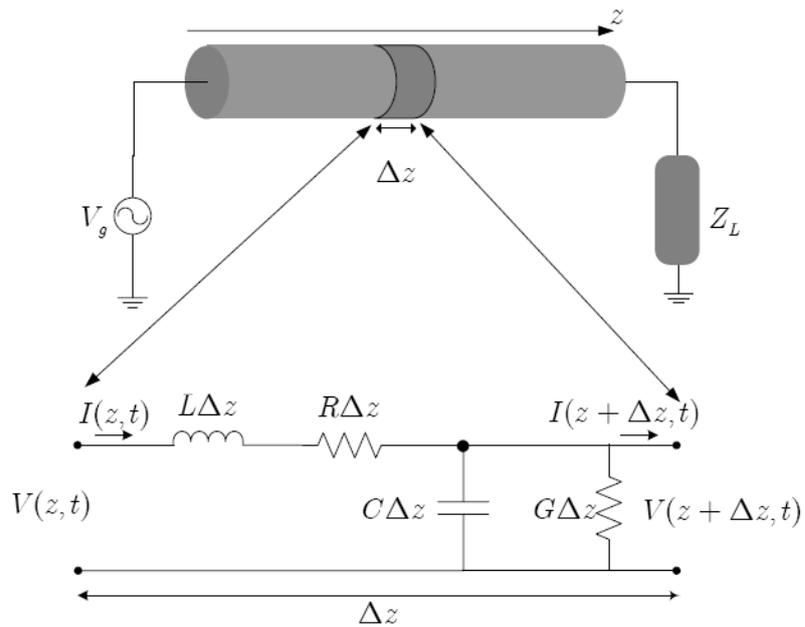


Figura 2. 1 - Representação do circuito equivalente de uma linha de transmissão.

Além dos parâmetros distribuídos, as linhas de transmissão possuem seus parâmetros de transmissão, sendo esses a impedância característica e a constante de propagação. Esses permitem definir as características de transmissão dos sinais ao longo da linha.

Uma corrente alternada trafegando sobre uma linha de transmissão está sujeita à impedância característica da linha, estando essa relacionada com os parâmetros primários e com a frequência ω [24], através da equação:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2.1)$$

Uma linha terminada com uma carga com impedância igual a Z_0 , se comportará como uma linha de comprimento infinito, evitando perdas por reflexão do sinal [23].

A constante de propagação γ representa as variações de amplitude e fase impostas pela linha de transmissão ao sinal que por ela se propaga. Essa constante é dada por uma parte real α , chamada de constante de atenuação, responsável pelas variações de amplitude do sinal, e uma parte imaginária β , chamada de constante de fase, responsável pela variação de fase do sinal. Dessa forma,

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (2.2)$$

que se relaciona com os parâmetros primários da linha através da equação [24].

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (2.3)$$

Pelo exposto, é possível determinar as características da transmissão dos sinais sobre a linha a partir dos seus parâmetros primários. Por outro lado, é possível projetar uma linha, determinando suas dimensões e características de isolamento, a partir de características de transmissão desejadas.

Os cabos telefônicos são constituídos por vários pares que ficam confinados dentro de uma capa, e agrupados a cada 25 pares. O sinal que trafega em um par pode causar a interferência no par vizinho, representando um tipo de ruído. Isso ocorre pelo efeito do acoplamento eletromagnético entre os pares, causados pelas capacitâncias e indutâncias envolvidas [23]. Esse efeito é conhecido como diafonia. O termo diafonia foi originalmente aplicado ao acoplamento originado com o tráfego do sinal de voz ao longo das linhas telefônicas, mas atualmente ele possui um significado mais amplo, referindo-se a transferência de energia entre pares telefônicos que estão transmitindo qualquer tipo de informação, tais como voz ou dados. Existem dois tipos de diafonia: paradiafonia e telediafonia [8], conforme ilustrado na Figura 2.2.

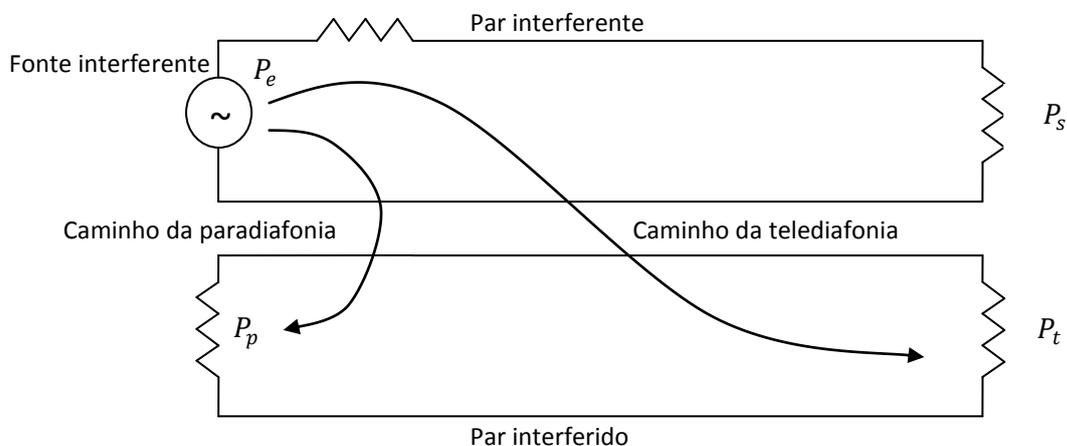


Figura 2. 2 - Representação dos dois tipo de diafonia: paradiafonia e telediafonia.

A paradiáfonia é a interferência no receptor provocada pelo tráfego de sinais nos pares vizinhos, estando a fonte dessas interferências próxima ao receptor, como ilustrado na Figura 2.2. Esse tipo de diafonia é normalmente medida e definida como uma diafonia entrada/saída, isto é, a potência de entrada no par interferente é comparada à potência de saída acoplada ao par interferido na extremidade do cabo que inclui a fonte interferente. A telediafonia é usualmente medida e definida como uma diafonia saída/saída, onde a potência de saída do circuito interferente é comparada à potência de saída acoplada ao circuito interferido na extremidade do cabo oposta à fonte interferente.

Além da diafonia, o par metálico está sujeito às fontes externas de ruído, como as correntes induzidas pela interferência de linhas de transmissão de energia, sinais de radiofrequência, etc. Esses podem ser evitados ou reduzidos a partir de um projeto adequado de aterramento e isolamento da rede [23] e, portanto, não serão considerados nesse trabalho. Por outro lado, o ruído térmico, que é proveniente da movimentação dos elétrons ao longo do condutor, é inevitável, representando uma limitação básica imposta pelo meio de transmissão [20], e por esse motivo, o mesmo é considerado no modelo que será apresentado nos capítulos seguintes.

2.2 OS CABOS TELEFÔNICOS

Os cabos telefônicos são formados por pares de fios de cobre, podendo ter até três mil e seiscentos pares. Antes da privatização do sistema de telefonia no Brasil, as normas de fabricação desses cabos eram determinadas pela Telebrás, e agora são definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, que manteve uma boa parte do previsto anteriormente pela Telebrás.

Os fios que formam os pares são torcidos entre si com passos que não excedem 150 mm. Essa torção evita que os pares funcionem como antenas, tornando-os mais imunes às interferências. Os condutores são isolados com um material de polietileno ou de papel, conforme o tipo de cabo. Essa isolamento é feita seguindo uma codificação de cores, através de uma combinação entre 5 cores para a linha “a” (branco, encarnado, preto, amarelo e

violeta), e 5 cores para a linha “b” (azul, laranja, verde, marrom e cinza), resultando em 25 pares. Dessa forma, os cabos são formados por grupos de até 25 pares cada. Essa combinação de cores se repete a cada grupo de 25 pares. Os grupos são identificados pela amarração feita com fios seguindo o mesmo código de cores [26]. A Figura 2.3 ilustra um exemplo desse agrupamento para um cabo de 200 pares.

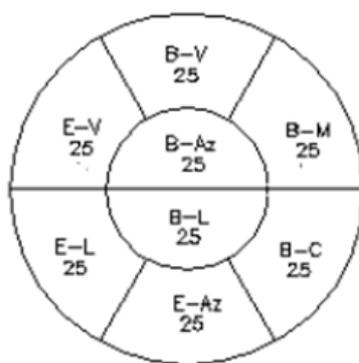


Figura 2. 3 - Exemplo do agrupamento de pares dentro do cabo [26].

A geometria de distribuição dos pares nos grupos, assim como desses no cabo, é projetada para reduzir os efeitos da diafonia, sendo esses praticamente nulos entre os grupos [26]. O núcleo do cabo onde ficam os pares é envolvido por várias camadas de uma fita formada por um material higroscópico, que fornece uma proteção térmica adequada para evitar danos à isolação dos condutores. Sobre o núcleo do cabo enfaixado, é aplicada uma fita de alumínio revestida com termoplástico em ambas as faces (fita APL). A espessura do alumínio na fita APL deve ser de $0,15 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ [26]. Sobre a fita APL é aplicado um revestimento de material termoplástico na cor preta, contendo aditivos adequados, para suportar os efeitos das intempéries. A Figura 2.4 ilustra a formação dos cabos descrita acima.

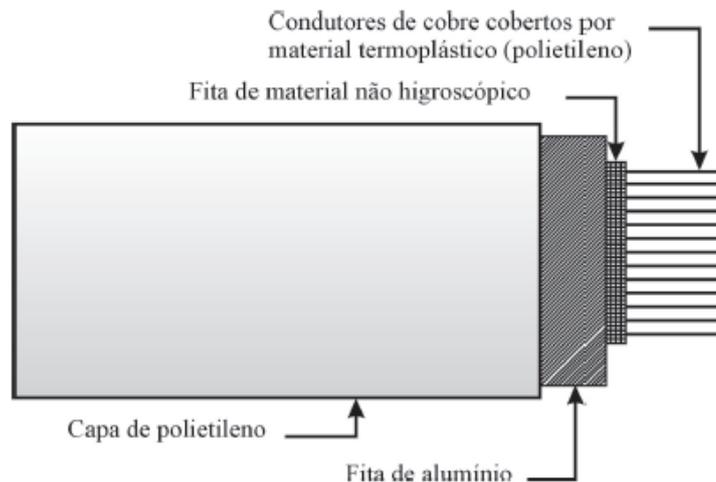


Figura 2. 4 - Formação básica dos cabos telefônicos [22].

Os cabos telefônicos são classificados conforme suas características construtivas, como tipo de isolamento e diâmetro dos condutores, tipo de capa externa e capacidade. A Tabela 2.1 apresenta os principais tipos de cabos encontrados atualmente na rede de telefonia brasileira.

Tabela 2.1 - Principais tipos de cabos telefônicos.

Descrição	Diâmetro do condutor (mm)	Isolamento do condutor	Capa externa	Capacidade de pares
CT-APL	0,40 / 0,50 / 0,65	Papel	APL	200 à 3600
CTP-APL	0,40 / 0,50 / 0,65	Polietileno	APL	10 à 2400

Os cabos mais encontrados na planta brasileira são os CT-APL com condutores de 0,40 mm, o CTP-APL com condutores de 0,40 e 0,65 mm. O primeiro será citado aqui como CT-APL-40, e os outros dois CTP-APL-40 e CTP-APL-65, respectivamente. O projeto do cabo CT-APL foi desenvolvido na década de 1970 [27], com o foco específico para o sistema telefônico convencional, onde é possível trafegar a voz e sinais de dados em baixas taxas. Dessa forma, não foram especificados parâmetros de transmissão para altas frequências [27]. Esses cabos possuem um projeto mais simplificado do que os cabos CTP-APL, e conseqüentemente possuem menor custo. Por esse motivo, e considerando o foco que se tinha no atendimento aos serviços de voz, a Telebrás previa a instalação desses

cabos em toda a rede subterrânea com capacidade superior a seiscentos pares, ficando os cabos CTP-APL limitados a capacidades inferiores, sendo instalados principalmente na rede aérea.

Em 1998 a Telebrás publicou um conjunto de normas [9] – [15] prevendo a digitalização da rede externa, tendo em vista as linhas digitais de assinantes. Esse fato motivou as operadoras a retirarem os cabos CT-APL de seus novos projetos, fazendo com que as fábricas desativassem as linhas de produção desses cabos. Com a extinção dos cabos CT-APL, em 1999, a ABNT fez uma atualização na norma do cabo CTP-APL, inserindo nessa os parâmetros de transmissão para a frequência de até 1,1 MHz [26], passando esse a ser recomendado para utilização em toda a rede. Apesar dessa mudança, uma boa parte da rede subterrânea de alta capacidade (acima de seiscentos pares) que foi implantada no Brasil antes de 1998, permanece com cabos CT-APL.

A seguir será apresentada uma visão geral da composição da rede de acesso composta pelos cabos metálicos citados aqui.

2.3 COMPOSIÇÃO DA REDE DE ACESSO

Os cabos telefônicos constituem o principal elemento da rede de acesso metálica, estando eles instalados em canalizações subterrâneas, construídas especificamente para abrigá-los, compondo uma rede subterrânea, ou em postes, constituindo uma rede aérea. A Figura 2.5 ilustra a composição básica dessa rede.

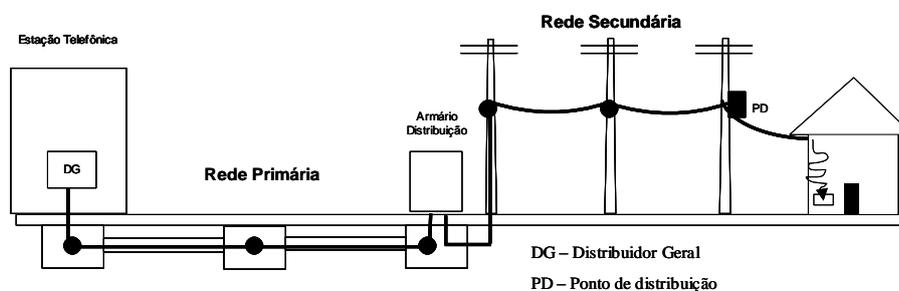


Figura 2. 5 - Composição básica da rede de acesso metálica.

A rede primária inicia no Distribuidor Geral (DG) localizado nas Estações Telefônicas. Os cabos dessa rede saem do DG com formações de alta capacidade, que variam entre seiscentos e dois mil e quatrocentos pares, e partem da Estação de forma radial, distribuindo seus pares ao longo do caminho nos Armários de Distribuição, chegando às extremidades da rede com cabos de menor capacidade (trezentos pares, por exemplo). Devido suas dimensões, esses cabos são instalados na rede de dutos subterrâneos, construída especificamente para abrigá-los. O comprimento típico dessa rede é de 2 km. Uma boa parte da rede primária foi construída antes de 1998, principalmente as que se encontram nos centros das grandes cidades e, portanto, possuem muitos cabos do tipo CT-APL.

A rede secundária é formada por cabos de capacidade variando entre dez e trezentos pares, porém todos do tipo CTP-APL, e na sua maioria com fios de bitola 0,40 mm. Para os pontos mais distantes dessa rede, são utilizados cabos com fios de 0,65 mm, que oferecem menores perdas ao sinal transmitido [26]. Tipicamente essa rede é aérea, estando os cabos fixados nos postes. O comprimento típico da rede secundária varia entre 0,5 km e 1,5 km.

A última parte da rede interliga o ponto de distribuição à casa do cliente, sendo denominada de linha de assinante (LA), que é constituída basicamente pelo fio externo, conhecido como FE. Por ser constituído por apenas um par de fios, o FE é o único elemento da rede de pares metálicos que é dedicado exclusivamente a um cliente. O FE termina no ponto de terminação de rede (PTR), após o qual inicia a rede interna do cliente. A rede de cabos possui uma topologia em estrela com até três níveis, sendo o primeiro deles com origem no DG, o segundo no armário de distribuição e o terceiro sendo originado a partir dos pontos de distribuição.

A seguir serão apresentados os principais tipos de linhas digitais de assinantes.

2.4 AS LINHAS DIGITAIS DE ASSINANTES

O sistema de telefonia foi desenvolvido para trabalhar na frequência de voz, onde a central de comutação utiliza filtros que impedem a transmissão dos sinais acima de 4 kHz. Sendo assim, os *modems* que trabalham utilizando a linha telefônica têm a vantagem de permitir a

conexão de qualquer ponto onde tenha esse tipo de linha ativa, porém ficam limitados a transmitir dados em baixas taxas de transmissão, que podem chegar ao máximo a 56 kbps, em função da barreira imposta pelos filtros da central telefônica [28]. Dessa forma, os pares de fios trançados de cobre que compõem os cabos telefônicos, e que são utilizados como canal de transmissão no sistema de telefonia, ficam com seu espectro de frequências acima de 4 kHz absolutamente ocioso.

O avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de *modems* que contam com técnicas de modulação que permitem o tráfego de dados sobre os pares trançados, independentemente do sistema de telefonia convencional, dando origem às linhas digitais de assinantes, conhecidas com DSL (*Digital Subscriber Line*). Sendo assim, emprega-se o termo DSL para uma tecnologia mais avançada de *modems* que transmitem dados em altas taxas sobre os mesmos pares de cobre utilizados pela telefonia convencional, de forma independente do sistema de telefonia [30]. Essa tecnologia ganhou força com o interesse dos usuários no aumento da velocidade do acesso à *internet*.

A linha digital de assinantes permite o acesso direto entre o terminal do usuário (um computador, por exemplo), e uma central de operações (CO) da operadora de telefonia, conforme ilustra a Figura 2.6. Através da CO, o usuário de uma DSL se conecta a um *backbone* de uma rede de dados de alta velocidade, que pode ser baseada, por exemplo, na tecnologia ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), IP (*Internet Protocol*) ou ainda *Ethernet*, todos utilizando redes de alta velocidade, normalmente construídas por cabos de fibra óptica.

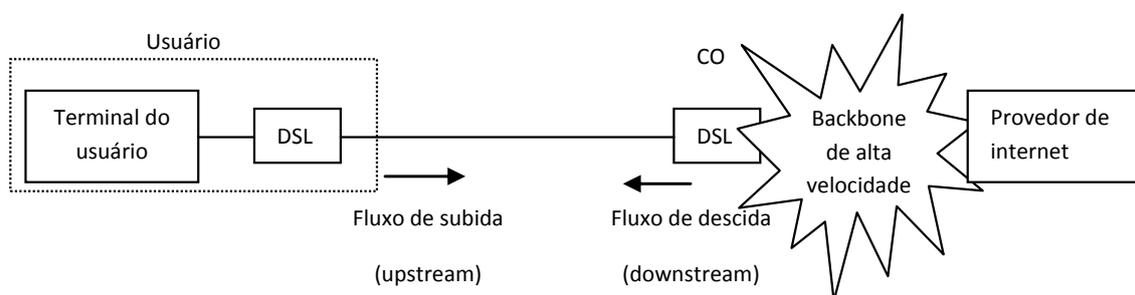


Figura 2. 6 - Diagrama de blocos o ambiente operacional de uma xDSL

A central de comutação de telefonia não faz parte da conexão de uma DSL, não cabendo, portanto, a cobrança de pulsos telefônicos para esses serviços. A conexão de uma DSL

ocorre por intermédio do *modem* e não discando para um número específico, como é feito com o acesso à *internet* via conexão discada [30]. Isso deixa claro que todo o funcionamento DSL não se refere à linha telefônica, pois esta é apenas o meio de transmissão, mas sim ao *modem*.

As linhas digitais de assinantes são classificadas como simétricas ou assimétricas, conforme as características das velocidades de subida e de descida. A velocidade de subida refere-se à conexão do cliente para o centro de operações, e a de descida, no sentido inverso. Se essas velocidades forem iguais, a DSL é chamada de simétrica, e sendo diferentes, tem a denominação de assimétrica. Essa classificação é necessária para a melhor utilização da banda disponível conforme a demanda dos serviços. As linhas digitais simétricas são importantes para serviços que exigem a troca de informações em tempo real entre as partes, como videoconferência, por exemplo. Por outro lado, quando o serviço precisa transmitir mais dados em um sentido do que para o outro, como acesso à *internet* e vídeo sobre demanda VoD (*video on demand*), devem ser utilizadas as técnicas assimétricas.

A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos principais tipos básicos de DSL e respectivas características [32].

Tabela 2.2 - Principais tipos de DSL

Tipo de DSL	Descrição	Taxa de descida	Taxa de subida	Permite o tráfego de voz
HDSL	High Bit Rate DSL	Acima de 2 Mbps	Acima de 2 Mbps	Não
ADSL	Asymmetric DSL	7 Mbps	800 Kbps	Sim
VDSL	Very High Data Rate DSL	50 Mbps	3 Mbps	Sim

A HDSL [31] vem sendo muito aplicada para estabelecer entroncamento entre centrais, principalmente na interligação entre as BTS's (*Base Transceiver Station*) e a central de comutação do sistema celular, e também em redes LAN, servidores de *Internet*, redes privadas de dados e outros. Com a grande expansão da rede celular existem hoje vários pares da rede metálica ocupados com HDSL. Por outro lado, por permitir a transmissão simultânea de voz e dados, e possuir uma banda para o tráfego de descida maior do que para

o tráfego de subida, o sistema ADSL é hoje o tipo de DSL mais popular no mundo, provendo principalmente acesso à *internet* a clientes residenciais [32]. A VDSL permite taxas bem superiores às previstas no ADSL, porém o seu alcance é muito menor em função das altas perdas. Por essa característica, a VDSL é mais aplicada em conjunto com FTTC (*Fiber to the cabinet*) ou FTTB (*Fiber to the build*) [32], onde o comprimento da rede metálica é reduzido pela substituição de um longo trecho de cabos metálicos por cabos ópticos. Por essas limitações a VDSL tem sido ainda pouco utilizada no Brasil.

Por sua importância nesse trabalho, em seguida é apresentado um maior detalhamento sobre a tecnologia ADSL.

2.5 ADSL – ASYMMETRIC DIGITAL SUBSCRIBER LINE

A ADSL transmite dados em altas taxas, através da parte superior do espectro de frequências dos pares metálicos (acima de 4 kHz), que fica ociosa quando os esses são utilizados nas ligações telefônicas. Para permitir o tráfego simultâneo de voz e dados sobre um mesmo par trançado, a ADSL utiliza a multiplexação por divisão de frequências para dividir o espectro do par metálico em três canais: voz, reservado para o tráfego do sistema telefônico, e os canais de subida e descida citados na seção anterior [32]. Na Figura 2.7 está ilustrada a divisão de frequências utilizada no ADSL.

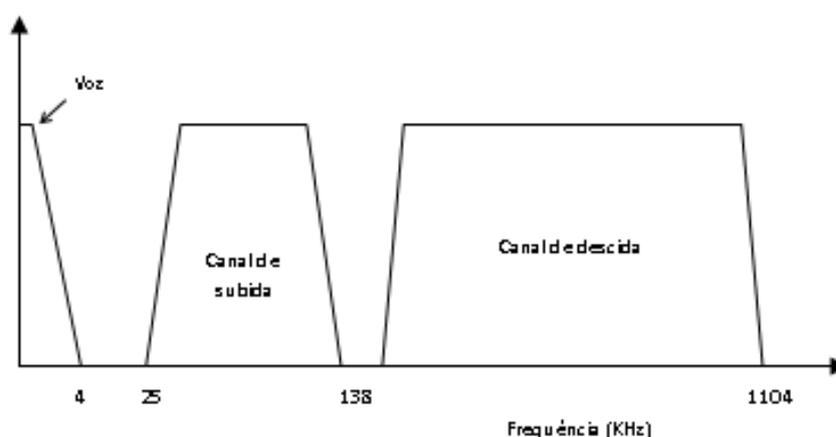


Figura 2. 7 - Divisão do espectro de frequências pela FDM.

A técnica DMT (*Discrete Multitone*) [17] é utilizada para dividir os três canais em subcanais independentes com 4312,5 Hz cada. Essa divisão é de complexa implementação, porém simplifica a análise da transmissão dos sinais, pois essa é feita em cima de canais estreitos sendo possível considerar as perdas e o próprio ruído constante em cada um [20]. A recomendação G.992.1 [17] estabelece a divisão em 256 subcanais, estando essa representada na Figura 2.8. A DMT aumenta a imunidade ao ruído, pois os subcanais afetados podem ser desprezados, mantendo os demais subcanais ativos. Com ela é possível também a utilização de taxas adaptativas, onde a quantidade de bits transmitidos por subcanal pode ser função da relação sinal-ruído presente no mesmo, sendo essa estimada pelo *modem* durante a fase de treino ou até mesmo durante a própria transmissão de dados. Essa característica permite que a transmissão do sinal possa se adaptar às condições do canal [21].

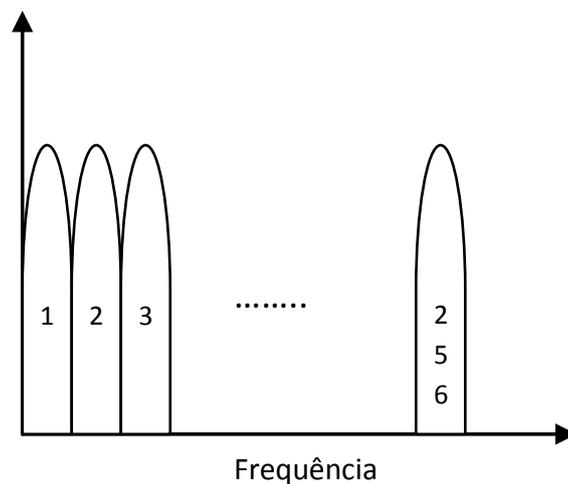


Figura 2. 8 - Divisão do espectro de freqüências dos pares metálicos em 256 subcanais pela técnica DMT.

Cada um dos subcanais é modulado em QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) [29]. Dessa forma, a transmissão do sinal ADSL pode ser considerada como uma transmissão em paralelo de vários canais independentes modulados em QAM [28].

Para separar voz e dados na linha telefônica, são instalados separadores (*splitters*), sendo esses pequenos equipamentos instalados no lado da central de operação e no cliente. Esses equipamentos são constituídos por filtros passa-baixa e passa-alta, capazes de separar os sinais de voz e dados, conforme ilustrado na Figura 2.9.

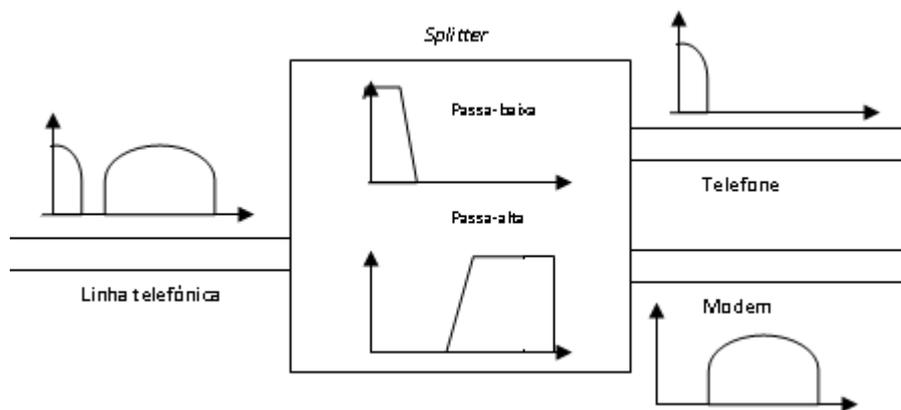


Figura 2. 9 - Ação dos separadores (*splitters*) na linha ADSL.

Quando a chamada telefônica (voz) é realizada, o sinal é encaminhado para a rede de comutação de circuitos da operadora de telefonia e segue pelo seu caminho habitual. Quando a linha ADSL é utilizada, para o acesso à *internet*, por exemplo, o sinal do *modem* é encaminhado ao equipamento que fica na central, conhecido como DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). Na central de operações, cada par telefônico é conectado ao *splitter*, e esse ao multiplexador de acesso DSL (DSLAM – *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). A função do DSLAM é concentrar o tráfego de dados das várias linhas com *modem* ADSL e conectá-lo com a rede de dados, funcionando como um grande concentrador de linhas ADSL. No DSLAM é que a operadora pode limitar a velocidade de acesso oferecida ao usuário, conforme plano do serviço adquirido. O DSLAM envia o sinal recebido para uma linha de alta velocidade que está conectada à *internet*. Na Figura 2.10 estão ilustrados como os elementos de uma rede ADSL estão interligados.

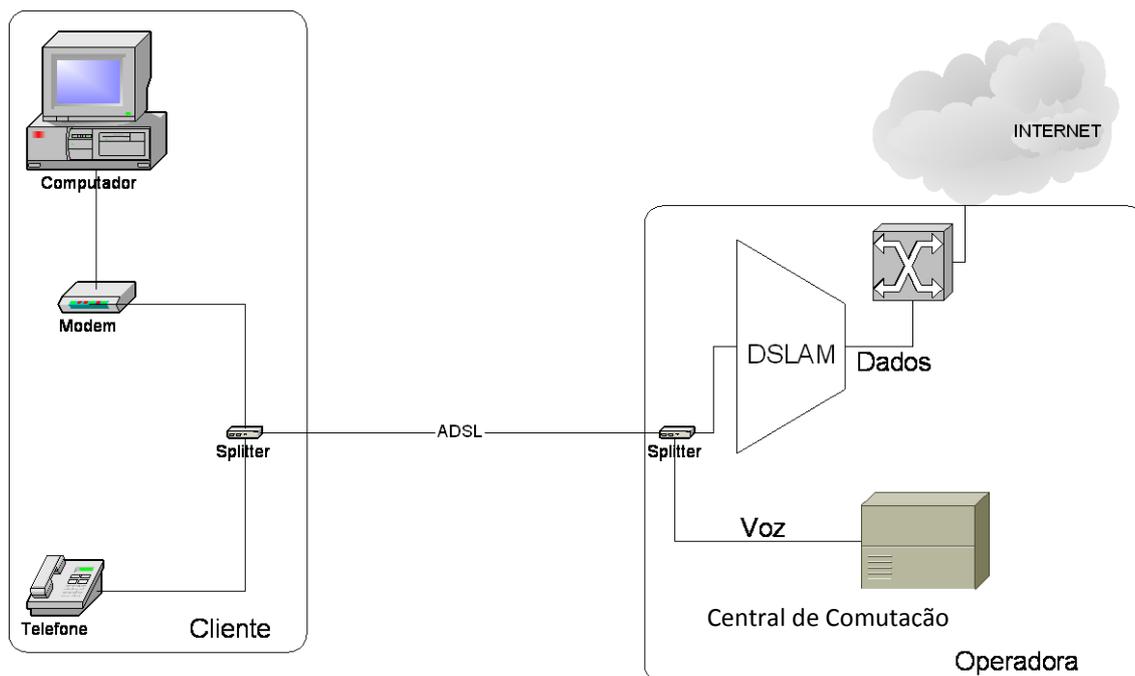


Figura 2. 10 - Esquema básico de um sistema ADSL.

Em 2005 foi emitida a recomendação G.992.3 estabelecendo o ADSL2 [33], o qual prevê a taxa adaptativa em tempo real e maior economia de energia, sendo desligadas as portadoras quando o usuário não está utilizando o sistema. No mesmo ano foi publicada a recomendação G.992.5 para o ADSL2+ [34], que manteve as características do ADSL2, porém duplicou a largura de banda do canal de descida, atingindo 2,2 MHz, aumentando a quantidade de subcanais para 512, permanecendo com 4312,5 Hz cada um. O canal de descida ficou com os subcanais de 33 a 512, resultando em 480 subcanais. Com essas características o ADSL2+ vem se apresentar como um sistema mais robusto e de maior capacidade de transmissão, podendo alcançar taxas superiores a 20 Mbps [32].

Normalmente a ADSL é oferecida para usuários que estão a uma distância máxima de 4 km da central telefônica. Quanto mais longe estiver, menos velocidade o usuário pode ter, e a conexão pode ter instabilidades ocasionais. Isso se deve ao ruído, interferências e as perdas que são impostas ao sinal trafegando sobre os pares de cobre. O estudo sobre esses efeitos e dos limites da rede de cabos metálicos será feito no capítulo seguinte.

3 MODELO PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE DA REDE

O objetivo desse capítulo é obter um modelo matemático que permita avaliar a capacidade da rede de cabos telefônicos em transmitir o sinal ADSL, visando estabelecer os limites de atendimento dessa rede considerando as taxas de transmissão a serem oferecidas. Para isso, são apresentados aqui os modelos para a análise sobre os efeitos do canal de transmissão, a diafonia, o ruído, bem como o cálculo da taxa máxima de transmissão, considerando o comprimento da rede, e os tipos de cabos envolvidos.

O modelo desenvolvido utiliza um conjunto de equações previstas nas referências bibliográficas, obtendo os parâmetros dessas equações a partir de testes práticos realizados nos cabos CT-APL-40, CTP-APL-40, CTP-APL-65 e o FE, sendo esses os principais tipos de cabos que constituem a rede telefônica, conforme foram apresentados na seção 2.2. Para validar os parâmetros, são realizadas comparações entre os valores simulados com as equações, e os valores obtidos a partir de medições realizadas no laboratório da Furukawa em Curitiba, com o apoio da BrasilTelecom S.A.

3.1 MODELO DO CANAL DE TRANSMISSÃO

Como já comentado anteriormente na seção 2.5, o sinal ADSL utiliza os pares metálicos como canal de transmissão, tendo esse canal características de um filtro passa-baixa, sendo modelado a partir de sua função de transferência, cujo módulo ao quadrado é dado por [5]

$$|H_{ch}(f)|^2 = e^{-2A_{ch}(f^{1/2})d}, \quad (3.1)$$

onde f é a frequência em Hz, d a distância em km, e A_{ch} é a constante que depende das características dos cabos. O objetivo aqui é, portanto, encontrar os valores apropriados de A_{ch} para cada um dos cabos citados anteriormente. Para isso, desenvolvendo a equação (3.1) em decibéis, obtém-se

$$A_{ch} = \frac{|H_{ch}(f)|^2_{dB}}{8,686df^{1/2}}, \quad (3.2)$$

onde A_{ch} é o valor da constante do cabo na frequência f .

Para obter um único valor de A_{ch} para cada tipo de cabo, como proposto por Pollet [5], optou-se por calcular a média entre os valores de A_{ch_i} calculados para cada subcanal DMT do ADSL, conforme mostrado na expressão

$$A_{ch} = \overline{A_{ch_i}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|H_{ch}(f_i)|^2_{dB}}{8,686df_i^{1/2}} \right), \quad (3.3)$$

onde N é o número de subcanais, e $|H_{ch}(f_i)|^2_{dB}$ é o valor da atenuação no subcanal i , e f_i a frequência central desse subcanal. Nesse trabalho os valores de $|H_{ch}(f_i)|^2_{dB}$ foram obtidos a partir da interpolação de onze medidas de atenuação em 1 km de cada um dos cabos analisados, ao longo das 256 frequências dos subcanais DMT do ADSL, cujos valores são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Módulo da atenuação em dB para 1 km de cada analisado.

Tipo de cabo	1 KHz	3 KHz	10 KHz	30 KHz	50 KHz	100 KHz	150 KHz	300 KHz	500 KHz	700 KHz	1 MHz
CT-APL	1,7	2,9	5,4	8,2	9,4	11,0	13,4	16,2	22,0	26,9	33,3
CTP-APL-40	1,7	2,9	5,2	8,0	9,0	10,4	12,1	13,4	17,4	20,2	25,7
CTP-APL-65	1,0	1,8	2,6	3,7	4,0	4,8	5,9	8,6	11,2	13,3	16,0
FE	2,3	3,6	5,2	6,2	7,2	10,0	13,2	18,0	24,0	29,2	36,0

Na Tabela 3.2 estão apresentados os valores obtidos para A_{ch} conforme método descrito acima.

Tabela 3.2 - Valores calculados para A_{ch} .

Tipo de cabo	$A_{ch} (km^{-1}Hz^{-1/2})$
CT-APL-40	$3,7485 \times 10^{-3}$
CTP-APL-40	$3,0516 \times 10^{-3}$
CTP-APL-65	$1,8280 \times 10^{-3}$

Em seguida os valores de A_{ch} apresentados na Tabela 3.2 foram aplicados na equação (3.1) para obter a atenuação do sinal em cada subcanal DMT do ADSL. A fim de aferir os resultados obtidos, são apresentados nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, os gráficos para cada um dos cabos analisados contendo os valores de $|H_{ch}(f)|^2$ conforme abaixo:

- valores medidos: obtidos pela equação (3.4)

$$|H_{ch}(f)|^2 = \frac{1}{10^{A(f)/10}}, \quad (3.4)$$

onde $A(f)$ representa cada um dos onze valores de atenuação apresentados na Tabela 3.1.

- valores interpolados: obtidos pela interpolação dos onze valores de atenuação da Tabela 3.1 ao longo dos 256 subcanais DMT, e aplicando-se a equação (3.4);

- valores simulados: obtidos pelo cálculo de $|H_{ch}(f)|^2$

aplicando os valores de A_{ch} da Tabela 3.2.

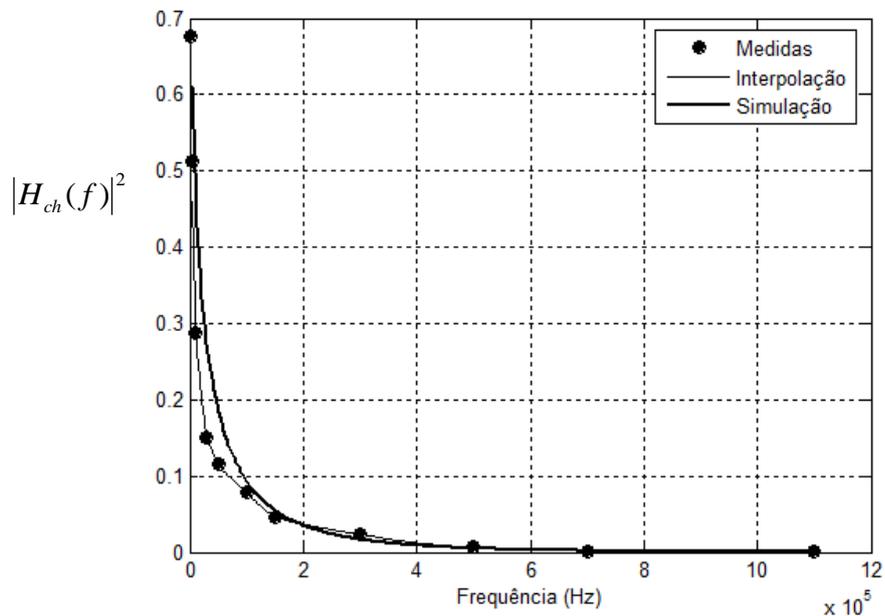


Figura 3. 1 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $|H_{ch}(f)|^2$ considerando 1 km de cabo CT-APL-40.

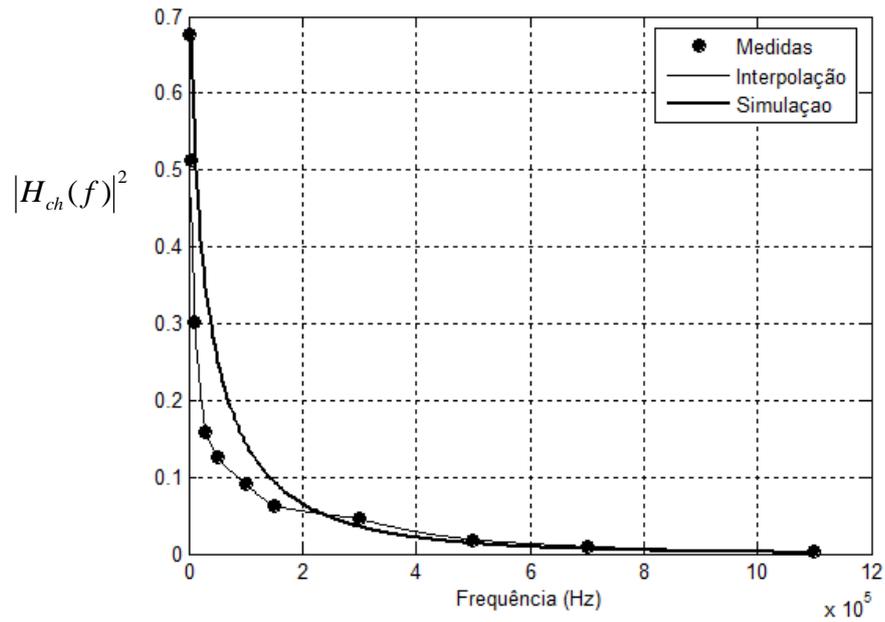


Figura 3. 2 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $|H_{ch}(f)|^2$ considerando 1 km de cabo CTP-APL-40.

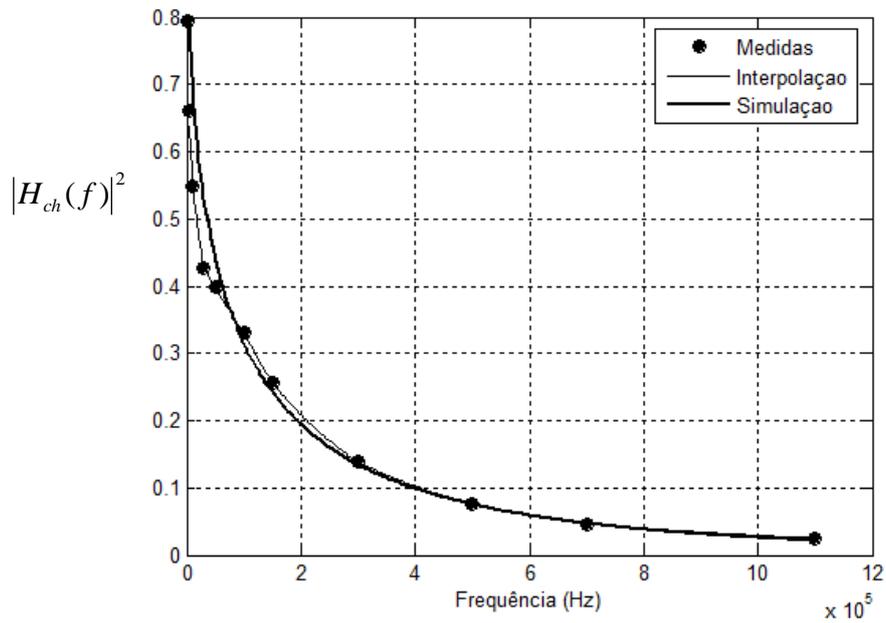


Figura 3. 3 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e calculados para $|H_{ch}(f)|^2$ considerando 1 km de cabo CTP-APL-65.

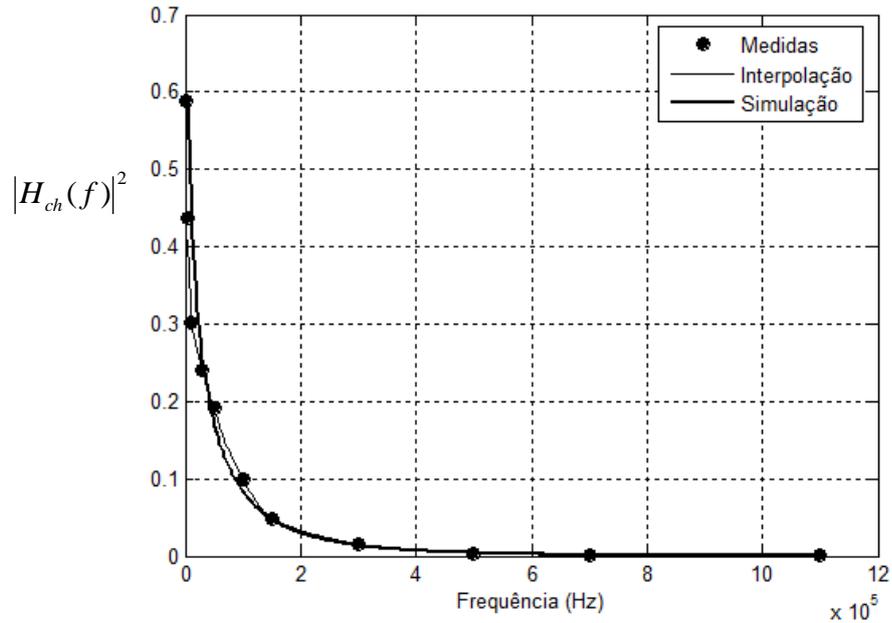


Figura 3. 4 - Comparação entre os valores medidos, interpolados e simulados para $|H_{ch}(f)|^2$ considerando 1 km de FE.

Pelos gráficos apresentados observa-se que o processo de obtenção de A_{ch} proposto aqui se demonstra eficiente, proporcionando uma boa aproximação para os valores das perdas nos cabos.

Com a Figura 3.5 é possível observar a diferença no desempenho das respostas em frequência, considerando os valores das perdas simuladas para cada um dos cabos que foram apresentados individualmente nos gráficos anteriores.

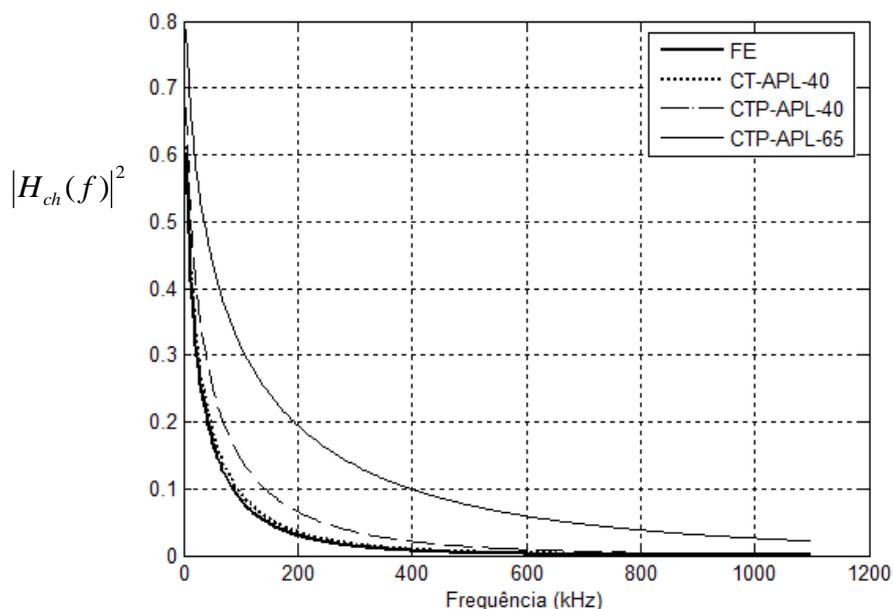


Figura 3. 5 - Comparação entre os valores simulados de $|H_{ch}(f)|^2$ para 1 km de cada cabo analisado.

Observa-se na Figura 3.5 o desempenho superior do cabo CTP-APL-65. Isso se deve a bitola de 0,65 mm adotada para os fios de cobre utilizados nesse cabo, pois com diâmetro maior, a resistência do condutor é menor e conseqüentemente possui menor nível de perdas [23]. Porém, a fabricação desse cabo necessita de uma quantidade bem maior de cobre, o que o torna um cabo de alto custo, inviabilizando sua aplicação na maioria dos projetos, tornando sua utilização restrita aos casos onde a rede é muito extensa, e não é possível o atendimento por cabos de fibra óptica. Por outro lado verifica-se o baixo desempenho do fio FE e do cabo CT-APL-40, o que sugere a redução máxima dos comprimentos desses na rede. O desempenho apresentado pelo cabo CT-APL-40 era esperado em função do seu projeto, pois o isolamento de papel possui maior condutância do que o polietileno, aumentando a constante de atenuação [23] citada na equação (2.2). Na última análise referente à Figura 3.5, verifica-se que o cabo CTP-APL-40 apresenta um desempenho intermediário aos outros apresentados, e, por possuir um custo também mediano, eles possuem melhor relação custo x benefício, fazendo com que seja o mais utilizado na rede nos dias atuais.

As simulações da atenuação do sinal ao longo dos pares metálicos foram executadas considerando a faixa de frequências adotada pelo ADSL, ou seja, até 1,1 MHz. Nessa faixa, já é verificado o baixo desempenho dos cabos para sinais que operam acima de 400 kHz, e conseqüentemente, as portadoras adicionais do ADSL2+, que chegam até 2,2 MHz, provavelmente são pouco utilizadas em função das fortes perdas impostas pelos pares metálicos. A Figura 3.6 mostra a comparação entre a atenuação no cabo CTP-APL-40, simulada com o valor de A_{ch} obtido com o método descrito anteriormente, e a atenuação simulada com o valor de A_{ch} obtido para o mesmo tipo de cabo fabricado na Europa, conforme apresentado por Barton [1].

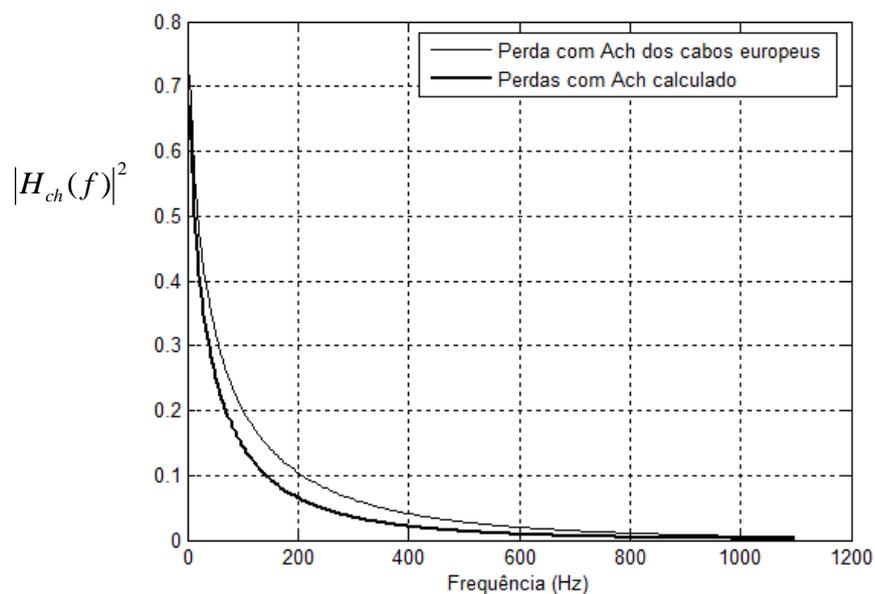


Figura 3. 6 - Comparação entre os valores simulados de $|H_{ch}(f)|^2$ para o cabo CTP-APL-40 a partir do valor de A_{ch} calculado nesse trabalho, e o valor de A_{ch} do mesmo tipo de cabos fabricado na Europa, apresentado por Barton [1].

Pelo gráfico acima, é possível observar que os cabos de isolamento plástico e de fios de 0,40 mm fabricados na Europa possuem uma melhor resposta em frequência do que os fabricados no Brasil. Para uma análise sobre os motivos dessas diferenças, seria necessária a comparação entre o padrão brasileiro e o europeu para a fabricação dos cabos, o que não é objeto do presente trabalho.

Como delineado na seção 2.3, pode haver mais de um tipo de cabo ligado em cascata ao longo da rede. A perda resultante dessa combinação de cabos é modelada através da

aproximação da rede de cabos a um sistema linear [28], conforme diagrama de blocos apresentado na Figura 3.7.

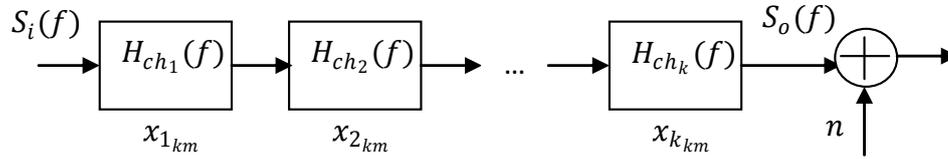


Figura 3. 7 - Diagrama de blocos da rede com combinação de cabos.

Na Figura 3.7, $H_{ch_1}(f)$, $H_{ch_2}(f)$ e $H_{ch_k}(f)$ são as funções de transferência de cada um dos k cabos que estão em cascata, e $x_{1_{km}}$, $x_{2_{km}}$ e $x_{k_{km}}$ os seus respectivos comprimentos; $S_i(f)$ e $S_o(f)$ as densidades espectrais de potência dos sinais de entrada e de saída da rede, respectivamente, e n o ruído. Dessa forma, a perda total será dada por [29]

$$\frac{S_o(f)}{S_i(f)} = |H_{ch_1}(f)|^2 |H_{ch_2}(f)|^2 \dots |H_{ch_k}(f)|^2 \quad (3.5)$$

Os resultados apresentados nessa seção ratificam a questão dos pares metálicos serem verdadeiros filtros passa-baixa, provocando grandes perdas aos sinais com frequências superiores a 400 kHz. Além disso, com o processo apresentado para a obtenção dos valores de A_{ch} , é possível modelar outros tipos de cabos, inclusive considerando suas condições atuais de manutenção, a partir das medidas de atenuação em algumas frequências dentro da banda desejada. Na seção seguinte, serão introduzidos no modelo os efeitos da diafonia.

3.2 MODELAGEM PARA A DIAFONIA

Vários estudos vêm sendo apresentados na literatura sobre a diafonia, sendo que a maior parte desses converge para propostas da utilização de modelos empíricos para estimar seus efeitos sobre a transmissão dos sinais nos cabos metálicos [21]. O presente trabalho utiliza a proposta de alguns autores para essa modelagem, porém, como no caso da atenuação nos pares dos cabos, para adequar esses modelos à realidade da rede brasileira, os parâmetros

das equações utilizadas são obtidos a partir de medidas de diafonia realizadas nos cabos analisados. O FE não é alvo do estudo da diafonia, por ser composto por apenas um par de fios. Dessa forma, a modelagem é feita considerando os cabos CT-APL-40, CTP-APL-40 e CTP-APL-65 em perfeitas condições, estando seus parâmetros elétricos de acordo com as respectivas normas [26] e [27].

Como visto na seção 2.1, a diafonia é uma espécie de ruído que incide sobre o sinal no par interferido, originado a partir do tráfego de sinais nos pares adjacentes, chamados de interferentes. Seus efeitos são introduzidos no modelo aqui proposto, conforme apresentado no diagrama de blocos apresentado na Figura 3.8, na qual o sinal de potência s_1 injetado no par interferido, cuja função de transferência é $H_{ch}(f)$, é recebido com uma potência s_0 . Ainda na Figura 3.8, a paradiafonia é representada a partir de sua função de transferência $H_p(f)$, que induz no receptor um sinal interferente de potência n_p , quando é injetado em outro par vizinho, o sinal de potência s_3 , estando a fonte de s_3 próxima ao receptor em questão. Por outro lado, a telediafonia é representada através de sua função de transferência $H_t(f)$, onde através dela, o sinal de potência s_2 , cuja fonte está próxima à fonte de s_1 , é inserido no par vizinho induzindo um sinal de potência n_t sobre o receptor ligado no par interferido. O ruído térmico na entrada do receptor está representado por n na Figura 3.8.

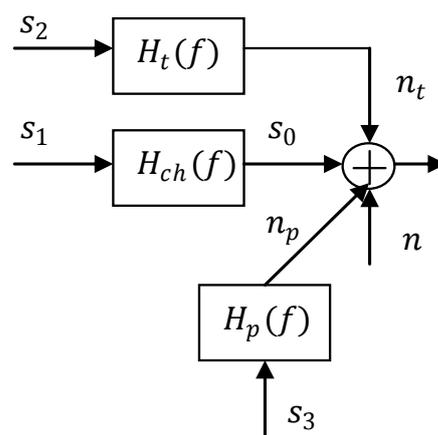


Figura 3. 8 - Diagrama de blocos para o modelo da diafonia.

Ainda analisando a Figura 3.8, pode-se tirar a seguinte relação para a paradiafonia:

$$N_p(f) = |H_p(f)|^2 S_3(f), \quad (3.6)$$

sendo $N_p(f)$ e $S_3(f)$ as densidades espectrais de potência do ruído resultante da paradiafonia e do sinal fonte da paradiafonia, respectivamente. A função de transferência $H_p(f)$ é dada por [20].

$$|H_p(f)|^2 = k_p f^{3/2}, \quad (3.7)$$

onde k_p é a constante de acoplamento de paradiafonia, e f a frequência em Hz. Substituindo-se (3.7) em (3.6), obtém-se a seguinte expressão para a densidade espectral de potência do ruído de paradiafonia:

$$N_p(f) = k_p f^{3/2} S_3(f). \quad (3.8)$$

De forma similar, a partir da Figura 3.8, obtém-se a seguinte expressão para telediafonia

$$N_t(f) = |H_t(f)|^2 S_2(f), \quad (3.9)$$

onde $N_t(f)$ e $S_2(f)$ são as densidades espectrais de potência do ruído de telediafonia e do sinal fonte da telediafonia, respectivamente, e $|H_t(f)|^2$ a representação da função de transferência de acoplamento de telediafonia. Neste trabalho utiliza-se o modelo citado em [5] para o acoplamento de telediafonia:

$$|H_t(f)|^2 = |H_{ch}(f)|^2 3,28 k_t d f^2, \quad (3.10)$$

onde $|H_{ch}(f)|^2$ é a função de transferência do par metálico, definida na equação (3.1), d é a distância em km, f é a frequência em Hz, e k_t é a constante de acoplamento de telediafonia.

Observa-se com a equação (3.10) que a telediafonia sofre influência do canal de transmissão, representado por sua função de transferência $|H_{ch}(f)|^2$. Isso ocorre porque na telediafonia a fonte da interferência está distante do receptor, e conseqüentemente, o sinal interferente sofre todo o efeito de degradação imposto pelo canal, até chegar ao receptor.

Substituindo a equação (3.10) em (3.9), é obtida a expressão abaixo para a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia:

$$N_t(f) = |H_{ch}(f)|^2 3,28k_t df^2 S_2(f), \quad (3.11)$$

Foram realizados testes para medir a diafonia nos principais tipos de cabos, a fim encontrar os valores de k_p e k_t para cada um deles. O objetivo dos testes é levantar o espectro de frequência do ruído induzido no par interferido, a partir da inserção de sinais ADSL ou HDSL nos pares vizinhos, considerando os tipos de cabos alvo desse estudo, e comparar os valores medidos com as equações (3.8) e (3.11), a fim de obter os valores de k_p e k_t , respectivamente. Esses testes foram realizados na fábrica de cabos telefônicos da Furukawa em Curitiba, com o apoio da BrasilTelecom S.A., onde foi montada a estrutura apresentada de forma esquemática na Figura 3.9 para os testes em uma bobina de cabo.

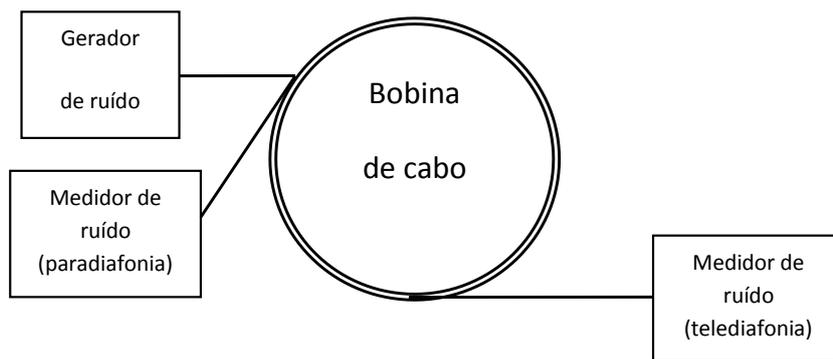


Figura 3. 9 - Montagem feita para os testes executados para levantar os parâmetros dos modelos da paradiafonia e telediafonia considerando uma bobina de cabo telefônico.

Os cabos em análise são fabricados em lances com comprimento máximo de 2 km. Dessa forma, para realizar os testes em comprimentos maiores, foi necessário executar emendas

entre os cabos de bobinas diferentes, conforme apresentado na Figura 3.10. As emendas foram utilizadas também para testar as combinações de diferentes tipos de cabos ligados em cascata.

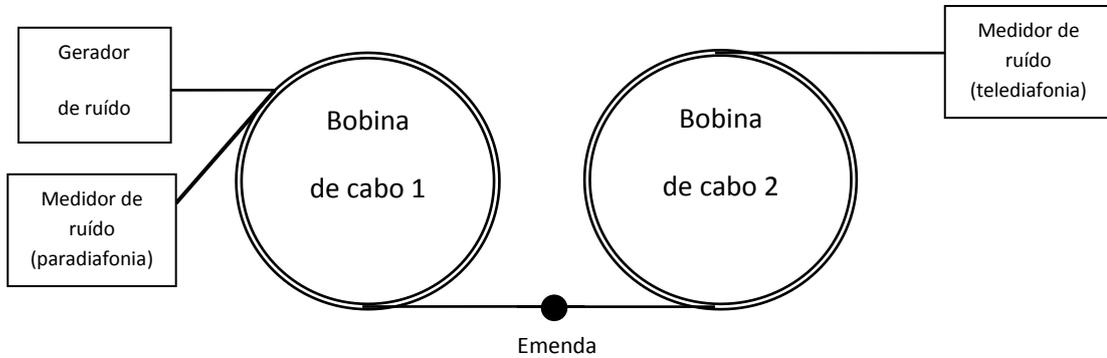


Figura 3. 10 - Montagem feita para os testes executados para levantar os parâmetros dos modelos da paradiáfonia e telediafonia considerando dois tipos de cabo.

Os sinais interferentes foram inseridos nos pares a partir de um gerador de ruído ADSL e HDSL fabricado pela Josaphat, sendo esse conectado em uma das extremidades do cabo testado, conforme mostrado nas Figuras 3.9 e 3.10. A Figura 3.11 apresenta uma foto desse gerador.



Figura 3. 11 - Gerador de ruído ADSL e HDSL.

Com o equipamento apresentado na Figura 3.11, é possível inserir gradativamente em cada um vinte e cinco pares do cabo, um sinal com densidade espectral de potência similar ao sinal ADSL ou HDSL. Para isso basta posicionar a chave seletora que fica ao lado de cada um dos vinte e cinco terminais, na respectiva posição. Dessa forma, é possível inserir os sinais par a par, promovendo o carregamento gradativo dos pares do grupo, na seqüência que se desejar. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram a densidade espectral de potência do ruído ADSL e HDSL, respectivamente, gerados para os testes.

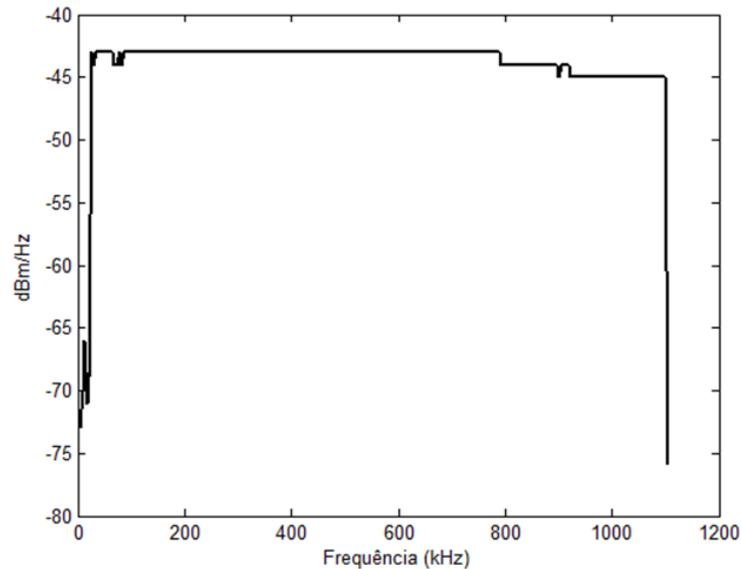


Figura 3. 12 - Densidade espectral de potência do ruído ADSL medida na saída do gerador.

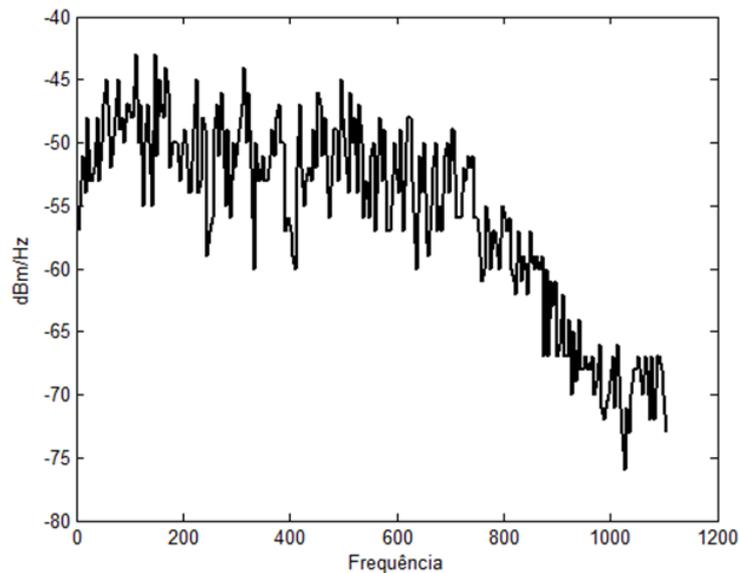


Figura 3. 13 - Densidade espectral de potência do ruído HDSL medida na saída do gerador.

As medidas do ruído de diafonia foram feitas com o equipamento SLK11+SLK22 da Acterna, que permite o levantamento da densidade espectral de ruído de paradiafonia e telediafonia, dependendo da posição em que o mesmo é instalado em relação à fonte dos sinais interferentes. Os testes foram feitos com os cabos CT-APL-40 retirados da planta, porém com boas condições de manutenção, estando seus parâmetros elétricos de acordo com [27], e cabos CTP-APL-40 e CTP-APL-65 novos, com os diferentes comprimentos disponíveis de bobinas e respectivas combinações citados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Comprimento dos lances de cabos utilizados nos testes.

N. Teste	CT-APL-40	CTP-APL-40	CTP-APL-65	Comp. Total
0		2 km		2 km
1		3 km		3 km
2		4 km		4 km
3		5 km		5 km
4	2 km			2 km
5	3,2 km			3,2 km
6	4 km			4 km
7	2 km	1 km		3 km
8	2 km	2 km		4 km
9			2 km	2 km
10			4 km	4 km
11		2 km	2 km	4 km

Para cada montagem citada acima, foram realizadas medições de paradiafonia e telediafonia com um, oito, dezesseis e vinte e quatro pares do grupo com ruídos ADSL e HDSL, totalizando noventa e seis medidas. Com esses resultados foram obtidos os valores para as constantes de acoplamento de paradiafonia e telediafonia, conforme apresentado a seguir.

3.2.1 Levantamento da constante de acoplamento de paradiafonia

A constante de acoplamento de paradiafonia k_p foi levantada a partir das medidas de paradiafonia realizadas com a montagem experimental apresentada anteriormente. Foi determinado um conjunto de nove mil valores de k_p , compreendidos entre 10^{-20} até 9×10^{-17} , em intervalos de 10^{-20} . Para cada um dos nove mil valores de k_p , foram feitas simulações no MATLAB utilizando-se a equação (3.8) para obter a densidade espectral de potência do ruído de paradiafonia, considerando cada uma das configurações de rede da Tabela 3.3. Os resultados dessas simulações foram comparados com o espectro do ruído medido das mesmas configurações de rede, sendo atribuído o valor de k_p para cada cabo que gerou menor erro quadrático médio entre a paradiafonia simulada e medida.

Os resultados obtidos do método apresentado acima demonstraram que o valor de k_p permaneceu aproximadamente constante para os diferentes carregamentos com sinais HDSL e ADSL em cada uma das configurações de rede apresentadas na Tabela 3.3. Esse resultado ratifica a formulação apresentada em [20], confirmando a existência de uma constante de acoplamento de paradiafonia para cada tipo de cabo. Na Tabela 3.4 são apresentados os valores obtidos de k_p para cada um dos cabos analisados.

Tabela 3.4 - Valores obtidos para a constante de acoplamento de paradiafonia (k_p).

Tipo de cabo	Valor de k_p
CT-APL-40	$2,13 \times 10^{-17}$
CTP-APL-40	$1,87 \times 10^{-17}$
CTP-APL-65	$6,24 \times 10^{-18}$

Para aferir o nível de precisão da estimativa do ruído de paradiafonia a partir da equação (3.8) utilizando o valor de k_p calculado, as Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 apresentam as comparações entre a densidade espectral de potência simulada com aquela equação considerando os valores de k_p da Tabela 3.4, e os obtidos com as medidas de paradiafonia nos cabos CT-APL-40, CTP-APL-40 e CTP-APL-65, respectivamente.

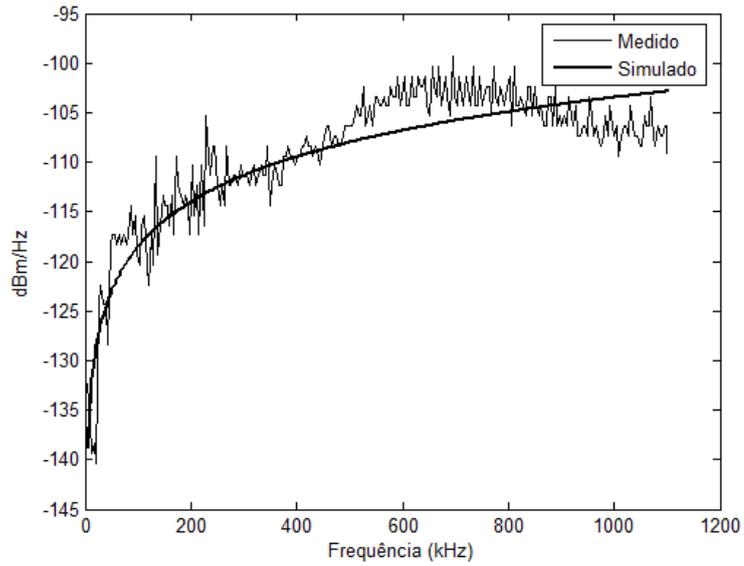


Figura 3. 14 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CT-APL-40.

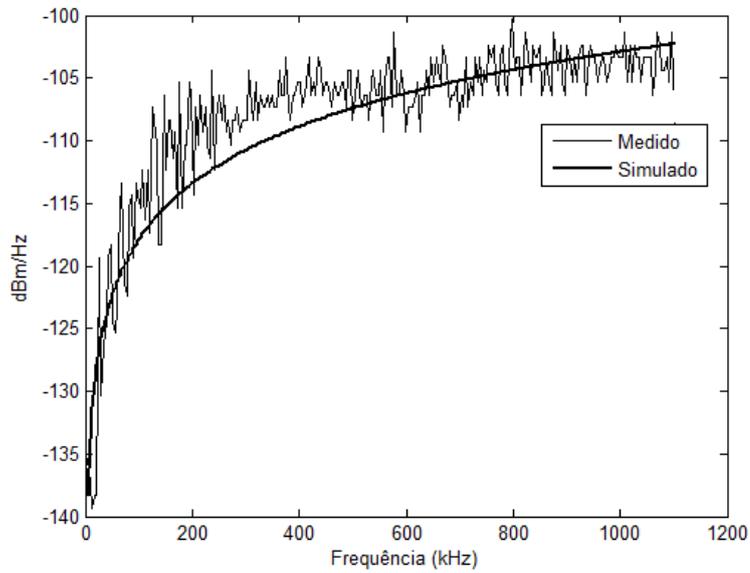


Figura 3. 15 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-40.

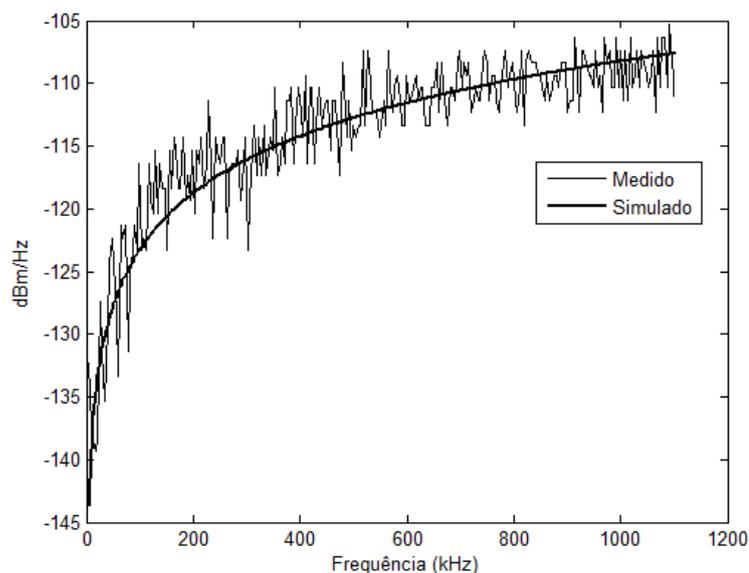


Figura 3. 16 - Comparação entre a densidade espectral de potência simulada com o valor de k_p encontrado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-65.

As Figuras acima demonstram a boa aproximação oferecida pelo método aqui utilizado para estimar o ruído induzido pela paradiáfonia. Observa-se também o forte efeito da paradiáfonia nos sinais de alta frequência, o que pode ser nocivo à transmissão dos sinais ADSL. Em seguida serão vistos os passos seguidos para encontrar a constante de acoplamento de telediafonia e os respectivos resultados.

3.2.2 Levantamento da constante de acoplamento de telediafonia

A constante de acoplamento de telediafonia k_t é obtida aqui de forma similar ao apresentado na seção anterior para a paradiáfonia. No entanto, agora, é preciso considerar o comprimento do cabo que está sendo testado, pois como visto na equação (3.11), o comprimento do cabo exerce influência sobre os efeitos da telediafonia gerada entre os pares.

Os valores de k_t utilizados na simulação estão no intervalo compreendido entre 8×10^{-50} a 9×10^{-17} onde tem-se nove mil e onze diferentes valores incrementando-se 10^{-20} . Para

cada um desses valores foram feitas simulações no MATLAB para encontrar a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia, conforme equação (3.11).

Estão sendo considerados os valores de k_t que apresentaram menor erro quadrático médio entre os valores simulados e os medidos para a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia. Os resultados desse processo de comparação ratificaram a existência da constante de acoplamento de telediafonia para cada tipo de cabo, como apresentado em [5] e em [20], pois os valores de k_t foram constantes para os diferentes carregamentos feitos nos cabos, considerando os vários comprimentos de rede utilizados nos testes de 0 à 6, e os testes 9 e 10, cujas configurações estão apresentadas na Tabela 3.3. Porém, os resultados demonstraram também que para redes compostas por diferentes tipos de cabos interligados em cascata, como nos testes 7, 8 e 11 citados na Tabela 3.3, a constante k_t se torna particular para aquela configuração específica. Dessa forma, para esses casos, o modelo aqui proposto estará utilizando valor de k_t do tipo de cabo com maior comprimento presente na rede analisada. Isso poderá levar o modelo a uma visão um pouco mais pessimista do que a situação real da rede, dependendo dos tipos de cabos envolvidos. Esses efeitos serão analisados no capítulo seguinte.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados para os valores de k_t obtidos com o processo descrito aqui.

Tabela 3.5 - Valores obtidos para a constante de acoplamento de telediafonia (k_t).

Tipos de cabos	Valores de k_t
CT-APL-40	$3,86x10^{-18}$
CTP-APL-40	$1,1x10^{-19}$
CTP-APL-65	$6,0x10^{-20}$

As Figuras a seguir apresentam os gráficos que comparam os valores simulados para o ruído de telediafonia com os valores de k_t citados na Tabela 3.5, e os valores do ruído medido em cada um dos cabos.

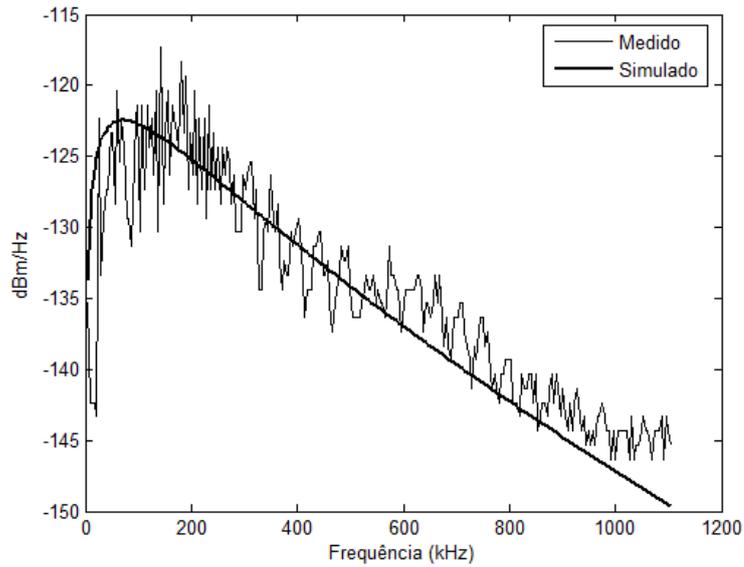


Figura 3. 17 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de k_t calculado, e a medida considerando o cabo CT-APL-40 com 2 km de comprimento.

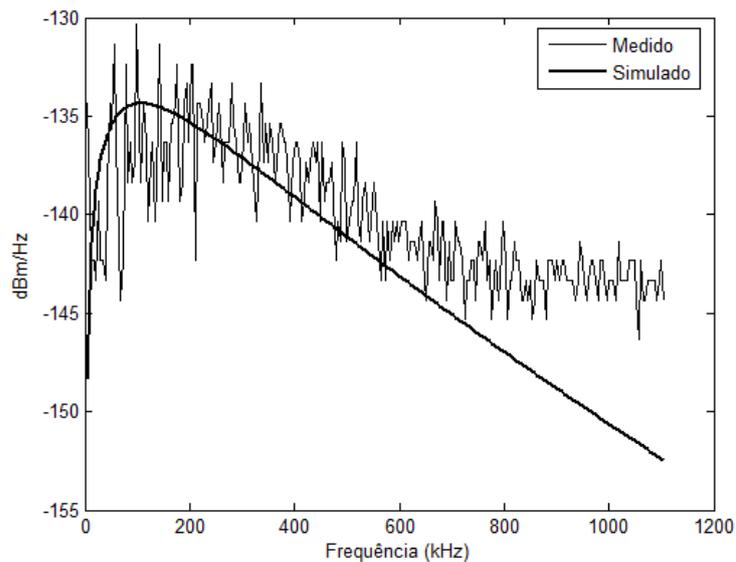


Figura 3. 18 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de k_t calculado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-40 com 2 km de comprimento.

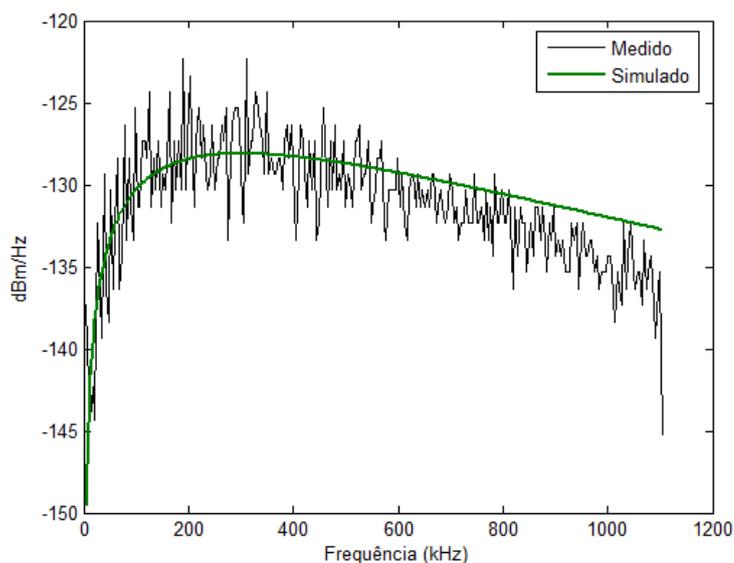


Figura 3. 19 - Comparação entre a densidade espectral de potência do ruído de telediafonia simulada com o valor de k_t calculado, e a medida considerando o cabo CTP-APL-65 com 2 km de comprimento.

Os resultados acima mostram que os níveis de potência da telediafonia são inferiores aos apresentados pela paradiafonia, sendo esse fato explicado pelo efeito do comprimento do cabo, pois como visto na equação (3.11), a presença de $|H_{ch}(f)|^2$ provoca uma degradação do sinal induzido ao longo do cabo. Esse comportamento faz com que alguns autores desconsiderem os efeitos da telediafonia como citado em [18] e [20]. Ainda com os gráficos apresentados acima, observa-se também a boa aproximação que a metodologia aqui apresentada proporciona para estimar o ruído de telediafonia induzido nos cabos analisados. A seguir será introduzida no modelo, a modelagem para o ruído do canal.

3.3 MODELAGEM DO RUÍDO NO CANAL

O modelo aqui proposto parte do princípio de que a rede de cabos está protegida dos ruídos provocados por fontes externas, como visto em 2.1, através de projetos adequados de proteção e isolamento elétrico. Dessa forma, é considerado o ruído térmico, sendo esse intrínseco ao meio de transmissão, não havendo, portanto, possibilidade de evitá-lo.

A modelagem do ruído térmico utilizada aqui é baseada na aproximação linear do sistema formado pelos pares metálicos [28]. Dessa forma, como previsto em [20], a potência de ruído térmico de um sistema é dados por

$$n = kT_e \delta f, \quad (3.12)$$

onde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ joules/kelvin é a constante de Boltzmann, T_e é a temperatura efetiva de ruído da rede inteira, e δf a largura de banda do canal, que nesse caso será de 4312,5 Hz, considerando que a análise é feita individualmente em cada subcanal DMT do ADSL, como citado na seção 2.5.

Considerando a possibilidade de vários tipos de cabos ligados em cascata, como apresentado na Figura 3.7, verifica-se em [20] que a temperatura efetiva de ruído da rede total pode ser expressa por

$$T_e = T_{e_1} + \frac{T_{e_2}}{|H_{ch_1}(f)|^2} + \frac{T_{e_3}}{|H_{ch_1}(f)|^2 |H_{ch_2}(f)|^2} + \dots + \frac{T_{e_k}}{|H_{ch_1}(f)|^2 |H_{ch_2}(f)|^2 \dots |H_{ch_{k-1}}(f)|^2}, \quad (3.13)$$

sendo $|H_{ch_k}(f)|^2$ a atenuação em cada um dos k cabos da rede, conforme Figura 3.7, e T_{e_1} , T_{e_2} , T_{e_3}, \dots, T_{e_k} representam as respectivas temperaturas efetivas de ruído desses cabos, sendo elas expressas [20] por

$$T_{e_k} = T_0 \left(\frac{1}{|H_{ch_k}(f)|^2} - 1 \right), \quad (3.14)$$

onde T_0 a temperatura ambiente dada em Kelvin, que nesse trabalho é considerada de 293 K.

Conhecendo o sinal recebido, como visto na seção 3.1, a interferência provocada pela diafonia, vista em 3.2, e o ruído apresentado aqui, é possível agora obter a relação sinal/ruído (SNR), como será visto a seguir.

3.4 CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Com o modelo apresentado até aqui já é possível estimar a potência do sinal recebido, os ruídos de paradiafonia e telediafonia, bem como já é conhecido o ruído térmico. Com esses, será calculada agora a relação sinal/ruído (SNR) estimada na entrada do receptor, para cada subcanal DMT. A partir da Figura 3.8, verifica-se que a SNR em decibéis, medida no receptor em cada um dos subcanais DMT é dada por

$$SNR_i = 10 \log_{10} \left(\frac{s_{out_i}}{n + n_{p_i} + n_{t_i}} \right), \quad (3.15)$$

sendo s_{out_i} , n_{p_i} e n_{t_i} as potências de saída, de paradiafonia e telediafonia no receptor em cada subcanal i , e n o ruído térmico apresentado na seção anterior. Com a SNR calculada para cada subcanal, é possível agora a taxa de bits transmitidos conforme será visto a seguir.

3.5 CÁLCULO DA TAXA DE BITS TRANSMITIDOS

Com os passos seguidos até aqui, conhecendo os tipos de cabos que compõem a rede e seus respectivos comprimentos, e também a quantidade de pares que estão ocupados com sinais HDSL ou ADSL, é possível estimar a SNR em cada um dos subcanais DMT. Com a SNR, pelo Teorema da Capacidade da Informação definido por Shannon [20], a taxa máxima de transmissão alcançada em um canal limitado em uma banda B na presença de uma relação sinal/ruído SNR , é dada por

$$C = B \log_2(1 + SNR) \text{ b/s.} \quad (3.16)$$

É visto em [21] que em um canal de transmissão real, a taxa máxima alcançada R é menor do que C , sendo necessário incluir na equação (3.16) um intervalo na SNR dado por Γ , aproximando seu resultado à taxa de bits realizável, resultando na equação (3.17)

$$R = B \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{\Gamma} \right) \text{ b/s.} \quad (3.17)$$

Considerando a modulação QAM, pois como visto na seção 2.5, no ADSL cada subcanal DMT possui esse tipo de modulação, é demonstrado em [21] que o valor de Γ é dado por

$$\Gamma = \frac{mar}{3cg} \left[Q^{-1} \left(\frac{P_e}{4} \right) \right]^2, \quad (3.18)$$

onde mar , cg e P_e são a margem da relação sinal/ruído, o ganho de codificação e a probabilidade de erro de símbolo, respectivamente, e a função Q é dada por

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y} dy. \quad (3.19)$$

A margem mar representa o excedente de relação sinal/ruído em relação ao seu valor mínimo necessário para garantir a taxa de erro de bits requerida pelo sistema. Dessa forma, para garantir a qualidade dos serviços para uma rede muito abrangente, com cabos em diferentes condições, pode-se utilizar a estratégia conservadora de aumentar a margem, pagando-se o preço de oferecer taxas de bits mais baixas, conforme observado nas equações (3.17) e (3.18).

O ADSL utiliza os códigos Reed-Solomon e de Treliça, resultando no ganho de codificação de 4 dB [21]. A probabilidade de erro de símbolo está relacionada com a probabilidade de erro de bit (BER) [20], conforme abaixo

$$P_e = (BER) \log_2 M, \quad (3.20)$$

sendo M a quantidade de símbolos, e $\log_2 M$ a quantidade de bits por símbolo. Para o sistema ADSL, tem-se $BER = 10^{-7}$ [17].

Com o exposto acima, considerando cada subcanal i DMT do ADSL com largura de banda δf , e relação sinal/ruído SNR_i , pode-se reescrever a equação (3.17) para expressar a taxa máxima de transmissão R_i obtida nesse subcanal como

$$R_i = (\delta f) \log_2 \left(1 + \frac{SNR_i}{\Gamma} \right) \text{ b/s}. \quad (3.21)$$

Considerando a definição da eficiência espectral η como a razão entre a taxa de transmissão e a largura de banda do canal [20], e aplicando esse conceito na equação (3.21), obtém-se

$$\eta_i = \frac{R_i}{\delta f} = \log_2 \left(1 + \frac{SNR_i}{\Gamma} \right) \text{ bits/s/Hz}, \quad (3.22)$$

onde η_i é a eficiência espectral no subcanal DMT de índice i .

Dando continuidade na busca da taxa total de transmissão do sistema ADSL, por ser a banda δf é igual para todos os subcanais DMT do ADSL, a taxa total R [21] será dada por

$$R = \sum_{i=N_{inicial}}^{N_{final}} R_i = \delta f \sum_{i=N_{inicial}}^{N_{final}} \log_2 \left(1 + \frac{SNR_i}{\Gamma} \right), \quad (3.23)$$

sendo $N_{inicial}$ e N_{final} os índices das portadoras inicial e final da banda analisada, podendo essa ser do canal de subida ou de descida, como visto na seção 2.5. Substituindo (3.22) em (3.23), tem-se

$$R = \delta f \sum_{i=N_{inicial}}^{N_{final}} \eta_i. \quad (3.24)$$

A equação (3.24) resulta na forma de calcular a taxa de transmissão no sistema ADSL, podendo essa ser para o fluxo do sinal de descida ou de subida. Essa equação será utilizada nos capítulos seguintes desse trabalho.

O conjunto de equações apresentado nesse capítulo permite estimar a taxa máxima de bits transmitidos com o sistema ADSL, considerando os efeitos dos cabos metálicos sobre a transmissão dos sinais, incluindo as perdas, a diafonia e o ruído. Dessa forma, se tem agora as ferramentas básicas para realizar algumas simulações e começar a obter algumas respostas às questões citadas na introdução desse trabalho.

4 ESTUDO DE CASOS: SIMULAÇÕES

A partir dos modelos apresentados no capítulo anterior, foram desenvolvidas rotinas no MATLAB com a finalidade de simular vários cenários visando conhecer os limites da rede de cabos metálicos para o provimento de serviços ADSL, considerando-se as características dessa rede e sua ocupação com sinais ADSL e HDSL. As simulações foram desenvolvidas em três grupos com objetivos diferentes cada um. O primeiro deles visa observar os efeitos dos cabos sobre a taxa de transmissão, sem considerar a diafonia. No segundo grupo, são inseridos nas simulações os efeitos da diafonia decorrente do tráfego de sinais ADSL e HDSL sobre os pares dos cabos. O terceiro e último grupo, visa estimar os limites de atendimento da rede considerando algumas taxas de transmissão fixadas por serviços específicos. A seguir são apresentados os parâmetros básicos utilizados nas simulações, a fim de estabelecer suas premissas e condições de contorno.

4.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas considerando-se os cabos apresentados na seção 2.2, os seus comprimentos típicos encontrados na rede, e sua ocupação com as linhas digitais de assinantes, sendo essas a ADSL e a HDSL. A ocupação é analisada em um grupo de 25 pares do cabo, pois, como visto na seção 2.2, é dentro de um grupo que ocorrem os efeitos significativos da diafonia.

Os valores para a margem de sinal/ruído e o ganho de codificação aplicados nas simulações, são os sugeridos em [21], sendo eles: $mar = 4$ (6 dB); $cg = 2,51$ (4 dB). Para a taxa de erro de bits, está sendo utilizado o previsto em [17], ou seja, $BER = 10^{-7}$.

Considerando que o canal de descida ocupa a parte superior do espectro de frequência dos pares metálicos, o mesmo é o mais afetado pelas perdas no canal e também pela diafonia, conforme visto nas seções anteriores. Dessa forma, as simulações apresentadas aqui estão focadas em analisar as taxas de descida do ADSL. Por ser mais robusto ao ruído e também permitir taxas mais elevadas, a utilização do ADSL2+ tem aumentado a cada dia, sendo,

portanto, aplicado nas simulações aqui apresentadas. Para isso, as interpolações das perdas nos cabos apresentadas na seção 3.1 foram complementadas para as frequências até 2,2 MHz.

Para a eficiência espectral citada na seção 3.5, está sendo considerado o valor máximo de 12 bits/s/Hz para cada um dos subcanais DMT, o que permite alcançar a taxa máxima de 24 Mbps prevista em [34].

Para inserir nas simulações os sinais ADSL2+ e HDSL, foram desenvolvidas rotinas no MATLAB para simular as densidades espectrais de potência desses sinais, seguindo o previsto nas respectivas recomendações ITU. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos com essas rotinas.

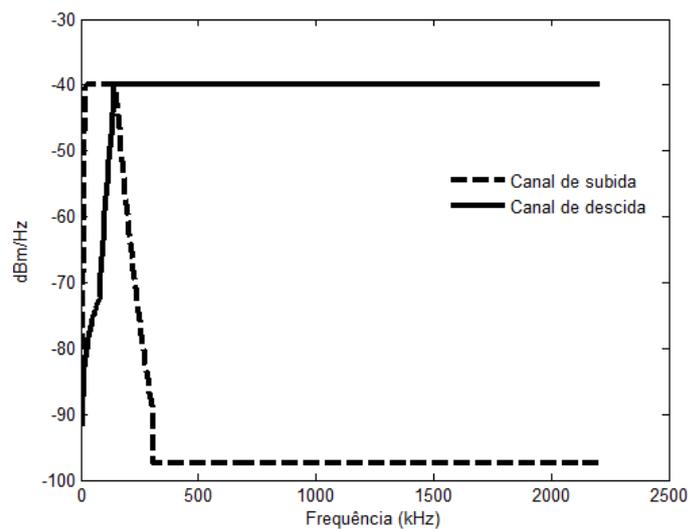


Figura 4. 1 - Simulação da densidade espectral de potência do sinal ADSL2+ utilizada nas simulações.

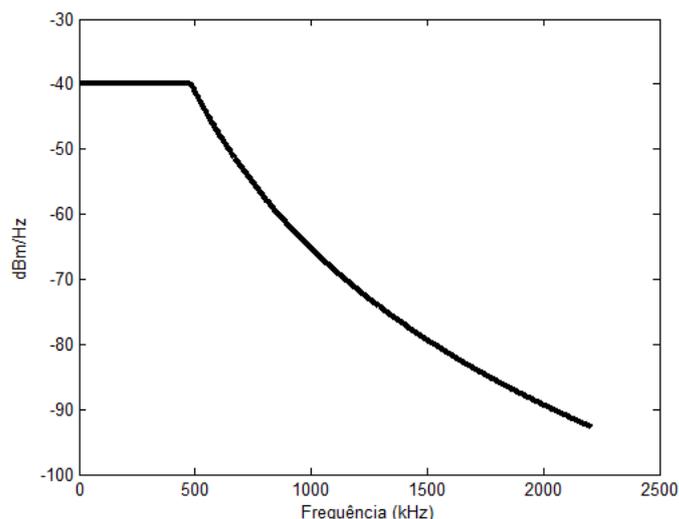


Figura 4. 2 - Simulação da densidade espectral de potência do sinal HDSL utilizadas nas simulações.

Vale destacar que as simulações estão baseadas em cabos com boas condições de manutenção, pois o modelo foi composto dessa forma, conforme citado no capítulo 3. A seguir serão vistos os resultados das simulações e as respectivas análises.

4.2 SIMULAÇÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DOS CABOS SOBRE A TAXA DE TRANSMISSÃO DO ADSL

Inicialmente estão apresentados na Figura 4.3, os resultados das simulações das taxas de transmissão para o sinal ADSL trafegando nos pares dos cabos sem considerar os efeitos da diafonia, ou seja, como se não existisse o tráfego de sinais ADSL ou HDSL nos outros pares do mesmo grupo do cabo. Dessa forma, apenas as perdas nos pares metálicos descritas na seção 3.1 e o ruído térmico apresentado em 3.3, estão exercendo os efeitos sobre as taxas de transmissão.

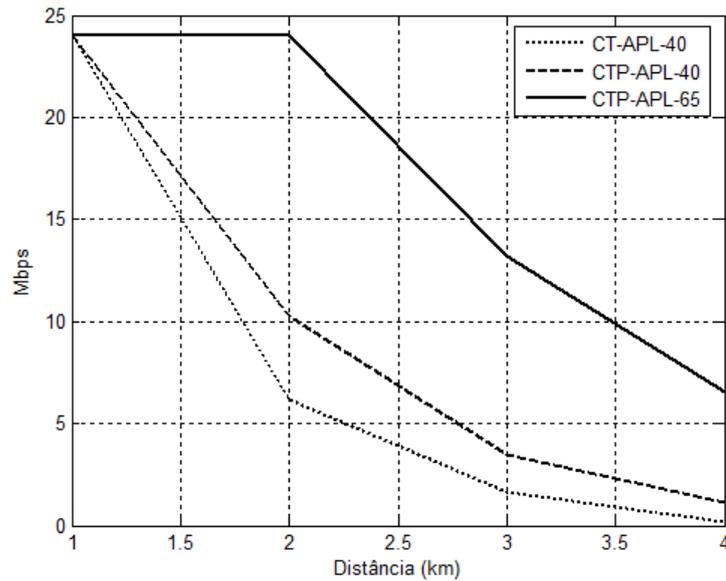


Figura 4. 3 - Variação da taxa de bits em função da distância, sem considerar a diafonia.

Tendo por base o cabo CTP-APL-40, o resultado acima está bastante próximo do apresentado em [35]. Porém, como visto em 3.1 através da Figura 3.6, podem existir diferenças de desempenho entre os cabos fabricados por diferentes países que possuem normas próprias para esse tipo de fabricação, como é o caso de Brasil. Observa-se ainda na Figura 4.3 o bom desempenho do cabo CTP-APL-65, e a baixa performance do cabo CT-APL-40, estando o cabo CTP-APL-40 com o desempenho intermediário entre os outros dois. Esse resultado está coerente com as respostas em frequência desses cabos, conforme apresentado na seção 3.1. É importante destacar quanto o cabo CT-APL-40 pode limitar as taxas de transmissão podendo alcançar níveis próximos a 60% em relação ao cabo CTP-APL-40, em uma distância de 2 km, como mostrado na Figura 4.3. Dessa forma, como visto na seção 2.3, esses cabos encontram-se instalados em uma boa parte da rede mais antiga, que está localizada principalmente nos centros das grandes cidades, exatamente onde a demanda por serviços ADSL em altas taxas é maior.

Para melhor entender os resultados acima, a partir da teoria apresentada no capítulo anterior, verifica-se, na equação (3.22), que a eficiência espectral de cada subcanal DMT aumenta com a SNR, e influencia diretamente a taxa de transmissão de bits, de acordo com a equação (3.23). Dessa forma, as altas perdas que os pares metálicos apresentam na parte superior do espectro de frequências do ADSL, provocam a redução da SNR, fazendo com

que essa diminua rapidamente com a frequência, reduzindo a eficiência espectral nos subcanais correspondentes, e conseqüentemente a taxa de transmissão. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram esses efeitos, simulando a SNR e a eficiência espectral de cada uma das portadoras, considerando 3 km de cada um dos cabos citados anteriormente.

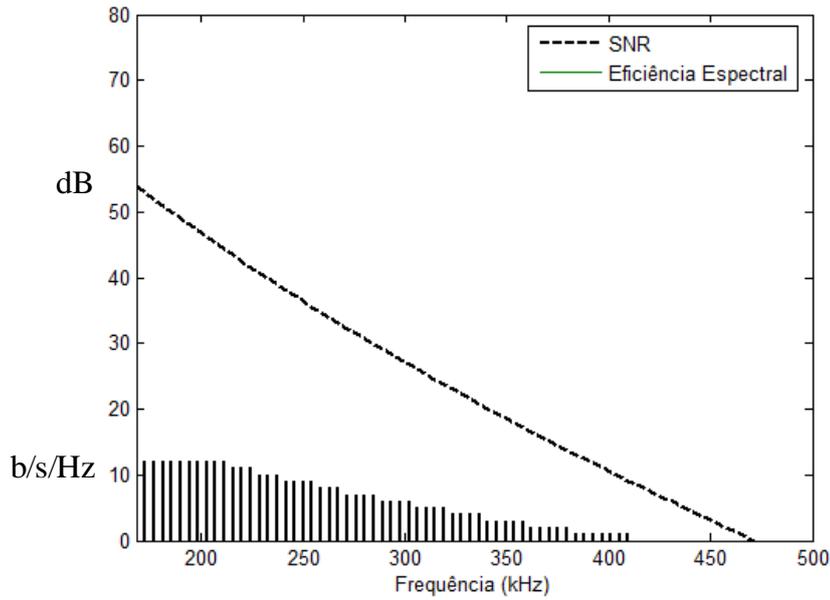


Figura 4. 4 - Simulação da SNR e eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CT-APL-40.

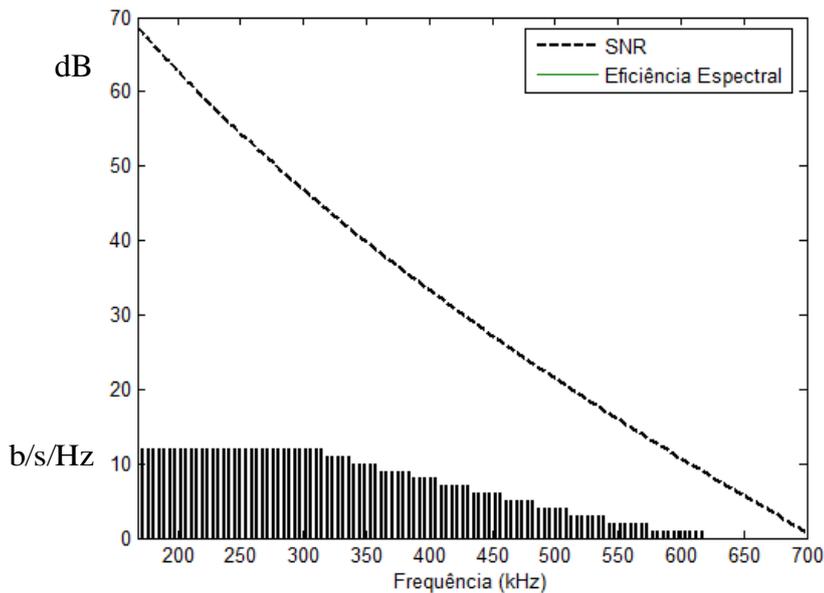


Figura 4. 5 - Simulação da SNR e Eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CTP-APL-40.

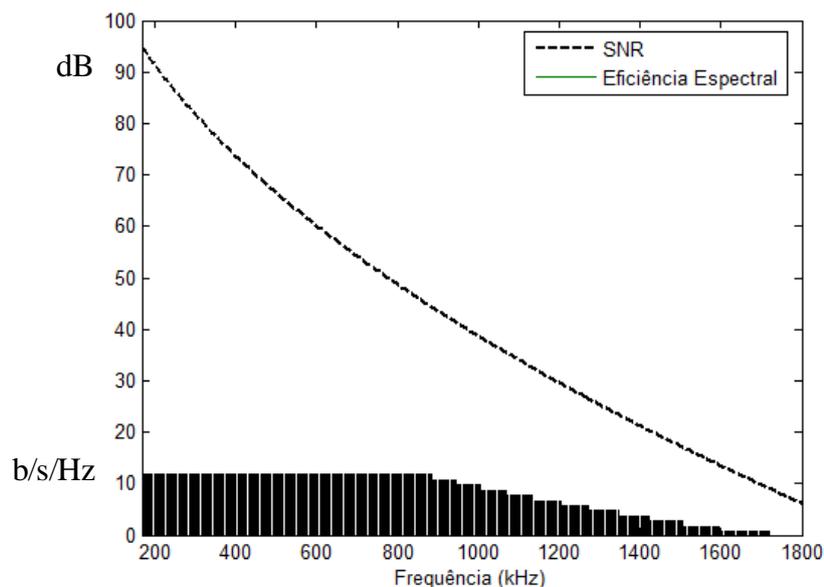


Figura 4. 6 - Simulação da SNR e Eficiência espectral em cada uma das portadoras DMT, considerando 3 km do CTP-APL-65.

Na Figura 4.4, fica claro o baixo nível de SNR nos cabos CT-APL, permitindo o carregamento de bits até os subcanais cujas frequências centrais estão próximas de 400 kHz. Por outro lado, na Figura 4.6, verifica-se que para os cabos CTP-APL-65, é possível fazer o carregamento de bits em praticamente todo o espectro, em função dos níveis de SNR ao longo do espectro de frequências, fazendo com que seja possível atingir altas taxas para esse tipo de cabo. Na Figura 4.5, fica ratificado o desempenho intermediário do cabo CTP-APL-40. Esse resultado é coerente com os resultados anteriores.

Em seguida, são apresentados os resultados de simulações visando observar o comportamento da taxa de transmissão em redes formadas por diferentes tipos de cabos ligados em cascata. Essas foram realizadas com três exemplos típicos de rede, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Configurações de rede com combinações de cabos

Configuração	CT-APL-40	CTP-APL-40	FE
1	2,0 km	0,8 km	0,2 km
2	1,5 km	1,0 km	0,5 km
3	1,0 km	1,8 km	0,2 km

A Figura 4.7 apresenta os valores da taxas de transmissão resultantes a partir das simulações feitas com as configurações de rede citadas acima.

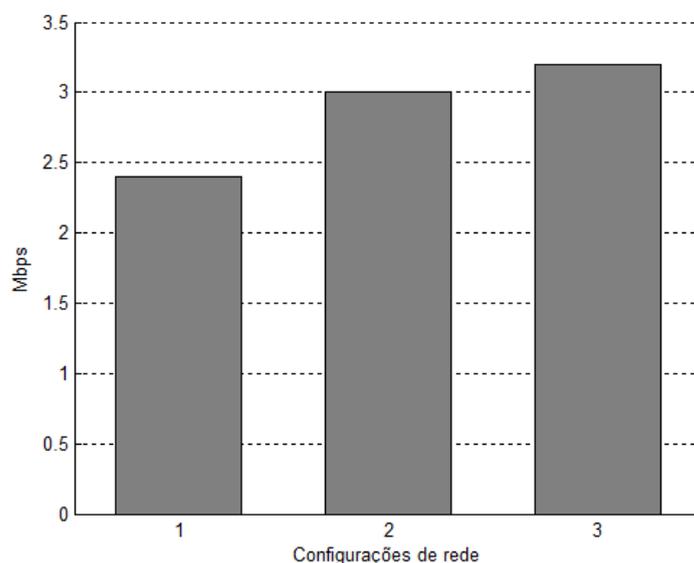


Figura 4. 7 - Resultado das simulações das taxas de transmissão para cada uma das configurações de rede da Tabela 4.1.

O resultado acima está coerente com os resultados anteriores, apresentando melhor desempenho para as taxas de transmissão em redes onde o comprimento do cabo CTP-APL-40 é superior aos cabos CT-APL-40, e o comprimento do FE é reduzido. Em seguida os efeitos da diafonia são inseridos nas simulações, a fim de avaliar o comportamento das taxas de transmissão máximas alcançadas sobre a rede de cabos metálicos.

4.3 SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA SOBRE OS SINAIS ADSL

A fim de mensurar o alcance dos sinais ADSL na rede de cabos metálicos sob a diafonia, foram realizadas algumas simulações através do modelo apresentado no capítulo 3, considerando os efeitos dos cabos e do ruído, junto com as interferências provocadas por sinais ADSL e HDSL trafegando nos pares vizinhos do mesmo grupo de cabos. Por trabalhar com espectro de frequência dividido de forma assimétrica para os canais de subida e descida, a análise da diafonia na transmissão de sinais ADSL necessita da

definição do ponto no qual é feita a medição no par interferido, ou seja, se é do lado do *modem* do cliente ou do DSLAM, para então definir quais são os sinais interferentes e interferidos.

Como as simulações realizadas aqui estão focadas no canal de descida, a análise será feita sobre a recepção do sinal no *modem* do cliente, pois é esse quem recebe o sinal de descida, como visto na seção 2.5. Dessa forma, a paradiáfonia ocorre pela interferência que os sinais de subida emitidos pelos *modems* instalados nos pares vizinhos, exercem sobre o sinal de descida recebido pelo *modem* instalado no par interferido. Essa situação está ilustrada na Figura 4.8.

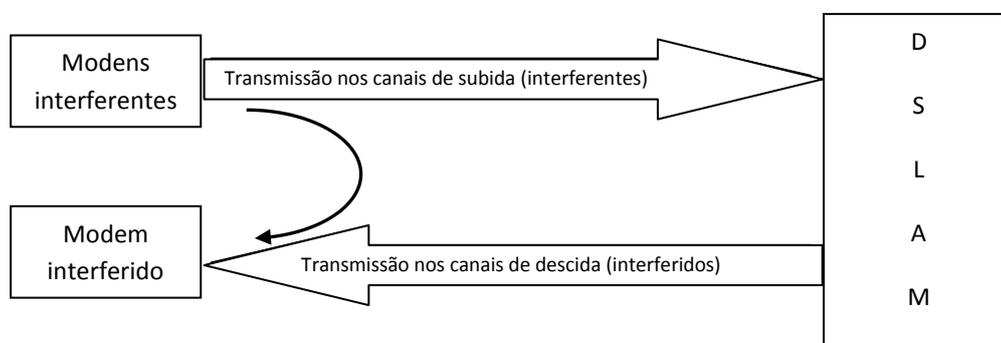


Figura 4. 8 - Esquemático da paradiáfonia provocada por sinais ADSL no lado do *modem* do cliente.

Por outro lado, visualizando ainda o *modem* do cliente, na telediafonia, os sinais interferentes são os de descida recebidos pelos *modems* conectados nos pares vizinhos, e o sinal interferido continua sendo o sinal de descida recebido pelo *modem* conectado no par de teste, conforme ilustrado na Figura 4.9.

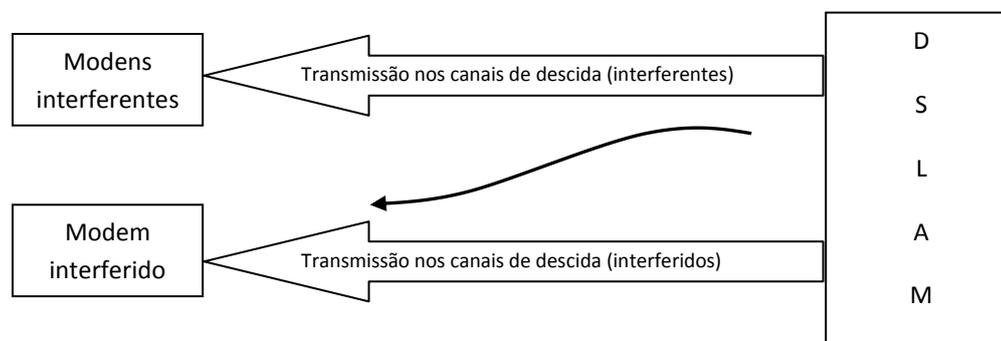


Figura 4. 9 - Esquemático para a telediafonia provocada por sinais ADSL no lado do *modem* do cliente.

No caso de serem considerados os sinais HDSL como interferentes, por ser uma tecnologia simétrica, como visto na seção 2.4, os sinais interferentes para a diafonia serão iguais, com densidade espectral dada pela Figura 4.2.

Com as configurações acima, as simulações foram realizadas considerando os parâmetros dos cabos analisados anteriormente, e observando a variação da taxa de transmissão sobre alguns comprimentos de rede, quando são inseridos sinais interferentes nos pares vizinhos. As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os resultados das simulações para as estimativas das taxas de transmissão de descida alcançadas com ADSL2+ em cabos CT-APL-40, CTP-APL-40 e CTP-APL-65, respectivamente, variando-se a distância, e considerando três situações para a ocupação dos 24 pares vizinhos no mesmo grupo do cabo:

- 24 pares do grupo sem tráfego de outras linhas digitais;
- 24 pares do grupo ocupados com sinais ADSL;
- 24 pares do grupo ocupados com sinais HDSL.

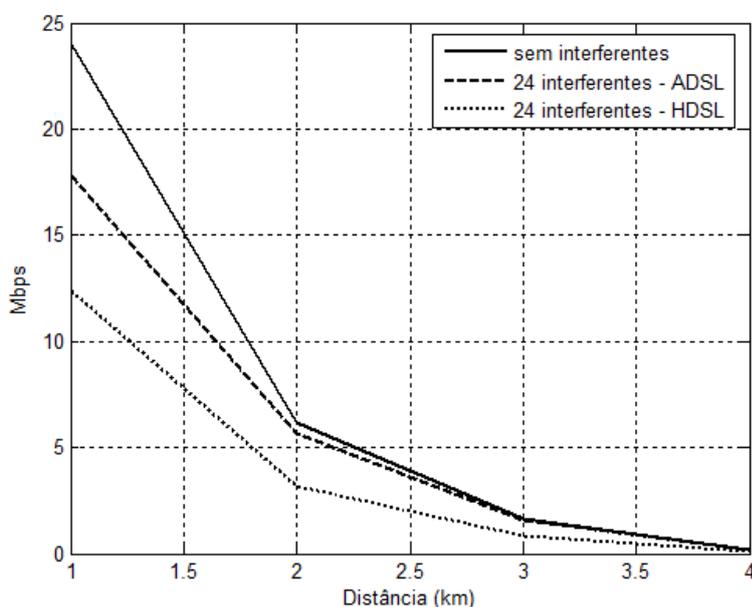


Figura 4. 10 - Simulação das taxas de transmissão dos sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CT-APL-40.

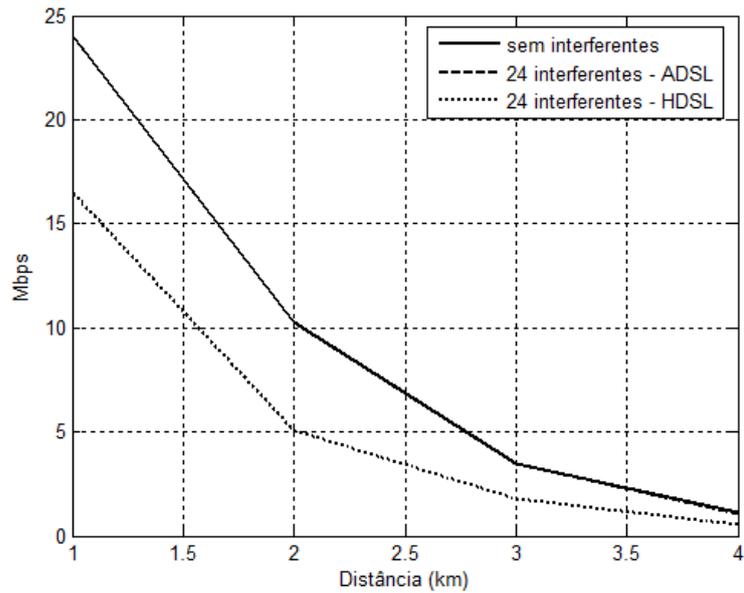


Figura 4. 11 - Simulação das taxas de transmissão dos sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CTP-APL-40.

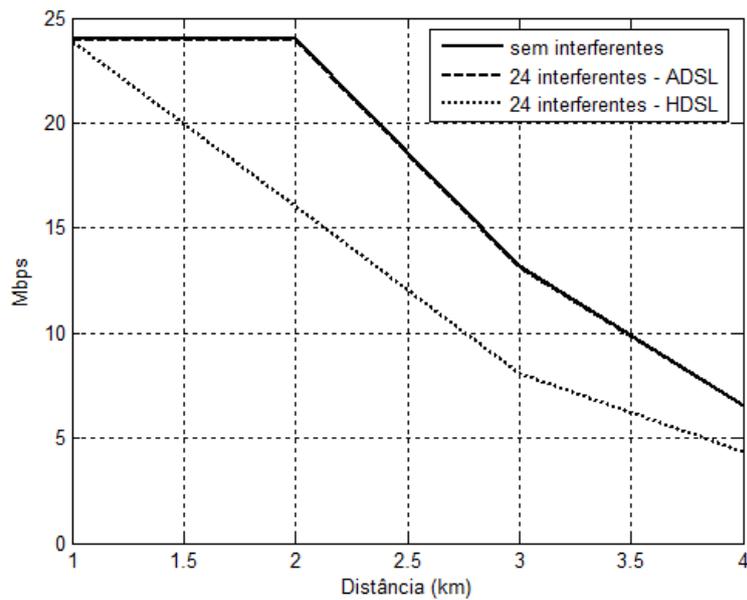


Figura 4. 12 - Simulação das taxas de transmissão de sinais ADSL trafegando em cabos do tipo CTP-APL-65.

Comparando-se os três gráficos acima, fica ratificado o baixo desempenho do cabo CTP-APL-40 quando comparado com os cabos CTP-APL-40 e CTP-APL-65, sendo ele menos imune às interferências provocadas pela diafonia, e os outros dois bem mais imunes. A resposta em frequência do cabo CTP-APL-40 contribui muito para o resultado descrito

acima, no sentido que ela degrada bastante o sinal com a distância, tornando a relação sinal-ruído ainda menor quando da adição do efeito da diafonia.

Como visto anteriormente, a paradiafonia provocada pelo tráfego de sinais ADSL nos pares vizinhos ao interferido, que também trafega ADSL, ocorre pela interferência que os sinais de subida gerados pelos *modems* interferentes exercem sobre o sinal de descida recebido pelo *modem* interferido. Porém, como apresentado na Figura 4.1, praticamente não há sobreposição entre os espectros de frequência desses sinais, tornando o efeito da paradiafonia praticamente nulo com esse tipo de interferência. Por outro lado, nesse caso, a telediafonia ocorre pela interferência entre os sinais de descida gerados pelos DSLAM's nos pares interferentes, sobre o sinal de descida recebido pelo *modem* no par interferido, havendo, portanto, uma sobreposição entre os espectros dos sinais interferentes e interferido. Porém, como visto nos gráficos das Figuras 3.17 a 3.19, os níveis de telediafonia são bastante baixos, em função de que os sinais interferentes sofrem as perdas em função do comprimento dos cabos, resultando no pouco efeito provocado pela telediafonia.

O exposto acima explica os resultados apresentados nos gráficos anteriores com relação ao carregamento do cabo com sinais ADSL, onde o efeito da diafonia é muito pequeno, ocorrendo inclusive, na escala apresentada, a aparente sobreposição entre as curvas das simulações “sem interferentes” e “24 interferentes – ADSL” nas Figuras 4.11 e 4.12. Esse fato não é uma mera coincidência, pois o ADSL foi projetado de forma assimétrica, também para reduzir esses efeitos de interferência.

Continuando a análise, é possível verificar nos gráficos anteriores que a degradação nas taxas de transmissão provocadas pelos sinais HDSL são bem mais fortes do que às provocadas pelos sinais ADSL, sendo essa sentida nos três cabos analisados. Esse fato é explicado pela superposição que há entre os espectros de frequências dos sinais ADSL2+ e HDSL, como pode ser visto na Figura 4.13. Essa sobreposição ocorre da forma mais agressiva através da paradiafonia, pois essa possui níveis bem mais altos do que os da telediafonia, por não sofrerem os efeitos de degradação provocados pelo comprimento do cabo. Esse resultado representa uma incompatibilidade espectral entre os sinais ADSL e

HDSL, tornando a existência simultânea dos dois em um mesmo cabo, muito prejudicial ao desempenho das taxas de transmissão.

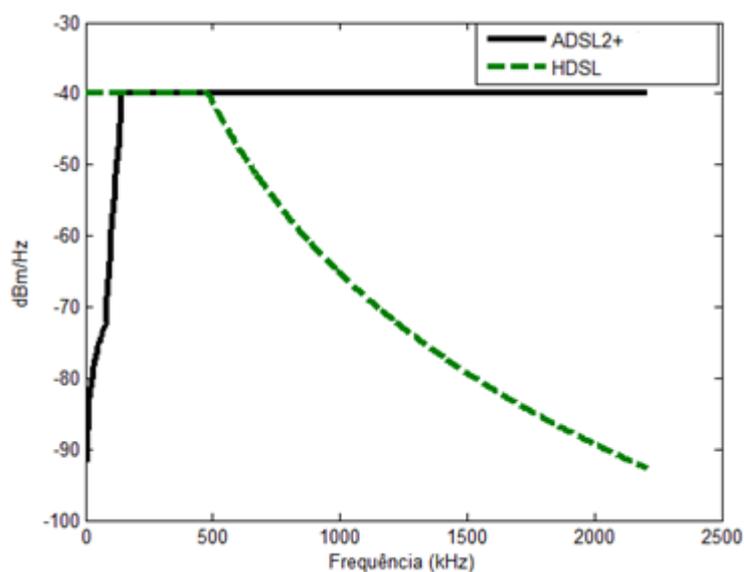


Figura 4. 13 - Sobreposição entre os espectros de frequência HDSL e do canal de descida do ADSL2+.

Os resultados apresentados acima sinalizam que é possível a convivência entre os sinais ADSL no mesmo grupo de pares de cabo, desde que sejam utilizados cabos com condutores isolados com polietileno em boas condições de manutenção. Porém, indicam também que deve ser evitada ao máxima a presença de sinais HDSL nos mesmos cabos onde estão trafegando sinais ADSL.

Foram vistas até aqui simulações que permitem visualizar as limitações da rede, considerando as taxas máximas permitidas conforme características dos cabos utilizados. Na seção seguinte, as simulações apresentadas terão o foco na visualização dos limites de atendimento de alguns serviços baseados em ADSL, de acordo com as taxas estabelecidas.

4.4 SIMULAÇÃO QUANTO AOS TIPOS DE SERVIÇOS QUE PODEM SER OFERECIDOS – UM EXEMPLO

São feitas aqui algumas simulações para exemplificar a utilização do modelo proposto, quanto à avaliação da rede para a prestação de alguns serviços que podem ser oferecidos tendo-se por base a tecnologia ADSL. A análise é feita em cima das taxas de transmissão mínimas necessárias para cada serviço. Os serviços previstos aqui são o acesso à *internet*, VoIP (*voice over internet protocol*), VoD (*video on demand*), transmissão de conteúdo de TV sobre IP (IPTV) e HDTV (*high definition TV*). Nas simulações é considerada uma rede típica de uma estação telefônica contendo seis rotas, cada uma com as características de cabos apresentados na tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2 - Exemplo de configurações de cabos em seis rotas distintas

Rota	CT-APL-40	CTP-APL-40	FE	Comprimento Total	Qtd de pares do grupo ocupado c/ HDSL
1	2,0 km	1,0 km	0,2 km	3,2 km	2
2	3,0 km	1,0 km	0,4 km	4,4 km	0
3	1,0 km	0,5 km	0,1 km	1,6 km	3
4	2,0 km	0,5 km	0,1 km	2,6 km	2
5	0,0 km	2,5 km	0,2 km	2,7 km	4
6	2,5 km	1,0 km	0,2 km	3,7 km	2

Na Figura 4.14 os pontos representam os níveis máximos obtidos para as taxas de transmissão de descida estimadas na periferia de cada uma das rotas da Tabela 4.2, estando representadas no mesmo gráfico, as faixas de valores para as taxas de transmissão nas quais é possível oferecer os serviços citados anteriormente. Dessa forma, podem ser estimados quais serviços podem ser oferecidos em cada uma das rotas.

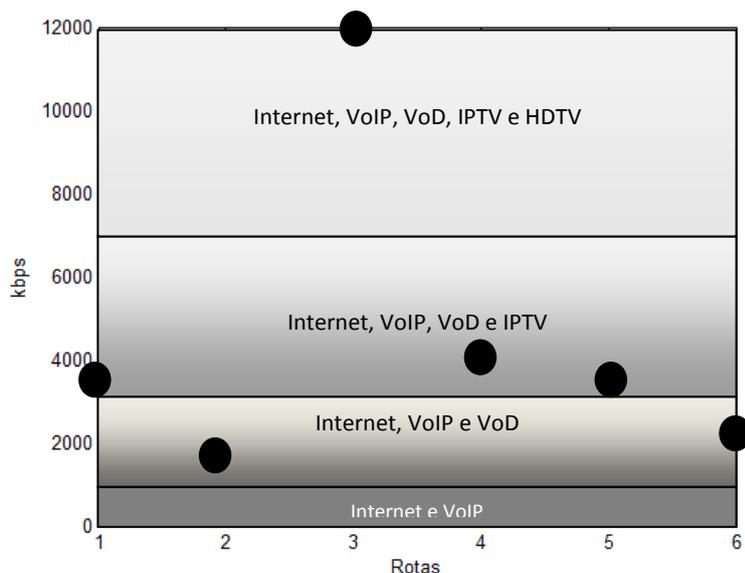


Figura 4. 14 - Serviços que podem ser oferecidos até a extremidade de cada uma das rotas listadas na Tabela 4.2, considerando as taxas máximas alcançadas na periferia das rotas.

Pelo gráfico da Figura 4.14, verifica-se que é possível ter limites distintos para a taxa de descida em cada uma das rotas de cabos de uma mesma estação, considerando que essas podem possuir tipos e comprimentos de cabos distintos. Isso sugere a aplicação do modelo na análise individual de cada rota, visando estimar os tipos de serviço possíveis de serem comercializados, levando em conta as taxas mínimas exigidas por esses.

Em [36] são apresentadas simulações que utilizam o modelo proposto aqui para estimar a área de atendimento dos serviços ADSL a 2 Mbps e 4 Mbps, a partir de uma proposta de classificação das regiões das estações telefônicas conforme segue: região central, região urbana e região suburbana. Essa metodologia representa uma forma de aplicação do modelo para uma avaliação rápida e geral da rede, onde podem ser definidas características diferentes para as regiões, considerando as particularidades da rede em cada área de atendimento. Por exemplo, pode-se ter um conjunto de características para a região urbana no norte do país, e outras características para o mesmo tipo de região no sul, ou no centro-oeste. Essas variações podem ocorrer inclusive dentro de uma mesma Unidade da Federação. Quanto mais específica for a classificação das regiões, mais preciso tende a ser o modelo de estimativa. O capítulo seguinte apresenta os resultados de alguns testes realizados na rede a fim de validar o modelo apresentado no capítulo 3 e as simulações realizadas aqui.

5 VALIDAÇÃO DO MODELO E SUGESTÕES DE APLICAÇÃO

Os resultados das simulações apresentados no capítulo anterior são importantes para a análise da capacidade da rede em transmitir sinais ADSL, permitindo avaliar os seus limites considerando as características específicas utilizadas nas simulações. Porém, esses resultados precisam ser validados, e, para isso, alguns testes sobre a taxa de descida do ADSL foram realizados em amostras de pares da rede. Os resultados foram comparados com os obtidos a partir das simulações geradas pelos cálculos propostos no capítulo 3, considerando os parâmetros das redes testadas. Os testes foram divididos em dois casos com objetivos diferentes cada um: um visa avaliar os desvios existentes entre as medidas de campo e os valores simulados pelo modelo para as taxas de transmissão do canal de descida; e o outro busca a validação dos resultados obtidos para a carga de um grupo de pares do cabo com sinais ADSL, como visto na seção 4.3. Também são apresentadas algumas sugestões para aplicação do modelo de cálculo proposto, considerando os resultados obtidos com a validação do mesmo.

5.1 CASO 1 – TESTES CONSIDERANDO AMOSTRAS DE PARES DA REDE

Foram executados testes para medir as taxas de transmissão em três amostras de pares da rede nas regiões centro-oeste e sul do Brasil, utilizando o equipamento SCR-xDSL da G-Work, que permite a execução de testes em massa, podendo testar até cem pares de cada vez. Os resultados dos testes foram aferidos a partir de medidas das taxas de transmissão obtidas pelo sincronismo entre o *modem* e o DSLAM que foram conectados em cerca de 10% dos pares testados. Dessa forma, os valores das medidas aqui apresentados são referentes a taxas de transmissão efetivamente liberadas para a comercialização dos serviços ADSL.

A primeira amostra é formada por noventa clientes, estando esses concentrados em uma região que varia entre 3 km e 3,3 km da estação telefônica. Como essa área ainda não

estava atendida pelos serviços ADSL, não foram considerados na simulação os efeitos da diafonia. A composição da rede foi estimada a partir do cadastro existente, sendo essa:

- CT-APL-40: 82%;
- CTP-APL-40: 16%;
- FE: 2%.

A Figura 5.1 apresenta a comparação entre os resultados das medidas e os obtidos com a simulação feita a partir do modelo proposto, ambos referentes à taxa máxima permitida para o canal de descida, considerando o ADSL2+.

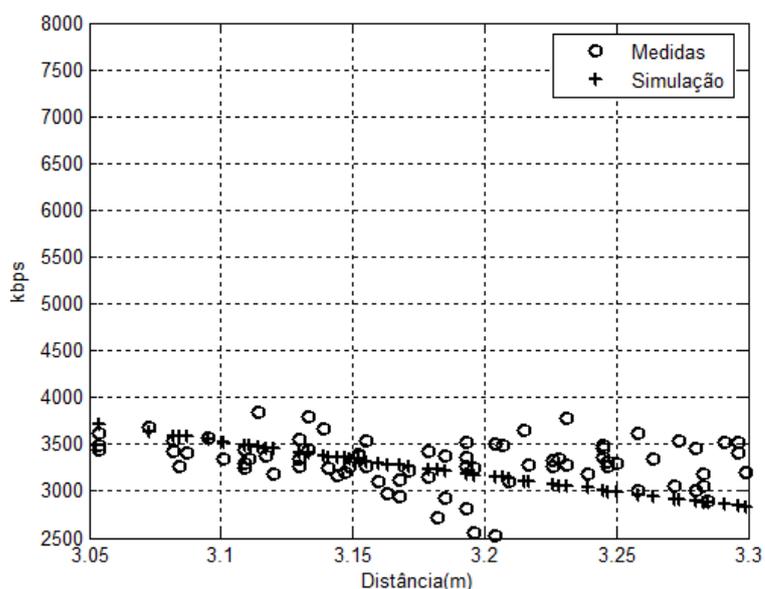


Figura 5.1 - Valores para as taxas de transmissão no canal de descida, obtidos a partir das medidas de campo e da simulação executada com o modelo de cálculo proposto, considerando uma amostra de noventa clientes.

Analisando os valores apresentados nos gráficos da Figura 5.1, verifica-se que a maior parte dos clientes podem ser atendidos com taxas de transmissão variando entre 3 Mbps e 3,5 Mbps. Os valores simulados pelo modelo seguem a coerência com os valores das taxas medidas para a maioria dos clientes, mantendo seus resultados na mesma faixa de taxa de descida. Vale observar, porém, que o modelo apresentou-se mais pessimista para os clientes localizados a distâncias superiores a 3,2 km. Esse fato pode ser resultado da aproximação dos comprimentos médios considerados para cada tipo de cabo da rede, pois os efeitos das perdas do sinal são intensos com o aumento da distância, como visto nos

gráficos apresentados na seção 3.1, reduzindo a relação sinal-ruído e conseqüentemente as taxas de transmissão, como é previsto na equação (3.24). Outro fato que pode estar provocando esse efeito mais pessimista é a extensão da interpolação das perdas nos cabos realizada para a banda do ADSL2+, conforme citado na seção 4.1. Os pontos fora da curva dos valores medidos, referentes às taxas de descida para os clientes que se encontram em distâncias próximas a 3,2 km, sinalizam que os pares nos quais esses estão conectados estão com problemas em suas características padrão, sugerindo a existência de algum tipo de defeito, que podem estar localizados em um ou mais pontos da rede, incluindo-se a rede interna do cliente, podendo ser decorrentes de oxidação do par, desgaste no isolamento, presença de umidade, etc. Para melhor visualizar as diferenças entre os valores medidos e os simulados para as taxas de transmissão dessa amostra, a Tabela 5.1 apresenta os valores para a média e o desvio padrão das curvas da Figura 5.1, obtidos a partir de ferramentas de análise estatística do MATLAB.

Tabela 5.1 - Medidas de dispersão para a amostra de noventa clientes.

Curvas	Média	Desvio Padrão
Medidas	3.286 kbps	253 kbps
Simulação	3.137 kbps	287 kbps

Com os números apresentados na Tabela 5.1 verifica-se que as medidas apresentam valores médios compreendidos entre 3.033 kbps e 3.539, enquanto que para a simulação têm-se a variação entre 2.850 kbps e 3.424 kbps. Esses números mostram que o modelo apresenta resultados bem aproximados aos obtidos com as medidas, porém com uma tendência um pouco pessimista.

A segunda amostra é composta por trinta usuários, estando esses conectados em uma rede cujo comprimento varia entre 2,8 km e 4,3 km, não havendo ainda clientes com serviços ADSL, e com o percentual de cada tipo de cabo estimado conforme segue:

- CT-APL-40: 15%;
- CTP-APL-40: 84%;
- FE: 1%.

Os gráficos da Figura 5.2 apresentam os valores das taxas de transmissão para o canal de descida, obtidos a partir dos resultados das medidas e da simulação.

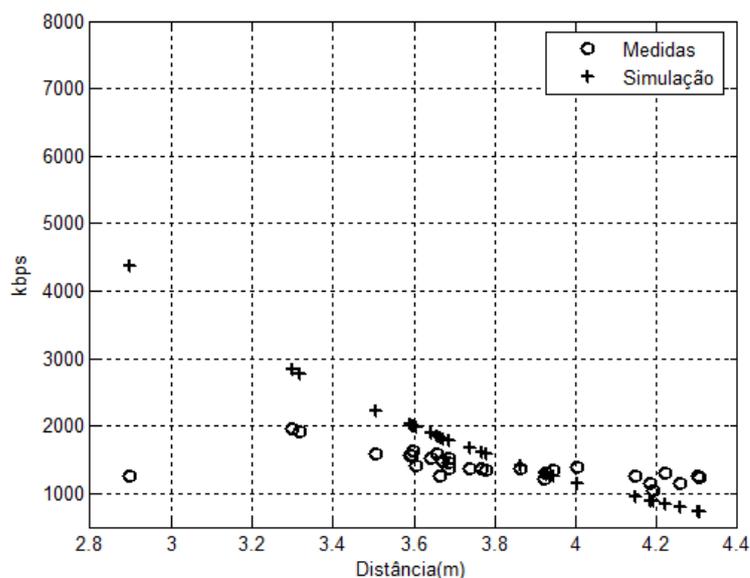


Figura 5.2 - Valores das taxas de transmissão no canal de descida para a amostra de trinta clientes, obtidos a partir das medidas e da simulação.

Observa-se com a Figura 5.2 que o modelo apresentou-se otimista referente aos clientes que se encontram antes de 3,8 km da estação, passando a ter uma tendência pessimista após essa distância. O valor apresentado na medida para o cliente que se encontra a 2,9 km deixa claro que há algum defeito no par ao qual o mesmo está conectado. Como no caso anterior, é feita a seguir uma análise da dispersão de cada uma das curvas da Figura 5.2, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Medidas de dispersão para a amostra de trinta clientes.

Curvas	Média	Desvio Padrão
Medidas	1.404 kbps	205 kbps
Simulação	1.346 kbps	675 kbps

Observa-se nessa amostra (Figura 5.2) que os clientes estão bem mais dispersos do que na anterior (Figura 5.1), pois estão distribuídos ao longo de 1,5 km, enquanto no outro caso, a distância máxima entre clientes era de 250 m. Esse fato faz com que essa amostra de trinta clientes apresente maiores variações nas taxas de transmissão em função das perdas no sinal provocadas pelo efeito da distância, o que é evidenciado pelo alto valor do desvio padrão calculado para as taxas de descida simuladas, conforme apresentado na Tabela 5.2. Porém, ainda na mesma tabela, o desvio padrão para os valores medidos apresentou-se bem menor do que os obtidos para a curva simulada, indicando que as taxas para os pares

que estão próximos da estação não diferenciam muito das apresentadas para os que estão mais distante. Esse fato sugere que os pares mais próximos estão com defeito apresentando perdas excessivas.

O terceiro e último caso analisado é composto de uma amostra com cento e trinta e cinco clientes que se encontram em distâncias que variam entre 2,5 km e 5 km da estação telefônica, em uma rede com incidência de circuitos de dados Não foi possível obter a ocupação exata desses pares com linhas digitais, porém, o equipamento SCR-xDSL utilizado nos testes apresenta um relatório com os possíveis sinais que estão trafegando sobre o par, considerando as características do ruído presente na linha. A partir desse relatório, foram considerados na simulação 20% dos pares ocupados com linhas HDSL. A rede para essa amostra é caracterizada pelos seguintes cabos:

- CT-APL-40: 75%;
- CTP-APL-40: 20%
- FE: 5%.

A Figura 5.3 apresenta as curvas dos valores medidos e simulados para essa amostra.

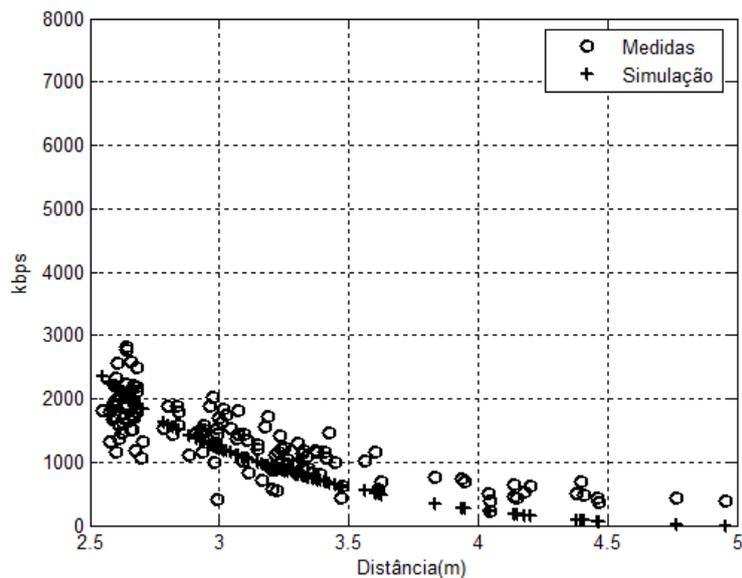


Figura 5.3 - Resultados obtidos para as taxas de transmissão no canal de descida, a partir das medidas e da simulação, considerando uma amostra de cento e trinta e cinco clientes e 20% de ocupação dos pares com HDSL.

O resultado para essa amostra apresenta o mesmo comportamento dos casos anteriores, onde o modelo apresenta-se mais otimista até certa distância, que no caso é de aproximadamente 2,7 km, e um pouco mais pessimista a partir dessa distância. Esse resultado pode ser melhor visualizado fazendo-se uma aproximação quadrática para os valores medidos, utilizando ferramentas do MATLAB, como apresentado na Figura 5.4.

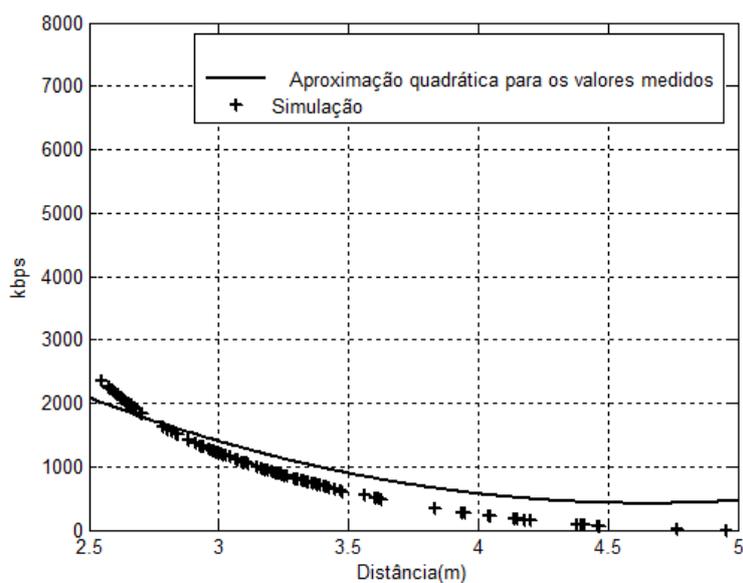


Figura 5.4 - Comparação entre os resultados da aproximação quadrática dos valores medidos para a amostra de centro e trinta e cinco clientes, e a respectiva simulação.

Seguindo a seqüência de análise, a Tabela 5.3 apresenta os resultados das medidas de dispersão para os valores medidos e simulados contidos no gráfico da Figura 5.3.

Tabela 5.3 - Medidas de dispersão para a amostra de centro e trinta e cinco clientes.

Curvas	Média	Desvio Padrão
Medidas	1.345 kbps	574 kbps
Simulação	1.231 kbps	673 kbps

A partir dos valores da Tabela 5.3 verifica-se que a simulação se apresenta novamente um pouco mais pessimista, com valores para as taxas de descida que podem variar em relação à média entre 558 kbps e 1.904 kbps, enquanto a mesma variação pode ocorrer para os valores medidos entre 771 kbps e 1.919 kbps. Os resultados dessa amostra sugerem que os grupos de pares nos quais os clientes estão conectados encontram-se em boas condições de

manutenção, pois as medidas possuem uma boa aproximação com relação à simulação, sendo essa baseada em parâmetros de cabos em perfeitas condições de manutenção, como visto nas seções 3.1 e 3.2.

Os resultados apresentados nessa seção permitem avaliar o grau de precisão do modelo de cálculo da taxa de transmissão apresentado neste trabalho, demonstrando que o mesmo apresenta-se com uma boa aproximação em relação aos valores obtidos com as medidas de campo, considerando as condições específicas da rede analisada em cada amostra. Ressalta-se, porém, que os resultados indicam que o modelo não considera as possíveis condições de defeito nos pares dos cabos, pois o mesmo foi construído a partir de parâmetros obtidos com cabos que estavam em perfeitas condições de manutenção. A tendência um pouco pessimista apresentada pelos cálculos pode ser regulada pelo parâmetro *mar*, indicado na equação (3.18). Na seção seguinte será visto o resultado do teste executado para analisar o comportamento da taxa de transmissão sob o carregamento dos pares de um grupo do par com sinais ADSL.

5.2 CASO 2 – TESTES NA REDE PARA ANALISAR OS EFEITOS DA OCUPAÇÃO COM SINAIS ADSL

Na seção 4.3 foram executadas algumas simulações da taxa de transmissão de descida do ADSL considerando os efeitos da diafonia, a partir do modelo de cálculo proposto nesse trabalho. Agora são apresentados aqui os resultados dos testes realizados para validar o comportamento da taxa de descida com o carregamento dos pares do cabo com sinais ADSL. Os testes foram limitados à carga com sinais ADSL em função das dificuldades encontradas para montar as estruturas necessárias para a execução dos mesmos na rede instalada, considerando a disponibilidade de pares e de espaço para instalação dos *modems* nos pontos terminais da rede. A rede utilizada no teste é composta de uma rede primária com 3,8 km de comprimento, e constituída por cabo do tipo CTS-APL-G-40. Não foram levantados os parâmetros desse cabo conforme procedimento citado na seção 3.1, porém, por possuir o isolamento dos condutores em polietileno, foram utilizados na simulação os parâmetros do CTP-APL-40. A montagem foi feita com a instalação dos vinte e quatro

modems ADSL em um armário de distribuição, localizado em um condomínio, conforme apresentado na foto apresentada na Figura 5.5.



Figura 5.5 - Montagem dos vinte e quatro *modems* ADSL no armário de distribuição para executar os testes de carregamento do grupo de pares do cabo.

Os vinte e quatro *modems* foram conectados gradativamente, e à medida que cada um era conectado, aguardava-se o seu sincronismo com o DSLAM, e fazia-se a medida da taxa de descida estimada pelo *modem*. A Figura 5.6 apresenta os resultados dos valores das taxas de transmissão medidas pelo *modem*, bem como uma aproximação linear desses feita através do MATLAB, e os valores obtidos com a simulação executada a partir do modelo de cálculo proposto.

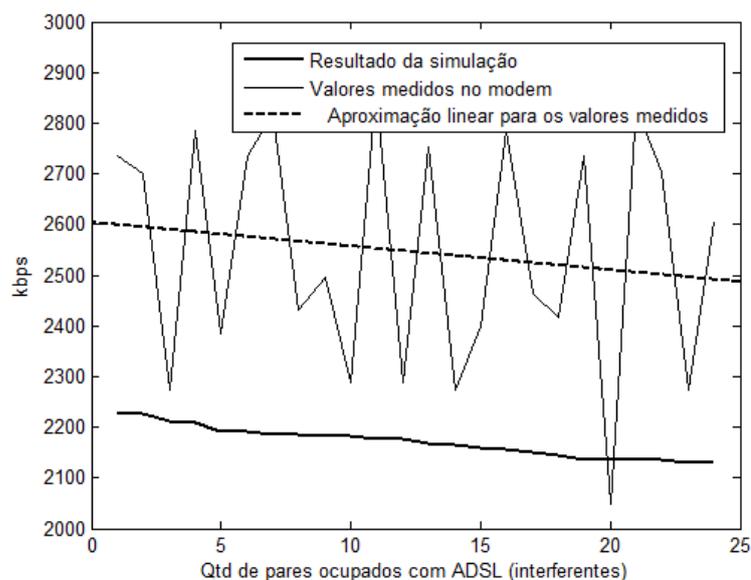


Figura 5.6 - Valores das taxas de descida medidos com o *modem* e a respectiva aproximação linear, e os valores dessas taxas obtidos a partir do modelo de cálculo proposto aqui, considerando o carregando dos pares com sinais ADSL.

Com os gráficos da Figura 5.6 verifica-se que a taxa de redução da velocidade de transmissão obtida pelo modelo se aproxima da apresentada pela linearização dos valores medidos para essas velocidades. Esse resultado valida os resultados das simulações apresentadas na seção 4.3 deste trabalho, considerando o carregamento dos pares com sinais ADSL. Esse resultado é importante para as operadoras de telefonia avaliarem o potencial da sua rede para os serviços ADSL, pois ratificam que o carregamento dos pares dos cabos com esse tipo de serviço não apresenta grandes prejuízos às taxas de transmissão comercializadas, desde que os pares dos cabos se encontrem em boas condições de manutenção. A diferença entre a curva simulada e a média das medidas está relacionada com a diferença entre os cabos do teste e da simulação, e da tendência pessimista apresentada pelo modelo.

Considerando os resultados apresentados até aqui, na seção seguinte são apresentadas algumas sugestões para estratégias de aplicação prática do modelo.

5.3 SUGESTÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Os resultados apresentados nesse capítulo demonstram que o modelo proposto pode ser utilizado como uma boa ferramenta para estimar as taxas de transmissão dos sinais ADSL, desde que sejam conhecidas as características dessa rede, como tipos de cabos envolvidos e respectivos comprimentos, cabendo agora sugerir algumas estratégias de aplicação do modelo, conforme segue:

- 1) Planejamento de rede: gerar relatórios a partir de cálculos executados com o modelo, que permitam identificar a potencialidade da rede para o lançamento de novos serviços e/ou ampliação de serviços existentes, tendo-se por base as taxas de transmissão exigidas por esses, assim como os tipos e comprimentos de cabos instalados;
- 2) Projeto e Operação de rede: direcionar os investimentos para a melhoria/manutenção da rede, visando atingir seu potencial máximo para prover serviços ADSL, sendo esse estimado através dos limites calculados pelo modelo para as taxas de transmissão. Para isso seriam realizadas as comparações entre as taxas de descida simuladas e as medidas realizadas por amostragem sobre os pares da rede, sendo apontadas as necessidades de investimentos de melhoria/manutenção caso fossem detectadas diferenças entre esses valores em níveis acima de um valor estipulado, conforme estratégia de investimentos da operadora;
- 3) Área comercial: direcionar a força de vendas para áreas onde o modelo apresentou resultados favoráveis à comercialização de um conjunto de produtos, sendo essa análise feita em cima da taxa mínima de transmissão exigida por cada produto.

Vale ressaltar que as aplicações sugeridas acima exigem uma boa base de conhecimento sobre os parâmetros da rede, que pode ser formada através da realização de testes de amostragem sobre os pares instalados, que permitam ajustar o modelo pela obtenção dos valores de A_{ch} , k_p e k_t , mais próximos às condições reais da rede instalada. As aplicações sugeridas nos itens 1 e 2 podem ser mais imediatas, pois nelas existe a possibilidade de adequação dos parâmetros às condições reais da rede através de testes por amostragem. Porém, a aplicação dentro do proposto no item 3 necessita de um bom nível de maturidade do modelo, obtido através da consolidação dos ajustes dos parâmetros às condições da

rede, pois nesse caso estará sendo tomada a decisão de venda do serviço e respectiva garantia de qualidade. Dessa forma sugere-se começar as análises com valores mais elevados da margem da relação sinal-ruído (*mar*), apresentada na seção 3.5 através da equação (3.18).

Como visto aqui, a aplicação dos cálculos propostos exige o conhecimento sobre os tipos de cabos e respectivos comprimentos que compõem a rede e, portanto, quanto mais precisas forem essas informações, mais precisos serão também os resultados obtidos com os cálculos propostos. Uma opção para garantir um bom nível de precisão, é possuir o cadastro da rede de cabos digitalizado em uma base de dados utilizando uma ferramenta de informações geográficas. Dessa forma é possível identificar sobre dos mapas da região analisada, as taxas máximas de descida em cada ponto de terminação da rede, como armários de distribuição e/ou caixas terminais, ou compor mapas da área de atendimento conforme uma determinada classificação, como apresentado no exemplo da Figura 5.7.

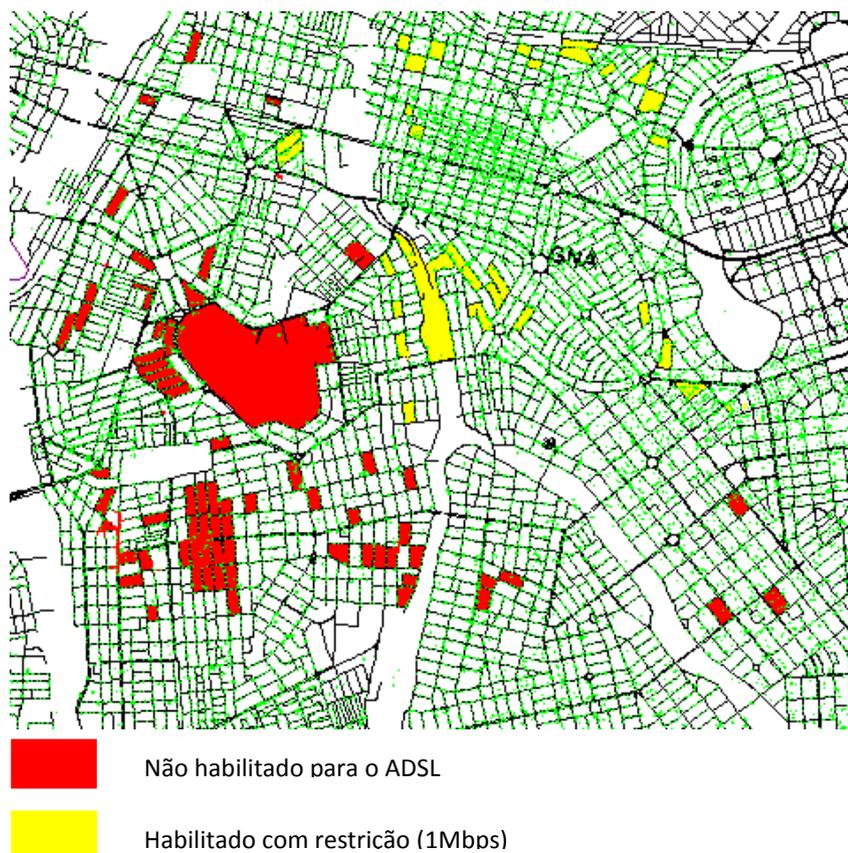


Figura 5.7 - Exemplo de mapeamento da área de atendimento através da aplicação do modelo de cálculo utilizando uma ferramenta de informações geográficas.

Pelo exemplo acima, verifica-se que a utilização do modeo de cálculo de forma conjunta com uma ferramenta de informações geográficas pode trazer um ganho muito grande para uma análise em massa da rede, com um bom grau de precisão, considerando que os cabos estarão devidamente referenciados com seus tipos e comprimentos.

6 CONCLUSÕES

Prover serviços de transmissão de dados com altas taxas de transmissão sobre a rede de acesso existente formada pelos cabos de pares metálicos é uma boa solução para viabilizar esse tipo de atendimento a baixo custo. Isso vem sendo viabilizado tecnicamente através da utilização da ADSL. Porém, esse tipo de linha digital transmite sinais com frequências de até 2,2 MHz, como é o caso da ADSL2+, e nessa faixa de frequência, o canal de transmissão formado pelo par metálico apresenta alto nível de perdas por ser essencialmente um canal do tipo passa-baixas. Essas restrições se agravam para os cabos do tipo CT-APL-40, que foram projetados e instalados na rede em uma época em que o foco dos serviços de telecomunicações estava voltado à voz. Um alto nível de perdas também foi apresentado pelo FE, sugerindo, portanto, que esse e o CT-APL tenham seus comprimentos reduzidos na rede sempre que possível, visando uma melhor utilização das taxas de transmissão oferecidas pela tecnologia ADSL. Os cabos CTP-APL-65, apesar de apresentarem uma resposta em frequência bastante favorável à transmissão através de ADSL, por seus altos custos, têm sua aplicação limitada a projetos muito específicos. Por outro lado, as redes compostas pelos cabos CTP-APL-40 apresentam bom desempenho para a transmissão dos sinais ADSL, tendo o potencial para atingir taxas de até 10 Mbps a 2 km da estação telefônica, considerando que o mesmo esteja em boas condições de manutenção.

Os resultados dos testes de diafonia apresentados aqui demonstram que os efeitos da paradiafonia são bem superiores e significativos do que os da telediafonia. Esse resultado ratifica a posição de alguns autores, [18] e [20], que chegam a desconsiderar os efeitos da telediafonia. Foi visto também que a diafonia provocada pelo tráfego de sinais HDSL é muito prejudicial às taxas de transmissão do ADSL, em função da sobreposição entre os espectros de frequência das duas técnicas. Porém, não foram apresentadas reduções significativas nas taxas de transmissão quando há a inserção do sinal ADSL nos demais pares do grupo, pois nesse caso praticamente não há sobreposição entre os espectros de frequência dos canais de subida e descida do ADSL, o que quase anula os efeitos da paradiafonia. Esse resultado era previsto em função da própria configuração assimétrica do ADSL, sendo ratificado com o teste de carga de ADSL apresentado na seção 5.2.

Os resultados das simulações constantes da seção 4.4 permitem uma análise importante quanto às formas de analisar as limitações do alcance da rede de cabos metálicos para o provimento de diferentes serviços suportados pela tecnologia ADSL. Ressalta-se ainda a necessidade de considerar, no detalhe, cada tipo de cabo e a sua contribuição para o comprimento total da rede compreendida entre o DSLAM e o *modem* do cliente, assim como as taxas de transmissão que precisam ser comercializadas.

Os resultados das validações apresentados no capítulo 5 apontam que o modelo de cálculo proposto neste trabalho para estimar a capacidade da rede em transmitir os sinais ADSL se apresenta, inicialmente, como uma boa ferramenta de aproximação dos valores das taxas de transmissão que podem ser alcançadas em cada par da rede. No entanto, o modelo considera os cabos nas suas condições normais, partindo do princípio de que seus parâmetros elétricos e de proteção estão de acordo com o previsto pelas respectivas normas de fabricação e instalação. Dessa forma, o modelo não contempla condições específicas que podem apontar problemas de manutenção dos cabos, como presença de umidade, oxidação, danos em emendas, problemas na rede interna do cliente, etc. Esse fato pode ser observado nos gráficos apresentados na seção 5.1, onde as medidas realizadas sinalizam claramente que as taxas de transmissão para alguns pares ficam fora curva, apresentando valores bem abaixo dos esperados. Dependendo do nível de qualidade da rede, o modelo desenvolvido aqui permite o ajuste na margem (*mar*) da relação sinal-ruído, possibilitando, portanto, aumentar o nível de segurança para o projetista/analista, de acordo com as condições da rede.

Sugere-se a aplicação do modelo para um diagnóstico inicial da rede na área analisada, cujos resultados devem reduzir os custos com os testes em campo, pois agora, esses podem ser feitos por amostragem, visando levantar possíveis desvios dos resultados originados por problemas na rede. Assim verifica-se que o modelo de cálculo aqui proposto permite um diagnóstico inicial e abrangente da rede de pares metálicos, de forma rápida e com resultados satisfatórios, atingindo, portanto, o objetivo proposto nesse trabalho.

O grau de precisão do modelo pode aumentar a partir da qualidade das informações referentes aos tipos de cabos que compõem a rede e seus comprimentos, bem como sua ocupação com linhas digitais. Dessa forma, é sugerida a composição de um sistema que

integre o modelo de cálculo aqui apresentado, com o cadastro da rede de cabos baseado em coordenadas geográficas, juntamente com um sistema que contenha as informações de ocupação da rede com linhas digitais. Dessa forma será possível uma avaliação da área completa de uma operadora, podendo haver a personalização do parâmetro *mar* para cada região, dependendo da qualidade da rede instalada, permitindo visualizar os pontos de terminação da rede com potencial de atendimento para cada serviço a ser ofertado.

Ainda para os trabalhos futuros, sugere-se a adequação do modelo para a análise da rede para o tráfego de sinais VDSL - *Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line*, por haver uma forte tendência na utilização desse tipo de linha digital juntamente com a tecnologia FTTC – *Fiber To The Cabinet* ou FTTB – *Fiber To The Build* como solução híbrida entre fibra e cabo metálico para prover serviços com taxas bem superiores às obtidas com o ADSL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Barton. (1991). “On The Performance of an Asymmetrical Digital Subscriber Lines QAM Transceiver”. IEEE Conference Record GLOBECOM, pp.2002-2006, Arizona.
- [2] M. Barton, Lora Chang and T. Russell Hsing. (1996). “Performance Study of High-Speed Digital Subscriber Lines Technology”. In: *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 44, n° 2.
- [3] Jean-Jacques Werner. (1991). “The HDSL Environment”. In: *IEEE Journal on Selected Areas on Telecommunications*, Vol. 9, n° 6, pp. 785-800.
- [4] M. Barton and Michael Honig. “Spectral Optimization of Discrete Multitone System on Twisted Wire Copper Pairs”.
- [5] T. Pollet, H. Van de Velde, M. Moeneclaey. (1995). “Effect of Cable and System Parameters on Passband ADSL Performance”. In: *IEEE Transactions on Communications*, vol. 3 n 2/3/4.
- [6] Kenneth J. Kerpez and Kamran Sistanizadeh. (1995). “High Bit Rate Asymmetric Digital Communications Over Telephone Loops”. In: *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 43, n° 6.
- [7] John Cook and Phill Sheppard. (1995). “ADSL and VDSL Splitter Design and Telephony Performance”. In: *IEEE Journal on Selected Areas on Telecommunications*, Vol. 13, n° 9, pp.1634-1642.
- [8] J. W. Cook, R.H Kirkby and M.G. Booth. (1999). “The Noise and Crosstalk Environment for ADSL and VDSL Systems”. In: *IEEE Communications Magazine*, May, pp. 73-78.
- [9] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-101 STB – Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI) – Acesso Básico e Tecnologias Derivadas: Aspecto de Transmissão na Rede Metálica de Assinantes”. Normas Telebrás.
- [10] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-102 STB – High-Bit-Rate Digital Subscriber Lines (HDSL): Aspectos de Transmissão na Rede Metálica de Assinantes”. Normas Telebrás.
- [11] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-105 STB – Asymmetric Digital Subscriber Lines (ADSL): Aspectos de Transmissão na Rede Metálica de Assinantes”. Normas Telebrás.

- [12] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-502 STB – Procedimentos de Ensaios na Rede Metálica de Assinantes para Transmissão de Sinais Digitais”. Normas Telebrás.
- [13] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-404 STB – Manutenção e Adequação da Rede Metálica Externa para Transmissão de Sinais Digitais”. Normas Telebrás.
- [14] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-106 STB – Efeito dos Paralelos: Aspectos de Transmissão na Rede Metálica de Assinantes”. Normas Telebrás.
- [15] TELEBRÁS. (1998). “Prática 235-110-103 STB – Sistemas de Conexão: Aspectos de Transmissão na Rede Metálica de Assinantes”. Normas Telebrás.
- [16] TELEBRÁS e CPqD (1998). “A Transmissão Digital na Rede Metálica de Assinantes”.
- [17] ITU-T – International Telecommunication Union. (1999). “G.992.1 – Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers”.
- [18] Chaohuang Zeng and John M. Cioffi. (2002). “Near-End Crosstalk Mitigation in ADSL Systems”. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, n° 5.
- [19] M.A. Garms, O. Tozze and R. Fernandes. (2003). “Characterisation of Central Office Main Distribution Frame for ADSL-DMT Services”. In: *IEE Proc.Sci. Meas Technol*, Vol. 150, n° 6.
- [20] S. Haykin. (2004). “Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais”. 4ª edição, Bookman.
- [21] John A. C. Bingham. (2002). “ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation”. John Wiley e Sons, Inc.
- [22] Marcelo Pereira Cayres (2003). *Efeitos do Meio de Transmissão Metálico na Modulação QAM para Acesso Banda Larga*, Dissertação de Mestrado, DCC- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- [23] TELEPAR. (1998). “Manual de Transmissão em redes telefônicas”.
- [24] William H. Hayt Jr. (1991). “Eletromagnetismo”. 3ª edição, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- [25] Charles A. Desoer e Ernest S. Kuh. (1988). “Teoria Básica de Circuitos”, Editora Guanabara.
- [26] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1999). “Cabo Telefônico Isolado com Material Termoplástico e Núcleo Protegido por Capa APL – Especificação”. Norma NBR 9124.

- [27] TELEBRÁS. (1982). “Prática 235-320-703-STB – Especificação de Cabos Telefônicos CT-APL”. Normas Telebrás.
- [28] Andrew S. Tanenbaum. (2003). “Redes de Computadores”. 4ª edição, Editora Campus.
- [29] B. P. Lathi. (1998). “Modern Digital and Analog Communication Systems”. Third Edition, Oxford University Press.
- [30] Adalton P. Toledo. (2001). “Redes de Acesso em Telecomunicações”. Makron Books.
- [31] ITU-T – International Telecommunication Union. (1998). “G.991.1 – High bit rate Digital Subscriber Line (HDSL) transceivers”.
- [32] George Abe. (2000). “Residential Broadband”. Second Edition, Cisco Press.
- [33] ITU-T – International Telecommunication Union. (2005). “G.992.3 - Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2)”.
- [34] ITU-T – International Telecommunication Union. (2005). “G.992.5 - Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers - Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2plus).
- [35] DSL Forum, Mar, 2003.
- [36] Cássio G. Rêgo, Paulo Carvalho and Sandro C. Monteiro. (2007). “Model for Estimate ADSL Service Area in presence of Channel Losses and Electromagnetic Coupling due HDSL Services”. In: *IMOC 2007, International Microwave and Optoelectronics Conference*, Salvador, Brasil.