

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**EDSON BRITO JÚNIOR**

**METODOLOGIA PARA A MEDIÇÃO DE PARÂMETROS**  
**RELACIONADOS COM A QUALIFICAÇÃO DO ENLACE DIGITAL DO**  
**ASSINANTE**

**DM – 19/2007**

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**66.075900 – BELÉM – PARÁ - BRASIL**

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**EDSON BRITO JÚNIOR**

**METODOLOGIA PARA A MEDIÇÃO DE PARÂMETROS  
RELACIONADOS COM A QUALIFICAÇÃO DO ENLACE DIGITAL DO  
ASSINANTE**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**66.075900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL**

---

B862m Brito Júnior, Edson

Metodologia para a medição de parâmetros relacionados com a qualificação do enlace digital do assinante/ Edson Brito Júnior; orientador Agostinho Luiz da Silva Castro – 2007.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2007.

1. Modem. 2. Linhas digitais de assinantes. I.Título.

CDD – 21. ed. 621.39814

---

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

**METODOLOGIA PARA A MEDIÇÃO DE PARÂMETROS RELACIONADOS COM A  
QUALIFICAÇÃO DO ENLACE DIGITAL DO ASSINANTE.**

**AUTOR:** EDSON BRITO JÚNIOR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM TELECOMUNICAÇÕES.

**APROVADA EM** 25/05/2007

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro  
(ORIENTADOR – UFPA)

---

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. João Crisostomo Weyl Albuquerque Costa  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Araújo  
(MEMBRO – IESAM)

**VISTO:**

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR PPGEE/UFPA)

**UFPA/CT/PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66.075900 – BELÉM – PARÁ - BRASIL**

## DEDICATÓRIAS

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Edson Brito e Maria Tereza da Silva Brito, pelo amor, carinho, educação, dedicação e incentivo que sempre me deram ao longo da minha vida. Vocês são exemplos de pais e minha vitória é de vocês também.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela proteção e por iluminar o meu caminho.

À minha família pelo apoio, amor e compreensão que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Agostinho L. S. Castro pela sua amizade, paciência, apoio e orientação.

Aos professores João Crisostomo, Aldebaro Klautau, Gervásio Cavalcante, pela amizade e pela oportunidade de trabalhar em pesquisa junto ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA).

Ao professor Antônio Marcos Araújo pela participação na banca examinadora.

A Professora Hermantine Carmona pela sua valiosa ajuda na correção gramatical deste trabalho.

Aos meus amigos do grupo LQ: Lamartine Vilar, Vinicius Lima, Roberto Rodrigues, Claudomiro Sales, Jacklyn Reis, Igor Negrão, Eder Patrício e Liane Barbosa por suas amizades e ajudas no decorrer deste trabalho.

Aos colegas do grupo DSM

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).

A ERICSSON AB (ASP LAB.) e ao LEA / UFPA pelo suporte fornecido durante as pesquisas bibliográficas e medições.

E a todos os que indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO 1 – Linha Digital do Assinante.....</b>	<b>04</b>
1.1. Considerações Iniciais.....	04
1.2. Tecnologia DSL.....	04
1.3. A Família xDSL.....	05
1.3.1. ADSL.....	06
1.3.2. VDSL.....	07
1.4. O Enlace Digital do Assinante.....	07
1.5. Vantagens e Desvantagens da Linha Digital do Assinante.....	08
1.5.1. Vantagens.....	08
1.5.2. Desvantagens.....	09
1.6. Qualificação do Enlace Digital do Assinante.....	10
1.6.1. SELT.....	11
1.6.2. DELT.....	11
1.7. Principais Problemas no Enlace do Assinante que Impactam nos Serviços oferecidos pela Tecnologia DSL.....	12
1.7.1. Bobinas de Pupinização.....	12
1.7.2. Grande Comprimento do Enlace e a Atenuação.....	12
1.7.3. Derivações ( <i>Bridged Taps</i> ).....	13
1.7.4. Mudança da Bitola.....	15
1.7.5. <i>Crosstalk</i> .....	17
1.8. Trabalhos Relacionados à Qualificação do Enlace.....	19
1.9. Considerações Finais.....	21
<b>CAPÍTULO 2 – Determinação Teórica dos Parâmetros Relacionados à Qualificação do Enlace do Assinante.....</b>	<b>22</b>
2.1. Considerações Iniciais.....	22
2.2. Características Elétricas do Par Trançado.....	22
2.2.1. Parâmetros Primários.....	22

2.2.2. Parâmetros Secundários.....	23
2.3. A Matriz ABCD.....	26
2.3.1. Impedância de Entrada.....	27
2.3.2. Função de Transferência.....	27
2.3.3. Parâmetro de Espalhamento.....	28
2.4. Modelos Genéricos dos Cabos DSL.....	31
2.4.1. Modelos #0 e #1 da <i>British Telecom</i> (RLCG Modelling).....	31
2.4.1.1. Modelo Empírico para Resistência.....	31
2.4.1.2. Modelo Empírico para Indutância.....	32
2.4.1.3. Modelo Empírico para Condutância.....	32
2.4.1.4. Modelo Empírico para Capacitância.....	33
2.4.5. O Modelo de Linha VUB0.....	33
2.5. Considerações Finais.....	35
<b>CAPÍTULO 3 – Metodologia para Medições em DSL.....</b>	<b>36</b>
3.1. Considerações Iniciais.....	36
3.2. Metodologia para Medições de Parâmetros em Sistemas DSL.....	36
3.3. Implementação da Metodologia.....	37
3.3.1. BALUN.....	39
3.3.2. Analisador de Impedância de Precisão.....	41
3.3.3. Teste Fixo.....	42
3.3.4. Analisador de Rede.....	43
3.3.5. Conjunto de Teste de Transmissão/Reflexão.....	43
3.3.6. Interface GPIB.....	44
3.3.7. Cabo BNC/BNC.....	45
3.3.8. Conectores RJ45 e RJ11.....	45
3.3.9. Computador.....	46
3.3.10. Terminações.....	46
3.3.11. <i>Setup's</i> de Medições.....	47
3.3.11.1. <i>Setup</i> para Medição de Impedância de Entrada.....	47
3.3.11.2. <i>Setup</i> para Medição da Função de Transferência.....	48
3.3.11.3. <i>Setup</i> para Medição do Parâmetro de Espalhamento $S_{11}$ .....	49
3.3.12. Calibração.....	49
3.3.12.1. Métodos de Calibração Utilizados.....	50

3.3.13. Medições.....	52
3.3.13.1. Impedância de Entrada.....	52
3.3.13.2. Função de Transferência.....	53
3.3.13.3. Parâmetro de Espalhamento.....	53
3.4. Considerações Finais.....	54
<b>CAPÍTULO 4 – Análise Estatística das Medições em DSL.....</b>	<b>55</b>
4.1. Considerações Iniciais.....	55
4.2. Conceitos Fundamentais.....	55
4.3. Detecção de <i>Outliers</i> .....	57
4.3.1. Gerenciamento de <i>Outliers</i> .....	58
4.3.2. Rotulamento de <i>Outliers</i> .....	58
4.3.3. Acomodamento de <i>Outliers</i> .....	59
4.3.4. Detecção de <i>Outliers</i> .....	59
4.3.4.1. Teste de <i>Rosner</i> .....	59
4.3.4.2. Teste de <i>Dixon</i> .....	60
4.3.4.3. Teste de <i>Grubbs</i> .....	61
4.3.4.4. Teste de <i>Cochran</i> .....	62
4.4. Avaliação da Incerteza na Medição (Intervalo de Confiança).....	62
4.4.1. Tipos de Incerteza.....	66
4.5. Tratamento Estatístico das Medições em DSL.....	67
4.5.1. Aplicação do Teste de <i>Dixon</i> .....	67
4.5.1.1. Procedimentos para Realização do Teste de <i>Dixon</i> .....	68
4.5.2. Aplicação da Incerteza nas Medições.....	68
4.6. Considerações Finais.....	69
<b>CAPÍTULO 5 – Validação da Metodologia em Medições Proposta: Estudo de Casos.....</b>	<b>70</b>
5.1. Considerações Iniciais.....	70
5.2. Campanha de Medições.....	70
5.3. Resultados das Medições.....	71
5.3.1. Função de Transferência.....	72
5.3.2. Parâmetro de Espalhamento.....	77
5.3.3. Impedância de Entrada.....	81
5.3.4. Sensibilidade das Medições: Situações Adversas.....	85

5.3.4.1. Situação 1.....	85
5.3.4.2. Situação 2.....	86
5.3.4.3. Situação 3.....	88
5.4. Considerações Finais.....	91
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Visão geral de um sistema DSL.....	05
Figura 1.2: Família xDSL.....	06
Figura 1.3: Enlace local entre a central e o assinante .....	08
Figura 1.4: Configurações de Testes SELT e DELT.....	11
Figura 1.5: Curva de Transferência para Enlace com comprimentos diferentes.....	13
Figura 1.6: Efeito da derivação em um sinal transmitido.....	14
Figura 1.7: Função de Transferência com e sem <i>bridged taps</i> .....	14
Figura 1.8: Curvas de Transferência do Sinal Transmitido.....	16
Figura 1.9: Esquema de <i>NEXT</i> e <i>FEXT</i> .....	17

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Modelo infinitesimal para uma linha de transmissão.....	23
Figura 2.2: 2PN representação da linha do assinante.....	26
Figura 2.3: Parâmetro- <i>S</i> de um dispositivo de duas portas.....	28

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Diagrama de Implementação da Metodologia.....	37
Figura 3.2: Simulador de Linha ADSL 400E3.....	38
Figura 3.3: Cabo de Par Trançado.....	38
Figura 3.4: BALUN <i>North Hills</i> 0301BB.....	39
Figura 3.5: Circuito Equivalente do BALUN.....	40
Figura 3.6: Analisador de Impedância de Precisão 4294A.....	41
Figure 3.7: Teste Fixo ( <i>test fixture</i> ) 16047E.....	42
Figure 3.8: Analisador de Rede 4395A.....	43
Figure 3.9: Conjunto de Teste 87512A.....	44
Figura 3.10: Interface 82357B USB/GPIB.....	44
Figura 3.11: Cabos BNC/BNC.....	45
Figura 3.12: Conectores RJ45 e RJ11.....	45
Figura 3.13: Computador.....	46
Figura 3.14: <i>Setup</i> para Medição de Impedância de Entrada.....	48
Figura 3.15: <i>Setup</i> para Medição da Função de Transferência.....	48

Figura 3.16: <i>Setup</i> para Medição do Parâmetro de Espalhamento $S_{11}$ .....	49
Figura 3.17: Configuração Compensação Fixa.....	50
Figura 3.18: Configuração Resposta e Isolação.....	51
Figura 3.19: Calibração da Porta 1 $S_{11}$ .....	52

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1 a: Resultados exatos e imprecisos.....	56
Figura 4.1 b: Resultados inexatos e precisos.....	56
Figura 4.1 c: Resultados inexatos e imprecisos.....	57
Figura 4.1 d: Resultados exatos e precisos.....	57
Figura 4.2: Exemplos de <i>outliers</i> .....	57
Figura 4.3: Resultados exatos e precisos.....	58
Figura 4.4: Área da distribuição normal abrangida pelos valores do desvio padrão.....	64

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1: ETSI#1 – Magnitude e Fase para $H(f)$ .....	72
Figura 5.2: ETSI#1 - Curva média das medidas $H(f)$ versus os modelos BT#1 e VUB0.....	73
Figura 5.3: ETSI#8 - Magnitude e Fase para $H(f)$ .....	73
Figura 5.4: ETSI#8 - Curva média das medidas $H(f)$ versus os modelos BT#1 e VUB0 .....	74
Figura 5.5: Cabo Real - Magnitude e Fase para $H(f)$ .....	74
Figura 5.6: Cabo Real - Curva média das medidas $H(f)$ versus os modelos BT#1 e VUB0.....	75
Figura 5.7: ETSI#4 - Magnitude e Fase para $S_{11}$ .....	77
Figura 5.8: ETSI#4 - Curva média das medidas $S_{11}$ versus os modelos BT#1 e VUB0.....	77
Figura 5.9: ETSI#7 – Magnitude e Fase para $S_{11}$ .....	78
Figura 5.10: ETSI#7 - Curva média das medidas $S_{11}$ versus os modelos de linha BT#1 e VUB0 .....	78
Figura 5.11: Cabo Real – Magnitude e Fase para $S_{11}$ .....	79
Figura 5.12: Cabo Real - Curva média das medidas $S_{11}$ versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.....	79

Figura 5.13: ETSI#1 – Magnitude e Fase para $Z_{in}$ .....	81
Figura 5.14: ETSI#1 - Curva média das medidas $Z_{in}$ versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.....	81
Figura 5.15: ETSI#8 – Magnitude e Fase para $Z_{in}$ .....	82
Figura 5.16: ETSI#8 - Curva média das medidas $Z_{in}$ versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.....	82
Figura 5.17: Cabo Real – Magnitude e Fase para $Z_{in}$ .....	83
Figura 5.18: Cabo Real - Curva média das medidas $Z_{in}$ versus os modelos de linha BT#1 e VUB0 .....	83
Figura 5.20: ETSI#8 - Módulo e Fase para $H(f)$ .....	85
Figura 5.21: ETSI#8 - Curva média da magnitude $H(f)$ e dos modelos de linha BT#1 e VUB0.....	86
Figura 5.22: ETSI#8 - Módulo e Fase para $H(f)$ .....	87
Figura 5.23: ETSI#8 - Curva média da magnitude $H(f)$ e dos modelos de linha BT#1 e VUB0 .....	87
Figura 5.24: ETSI#8 - Módulo e Fase para $H(f)$ .....	88
Figura 5.25: ETSI#8 - Curva média da magnitude $H(f)$ e dos modelos de linha BT#1 e VUB0 .....	89

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1.1: Características Comuns das Bitolas dos Cabos de Par Trançado.....	16
---	----

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Teste de <i>Dixon</i> .....	60
---	----

### CAPÍTULO 5

Tabela 5.1: Descrição dos Cenários Utilizados na Implementação da Metodologia.....	71
Tabela 5.2: Análise Estatística das Medições de $H(f)$ .....	76
Tabela 5.3: Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.....	76
Tabela 5.4: Análise Estatística das Medições de $S_{11}$ .....	80
Tabela 5.5: Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.....	80
Tabela 5.6: Análise Estatística das Medições de $Z_{in}$ .....	84
Tabela 5.7: Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.....	84
Tabela 5.8: Análise Estatística das Medições de $H(f)$ para o enlace ETSI#8.....	89
Tabela 5.9: Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.....	90

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a medição dos principais parâmetros relacionados à qualificação do enlace digital do assinante. Para essa metodologia, alguns procedimentos importantes são indicados, tais como: seleção adequada dos equipamentos/dispositivos para as medições, escolha adequada do processo de calibração para as medições e a realização de um tratamento estatístico dos parâmetros medidos: impedância de entrada, função de transferência e parâmetro de espalhamento. A validação da metodologia foi realizada através de alguns estudos de casos considerando duas situações: uma, quando todos os procedimentos de medições foram realizados de acordo com a metodologia e outra, quando as medições não seguiram os procedimentos propostos. Adicionalmente, para comprovar a aplicabilidade da metodologia, foram realizadas comparações entre os dados medidos e alguns modelos teóricos utilizados como referências. Em ambos os casos citados acima, a metodologia se mostrou bastante eficaz e apresentou medições coerentes, dentro de valores confiáveis.

**Palavras-Chaves:** DSL, Qualificação do Enlace e Metodologia de Medições.

## **ABSTRACT**

The present work is related to SELT tests by proposing a methodology for measuring the main parameters related to the loop qualification. For the proposed methodology, some important procedures should be followed in order to provide trust measures such as: appropriate selection of the equipments/devices for the measurements, appropriate choice of the calibration process for the measurements and a statistical treatment of the measurements of the parameters which are Input Impedance, Transfer Function and Scattering Parameter. The present work defines such procedures. For validation of the methodology, some studies of cases were accomplished considering two situations: all of the procedures of measuring were made according to a proposed methodology and, the second case; the measurements made did not follow the proposed procedures. Additionally, in order to prove the applicability of the methodology a comparison evaluation was carried out between the measured data and some theoretical models used as references. In both cases (application of the proposed methodology and in the comparison evaluation) the results showed the applicability of methodology. The data were reliable and coherent with the expected values and theory.

**Keywords:** DSL, Loop Qualification and Methodology of Measurements.

# Introdução

Atualmente, observa-se um crescimento significativo no acesso a serviços de faixa larga. Isto se deve, em grande parte, a proliferação do uso da tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*) que, utilizando uma infra-estrutura já disponível (rede telefônica de pares de fios de cobre), permite, principalmente ao usuário doméstico, o acesso a uma gama de serviços como: Internet, Voz sobre IP (*Internet Protocol*) e Vídeo sob demanda. Porém, a utilização da rede telefônica para este tipo de tráfego impõe às operadoras novos requisitos e procedimentos de qualidade, operação e manutenção do meio de comunicação.

Em se tratando da tecnologia de acesso DSL, um desses novos procedimentos que auxiliam as operadoras, tanto no processo de instalação quanto no de manutenção desta tecnologia de acesso, é a chamada Qualificação do Enlace do Assinante. Através da Qualificação do Enlace, é possível se estimar o estado operacional da linha do assinante em proporcionar o acesso a serviços com a qualidade necessária.

A qualificação do enlace digital do assinante pode ser realizada usando-se duas técnicas: *Single Ended Line Testing* (SELT), que permite a estimação das condições de transmissão do enlace do assinante sem a necessidade de se deslocar um técnico especializado à casa do assinante, e a *Dual Ended Line Testing* (DELT) cuja diferença da anterior reside no fato de se ter, no lado do assinante, equipamentos específicos ou técnicos para a realização dos testes.

Considerando o caso específico de testes SELT, este pode ser realizado para uma pré-qualificação do enlace, ou seja, para determinar que serviços possam ser oferecidos a um determinado usuário. Uma importante parte desta qualificação é a estimação da capacidade do enlace, isto é, a estimação das máximas taxas para as transmissões em *upstream* e *downstream*. Para a estimação da capacidade, parâmetros como a função de transferência do enlace e a estimação do ruído do canal são relevantes. Tais parâmetros são obtidos, na prática, através de medições baseadas em reflectometria, que junto com outros parâmetros como o parâmetro  $S_{11}$  e a impedância de entrada fornecem uma indicação do estado operacional do enlace.

Dentro deste contexto, este trabalho se refere à elaboração de uma metodologia para a medição dos parâmetros Impedância de Entrada  $Z_{in}$ , Parâmetro de Espalhamento  $S_{11}$  e Função

de Transferência  $H(f)$ , que são necessários para a obtenção de um diagnóstico operacional do enlace.

Para essa metodologia, critérios e procedimentos devem ser seguidos para a obtenção de dados/medições confiável e coerentes. Tais critérios envolvem a seleção/especificação correta dos dispositivos do *setup* de medição, tendo em vista as características elétricas destes; a realização de procedimentos adequados de calibração e uma fase de pós-processamento dos dados, que envolve o tratamento estatístico dos mesmos para fins de observação da coerência dos dados.

## **Motivação e Contribuição**

A obtenção dos parâmetros  $Z_{in}$ ,  $S_{11}$  e  $H(f)$  são de grande importância para a análise do enlace do assinante. Estes valores podem ser obtidos teoricamente através de expressões derivadas de modelos de linha, bem como podem ser medidos. Para medir tais parâmetros utilizam-se equipamentos. Procedimentos de medição para os parâmetros citados estão indicados em diversas recomendações e normas. Porém, além de diluídas em vários documentos, muitas vezes, representam casos bem específicos de medições. Dessa forma, este trabalho contribui para o processo de determinação dos parâmetros supracitados, definindo uma metodologia para a medição de parâmetros relacionados à qualificação do enlace digital do assinante em sistema DSL. Sendo assim, este trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- define uma metodologia para a seleção dos equipamentos/dispositivos para as medições,
- define uma metodologia para as medições dos parâmetros  $Z_{in}$ ,  $S_{11}$  e  $H(f)$  do enlace, e
- define uma metodologia para o tratamento estatístico das medições.

## **Estrutura do trabalho**

Para a completa descrição da metodologia proposta, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Linha Digital do Assinante: aborda os conceitos fundamentais sobre a linha digital do assinante, as técnicas utilizadas para a qualificação do enlace e os principais problemas encontrados nos atuais enlaces do assinante, que limitam a sua capacidade em oferecer um serviço com qualidade.
- Capítulo 2 – Determinação Teórica dos Parâmetros relacionados à Qualificação do Enlace do Assinante: este capítulo tem como objetivo apresentar os principais modelos de linha de transmissão, os quais fornecem os parâmetros primários e secundários utilizados para a obtenção dos parâmetros utilizados neste trabalho. Adicionalmente, apresenta os modelos que vão ser usados na análise final dos resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta.
- Capítulo 3 – Metodologia para Medição em DSL: este capítulo descreve, em detalhes, a metodologia proposta para medição dos parâmetros relacionados com a qualificação do enlace do assinante.
- Capítulo 4 – Análise Estatística das Medições em DSL: descreve os conceitos fundamentais sobre medições, focando-se nos possíveis erros e no tratamento desses erros após a obtenção dos resultados das medições em DSL. Este tratamento é feito através de testes estatísticos e da incerteza na medição.
- Capítulo 5 – Validação da Metodologia de Medições Proposta: Estudos de Casos: este capítulo tem como objetivo mostrar a aplicação da metodologia proposta através de alguns estudos de casos considerando algumas situações quanto aos procedimentos de medições e, também, fazer uma análise para os resultados obtidos.
- Conclusão – tem como objetivo as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## Linha Digital do Assinante

### 1.1 Considerações Iniciais

A tecnologia DSL, que utiliza a infra-estrutura telefônica existente, surgiu devido a necessidade de ser oferecido ao usuário final um conteúdo eletrônico, tal como a Internet. Tal tecnologia permite o transporte de dados em banda larga, o que resulta em ofertas de serviços com certa qualidade e baixo custo (comparada com outras tecnologias).

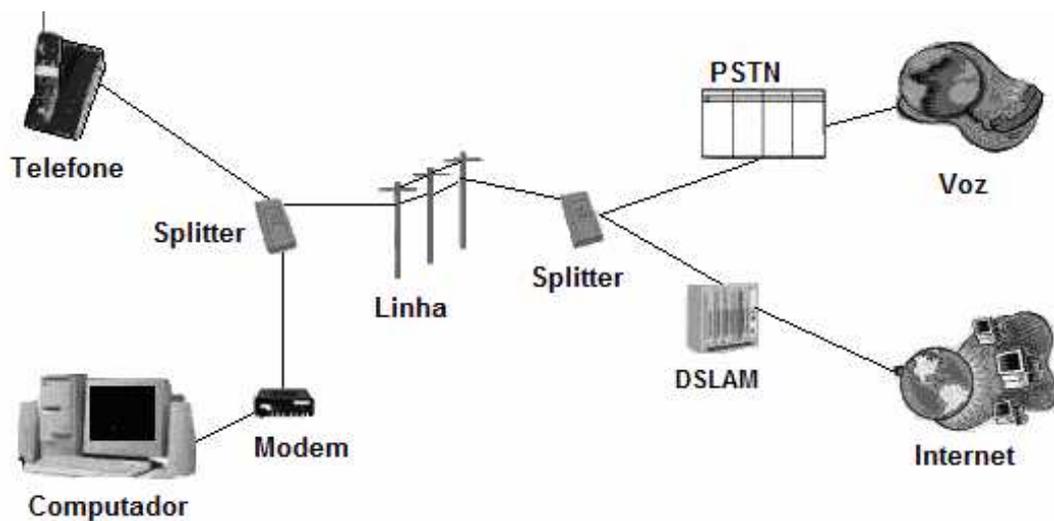
Neste capítulo, a tecnologia DSL será apresentada, bem como serão abordadas suas principais características. Será discutida a Qualificação do Enlace do Assinante, como meio usado para indicar possíveis problemas que podem limitar a qualidade dos serviços fornecidos ao assinante.

### 1.2 Tecnologia DSL

A tecnologia DSL, surgiu em 1989 da evolução dos sistemas RDSI (Redes Digitais de Serviços Integrados). Trata-se de uma tecnologia que usa as linhas telefônicas de cobre existentes e provê uma conexão à Internet dedicada e com alta velocidade. Uma das grandes vantagens de alguns sistemas DSL está no fato de que eles podem coexistir na mesma linha com o serviço telefônico de voz tradicional, ou POTS (*Plain Old Telephone Service*) [1]. Isso é conseguido utilizando-se faixas de frequência diferentes da faixa de voz (que vai de 0 a 4 kHz). Essencialmente, isso resulta em duas linhas em uma: uma para o POTS, e uma para a conexão com a Internet.

O fato de que a estrutura telefônica, baseada em circuitos chaveados, conhecida como *Public Switched Telephony Network* (PSTN) foi concebida para transportar sinais de voz e, ocupando apenas as baixas frequências, permite que se utilizem as altas frequências para outro tipo de transmissão. Com isso, é possível a transmissão de voz e dados em banda larga simultaneamente em um mesmo par trançado de cobre, uma vez que tais transmissões serão feitas em faixas de frequências diferentes.

Em sistemas DSL, a CO (*Central Office*) é responsável por prover o acesso à rede e isto é feito por meio de um equipamento chamado DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). O DSLAM está ligado a uma rede de alta velocidade, que está ligada a um *backbone*; que por sua vez provê a ligação com a Internet. O DSLAM tem a função de transportar o sinal recebido da rede em que está ligado através do par trançado de cobre, que por sua vez, interliga a central ao assinante [2]. A Figura 1.1 mostra uma visão geral de um sistema DSL.

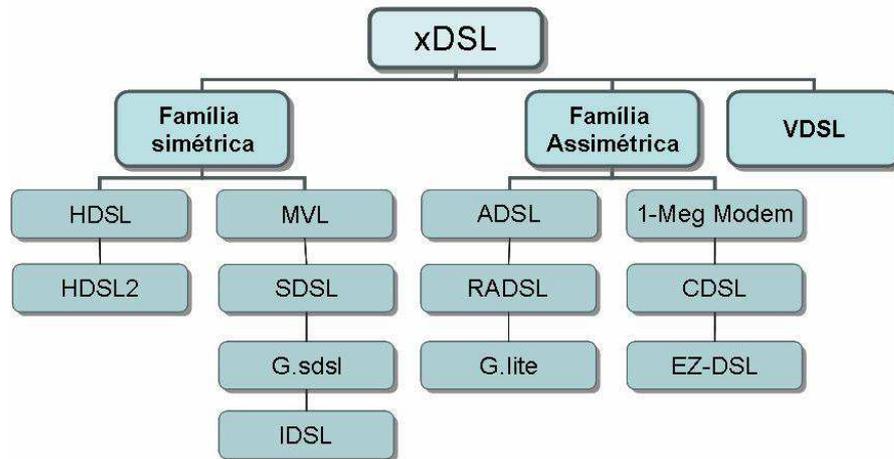


**Figura 1.1:** Visão geral de um sistema DSL.

### 1.3 A Família xDSL

Existem vários tipos de tecnologias DSL a serem escolhidas. A seleção de uma delas depende de múltiplos fatores: tipo de serviços oferecidos; topologia dominante da rede já existente; planos para o surgimento de novos serviços no futuro. Justamente por esta variedade de tipos, costuma-se empregar o acrônimo xDSL, onde o “x” substitui uma ou mais letras. A Figura 1.2 mostra uma arquitetura para as famílias xDSL. Pela figura, vê-se que existem dois tipos de DSL: simétrico e assimétrico. Os tipos simétricos transmitem dados com a mesma largura de banda nos dois sentidos (assinante-central e central-assinante) e nos tipos assimétricos a largura de banda é maior para transmissão dos dados no lado do usuário. Isto por que, a Internet doméstica é considerada em primeiro lugar, um serviço para *download*. Cada uma destas tecnologias oferece taxas diferentes de transmissão e recepção, bem como possuem características próprias, que incluem número de pares de fios empregados e

distâncias máximas de transmissão. Por exemplo, os usuários domésticos que desejam usufruir da alta largura de banda para o acesso à Internet, são melhores servidos pelos serviços assimétricos, pois, em geral, a própria natureza desse tráfego é assimétrica. Por outro lado, usuários corporativos, como filiais de empresas e provedores de conteúdo, devem usar os serviços simétricos.



**Figura 1.2:** Família xDSL.

A ênfase desse trabalho será voltada para as famílias cujos conceitos são apresentados a seguir.

### 1.3.1 Família ADSL

ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) tem uma maior largura de banda para *downstream* (CO para assinante) do que para *upstream* (assinante para CO). Dessa forma, em geral, é mais aplicada a consumidores residenciais, visto que na maioria das vezes esses consumidores buscam por informação digital na rede. A taxa de bits para *downstream* varia de 256 kbps até 9 Mbps enquanto que a taxa de bits para *upstream* varia de 16 kbps até 640 kbps [3]. A transmissão ADSL pode alcançar distâncias entre CO e assinante da ordem de 5,5 km, entretanto, as taxas de bits são menores para essa distância máxima.

O ADSL, usualmente, utiliza a banda de frequência de 25 kHz até 1,104 MHz enquanto que o POTS usa a banda de 300 Hz até 3,4 kHz. Hoje em dia, a maioria dos modems ADSL usa técnicas DMT (*Discrete Multi-Tone*) que é recomendado pelos padrões ADSL.

Dentre esses padrões, incluem-se o ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), o ANSI (*American National Standard Institute*) e o ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication*) G.992.1 [4] e G.992.2 [5]. Na transmissão DMT, a banda de frequência (0 Hz até 1,044 MHz) é dividida igualmente em sub-canais ou sub-portadoras, frequentemente referenciada por tom. Isso equivale a 256 tons. Cada tom ocupa 4,3125 kHz da largura de banda. 32 tons são alocados para a banda de *upstream* e cerca de 250 tons são usados para a banda *downstream*.

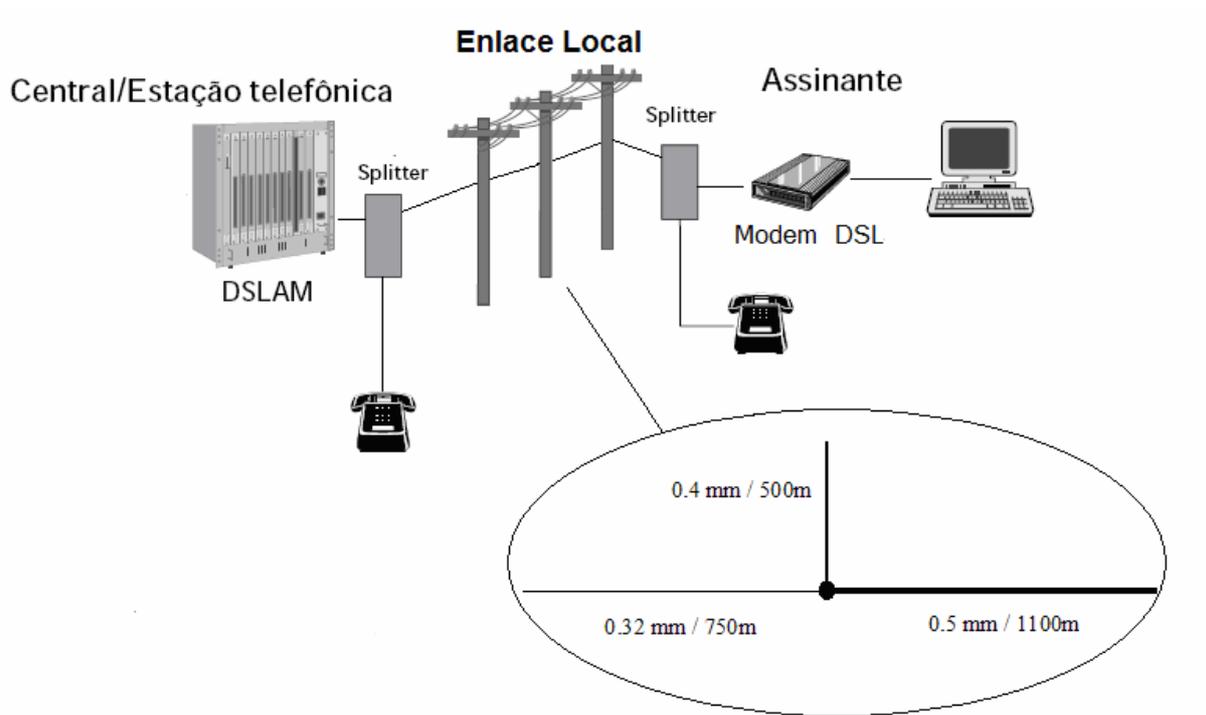
### 1.3.2 Família VDSL

A família VDSL (*Very High bit-rate Digital Subscriber Line*) foi desenvolvida para proporcionar aos usuários alta velocidade de transmissão nas frequências até 30 MHz e taxa de bits da ordem de 52 Mbps. O VDSL pode operar em altas taxas de bits apenas para pequenas distâncias, da ordem de 1370 m e são conectados aos *backbones* de fibra óptica de alta velocidade. A topologia básica de um sistema VDSL consiste em: uma unidade óptica – ONU (*Optical Network Unit*), a unidade transmissora VDSL no lado do assinante – VTU-R (*VDSL Transmission Unit at Remote side*) e a unidade transmissora VDSL no lado da unidade óptica – VTU-O (*VDSL Transmission Unit at ONU side*).

A VDSL também pode coexistir com o POTS na mesma linha telefônica, como ocorre com a ADSL; entretanto, VDSL utiliza a banda de frequência de maneira diferente. A VDSL tem duas bandas para *downstream* duas bandas para o *upstream*, sendo a primeira banda (frequências mais baixas) utilizada para *downstream*, a segunda para *upstream*.

## 1.4 O Enlace Digital do Assinante

A infra-estrutura da linha telefônica, conhecida como planta do enlace, consiste de cabos de par trançados conectando a central a um assinante (CPE – *Customer Premise*). O enlace telefônico de par trançado é chamado de enlace local do assinante. O enlace do assinante, por possuir várias topologias de comprimentos variáveis e muitas vezes maiores que 3 km, é constituído de uma ou mais seções com cabos de diâmetros diferentes. Em destaque, a Figura 1.3 mostra uma representação de um enlace entre a central e o assinante, onde se observa a presença de um enlace com muitas seções, com diâmetros e comprimentos de diferentes.



**Figura 1.3:** Enlace local entre a central e o assinante.

## 1.5 Vantagens e Desvantagens da Linha Digital do Assinante

### 1.5.1 Vantagens

Uma das principais motivações para o aparecimento da DSL foi a busca por uma tecnologia que permitisse elevadas taxas de transmissão de dados, para fazer face às capacidades dos *modems* por cabo, e permitindo a implementação rentável de Vídeo sobre Demanda e Internet através das linhas telefônicas. Em condições ideais, este objetivo foi amplamente atingido, com taxas de bits da ordem dos 8 Mb/s, mas mesmo com taxas mais baixas, há um ganho em relação às demais tecnologias.

No entanto, a capacidade de transporte da DSL varia muito com a distância, taxas de 6 Mb/s podem ser atingidas entre 3 a 4 km, e as taxas mais baixas encontram-se quanto maior for a distância, 1,5 a 2 Mb/s para cerca dos 5 km. Segundo testes, ainda se pode atingir distâncias de cerca de 9 km; e se o meio de transmissão usado for a fibra óptica pode-se atingir taxas de 52 Mb/s e 155 Mb/s. Sem dúvida, é uma das vantagens em relação à RDSI.

## 1.5.2 Desvantagens

A tecnologia DSL também tem os seus problemas. Um deles surge devido à distribuição das capacitâncias e resistências ao longo da linha, o que provoca grandes atenuações e distorções para a banda dos sinais de voz. Para resolver este problema ao longo das linhas, foram introduzidas bobinas indutivas de modo a compensar o efeito capacitivo, proporcionando uma boa comunicação dos sinais de voz.

O problema para DSL está no fato de que para frequências superiores a 4 kHz, as atenuações são grandes, daí a necessidade da remoção dessas bobinas de algumas linhas, para permitir comunicações de alta velocidade. Esta distribuição de capacitâncias e resistências ao longo das linhas é a que provoca o aumento da atenuação com a distância para as altas frequências, provocando assim a variação das taxas de transmissão. Outro problema com sinais em altas frequências é a dispersão do sinal, este efeito é causado devido às frequências que se propagam com velocidades diferentes ao longo da linha. Os efeitos da dispersão agravam-se com o aumento da frequência e do comprimento da linha.

Outro problema muito grave para as transmissões DSL, e outros sistemas que usam as altas frequências, são as interferências causadas por *crosstalk*, que são causadas pelos transmissores presentes nas linhas, os quais geram impulsos de mesma frequência, causando interferência com os sinais recebidos.

O cenário descrito acima parece indicar um ambiente catastrófico para a utilização da infra-estrutura telefônica, para fins de transmissão de dados em altas velocidades e altas frequências.

Porém, a tecnologia de acesso DSL é amplamente utilizada hoje. Para tanto, técnicas e métodos foram desenvolvidos para viabilizar o seu uso sobre pares de fios de cobre da rede telefônica. Tais técnicas são metodologias usadas pelo provedor de serviço, para indicar o estado operacional do enlace e apontar uma ação para os possíveis problemas identificados.

Dentro deste contexto, surgiu a técnica conhecida como Qualificação do Enlace, a qual será assunto da próxima seção.

## 1.6 Qualificação do Enlace Digital do Assinante

O estado operacional da linha do assinante reflete o propósito inicial para a qual foi projetada, ou seja, a sua construção está relacionada com as necessidades do sistema telefônico tradicional (POTS). Dessa forma, algumas características e elementos instalados no enlace local com o intuito de melhorar a qualidade do serviço telefônico, acabam por prejudicar ou afetar o desempenho, ou até mesmo inviabilizar a instalação do serviço DSL. Dentre esses elementos destacam-se as bobinas de pupinização (*load coil*), as derivações (*bridged tap*), e mudanças de cabos no enlace.

Antes da instalação do serviço DSL, as operadoras procuram obter a maior quantidade possível de informação do enlace local a fim de avaliar o estado operacional da linha e, conseqüentemente, adequá-la (se for o caso), para que o desempenho do serviço DSL não seja prejudicado. A obtenção dessa informação garante a boa operação e a rápida instalação, além de evitar futuras frustrações por parte do assinante com o baixo desempenho do serviço. Assim, a obtenção de informação do enlace local visa também manter a qualidade do serviço já em operação para um assinante específico.

Dentro desse contexto surge a qualificação do enlace, que é um conjunto de técnicas, as quais visam avaliar as capacidades de um enlace local específico de suportar e manter as exigências de um serviço DSL. Dentre essas técnicas destacam-se: medições em nível de camada física e simulações por meio de modelos matemáticos, que identificam um determinado enlace. No que se referem às medições, estas podem ser realizadas tanto no lado da CO como no lado do assinante (com a presença física ou não de um técnico da operadora) com equipamentos dedicados de medidas, ou através de *modems* e DSLAMS. Dessa forma, definem-se as técnicas de monitoramento em uma extremidade do enlace – SELT e as técnicas de monitoramento nas duas extremidades do enlace – DELT.

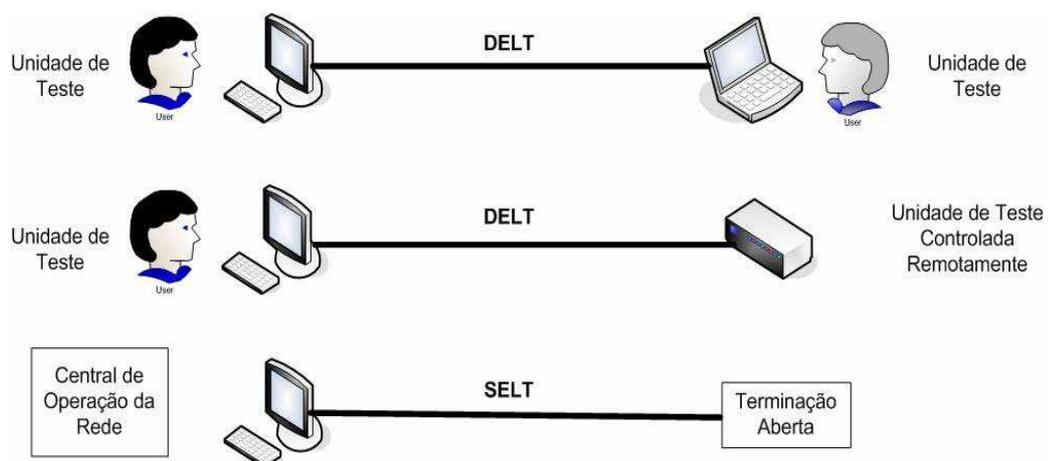
Adicionalmente, com a Qualificação do Enlace, é possível, através das medições realizadas e testes feitos pelas operadoras, a construção de um banco de dados, onde as informações armazenadas servem para comparações com outras bases de dados, para proverem uma ferramenta para monitorar e diagnosticar o desempenho do sistema DSL.

### 1.6.1 SELT

Os testes SELT são testes das características elétricas do enlace local realizadas por equipamento apropriado, sendo normalmente localizado no lado da CO [6]. Esses testes podem envolver a análise da reflexão de um pulso através do enlace local no domínio do tempo – TDR (*Time Domain Reflectometry*) ou no domínio da frequência – FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). As técnicas SELT necessitam de menos tempo e custo financeiro, visto que não há a necessidade de enviar um técnico à residência do assinante. Entretanto, esses testes são mais dependentes do nível do ruído no receptor, visto que os sinais de testes devem se propagar por todo o enlace [7].

### 1.6.2 DELT

Os testes DELT são testes das características elétricas do enlace local que são realizados em ambos os lados, do assinante e da CO. Esses testes são realizados com auxílio da combinação de *modems* xDSL em cada extremidade do enlace, sendo o da CO o *modem* de referência. Vale ressaltar que o *modem* do assinante deve ser compatível com os padrões ADSL2 que suportam as técnicas DELT [8] e [9]. A Figura 1.4 ilustra os testes SELT e DELT. No teste DELT, a unidade de teste faz referência a um *modem* ou equipamento dedicado de medição que pode ser controlado remotamente. No SELT, os testes dependem apenas da central de operação.



**Figura 1.4:** Configurações de Testes SELT e DELT [8].

## 1.7 Principais Problemas no Enlace do Assinante que Impactam nos Serviços Oferecidos pela Tecnologia DSL

Quando um assinante solicita para a operadora um certo serviço que utiliza a tecnologia DSL, a primeira coisa que ela deve fazer é verificar se a linha desse assinante pode suportar este serviço. A Qualificação do Enlace difere para cada assinante, dado que ela depende da topologia entre o assinante e a operadora. Conforme foi descrito na seção 1.4, muitas topologias são encontradas, mas tipicamente um enlace do assinante consiste de seções de cabos, possivelmente com diâmetros e comprimentos diferentes, conectados um ao outro. Além disso, existem outros fatores limitantes na oferta dos serviços DSL a serem considerados, como descrito na seção 1.6. Essas limitações são detalhadas a seguir.

### 1.7.1 Bobinas de Pupinização (*Load Coil*)

Bobinas de pupinização são pequenos transformadores usados como filtros passa-baixas, localizados ao longo do enlace do assinante para equilibrar a resposta em frequência na transmissão do sinal de voz [8]. Esses filtros são considerados uma catástrofe para serviços de banda larga, dependentes das altas frequências atenuadas drasticamente.

As bobinas de pupinização foram inicialmente usadas nos serviços POTS para tornar a resposta em frequência equilibrada e ainda diminuir a atenuação da linha. Mas, para o DSL, as bobinas de pupinização são consideradas como um fator limitante no desempenho e na qualidade dos seus serviços, pois, para as transmissões dos serviços DSL que trabalham com sinais acima da banda de voz elas aumentam a atenuação da linha.

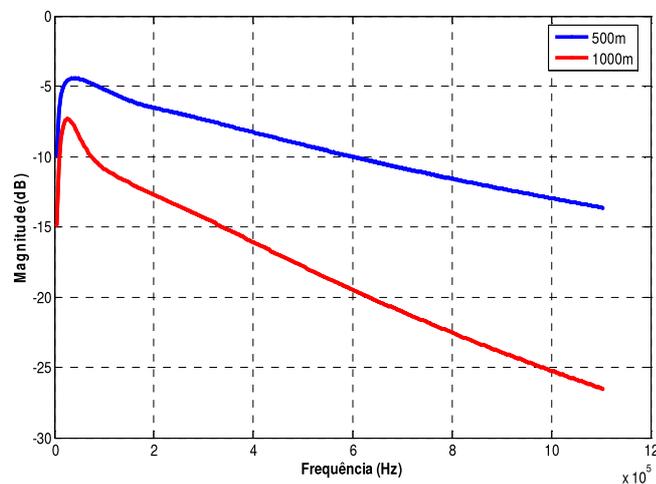
Como consequência dos fatores citados anteriormente, é importante detectar e remover todas as cargas indutivas ao longo do enlace para se alcançar uma boa taxa de bits na transmissão dos serviços DSL.

### 1.7.2 Grande Comprimento do Enlace e a Atenuação

À medida que se aumenta o comprimento da linha de transmissão, o sinal também sofre um aumento na sua atenuação. Essa perda de potência do sinal transmitido devido à presença do enlace é conhecida como perda por inserção (*Insertion Loss*) [10]. Quanto maior o comprimento, maior a atenuação do sinal. Um problema prático é o da estimação da perda

por inserção, a qual é feita pela central telefônica a fim de se conhecer quanto de potência chega até seu assinante. Para os sistemas DSL, a perda devido à presença da linha se torna muito grande para linhas a uma distância acima de 5,5 km da central, tornando impraticável a implantação do serviço DSL [7].

O comprimento da linha é um fator preocupante na tarefa de qualificação, pois mesmo que a linha não possua uma terminação em curto ou aberto, ou até mesmo uma *bridged tap*, o próprio cabo telefônico possui perdas [11]. Quanto maior o comprimento da linha maior a perda, resultando em taxas de transmissões baixas, conforme se observa na Figura 1.5. Diante desse fator, nota-se que a taxa de transmissão em serviços DSL alcançável é inversamente proporcional ao comprimento da linha, sendo importante conhecer o comprimento da linha para se de estabelecer taxas de transmissão suportadas por ela.



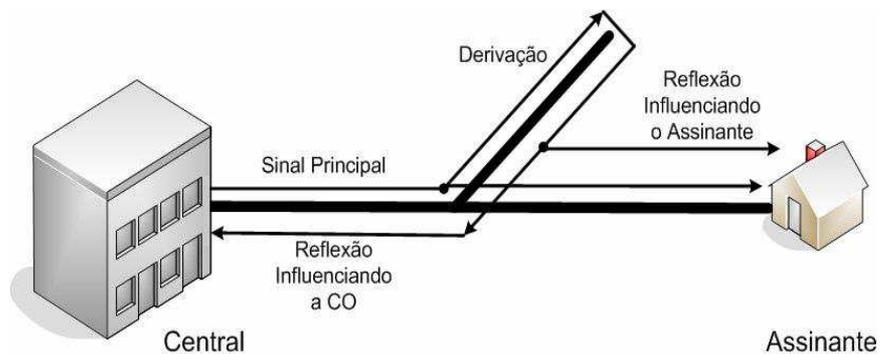
**Figura 1.5:** Curva de Transferência para Enlace com comprimentos diferentes.

### 1.7.3 Derivações (*Bridged Taps*)

As *Bridged taps* são derivações de fios em aberto que estão em paralelo com a linha do assinante. Elas se formam quando ocorrem mudanças na linha, deixando derivações desnecessárias presas a ela. As *bridged taps* podem existir entre a central e o assinante, ou até mesmo além do assinante. O efeito negativo dessas *bridged taps* nos serviços DSL está diretamente relacionado à sua localização, ao seu comprimento, ao seu diâmetro, ao tipo de serviço e à frequência utilizada. Algumas *bridged taps* podem ser toleradas, dependendo da sua localização e do serviço que será operado na linha.

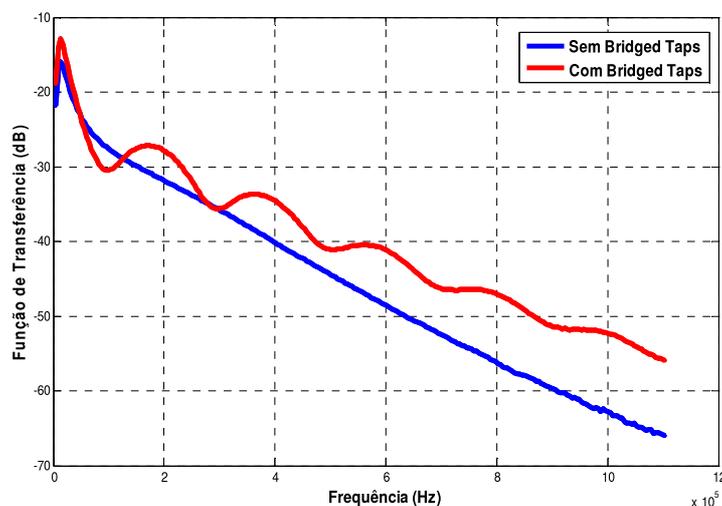
O problema é que parte do sinal transmitido passa pela derivação e é refletido por sua terminação em aberto, voltando atrasado para a linha principal, fato esse que possivelmente

causará interferência com o sinal não atrasado. Contudo que a linha seja usada estritamente para POTS, esta reflexão é aceitável, desde que o tempo de atraso seja bastante curto para que o ouvido humano possa perceber e o comprimento da derivação esteja longe do tamanho do comprimento de onda dos sinais de baixa frequência. Por outro lado, para serviços de banda larga, isto causa alguns problemas, como perdas e distorções no sinal no enlace. Algumas das altas frequências podem ser extintas por conta de interferência negativa. A Figura 1.6 ilustra o efeito de uma derivação nos sinais transmitidos.



**Figura 1.6:** Efeito da derivação em um sinal transmitido [7].

Em um enlace DSL sem derivações, e considerando a terminação casada com a linha, a função de transferência decai de forma monotônica com o aumento da frequência. Entretanto, quando uma derivação está presente no enlace, a função de transferência apresentará oscilações periódicas resultando em perdas na capacidade de transmissão. Na Figura 1.7 é possível notar essas oscilações quando se comparar as curvas da função de transferência para enlaces com e sem *bridged taps*.



**Figura 1.7:** Função de Transferência com e sem *bridged taps*.

Uma técnica para detectar e localizar uma *bridged tap* é feita através da função de transferência do enlace do assinante. Nesta técnica a presença de um nulo periódico na função de transferência indica a presença de uma *bridged tap* no enlace [12].

A presença de uma derivação pode ser descoberta de modo que a frequência do primeiro nulo seja usada para estimar o comprimento da *bridged tap*. Quando uma simples *bridged tap* está presente no enlace, os nulos da função de transferência aparecem nas frequências onde o comprimento é igual a um número ímpar de um quarto do comprimento de onda [13 e 20].

Para detectar a presença de uma *bridged tap* em um enlace telefônico, utiliza-se uma metodologia similar às técnicas descritas acima [21]. No trabalho, a resposta ao impulso é feita pela IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para detectar a presença de uma imperfeição ao longo do enlace. As reflexões causadas pelas *bridged tap*, as terminações em circuito aberto da *bridged tap* e a sua impedância são utilizadas para determinar a localização e o comprimento da mesma e também serve para estimar o comprimento total do enlace.

#### 1.7.4 Mudança da Bitola

Todo o meio físico de transmissão sofre influências do meio externo, acarretando em perdas de desempenho nas taxas de transmissão. Essas perdas podem ser atenuadas limitando a distância entre os pontos a serem ligados. Nos cabos telefônicos, um fator determinante dessas perdas é a indução eletromagnética nos seus condutores.

Diante disso, a qualidade da linha de transmissão que utiliza os pares de fios trançados depende basicamente da qualidade dos condutores empregados e da bitola dos cabos (quanto maior a bitola, menor a resistência ôhmica por quilômetro).

Nos sistemas DSL, a consequência na mudança de bitola do cabo ao longo da linha provoca reflexões que irão atenuar o sinal. Essa atenuação aumenta com a frequência e com o comprimento da linha. De acordo com o serviço utilizado, diferentes bitolas podem ser encontradas na linha do assinante. Segundo as recomendações utilizadas pelos padrões ADSL, ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), ANSI (*American National Standard Institute*) e TELEBRÁS, as bitolas encontradas são:

- ETSI: 0,32 mm/0,4 mm/0,5 mm/0,63 mm/0,9 mm.
- ANSI: 19 AWG/22 AWG/24 AWG/26 AWG, onde AWG (American Wire Gauge).

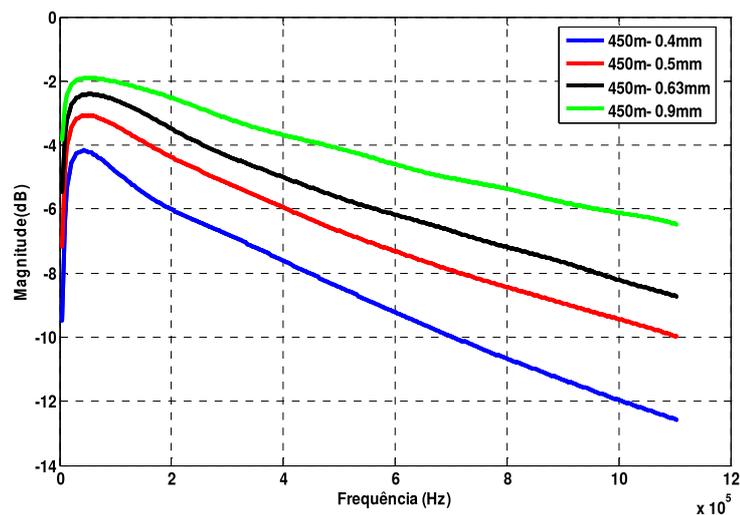
- TELEBRAS: 0,3 mm/0,4 mm/0,5 mm/0,65 mm/0,9 mm.

A Tabela 1.1 indica a correspondência entre AWG, diâmetro do cabo e a resistência DC (em *Ohms* por quilômetro) [14]. A resistência do enlace é um importante parâmetro, visto que ela determina o comprimento máximo do enlace. Cabos muito finos têm uma alta resistência e normalmente são utilizados para enlaces curtos. Devido a sua baixa resistência, cabos mais grossos são utilizados para enlaces mais longos.

**Tabela 1.1:** Características Comuns das Bitolas dos Cabos de Par Trançado.

AWG	Diâmetro do cabo (mm)	Resistência do Enlace ( $\Omega/\text{km}$ ) a 20 <sup>o</sup> C
19	0,9	55
22	0,63	111
24	0,5	175
26	0,4	281

Conforme descrito anteriormente, a atenuação na transmissão de um serviço DSL é inversamente proporcional ao diâmetro do cabo utilizado. A Figura 1.8 mostra esse comportamento para vários cabos com tamanhos diferentes, mas com comprimentos iguais. O cabo com diâmetro de 0,9 mm apresenta uma menor atenuação em relação aos outros, ou seja, possui menor perda em dB na potência do sinal transmitido.



**Figura 1.8:** Curvas de Transferência do Sinal Transmitido.

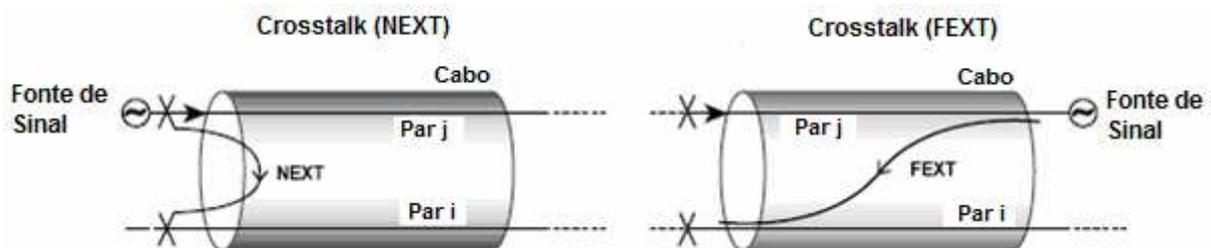
Uma maneira de observar a mudança de bitola em um enlace é analisar o decaimento presente no sinal TDR. O efeito do descasamento de impedância causado pela mudança de

bitola ao longo do enlace é estudado através da função de transferência do canal [15]. A mudança de bitola causa uma descontinuidade na curva da função de transferência, mas essa descontinuidade é somente observada pela reflexão presente no sinal TDR. Porém, uma vez observada essa reflexão é possível estimar a bitola do enlace.

### 1.7.5 Crosstalk

Na rede telefônica, vários pares trançados de cobre são colocados juntos em um mesmo cabo chamado de *binder*. Sistemas adjacentes dentro do *binder* podem transmitir ou receber informações na mesma faixa de frequências, fato esse que pode gerar uma interferência por *crosstalk* significativa. Isso ocorre pelo fato de que os sinais induzidos pelo efeito de *crosstalk* se combinam com os sinais originalmente transmitidos pelo enlace. O resultado é uma forma de onda diferente da originalmente transmitida.

O efeito de *crosstalk* pode ser dividido em duas categorias. *Crosstalk* causado por extremidades próximas, conhecido como NEXT (*Near End Crosstalk*), é o mais significativo, justamente pelo fato de que a alta energia de um sistema adjacente induz um *crosstalk* significativo no sinal primário. A outra forma é o *crosstalk* causado por extremidades mais afastadas, conhecido com FEXT (*Far End Crosstalk*), que é tipicamente menor, pois a interferência da extremidade mais afastada é atenuada no decorrer do enlace. Existem também o *Self-NEXT*, funcionando no mesmo tipo de xDSL e no mesmo *binder* de cabos, e *Foreign-NEXT*, funcionando em tipos de xDSL adjacentes. A Figura 1.9 ilustra o esquema do NEXT e do FEXT [16].



**Figura 1.9:** Esquema de NEXT e FEXT [11].

Existem três modelos matemáticos de *crosstalk* amplamente utilizados na literatura. Um deles é chamado modelo NEXT [17]. Outro é o modelo NEXT simplificado, determinado por:

$$|H_{NEXT}(f, N)|^2 = N^{0,6} 0,8536 \times 10^{-14} (f / 1Hz)^{1,5} \quad (1.1)$$

onde  $N$  é o número de pares do enlace,  $f$  é a frequência.

O terceiro modelo é conhecido como ETSI, o qual também é similar ao modelo NEXT, porém é um pouco mais sofisticado que o NEXT simplificado [18] [19]. O modelo de crosstalk ETSI é determinado por:

$$|H_{NEXT}(f, L, N)|^2 = N^{0,6} 10^{-5} (f / 1MHz)^{1,5} (1 - |s_{T0}(f, L)|^4) \quad (1.2)$$

onde  $s_{T0}(f, L)$  é uma notação ETSI para a função de transmissão do enlace, a qual, por simplificação, pode ser também denominado como  $H_{channel}(f, L)$ .

Os modelos NEXT e NEXT simplificado são geralmente utilizados como modelos nas aplicações norte americanas, enquanto o modelo de *crosstalk* ETSI é frequentemente usado nas aplicações européias.

Similar ao acoplamento NEXT, o acoplamento FEXT é dado por:

$$|H_{FEXT}(f, L, N)|^2 = N^{0,6} K_{FEXT} f^2 L |H_{channel}(f, L)|^2 \quad (1.3)$$

onde  $L$  é o comprimento do enlace (medido em pés – *feet*) e  $K_{FEXT}$  é uma constante. Para os cabos do padrão ANSI, a constante  $FEXT$  é considerada como sendo [9]:

$$K_{FEXT} = 8,10^{-20} \quad (1.4)$$

Para os cabos europeus, a constante FEXT é considerada como sendo [14]:

$$K_{FEXT} = 10^{-4,5} \frac{1}{MHz^2 km} = 10^{-19,5} \quad (1.5)$$

## 1.8 Trabalhos Relacionados à Qualificação do Enlace

Diante dos problemas na oferta dos serviços DSL, muitas pesquisas foram desenvolvidas com intuito de melhorar a qualidade do enlace do assinante. No entanto, buscam-se ainda novas metodologias que ajudem na solução desses problemas. Nesta seção serão descritos alguns desses trabalhos.

O trabalho [22] sugere a aplicação de um modelo denominado VBU0 para estimar a função de transferência do enlace, a partir das medidas dos parâmetros da linha. Esse modelo é validado com medidas e simulações para algumas topologias da rede, considerando um caso de uma rede simples, com uma *bridged tap* ou uma rede em cascata com duas seções.

Para cada situação acima descrita foi encontrado, a partir dos parâmetros primários e secundários, um modelo matemático para os parâmetros de espalhamento  $S_{11}$  e para a função de transferência  $H(f)$ . Através desse modelo, é possível se obter informações da topologia da rede, a qual é considerada inicialmente desconhecida.

Em [23], o problema da qualificação do enlace utilizando SELT é realizado através das técnicas convencionais TDR, a partir das limitações da natureza da linha do assinante. Nesse trabalho é analisado um algoritmo, considerando-se o conhecimento estatístico do enlace. A principal relação através do algoritmo proposto é a exploração determinística do uso de modelos do par trançado. Depois, os modelos foram validados através de experimentos. Ainda foram feitas simulações para comparar os resultados obtidos com a ajuda de TDR para escolher a topologia que mais se aproxima de uma situação verdadeira. Para validar os resultados, foram realizadas simulação através de técnicas computacionais e os resultados comparados com as medidas obtidas através de TDR. Essas simulações e medidas levam em conta diferentes situações referentes à mudança de bitola do cabo.

Assim como em [23], a referência [7] utiliza um modelo matemático do enlace do assinante, a partir das dos parâmetros impedância de entrada e função de transferência de diferentes cabos (bitolas) para estimar o comprimento do enlace através do uso de TDR. O modelo utiliza diferentes topologias de rede (com ou sem *bridged tap*) para validar o seu resultado. Esses resultados são comparados com as informações armazenadas nos banco de dados das operadoras.

Em [24], um sistema especialista para identificação e classificação do enlace local foi desenvolvido através do uso de TDR. O objetivo desse sistema foi estimar a capacidade teórica do canal do enlace, entre a central e o assinante, baseando-se nas medidas de TDR e da densidade espectral de potência do ruído a partir da central. Essas medidas são processadas

usando-se técnicas avançadas de processamento digital de sinais, inteligência artificial e identificação de sistemas para estimar a função de transferência, na qual são necessárias para estimar a capacidade do canal. O sistema ainda utiliza o modelo VBU0 baseado em uma rede de duas linhas.

No trabalho [15] é proposta uma técnica para avaliar a precisão do *loop make-up identification* (identificação e caracterização do enlace), sem qualquer conhecimento a priori da topologia do enlace. Essa técnica utiliza um método através da análise das medidas de TDR para avaliar e identificar um *single ended loop make-up*. O método consiste em estimar a função de transferência do canal; para isso foi desenvolvido um algoritmo que, através da extração do sinal TDR obtido, é capaz de estimar uma determinada topologia da rede. Essa estimativa é feita a partir do sinal refletido, ou seja, da diferença entre o sinal TDR medido e o sinal TDR simulado. Na segunda parte da referência [25] é feita uma extensão do trabalho a partir de uma avaliação do desempenho de tal algoritmo através de técnicas de TDR estendidas [23], que utilizam modelos de resposta ao impulso e algoritmos ML (*Maximum Likelihood* - Máxima-Probabilidade). Uma outra contribuição desse trabalho é uma implementação para uma estimativa de múltiplas topologias através dos registros das medições da *Bellcore's* de 1987-1990.

## **1.9 Considerações Finais**

Este capítulo teve como objetivo uma fundamentação da linha digital do assinante e da técnica de qualificação do enlace DSL. Outro ponto importante foi a descrição dos principais problemas que influenciam na limitação dos serviços oferecidos. O intuito de se realizar testes de qualificação é analisar, através de simulações de modelos matemáticos e de medições, o estado físico da linha para se chegar a um diagnóstico seguro e eficaz, garantindo com isso uma boa qualidade dos serviços ao usuário final. Ainda neste capítulo, alguns trabalhos relacionados à qualificação do enlace foram brevemente descritos, mostrando as atuais linhas de pesquisas nesta área.

O próximo passo vai ser a abordagem da determinação teórica dos parâmetros relacionados à qualificação do enlace do assinante, os quais serão aplicados na metodologia proposta.

## Capítulo 2

# Determinação Teórica dos Parâmetros Relacionados à Qualificação do Enlace do Assinante

### 2.1 Considerações Iniciais

A modelagem da linha de transmissão de par trançado é muito utilizada como uma maneira de fazer a qualificação do enlace. Embora simulada, ela se torna um fator importante no planejamento e implantação dos serviços DSL. Além do mais, os modelos desenvolvidos, quando precisos, permitem estimar uma topologia da rede do assinante em diferentes situações.

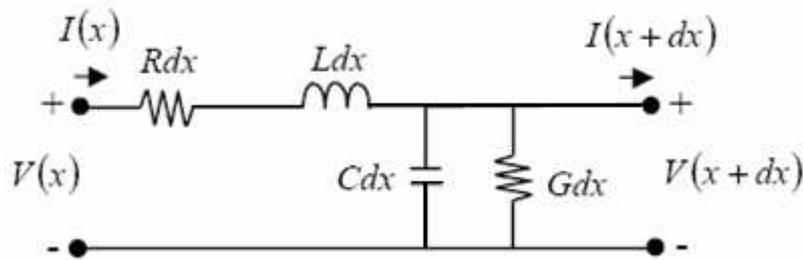
Os modelos genéricos de cabos DSL foram criados para descrever precisamente o comportamento dos parâmetros primários e secundários dos cabos de par trançado [26]. A utilização desses modelos permite conhecer as características físicas de um enlace DSL. Embora muitos desses modelos sejam empíricos, eles são amplamente utilizados como referências quando se necessita de uma análise comparativa para um resultado de uma medição. Diante disso, neste capítulo serão descritos alguns modelos de linhas utilizados para cabos DSL, que servirão de referências nas análises dos resultados deste trabalho.

### 2.2 Características Elétricas do Par Trançado

#### 2.2.1 Parâmetros Primários

Os parâmetros primários de um cabo de par trançado de cobre são: a Resistência ( $R$ ), a Indutância ( $L$ ), a Capacitância ( $C$ ) e a Condutância ( $G$ ), que são variáveis em função da frequência. Assumindo que o cabo de par trançado é modelado como uma linha de transmissão, este pode ser descrito por um incremento de circuito equivalente formado por uma resistência em série ( $R$ ), uma indutância em série ( $L$ ), uma capacitância em paralelo ( $C$ ) e

uma condutância em paralelo ( $G$ ), como ilustrado Figura 2.1, para um elemento infinitesimal  $dx$  de uma linha de transmissão.



**Figura 2.1:** Modelo infinitesimal para uma linha de transmissão [26].

Um segmento de uma linha de transmissão pode ser visto como uma cascata desses elementos infinitesimais de comprimento. Os valores dos parâmetros primários são expressos por unidade de comprimento e são dependentes da frequência. Sem perda de generalidade, a impedância série pode ser representada por uma resistência  $Rdx$  e a indutância  $Ldx$ , ambos os parâmetros expressos por unidade de comprimento. A impedância paralela é representada por uma resistência paralela (de admitância  $Gdx$ ) e uma capacitância  $Cdx$ , onde  $G$  é a condutância por unidade de comprimento e  $C$  é capacitância por unidade de comprimento. Para o cálculo dos parâmetros primários de um tipo de cabo específico são usados os modelos das recomendações da ITU-T (*Internacional Telecommunication Union – Telecommunication*). Os parâmetros primários são geralmente determinados experimentalmente por entidades como a ITU-T ou companhias telefônicas que publicam os seus resultados encontrados. Além do mais, esses resultados experimentais levam a determinações de expressões analíticas para os parâmetros primários para diferentes tipos de cabos.

### 2.2.2 Parâmetros Secundários

Os parâmetros secundários são também conhecidos por constante de propagação e impedância característica. Considerando um elemento infinitesimal  $dx$  do circuito equivalente de uma linha de transmissão tal como ilustrado na Figura 2.1 e aplicando-se as equações de *Kirchhoff* a este circuito, pode-se obter, as seguintes equações diferenciais:

$$dV = -(R + jL\omega)I dx \quad (2.1)$$

$$dI = -(G + jC\omega)Vdx \quad (2.2)$$

Portanto,

$$\frac{dV}{dx} = -(R + jL\omega)I \quad (2.3)$$

$$\frac{dI}{dx} = -(G + jC\omega)V \quad (2.4)$$

Então,

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -(R + jL\omega) \quad (2.5)$$

$$\frac{dI}{dx} = (R + jL\omega)(G + jC\omega)V \quad (2.6)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = -(G + jC\omega) \quad (2.7)$$

$$\frac{dV}{dx} = (R + jL\omega)(G + jC\omega)I \quad (2.8)$$

Onde  $V \equiv V(x, \omega)$  e  $I \equiv I(x, \omega)$  são a tensão e a corrente a uma distância  $x$  da linha de transmissão para uma dada frequência  $f$ . As Equações (2.5) e (2.6) podem ser re-escritas da seguinte maneira.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \gamma^2 V \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = \gamma^2 I \quad (2.10)$$

Onde a quantidade complexa é a constante de propagação, na qual é o primeiro parâmetro secundário, e expresso pela equação (2.11).

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \equiv \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.11)$$

Pela separação da Equação (2.11) em parte real e imaginária, pode-se obter a coeficiente de atenuação  $\alpha$  e coeficiente de fase  $\beta$  respectivamente [29]. Estes dois parâmetros são definidos de acordo com as seguintes equações:

$$\alpha = \sqrt{-\frac{1}{2}(\omega^2 LC - RG) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (2.12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2}(\omega^2 LC - RG) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (2.13)$$

Encontradas as soluções gerais das equações diferenciais (2.9) e (2.10), obtem-se as seguintes Equações.

$$V(x, f) = V_0^+ e^{-\gamma x} + V_0^- e^{\gamma x} \quad (2.14)$$

$$I(x, f) = I_0^+ e^{-\gamma x} + I_0^- e^{\gamma x} \quad (2.15)$$

onde  $V_0^+$  e  $V_0^-$  são as tensões no sentido positivo e no sentido negativo, respectivamente. Da mesma maneira,  $I_0^+$  e  $I_0^-$  são as correntes no sentido positivo e negativo, respectivamente.

Aplicando ambas as soluções (2.14) e (2.15) às equações diferenciais, (2.9) para a tensão e (2.10) para corrente tem-se o seguinte resultado:

$$Z_0(\omega) = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (2.16)$$

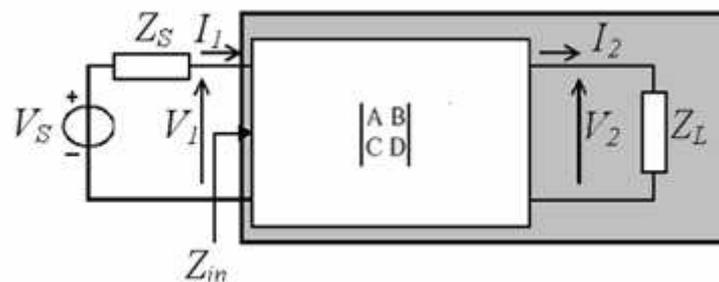
Este resultado é igual a uma constante denominada de impedância característica da linha de transmissão do par trançado, que é o segundo parâmetro dos parâmetros secundários.

Para as altas frequências, a influência de  $L$  e  $G$  é predominante, isto é,  $\omega L \gg R$  e  $\omega C \gg G$ . Então a impedância característica é constante e puramente resistiva, podendo ser expressa por [26]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.17)$$

### 2.3 A Matriz ABCD

Cada par trançado pode ser exatamente modelado como uma rede de duas portas (*two-port network-2PN*). Dentro da teoria de linha de transmissão, a maneira mais comum de representar uma 2PN é usar a teoria de matriz de transmissão, também conhecida como matriz ABCD [30]. A Fig. 2.2 mostra um modelo de um enlace telefônico do assinante usando a matriz ABCD.



**Figura 2.2:** 2PN representação da linha do assinante [30].

A relação entre a corrente e a tensão (no domínio da frequência) na rede de duas portas 2PN é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = T_F \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde  $T_F$  é a matriz de transmissão direta ou matriz ABCD [30]. Os coeficientes ABCD, os quais são funções complexas da frequência, caracterizam completamente as propriedades elétricas de uma rede 2PN e são definidos como:

$$A = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{I_2=0} ; B = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{V_2=0} ; C = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{I_2=0} ; D = \frac{I_1}{I_2} \Big|_{V_2=0} \quad (2.19)$$

Para um cabo de comprimento  $l$ , estes coeficientes e a correspondente matriz de transmissão  $T_F$  são [26]:

$$\begin{cases} A = D = \cosh \gamma l \\ B = Z_0 \sin \gamma l \\ C = \frac{1}{Z_0} \sin \gamma l \end{cases} \Rightarrow T_F = \begin{vmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sin \gamma l \\ \frac{1}{Z_0} \sin \gamma l & \cosh \gamma l \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

### 2.3.1 Impedância de Entrada

A impedância de entrada de um circuito é definida como a razão entre a tensão aplicada na entrada de tal circuito e a corrente resultante como mostrado na Figura 2.2. A equação que expressa a impedância de entrada de uma linha de transmissão em função dos parâmetros ABCD é dada por [26]:

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (2.21)$$

### 2.3.2 Função de Transferência

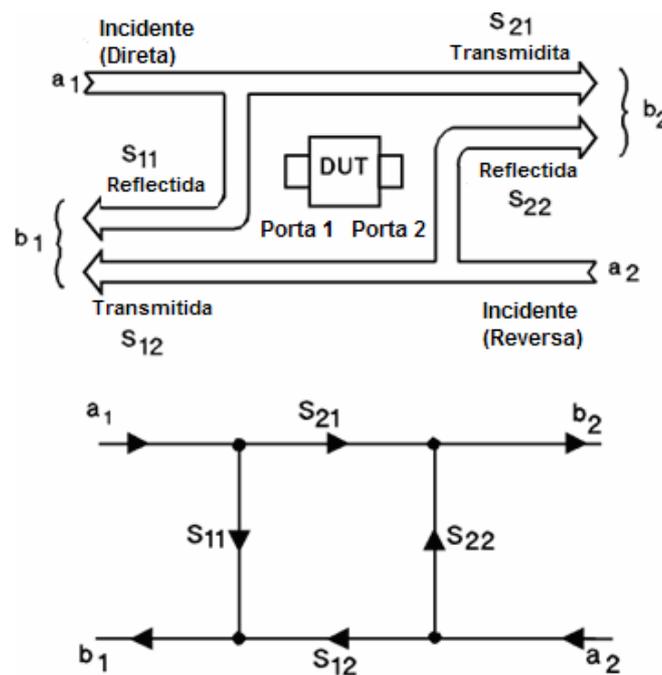
De uma maneira em geral, a função de transferência de um sistema pode ser definida como uma expressão matemática que descreve a relação entre a entrada e a sua saída. A Função de Transferência depende da frequência e diminui em módulo com o aumento da mesma. É um importante parâmetro usado para definir o comprimento máximo do cabo e a sua resposta em frequência.

Para o modelo de rede de duas portas da Figura 2.2, a função de transferência pode ser determinada através da equação [26]:

$$\frac{V_2}{V_s} = H_f(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s} \quad (2.22)$$

### 2.3.3 Parâmetro de Espalhamento ( $S_{11}$ )

O termo “parâmetro de espalhamento” é derivado dos parâmetros que representam um espalhamento ou a separação do sinal através de um *device under test* (DUT) conforme mostrado na Figura 2.3. Estes sinais espalhados são ondas refletidas e transmitidas que, são produzidas quando uma onda incidente encontra um dispositivo [31].



**Figura 2.3:** Parâmetro- $S$  de um dispositivo de duas portas.

Os Parâmetros- $S$  se tornam importante quando a frequência de operação é bastante alta, dessa forma os elementos do circuito representa uma fração significativa do comprimento de onda (aproximadamente um décimo de um comprimento de onda). Também, quando a frequência aumenta para faixa de microondas fica difícil medir a tensão e a corrente

necessárias para medidas da impedância. Para superar este problema, uma razão da onda incidente e refletida é utilizada. Isto é mostrado na Figura 2.3 e é definida na equação a seguir.

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a_k=0 \text{ para } k \neq j} \quad (2.23)$$

A equação (2.23) determina que, para obtenção do parâmetro  $S_{ij}$ , se forneça energia à porta  $j$  e se meça a resposta na porta  $i$ . É importante observar que todas as portas, exceto a porta de entrada do sinal, devem estar com as terminações perfeitamente casadas com a impedância característica do dispositivo utilizado.

De acordo com a Equação (2.24) uma matriz de espalhamento é utilizada para determinar as relações (2.25) e (2.26) entre os parâmetros- $S$  e a energia transmitida e refletida nas duas portas.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2.25)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.26)$$

Sendo  $a_i$  e  $b_i$  a raiz quadrada das ondas de potência incidente e refletida, respectivamente.

O parâmetro de espalhamento de uma determinada porta é obtido quando as outras portas se encontram casadas. Nesta condição, para um sistema de duas portas conforme a Figura 2.2, tem-se:

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_1^+} \right|_{V_2^-=0} \quad (2.27)$$

$$S_{12} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_1^-=0} \quad (2.28)$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^+}{V_1^+} \right|_{V_2^- = 0} \quad (2.29)$$

$$S_{22} = \left. \frac{V_2^+}{V_2^-} \right|_{V_1^+ = 0} \quad (2.30)$$

Sabendo que as ondas de tensão são definidas de acordo com uma impedância de referência [32], tem-se:

$$V_i^\pm = V_i \pm Z_{ref} I \quad (2.31)$$

Definindo a impedância de referência para a porta 1 como [32]:

$$Z_{ref} = Z_g = 100\Omega \quad (2.32)$$

Representando o esquema da Figura 2.2 de forma simplificada, usando a notação da impedância de entrada tem-se:

$$V_1 = Z_{in} I_1 \quad (2.33)$$

Substituindo em (2.27), as equações para  $V_1^+$  e  $V_1^-$  provenientes de (2.31), tem-se:

$$S_{11} = \frac{V_1 - Z_{ref1} I_1}{V_1 + Z_{ref1} I_1} \quad (2.34)$$

Substituindo (2.32) e (2.33) em (2.34) tem-se:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \quad (2.35)$$

Substituindo  $Z_{in}$  por A/C definida como a impedância observada na porta 1 devido a toda rede [32]. A Equação (2.35) pode ser reescrita como:

$$S_{11} = \frac{A - Z_s \cdot C}{A + Z_s \cdot C} \quad (2.36)$$

## 2.4 Modelos Genéricos dos Cabos DSL

Os modelos genéricos de cabos DSL foram criados para descrever precisamente o comportamento dos parâmetros primários e secundários dos cabos de par trançado [26]. A utilização desses modelos permite conhecer as características físicas de um enlace DSL. Embora muitos desses modelos sejam empíricos, eles são amplamente utilizados pelos diversos grupos de pesquisas para criação de novos modelos. Além do mais, os modelos genéricos podem ser usados como referências, quando se necessita de uma análise comparativa em uma medição e um modelo teórico de cabo. A seguir, alguns dos principais modelos genéricos de cabos DSL são descritos.

### 2.4.1 Modelos #0 e #1 da *British Telecom* (RLCG Modelling)

Esses dois modelos empíricos foram primeiramente propostos por *John Cook* da *British Telecom* [27] [28] para caracterizar cada parâmetro primário de um cabo DSL, conforme descrição a seguir.

#### 2.4.1.1 Modelo Empírico para Resistência

Este modelo tem como base o efeito conhecido como *Skin* [26]. O efeito *Skin* afeta o fluxo de corrente nas altas frequências, a resistência do fio aumenta drasticamente. Uma vez que este efeito se torne dominante, ele aumenta proporcionalmente a  $\sqrt{f}$  [26]. Já para as frequências mais baixas, o efeito *Skin* não é dominante e a resistência do fio se aproxima de uma resistência DC. Diante disso, o modelo empírico para resistência é dado pela seguinte Equação:

$$R(f) = \sqrt[4]{(R_{oc}^4 + a_c f^2)} \quad (2.37)$$

Para os fios de cobre o modelo empírico pode ser obtido pela extensão da Equação (2.37) [26]:

$$R(f) = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt[4]{(R_{oc}^4 + a_c f^2)}} + \frac{1}{\sqrt[4]{(R_{os}^4 + a_s f^2)}}}} \quad (2.38)$$

onde  $R_{oc}$  e  $R_{os}$  são as resistências DC para o cobre e para aço [26]. A separação do efeito *Skin* para o cobre e para o aço, é dada pelos parâmetros  $a_c$  e  $a_s$ .

#### 2.4.1.2 Modelo Empírico para Indutância

Nas baixas frequências, onde o efeito *Skin* não é dominante, o parâmetro  $L$  demonstra uma indução constante  $L_0$ . No entanto, nas altas frequências, o efeito *Skin* é dominante, sendo assim, o parâmetro  $L_0$  tende a uma indução constante  $L_\infty$ . Como seqüência, o modelo empírico para indução foi modelado através da seguinte equação:

$$L(f) = \frac{L_0 + L_\infty \left( \frac{f}{f_m} \right)^b}{1 + \left( \frac{f}{f_m} \right)^b} \quad (2.39)$$

onde  $b$  e  $f_m$  são parâmetros que controlam a transição entre  $L_0$  e  $L_\infty$ , através do eixo da frequência [26].

#### 2.4.1.3 Modelo Adequado para Condutância

Um modelo adequado para a condutância do cabo foi criado de acordo com a equação seguinte:

$$G(f) = g_0 f^{g_c} \quad (2.40)$$

onde  $g_o$  e  $g_e$  controlam o comportamento do aumento exponencial da perda do dielétrico [26].

#### 2.4.1.4 Modelo Empírico para Capacitância

Um modelo apropriado para capacitância está representado a seguir:

$$C(f) = C_\infty + C_0 f^{-C_e} \quad (2.41)$$

Para um bom dielétrico,  $C_0$  pode ser considerado negligenciado, e o modelo da capacitância é  $C_\infty$ . Porém, para os cabos utilizados em DSL este comportamento não é verificado, sendo assim utiliza-se o modelo completo dado pela Equação (2.41) [26].

#### 2.4.5 O Modelo de Linha VUB0

De acordo com as equações 2.20, é possível se perceber a relação existente entre os coeficientes ABCD da matriz de transmissão e os parâmetros secundários  $\gamma$  e  $Z_o$ . Diante disso, o modelo VUB0 (*Vrije Universiteit Brussel*) foi desenvolvido para representar matematicamente uma linha de transmissão de par trançado [32]. Para a caracterização matemática do modelo VUB0, calcula-se o produto da constante de propagação  $\gamma$  e o comprimento  $l$  da linha como uma função da frequência  $s$ ; para isso, quatro parâmetros independentes são definidos:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  [33].

$$\gamma l = \sqrt{Z_s y_p l^2} = \sqrt{a_4 s^4 + a_1 s \sqrt{-s} \frac{J_0}{J_1} + a_1 a_3 s^2 \frac{\psi}{2}} \quad (2.42)$$

Na Equação (2.66)  $\psi$  é uma função auxiliar dependente da frequência  $s$  e dos parâmetros  $a_2$  e  $a_3$ .  $J$  são as funções de Bessel  $J_i = J_i(a_3 \sqrt{-s})$  que dependentes da frequência e do parâmetro  $a_3$ . Os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  são relacionados com as dimensões geométricas do cabo e com as constantes eletromagnéticas do material utilizado. O parâmetro  $a_4$  é uma função dos parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , é considerado ainda como um parâmetro independente que atribui ao modelo VUB0 um grau maior de liberdade.

$$a_4 = a_1 a_3 \ln(1/\sqrt{a_2}) \quad (2.43)$$

A impedância característica  $Z_0$  é representada como segue e adiciona o parâmetro,  $a_5$ .

$$Z_0 = \frac{\mathcal{N}}{y_p l} = \left( \sqrt{a_4 s^2 + a_1 s \sqrt{-s} J_0 / J_1 + a_1 a_3 s^2 \psi / 2} \right) / a_5 s \quad (2.44)$$

onde  $a_5$  está relacionado aos parâmetros geométricos  $a$ ,  $D$  e  $l$ , com a permissividade elétrica  $\epsilon$  do dielétrico.

$$a_5 = \frac{\pi \epsilon}{ar \cosh(D/2a)} \quad (2.45)$$

Sendo assim é possível se expressar as equações para o produto  $\gamma l$  e  $Z_0$  das Equações (2.20) e, conseqüentemente, obter-se os parâmetros  $Z_{in}$ ,  $H(f)$  e  $S_{11}$ .

## 2.5 Considerações Finais

Neste capítulo procurou-se abordar o enlace do assinante como uma representação do modelo de linha de transmissão de par trançado. Além dos parâmetros primários e secundários e ainda o conceito da matriz ABCD utilizada para determinar os parâmetros físicos que foram definidos através da análise destes parâmetros, pode-se obter os parâmetros  $Z_{in}$ ,  $H(f)$  e  $S_{11}$  em nível teórico.

Foram ainda descritos os principais modelos de linhas, que serão utilizados como referências para os resultados das medições deste trabalho. O próximo passo é a descrição da metodologia das medições, utilizando-se os parâmetros físicos descritos.

## Capítulo 3

### Metodologia para Medições em DSL

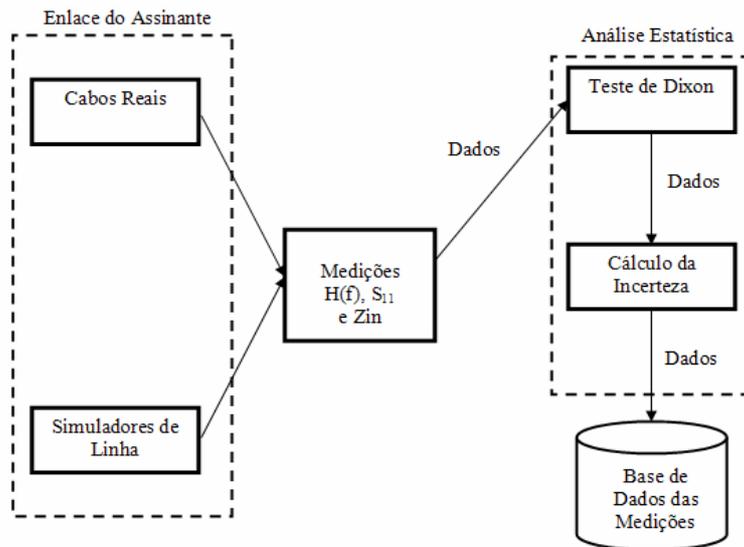
#### 3.1 Considerações Iniciais

Para qualificar um determinado enlace do assinante, parâmetros físicos como impedância de entrada, função de transferência e parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  podem ser utilizados. A determinação desses parâmetros é feita através de medições, usando-se equipamentos apropriados, *setups* de medições e procedimentos adequados. Diante disso, uma metodologia para medições desses parâmetros foi proposta. Neste capítulo será descrita e mostrada todas as etapas desta metodologia.

#### 3.2 Metodologia para Medições de Parâmetros em Sistemas DSL

O desenvolvimento de uma metodologia para medições em DSL voltada para a caracterização do enlace do assinante é útil e necessária para a realização de testes associados às atividades de qualificação do enlace. Uma vez que essa metodologia seja aplicada com confiabilidade, seus resultados podem ser armazenados em uma base de dados para serem utilizados nas diversas técnicas de pós-processamento e também na validação de novos modelos de linha de par trançado.

A metodologia proposta neste trabalho consiste em duas etapas, conforme mostra o diagrama da Figura 3.1. A primeira etapa consiste nas medições dos parâmetros físicos do enlace escolhido. A segunda consiste em analisar os resultados das medições obtidas, através de uma análise estatística. Se, após esta análise, percebe-se que os resultados apresentam uma boa confiabilidade, eles serão armazenados em um banco de dados de medições, para uso posterior em diversas aplicações para qualificação do enlace.



**Figura 3.1:** Diagrama das Etapas da Metodologia.

### 3.3 Implementação da Metodologia

Para realização das medições em DSL, a seleção dos instrumentos depende do parâmetro a ser medido e da banda de frequência que será utilizada. Uma vez definida essas variáveis, é possível saber a configuração adequada para cada um dos instrumentos. As seções 3.3.1. a 3.3.10. descrevem os instrumentos adequados para cada parâmetro a ser medido. Neste trabalho as faixas de frequências utilizadas foram: (4,3125 kHz a 1,104 MHz) para ADSL e (4,3125 kHz a 2,208MHz) para ADSL2+. Contudo, existe condição de se utilizar faixas de frequências maiores para VDSL (4,3125 kHz a 30 MHz).

Antes das descrições dos equipamentos, faz-se necessária a descrição dos chamados DUT - dispositivos de teste, que serão utilizados como enlace do assinante. Neste trabalho foram utilizados dois DUT, a saber:

#### DUT - Simulador de Linha ADSL

O simulador de Linha ADSL 400E3 mostrado na Figura 3.2, é composto de duas unidades. Sendo que cada unidade permite simular os cenários padrões ETSI. O simulador pode simular uma seção com bitola de 0.32 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.63 mm e 0.9 mm de comprimento máximo de 500 m; permite ainda utilizar cenários europeus de 50 m a 3.700 m com impedância característica da linha de 100 ohms.



**Figura 3.2:** Simulador de Linha ADSL 400E3.

### DUT - Cabo de Par Trançado

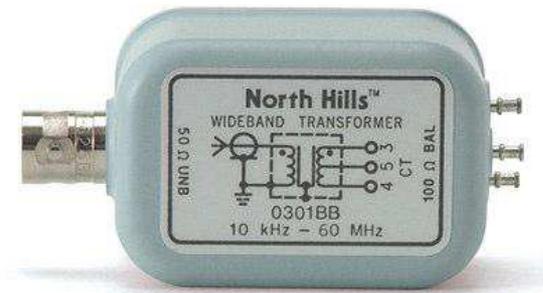
Além do simulador de linha descrito acima, utilizou-se uma cabo de par trançado com 16 pares de bitola de 0.4 mm e comprimento de 500 m como mostrado na Figura 3.3. A impedância característica desse cabo é de 120 ohms.



**Figura 3.3:** Cabo de Par Trançado.

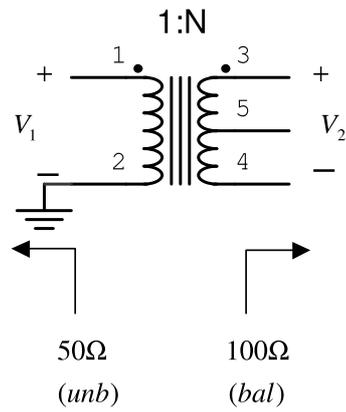
### 3.3.1 BALUN

O BALUN *North Hills* modelo 0301BB mostrado Figura 3.4 permite operação na faixa de 10 kHz a 60 MHz. O nome BALUN vem de “*BALanced/UNbalacend*”. É um dispositivo que acopla um sistema balanceado (o par trançado) a um sistema desbalanceado (analisador de rede ou de impedância), por exemplo.



**Figura 3.4:** BALUN *North Hills* 0301BB.

O BALUN utilizado deverá cobrir a faixa de frequência de interesse e também é necessário possuir um bom casamento de impedância entre o equipamento de medição e o DUT. No entanto, para medições em DSL e considerando a família ADSL, a faixa inicial da frequência utilizada é de 4,3125 kHz, portanto o BALUN utilizado limita em 10 kHz para essa primeira faixa, causando um corte nos dois primeiros tons. Porém, isso não resulta em perdas nas medições. O importante é que o BALUN deverá ter exatamente uma impedância característica que permita operar na faixa de frequência requerida. Isto é, a variação na perda por inserção sobre a faixa de frequência não deverá exceder 3 dB [36]. Além disso, a impedância em aberto no BALUN deverá ser dez vezes maior que a impedância do sistema, especialmente para as baixas frequências [36]. Isto porque, em geral, um BALUN é feito usando-se um indutor, cuja impedância diminui com a frequência. Sendo assim, a Figura 3.5 mostra o circuito equivalente do BALUN 0301BB.



**Figura 3.5:** Circuito equivalente do BALUN.

As relações entre as tensões e correntes para um transformador ideal são:

$$V_2 = NV_1 \quad (3.1)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{N} \quad (3.2)$$

Dividindo-se (3.1) por (3.2), tem-se.

$$\frac{V_2}{I_2} = \frac{N^2 V_1}{I_1} \quad (3.3)$$

A partir da Equação (3.3), obtém-se:

$$Z_2 = N^2 \times Z_1 \quad (3.4)$$

onde  $Z_2 = 100\Omega$  e  $Z_1 = 50\Omega$  para o BALUN, assim:

$$N^2 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{100}{50} = 2 \quad (3.5)$$

A partir da Equação (3.5), as Equações (3.1), (3.2) e (3.3), podem ser re-escritas como:

$$V_2 = \sqrt{2} \times V_1 \quad (3.6)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

$$Z_2 = 2 \times Z_1 \quad (3.8)$$

A equação resultante (3.8) mostra a relação existente entre a porta desbalanceada (1) e a porta balanceada (2) do BALUN 301BB. Sendo assim, os resultados observados nos instrumentos de medições deverão estar reduzidos pela metade.

### 3.3.2 Analisador de Impedância de Precisão

O analisador de impedância de precisão 4294A, mostrado na Figura 3.6 é um equipamento que opera na faixa de 40 Hz – 110 MHz e com uma escala para medições de impedância que vai de 3 mΩ a 500 MΩ. Este analisador é usado para fornecer o sinal de entrada para o dispositivo de teste, e também para as medições das variáveis de interesse [35]. Como no caso de medições em DSL, sua utilização é importante, pois permite obter a magnitude e a fase da impedância de entrada para o enlace do assinante com margem erro de  $\pm 0,08\%$  [35]. Além disso, é ideal para medições em ADSL, ADSL2+ e VDSL, devido cobrir as faixas de frequências utilizadas por estas famílias.



**Figura 3.6:** Analisador de impedância de precisão 4294A.

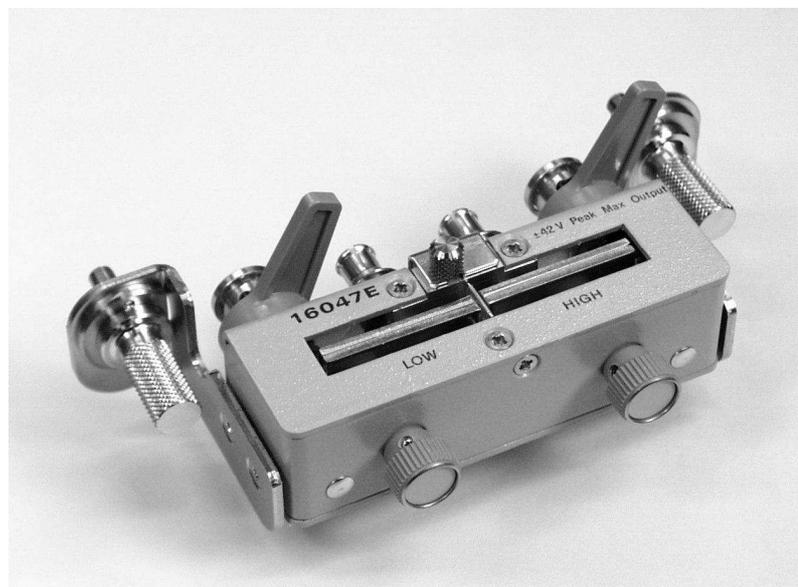
### 3.3.3 Teste Fixo

O teste fixo (*test fixture*) 16047E mostrado na Figura 3.7 é um dispositivo que funciona como um conector, entre as 4 portas do analisador de impedância 4294A e a porta desbalanceada do BALUN. Também tem a função de ser usado para compensar as perdas durante o processo de calibração. Sua faixa de operação está entre DC – 110 MHz. No entanto, sua proporção de erro é de [35]:

$$0,2x\left(\frac{f}{10}\right)^2 [\%] \text{ para } f \leq 15 \text{ MHz} \quad (3.9)$$

$$4x\left(\frac{f}{100}\right) [\%] \text{ para } f > 15 \text{ MHz} \quad (3.10)$$

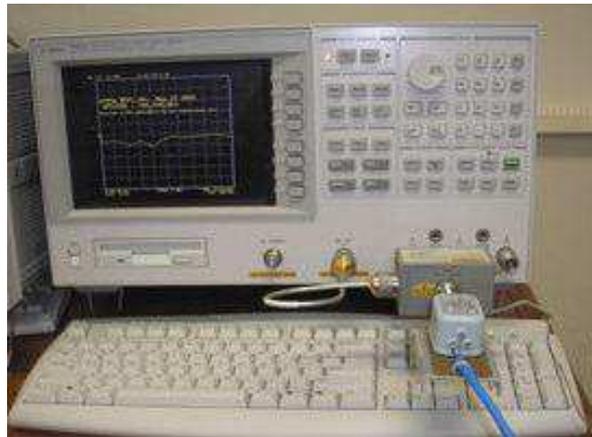
Para medições em ADSL, ADSL2+ e VDSL as proporções de erros encontradas são de: 0,0024%, 0,0097% e 1,2%. Diante desses resultados, a utilização deste dispositivo nas medições em DSL, não ocasiona erros de grandes proporções nas medições de impedância de entrada.



**Figura 3.7:** Teste fixo (*test fixture*) 16047E.

### 3.3.4 Analisador de Rede

O analisador 4395A mostrado na Figura 3.8 é um equipamento que opera na faixa de 10 Hz – 500 MHz. Este analisador combina três importantes funções: um analisador de rede, um analisador de espectro e um analisador de impedância. Isso permite que seja utilizado em múltiplos testes quando necessário. Porém, para as medições de função de transferência e de parâmetro de espalhamento do enlace do assinante, utiliza-se a função de analisador de rede. Neste analisador é possível se obter o módulo da magnitude e a fase da função de transferência, e do parâmetro de espalhamento, com uma precisão de  $\pm 0,5$  dB para magnitude e  $\pm 0,3$  grau para a fase [40]. Além disso, devido a faixa de operação desse analisador é possível medições em ADSL, ADSL2+ e VDSL.



**Figura 3.8:** Analisador de Rede 4395A.

### 3.3.5 Conjunto de Teste de Transmissão/Reflexão

O conjunto de teste 87512A/B mostrado na Figura 3.9 fornece a capacidade de medições com características de transmissão e reflexão, para dispositivos com impedância de 50 Ohms ou 75 Ohms. A faixa de operação, quando atua como analisador de rede, é de DC a 2 GHz [36]. A porta de teste do 87512A é um conector tipo N (fêmea) com impedância de 50 ohms, e a porta de teste do 87512B é um conector tipo N (fêmea) com impedância de 75 Ohms. Porém, para medições da função de transferência e do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  utiliza-se o conjunto de teste 87512A, devido a porta desbalanceada do BALUN utilizado ser de 50 ohms. Além, de servir de conexão entre a porta do analisador de rede e a porta do

BALUN, uma outra função importante desse dispositivo é fornecer o sinal de referência (R), para o enlace ser comparado com a porta de entrada (A) e de saída (B) do analisador de rede.



**Figura 3.9:** Conjunto de teste 87512A.

### 3.3.6 Interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*).

Nas medições em DSL é importante o armazenamento dos dados obtidos, para uma posterior análise. Uma maneira de obter estes dados foi a utilização de um dispositivo que faça conexão do equipamento de medição ao computador. A interface utilizada foi a 82357B USB/GPIB como mostrada na Figura 3.10, que é uma placa compatível com os instrumentos de medições, como o analisador de impedância 4294A e o analisador de rede 4395A. Esta interface permite conectar até 14 instrumentos compatíveis a ela [39].



**Figura 3.10:** Interface 82357B USB/GPIB.

### 3.3.7 Cabo BNC/BNC

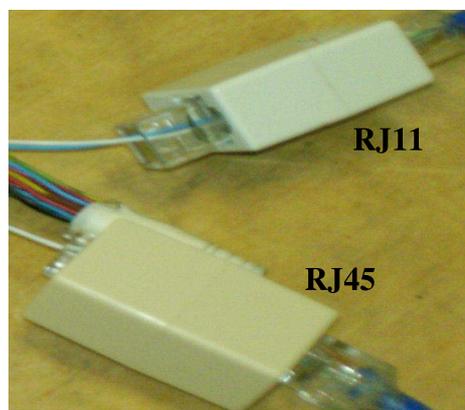
O cabo BNC/BNC mostrado na Figura 3.11 é utilizado para conexões entre o BALUN e as portas do analisador de rede 4395A. Esse cabo possui dois conectores BNC, um em cada uma das extremidades, e deverá ter um comprimento ideal para não influenciar nas medições. O cabo utilizado é um cabo de comprimento padrão fornecido pelo fabricante e a resistência dos contatos BNC é menor que 0,005 Ohms. Assim, a influência desses conectores utilizados nas medições é negligenciável.



**Figura 3.11:** Cabos BNC/BNC.

### 3.3.8 Conectores RJ45 e RJ11

Os conectores RJ45 e RJ11 mostrados na Figura 3.12 são padrões utilizados para conexões entre a porta balanceada do BALUN e o DUT.



**Figura 3.12:** Conectores RJ45 e RJ11.

### 3.3.9 Computador

A utilização de um computador como mostrado na Figura 3.13, teve como finalidade, a armazenagem dos dados obtidos nas medições de impedância de entrada, função de transferência e do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ . Porém, para que isso seja possível, é necessário que o computador possua uma interface USB (*Universal Serial Bus*), para se conectar ao analisador de impedância 4294A e ao analisador de rede 4395A. Além disso, outra finalidade importante foi a necessidade de um computador para atuar como gerenciador dos programas (*softwares*) para controle e acesso desses analisadores.



**Figura 3.13:** Computador.

### 3.3.10 Terminações

Para medições em DSL existem três terminações que podem ser utilizadas. Estas terminações são descritas como:

- Terminação de 100 ohms: simula um modem conectado ao enlace; sendo que esta terminação pode ser feita usando-se um resistor de 100 ohms com  $\pm 1\%$  de precisão.
- Terminação Aberta: É simplesmente um enlace sem nenhuma conexão na sua terminação.

- Terminação em Curto-circuito: simula uma terminação em curto conectada ao enlace; sendo que esta terminação pode ser feita usando um conector RJ4 (fêmea) com seus contatos internos curto-circuitados.

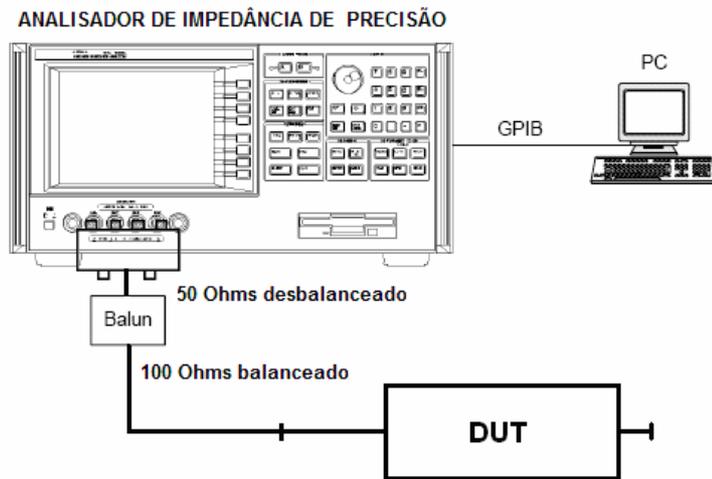
As terminações descritas acima foram feitas no laboratório para suprir a demanda das medições. A utilização destas terminações não causa erros consideráveis nas medições. Porém, para uma maior precisão é necessário adquirir um *kit* de terminações padrões junto ao fabricante.

### 3.3.11 *Setup's* de Medições

Esta seção descreve os atuais *setup's* utilizados para as medições dos parâmetros descritos no capítulo anterior, assumindo que o DUT pode ser um cabo real ou um simulador de linha [34]. O Anexo A traz uma instrução técnica para cada *setup's* de medições, mostrando os seus principais procedimentos necessários.

#### 3.3.11.1 *Setup* para Medição de Impedância de Entrada

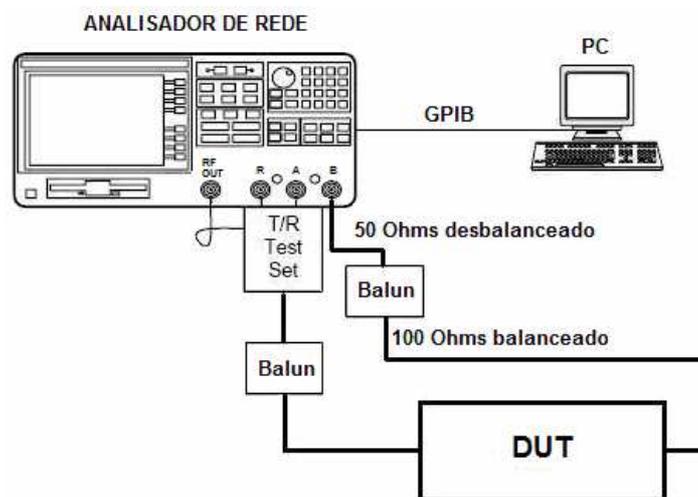
Para realização da medição de impedância de entrada, os equipamentos necessários para o *setup* são mostrados na Figura 3.14. O analisador de impedância de precisão 4294A é conectado a porta desbalanceada do BALUN 0301BB através do teste fixo 16047E. O DUT se conecta a porta balanceada do BALUN utilizando um cabo apropriado e um conector RJ45 ou RJ11. A interface 82357B USB/GPIB se conecta ao analisador de impedância através de uma porta paralela e ao computador utilizando a porta GPIB.



**Figura 3.14:** *Setup* para medição de Impedância de Entrada [35].

### 3.3.11.2 *Setup* para Medição da Função de Transferência.

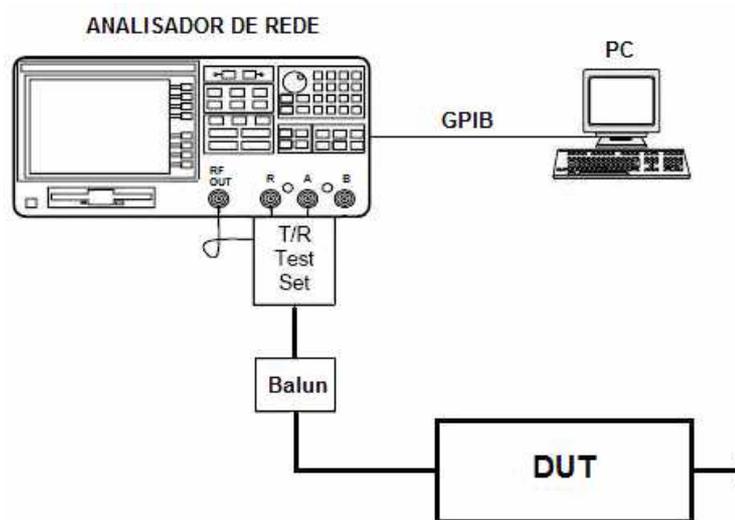
Para realização das medições da função de transferência o *setup* utilizado está mostrado na Figura 3.15. Neste *setup*, o analisador de rede 4395A se conecta ao primeiro BALUN através do conjunto de teste 87512A utilizando a porta de entrada de referência (R), a porta de saída de referência (RF out) e a porta de entrada de transmissão (A). O segundo BALUN se conecta à porta de saída de reflexão (B) através de um cabo macho BNC/BNC. Nas portas balanceadas dos BALUNS, o DUT é conectado através de dois cabos apropriados com conectores RJ45 ou RJ11. A interface 82357B USB/GPIB se conecta ao analisador de rede através de uma porta paralela e ao computador utilizando a porta GPIB.



**Figura 3.15:** *Setup* para medição da Função de Transferência [40].

### 3.3.11.3 *Setup* para Medição do Parâmetro de Espalhamento $S_{11}$

Para realização da medição do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ , os equipamentos necessários para o *setup* são mostrados na Figura 3.16. Neste *setup*, o analisador de rede 4395A se conecta somente através de um BALUN 0301BB ao conjunto de teste 87512A, utilizando a porta de entrada de referência (R), a porta de saída de referência (RF *out*) e a porta de entrada de transmissão (A). Na porta balanceada do BALUN, o DUT é conectado através de um cabo apropriado com conector RJ45 ou RJ11. A interface 82357B USB/GPIB se conecta ao analisador de rede através de uma porta paralela e ao computador utilizando a porta GPIB.



**Figura 3.16:** *Setup* para medição do Parâmetro de Espalhamento  $S_{11}$  [40].

### 3.3.12 Calibração

As medições dos parâmetros do enlace do assinante são feitas por equipamentos que estão sujeitos a erros. Para remover esses erros sistemáticos algumas técnicas de calibração foram desenvolvidas, tais como: SOLT (*short-open-load-thru*), TRL (*thru-reflection-line*) e LRM (*line-reflection-match*) [37]. Estas técnicas têm vantagens e desvantagens. Então, uma escolha cuidadosa é recomendada para se achar o procedimento de calibração mais adequado para cada aplicação específica. Todas essas técnicas incluem alguma variação, sendo as três técnicas utilizadas principalmente para análise dos parâmetros de espalhamento S. As medições dos parâmetros S são baseadas na razão entre as ondas refletidas e incidentes

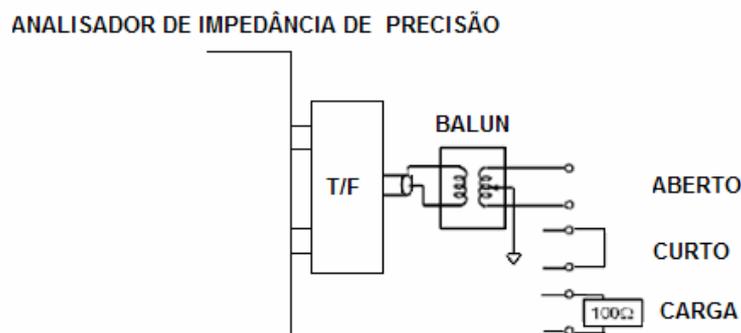
através da impedância característica do sistema [37]. Entre a fonte de sinal e a porta do dispositivo, são encontrados muitos componentes, tais como: conectores, adaptadores, baluns, cabos e etc. Estes componentes do sistema representam possíveis perdas e descontinuidades. Como resultado, um procedimento de calibração é necessário para remover os erros produzidos pelas imperfeições dos componentes.

### 3.3.12.1 Métodos de Calibração Utilizados

Para a realização de cada medição de um determinado parâmetro, é necessária a utilização de um método derivado das técnicas descritas na seção anterior. Os parâmetros a serem medidos possuem um método particular que utilizam um procedimento de calibração apropriado. A seguir são descritos cada um desses métodos. Para melhor entendimento, o Anexo A mostra as instruções para cada procedimento de calibração descrito abaixo.

#### A. Método de Compensação Fixa (*Fixture Compensation*)

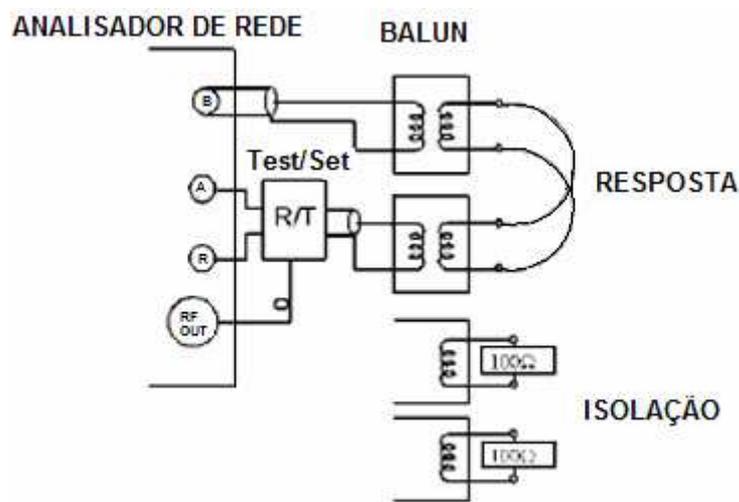
O analisador de impedância de precisão, utilizado nas medições de impedância de entrada, permite três métodos de calibração: *user calibration*, *port extension compensation* e *fixture compensation* [35]. Para medir a impedância de entrada, assumindo que o enlace do assinante é medido na banda ADSL, o método apropriado é a compensação fixa. O método de compensação fixa reduz os erros parasitas existentes entre o teste fixo 16047E e as portas do analisador de impedância 4294A. Este método utiliza três cargas de compensação conhecidas como: *ABERTA*, *CURTO* e *CARGA*, que são conectadas na porta balanceada do BALUN 0301BB, para reduzir os possíveis erros e compensar as perdas devido aos conectores e aos cabos entre o analisador e o enlace. O *setup* para calibração desse método é mostrado na Figura 3.17.



**Figure 3.17:** Configuração Compensação Fixa [36].

## B. Método de Resposta e Isolação (*Response & Isolation*)

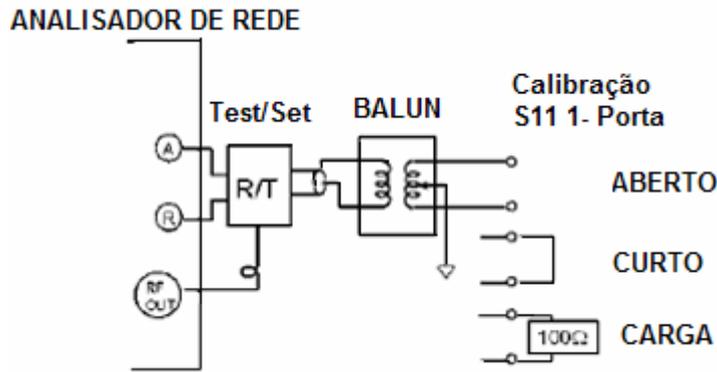
Para fazer medições de função de transferência do enlace do assinante, o método de calibração requerido é resposta e isolação [36]. A Figura 3.18 mostra o *setup* de calibração para essas medições. Na configuração resposta, as portas balanceadas dos BALUNS 0301BB deverão ser conectadas uma na outra, através de um conector e de um cabo apropriado. Para a configuração isolação, as portas balanceadas dos BALUNS 0301BB deverão estar com cargas de 100 Ohms [36] conforme mostrado na Figura 3.18. Esses procedimentos são necessários para eliminar os possíveis erros ocasionados pelos conectores e cabos utilizados.



**Figure 3.18:** Configuração Resposta e Isolação [36].

## C. Método de Calibração da Porta 1 $S_{11}$ (*1-Port Calibration*)

Para se fazer as medições do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ , o método de calibração requerido é o de Calibração da Porta 1  $S_{11}$  [36]. Neste método, são necessárias também três cargas padrões de calibração como: aberta, curto e carga, sendo que tais cargas podem ser fornecidas pelo fabricante. Este método é utilizado para remover a resposta em frequência e a diretividade que são os maiores causadores de erros nessa medição [36]. A calibração da Porta 1  $S_{11}$  deve ser executada na porta balanceada do BALUN 0301B. A Figura 3.19 mostra o *setup* utilizado para essa calibração antes das medidas.



**Figure 3.19:** Calibração da Porta 1  $S_{11}$  [36].

Outro fator importante a ser considerado é que tanto o analisador de rede quanto o de impedância devem ser calibrados com o teste fixo 16047E, conjunto de teste 87512A e os BALUNS para compensar os possíveis erros nas medições devido às conexões e cabos utilizados.

### 3.3.13 Medições

Após a escolha do *setup* a ser utilizado e do método apropriado de calibração, é descrito nesta seção a realização das medições dos parâmetros anteriormente citados. Cada medição realizada requer um método e um procedimento.

#### 3.3.13.1 Impedância de Entrada

As medições de impedância de entrada utilizam o *setup* descrito na seção 3.3.11.1. Os testes de impedância de entrada consistem de três situações, os quais são dependentes da terminação utilizada no lado do usuário. A terminação em aberto é a situação quando não existe nem um dispositivo (*modem*). Na situação em curto, o *modem* está desligado. Para a situação em carga, um dispositivo (*modem*) está ligado.

Com as medidas de impedância de entrada, é possível se obter a impedância característica de um enlace, utilizando o método *single ended testing*, também conhecido como método *open/short* [38]. Uma outra maneira de se obter a impedância característica é utilizar o método conhecido como A1 definido em IEC (*International Electrotechnical Commission*). Esse método utiliza um BALUN, mas exclui o seu desempenho [38]. A

referência bibliográfica [34] descreve uma metodologia baseada em medições, que utiliza este método para obtenção da impedância característica.

### 3.3.13.2 Função de Transferência

O teste utilizado para medições de função de transferência do enlace DSL consiste no método *single ended line testing*. Este método utiliza a medida do parâmetro de espalhamento de transmissão direta  $S_{21}$ , como mostrado no *setup* da Figura 3.15. Um sinal é aplicado na porta de referência (R) do analisador de rede e o mesmo é analisado na sua porta de saída (B) de acordo com a Figura 3.15. A relação entre variáveis medidas nessas portas (B/R) fornece a medida da função de transferência.

### 3.3.13.3 Parâmetro de Espalhamento $S_{11}$

O teste utilizado para medições do parâmetro espalhamento  $S_{11}$  do enlace DSL consiste no método *single ended double line testing*, conforme descrito na seção 3.3.11.3. Este método utiliza a medida do parâmetro  $S_{11}$ , também conhecido como coeficiente de reflexão na entrada. Nesse teste, o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ , é a razão entre um sinal refletido e um sinal incidente é medido pela relação da porta de referência (R) e a porta de entrada (A) do analisador de rede diretamente no domínio da frequência.

### **3.4 Considerações Finais**

Este capítulo teve como objetivo apresentar a metodologia definida para medições em sistemas DSL, cujas etapas do desenvolvimento da metodologia foram apresentadas. Foram descritos os equipamentos utilizados, os *setups* para medições dos parâmetros e os métodos de calibração.

O próximo capítulo descrever os conceitos fundamentais sobre medições em DSL, focando-se nos possíveis erros e tratamentos estatísticos, após obtenção dos resultados das medidas e da incerteza na medição.

## Capítulo 4

### Análise Estatística das Medições em DSL

#### 4.1 Considerações Iniciais

Quando se avalia o resultado de medição de um parâmetro físico do enlace DSL é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa do resultado, de tal forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, os resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referências fornecidos por uma especificação ou por uma norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento implementado e compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade de uma medição de um determinado parâmetro. Isto requer a aplicação de um tratamento estatístico nos dados, a fim de identificar e isolar dados incoerentes.

Diante disso, neste capítulo apresenta-se uma metodologia para o tratamento estatístico dos dados obtidos nas medições. O objetivo desse tratamento é assegurar que o método utilizado em cada medição realizada seja avaliado, para se chegar a um resultado preciso e confiável para uso posterior nas diversas técnicas de qualificação do enlace digital do assinante.

#### 4.2 Conceitos Fundamentais

Para subsidiar a análise estatística proposta neste capítulo, faz-se necessário, inicialmente, a introdução de alguns conceitos fundamentais.

Pode-se definir medição como o processo de se encontrar experimentalmente o valor de uma quantidade física, com a ajuda de um meio especial chamado de instrumento de medição. O valor verdadeiro de uma quantidade mensurável é o valor da medida da quantidade física, a qual, idealmente, reflete qualitativamente e quantitativamente a correspondente propriedade do objeto [41].

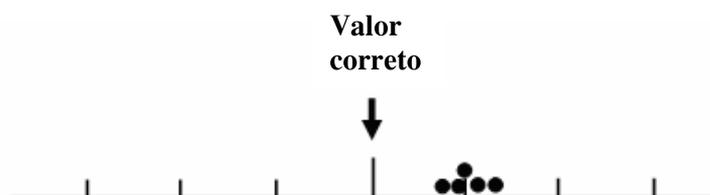
Como os instrumentos de medição são criados através da ação humana, os resultados das medições não são absolutamente precisos. Esta inevitável imperfeição é expressa pela

incerteza relacionada à sua própria medição. A incerteza de medição é o valor de uma medida que permanece com uma dada probabilidade [41], enquanto que o erro de medição é o desvio do resultado em relação ao valor verdadeiro da quantidade mensurável. Portanto, o termo erro é usado para caracterizar os componentes da incerteza [41].

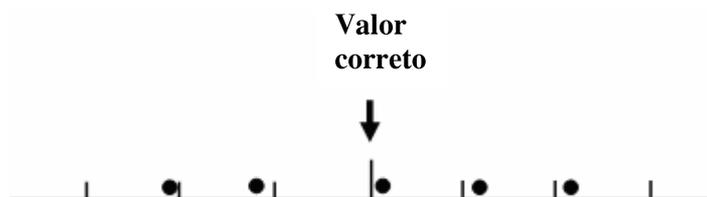
Uma importante classificação dos erros de medição é baseada nas suas propriedades. Neste sentido são definidos os erros sistemáticos e aleatórios. Um erro é dito ser sistemático se ele permanece constante ou muda de maneira regular em todas as repetidas medições na mesma proporção [41].

Quando uma medição é repetida muitas vezes, seguindo as mesmas condições, são observadas variações nos resultados obtidos que se propagam mais ou menos fora de um valor médio, tais variações ocorrem de um modo imprevisível, o erro é dito aleatório.

Outros dois importantes conceitos são exatidão e precisão. Exatidão é a qualidade que expressa como os resultados de uma medição, que foi repetida, estão próximos um do outro. Quanto mais próximos os resultados, mais exata a medição. No entanto os erros aleatórios afetam a exatidão da medição. A precisão é a qualidade que expressa como os resultados estão próximos do valor verdadeiro da quantidade de interesse. Portanto, os erros sistemáticos – também conhecidos como *bias* – afetam a precisão da medição, quer dizer, a proximidade dos resultados de acordo com o valor verdadeiro. As figuras seguintes resumem os conceitos de exatidão e precisão.



**Figura 4.1 a:** Resultados exatos e imprecisos.



**Figura 4.1 b:** Resultados inexatos e precisos.

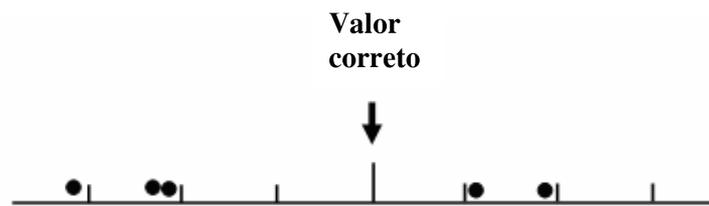


Figura 4.1 c: Resultados inexatos e imprecisos.

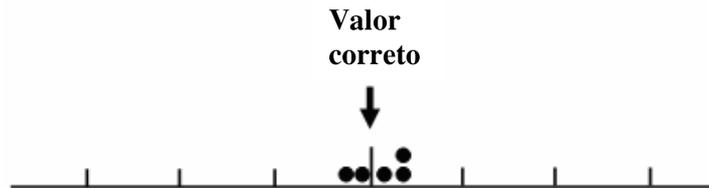


Figura 4.1 d: Resultados exatos e precisos.

### 4.3 Detecção de *Outliers*

Os erros de medição podem também ser classificados como *outliers* e *blunders*. *Blunders* ocorrem como resultado dos erros feitos pelo experimento [42]. O termo *outliers* é usado coletivamente para observações discordantes e para contaminantes. A observação discordante é aquela que aparece surpreendente ou discrepante para o investigador [43]. A observação contaminante apresenta uma diferente distribuição quanto ao resto dos dados. As observações contaminantes podem ou não ser notadas pelo investigador. A Figura 4.2 mostra alguns exemplos de *outliers*.

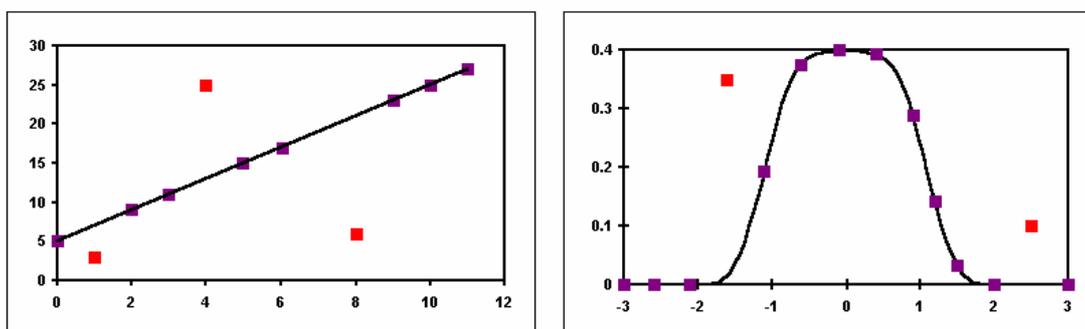
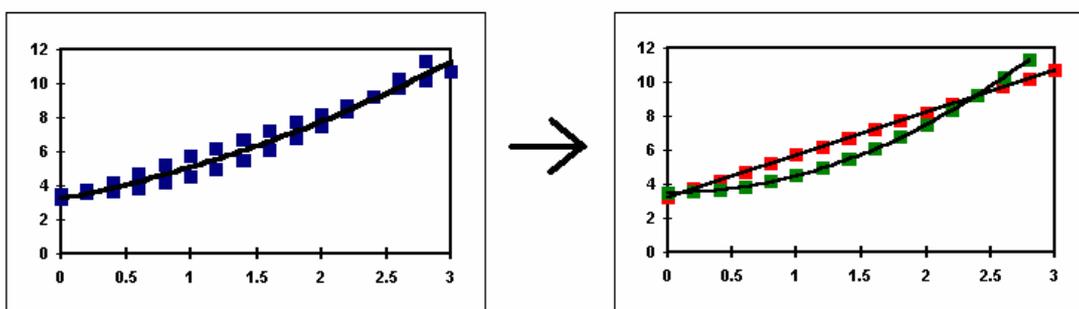


Figura 4.2: Exemplos de *outliers* [43]. Nota: Outliers são indicados em vermelho.

As possíveis fontes de *outliers* são: gravação, erros de medição, suposição da distribuição incorreta dos dados, estrutura de dados desconhecida [43]. Gravação e erros de medição são geralmente as primeiras fontes suspeitas de *outliers*. Suposição incorreta sobre a distribuição dos dados pode levar a uma indicação de *outliers*. Adicionalmente, estrutura de dados desconhecidas e correlações podem causar aparecimento de *outliers* como mostrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Resultados exatos e precisos [43].

#### 4.3.1 Gerenciamento de *Outliers*

Existem dois modos de gerenciar dados *outliers*. No laboratório, um cuidado na gravação de cada experimento é recomendado e todos os dados devem ser gravados com alguma possível explicação ou informação adicional. Na análise dos dados, alguns métodos estatísticos são recomendados.

#### 4.3.2 Rotulamento de *Outliers*

O primeiro passo na análise dos dados é rotular *outliers* suspeitos para observação futura. Três métodos diferentes são normalmente disponíveis para a investigação dos dados: método *z-score*, método *z-score* modificado e método *boxplot* [43]. Estas técnicas são baseadas em métodos de regressão robustos. Todas as observações experimentais são padronizadas e os valores extremos predeterminados sobre um limite padrão são rotulados como *outliers* [43].

### 4.3.3 Acomodamento de *Outliers*

Os *Outliers* podem, às vezes, serem acomodados na análise dos dados. Este processo previne a influência de *outliers* nos parâmetros a serem estimados. Alguns modos de acomodação de *outliers* utilizado são: médias adaptadas, estimadores escalares ou intervalos de confiança. Na utilização de uma média adaptada um percentual fixo dos dados é deixado por último para serem ordenados. O valor médio é calculado para o restante dos dados. Esta adaptação irá desprezar os *outliers* e muitas vezes aumenta a eficiência da estimação da média populacional. Nos estimadores escalares, a divisão entre a metade do desvio absoluto e a metade da amostra é usada para calcular uma medida da variabilidade na amostra. Esta variabilidade é resistente aos *outliers* e pode ser usada no lugar do desvio padrão, como é feito no teste *z-score* modificado.

O intervalo de confiança pode ser ajustado usando-se a variância para minimizar o efeito dos *outliers*. Este tipo de variância utiliza a média adaptada no lugar da média populacional.

### 4.3.4 Detecção de *Outliers*

Existem muitos testes para identificação de *outliers*. Os quatro testes outliers comuns para distribuição normal são: o teste de *Rosner*, o teste de *Dixon*, o teste *Grubbs* e o teste de *Cochran*. Estas técnicas são baseadas nos testes de hipóteses, especialmente os métodos de regressão.

#### 4.3.4.1 Teste de *Rosner*

O teste de *Rosner* para detecção de até  $K$  *outliers* pode ser usado quando o número de pontos é maior que 25. Este teste identifica tanto altos *outliers* como baixos *outliers*, ou seja, identifica *outliers* sempre nas duas extremidades [44]. Os dados são arrumados na ordem ascendente e a média e o desvio padrão  $s$  são determinados. O procedimento exige remoção do grupo de dados em observação,  $x$ , isto é, o mais distante, da média.  $R$  é calculado conforme a equação a seguir:

$$R_{i+1} = \frac{|x^{(i)} - \bar{x}^{(i)}|}{s^{(i)}} \quad (4.1)$$

O resultado do teste  $R$  é então comparado com um valor crítico [43]. A hipótese nula determina qual o dado se ajusta a uma distribuição normal para ser então testado. Se  $R$  é menor que o valor crítico, a hipótese nula não pode ser rejeitada e, portanto, não existem *outliers*. Se  $R$  é maior que o valor crítico, a hipótese nula não pode ser rejeitada, e a presença de  $K$  *outliers* é aceita.

#### 4.3.4.2 Teste de *Dixon*

Este teste tem por objetivo identificar valores afastados da amostra. Tem a vantagem que não ser necessário o conhecimento da estimativa do desvio padrão [44]. Para operacionalizar a realização do teste, seguem-se os passos:

1 - Ordenar os valores em ordem crescente, isto é:

$$x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n$$

2 – Considerar a hipótese de que o menor valor  $x_1$ , ou o maior valor  $x_n$ , seja um suspeito como um valor *outlier*.

3 - Selecionar o risco desejado de falsa rejeição.

4 – Aplicar as seguintes equações, de acordo com o tamanho da amostra como mostrado na tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Teste de *Dixon*.

$n$	Se $x_n$ é suspeito	Se $x_1$ é suspeito
$3 \leq n \leq 7$	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$	$(x_2 - x_1) / (x_n - x_1)$
$8 \leq n \leq 10$	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$	$(x_n - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
$11 \leq n \leq 13$	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_2)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
$14 \leq n \leq 25$	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_3)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-2} - x_1)$

5 - Comparar as razões calculadas com os valores críticos – Teste de *Dixon* (ver anexo B). Caso o valor encontrado seja maior, então a suposição de *Outliers* existe.

#### 4.3.4.3 Teste de *Grubbs*

Este teste também é utilizado para se tomar decisões sobre valores *outliers*. Para a execução do teste, segue-se o procedimento:

1 – Ordenam-se os valores em ordem crescente, isto é:

$$x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n$$

2 – Considera-se a hipótese de que o menor valor  $x_1$ , ou se o maior valor  $x_n$ , seja suspeito como um valor *outlier*.

3 – Estimar-se (calcula-se) o desvio padrão de todos os valores.

4 – Calcula-se  $T$  conforme a equação (4.2):

$$T = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad (4.2)$$

onde  $T$  é a variável resultante de *Grubbs*.

5 – Seleciona-se o risco desejado de falsa rejeição.

6 – Comparam-se os valores calculados com os valores tabelados. Se  $T$  for maior que o valor tabelado, a rejeição pode ser feita com o risco associado.

#### 4.3.4.4 Teste de *Cochran*

O teste descrito por Cochran pode ser usado quando se deseja decidir se uma estimativa de variância é excessivamente grande ou não, em comparação com um grupo. Por exemplo, se a variância reportada por um observador é excessivamente grande em comparação com os outros membros do grupo, então se deve proceder ao teste de *Cochran*:

- 1 – Calculam-se as variâncias que serão comparadas;
- 2 – Somam-se todas as variâncias;
- 3 - Calcula-se a razão entre a variância suspeita e o somatório de todas as variâncias.

Se o valor calculado da razão for maior que o da tabela, a variância em questão é considerada como sendo não homogênea.

### **4.4 Avaliação da Incerteza na Medição (Intervalos de Confiança)**

Cada vez que certa quantidade  $X$  é medida, erros estarão presentes. Desde que não seja possível evitar completamente tais erros, faz-se necessário quantificá-los através da incerteza associada na medição.

A incerteza na medição é avaliada de acordo com um dos dois tipos de métodos de avaliação: método tipo A ou tipo B. A avaliação do tipo A da incerteza padrão é feita pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média, que sugere um procedimento ou análise de regressão apropriada. A avaliação da incerteza padrão do tipo B é realizada por uma série de observações.

A avaliação da incerteza padrão tipo A pode ser aplicada quando muitas observações independentes foram feitas por uma quantidade de medições sob as mesmas condições. Se existe resolução suficiente no processo de medição então será observado um espalhamento ou dispersão nos valores obtidos [46]. Então, a avaliação do tipo A somente quantificará o efeito dos erros aleatórios na medição.

Basicamente, dois critérios são usados para análise dos dados com respeito à distribuição de probabilidade: a tendência central e o nível de dispersão dos dados sobre a tendência central [46].

A tendência central de um conjunto de dados, em geral, é dada pelo valor médio de  $n$  observações estatisticamente independentes ( $n > 1$ ), chamada de média aritmética ou termo médio,  $\bar{x}$ . A média é calculada pela seguinte equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.3)$$

Um parâmetro estatístico muito utilizado para quantificar o nível de dispersão dos valores  $x_i$  é o desvio padrão experimental  $s(x)$ , expresso pela seguinte equação:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.4)$$

o qual é derivado de outro parâmetro estatístico chamado variância experimental,  $s(x)^2$ .

Qualquer medição de um conjunto de dados é dita ser uma amostra de um número teoricamente infinito de medição. Tal conjunto de todos os valores possíveis de medição é comumente chamado de população. Se não existem erros sistemáticos, o valor médio de tal população,  $\mu$ , é o valor verdadeiro da quantidade de interesse. A média amostral  $\bar{x}$  fornece uma estimativa de  $\mu$ . A população também pode ser associada ao desvio padrão  $\sigma$ . Da mesma maneira, o desvio padrão experimental,  $s(x)$ , fornece uma estimativa do  $\sigma$ .

Visto que as medições individuais estão dispersas em volta do valor verdadeiro da quantidade de interesse e, com certa abrangência, dependem da precisão da medição, não é razoável que a média amostral seja exatamente igual à média populacional. Desta forma, as médias aritméticas derivadas de um grupo de dados distintos apresentarão uma variação dentro dos seus respectivos valores. Em outras palavras, a média amostral também é uma quantidade aleatória. O desvio padrão da média amostral é chamado de erro padrão da média (*standard error of the mean – s.e.m*). A relação matemática entre o desvio padrão populacional  $\sigma$  e o *s.e.m* é dada pela seguinte equação [45]:

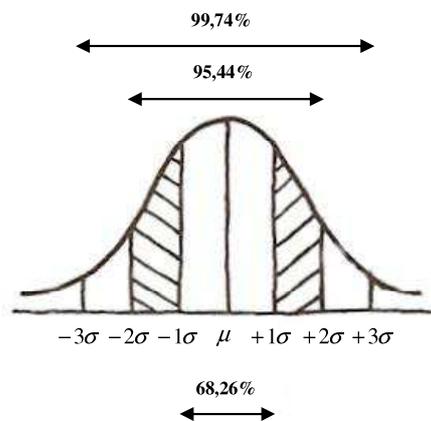
$$s.e.m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

Por causa disso, é útil calcular um intervalo numérico para o qual, com certa probabilidade, o valor da quantidade de interesse seja verdadeiro. Este intervalo é chamado de intervalo de confiança.

Assumindo que a quantidade de interesse é descrita por uma distribuição normal com valor esperado  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  – como mostrado na Figura 4.4, 95% da média amostral estarão situadas no intervalo expresso na Equação (4.6):

$$\mu - 1,96\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) < \bar{x} < \mu + 1,96\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (4.6)$$

onde o valor 1,96 é o valor da quantidade normalizada da distribuição normal, correspondente à probabilidade selecionada de 95%.



**Figura 4.4:** Área da distribuição normal abrangida pelos valores do desvio padrão.

Na prática,  $\mu$  e  $\sigma$  são parâmetros desconhecidos e somente o valor médio  $\bar{x}$  e o desvio padrão experimental  $s(x)$  são fornecidos a priori, que são estimados para uma medição de amostra finita. Assim, a Equação (4.6) pode ser re-escrita conforme a seguinte equação:

$$\bar{x} - 1,96\left(\frac{s(x)}{\sqrt{n}}\right) < \mu < \bar{x} + 1,96\left(\frac{s(x)}{\sqrt{n}}\right) \quad (4.7)$$

Para grandes quantidades de amostras,  $s(x)$  fornece uma estimação suficientemente precisa de  $\sigma$ , que pode ser substituído facilmente nas equações. Mas, para quantidade de amostras não muito grande,  $s(x)$  não fornece uma boa estimativa de  $\sigma$ . Considerando este fato, a equação (4.7) pode ser adaptada para (4.8)

$$\bar{x} - t_{(n-1), (1-\alpha/2)} \left( \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \right) < \mu < \bar{x} + t_{(n-1), (1-\alpha/2)} \left( \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.8)$$

onde  $t$  é o valor da distribuição *t Student's* para  $(n-1)$  graus de liberdade e probabilidade  $(1-\alpha/2)$ . O termo  $t_{(n-1), (1-\alpha/2)} \left( \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \right)$  é chamado de largura média  $h$ , e  $\alpha$  é o erro permitido, considerando que a quantidade do valor verdadeiro está contida no intervalo calculado.

Como podem ser visto, três variáveis influenciam na largura do intervalo de confiança [47]:

- O número  $n$  de medições;
- A probabilidade de confiança  $(1 - \alpha)$ , predefinida pelo observador;
- A variância  $(s(x)^2)$  relacionada ao valor medido.

A variação relacionada ao valor de medição é dependente de um grupo de fatores imprevisíveis e incontroláveis. Então, o observador está limitado em tratar as alterações de apenas um número de medições e na probabilidade de confiança desejada. Então, as três situações que definem as relações entre o número de medições e as probabilidades de confiança são [47]:

- Se a probabilidade de confiança é constante, um grande número de medições resultará em um intervalo de confiança fechado;
- Se a largura do intervalo de confiança é constante, um grande número de medições resultará em uma grande probabilidade de confiança;
- Se o número de medições é constante, uma grande probabilidade de confiança resultará em intervalo de confiança extenso.

#### 4.4.1 Tipos de Incerteza

Como descrito anteriormente, a incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados pelo desvio padrão experimental. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvio padrão, são avaliados por meio de distribuição de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando e que os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

Quando um conjunto de muitas medições repetidas é feito, a incerteza padrão,  $u$ , pode ser identificada como o desvio padrão experimental que é uma estimativa não-tendenciosa (*unbiased*) para o desvio padrão [48].

No caso mais simples, a medição é repetida  $n$  vezes exatamente nas mesmas condições obtendo-se resultados  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . A melhor estimativa não-tendenciosa para a incerteza padrão é:

$$u = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (4.9)$$

Neste caso, o número de graus de liberdade é  $\nu = (n-1)$ .

Existem ainda duas maneiras de se calcular a incerteza de uma medição. São elas:

1 – Incerteza Padrão Combinada ( $u_c$ ) é obtida como sendo a raiz quadrada positiva da soma quadrática das diversas incertezas padrão ( $u_i$ ) não correlacionadas e envolvidas no processo de medição [48]

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2} \quad (4.10)$$

2 – Incerteza Expandida ( $u_p$ ), obtida pela multiplicação do fator de abrangência ( $k$ ) pela incerteza padrão combinada [48].

$$u_p = k \cdot u_c \quad (4.11)$$

O fator de abrangência é um fator numérico usado como multiplicador da incerteza padrão combinada, de modo a obter a incerteza expandida.

A distribuição de probabilidade da incerteza expandida é aproximadamente normal. O menor valor do fator de abrangência ( $k$ ) é:

- $k = 2$  - para nível de confiança de aproximadamente 95%.
- $k = 3$  - para nível de confiança de aproximadamente 99%.

## 4.5 Tratamento Estatístico das Medições em DSL

A maioria das medições utilizadas neste trabalho, por mais otimizadas que sejam sua capacidade de desempenho, não está isenta de provocar erros quando de sua utilização. Portanto, se fez necessário um tratamento estatístico dos valores dos parâmetros físicos do enlace do assinante medidos, com a intenção de se identificar os erros de natureza sistemáticas e/ou aleatórios cometidos nos processos de medição.

Neste sentido, adotaram-se alguns procedimentos para realização do tratamento estatístico. Esses procedimentos são descritos nas seções seguintes.

### 4.5.1 Aplicação do Teste de *Dixon*

Como descrito na seção 4.3.4, existem alguns testes que auxiliam a análise para detectar amostras (valores) que divergem em uma população. Porém, nesse trabalho utilizou-se o teste de *Dixon*, devido este apresentar uma boa precisão e rapidez na detecção de valores *outliers*. A escolha desse teste foi devido à sua facilidade e por se tratar de um método simples e eficaz. Além disso, o fator determinante na sua escolha é: a possibilidade do teste ser

aplicado em uma quantidade de amostras considerável. Outra vantagem é que não é necessário o conhecimento a priori da estimativa desses valores.

#### 4.5.1.1 Procedimentos para Realização do Teste de *Dixon*

Após a coleta das medições os dados são armazenados em arquivos no formato .xls, sendo que cada arquivo é composto de três colunas que são: frequência, parte real e parte imaginária para toda faixa de frequência utilizada. Para cada valor da parte real e imaginária usa-se o teste de *Dixon*, conforme o código fonte no Anexo B. Depois do processamento é gerado um arquivo de saída, no formato .txt para análise dos resultados. Considerando que o número de *outliers* encontrados esteja abaixo de 15% do total da amostra, estes dados podem ser armazenados para serem utilizados na etapa seguinte. Caso contrário, esses dados são descartados e novas medições são realizadas.

#### 4.5.2 Aplicação da Incerteza nas Medições

Nessa etapa, a incerteza associada nas medições é determinada através da utilização do desvio padrão das  $n$  medições realizadas, conforme o código fonte no Anexo B. Para essa etapa utilizou-se um código fonte, o qual se encontra no Anexo B, que utilizou as equações 4.9 a 4.11, o intervalo de confiança utilizado para a estimativa da incerteza das medições foi de 95,44%, conforme mostrado na Figura 4.4.

## 4.6 Considerações Finais

Foi mostrado neste capítulo a necessidade de se realizar análises estatísticas nos dados das medições em DSL para se determinar a presença de *outliers* (dados incoerentes). Foram descritas algumas técnicas de análise, porém, o teste de *Dixon* foi escolhido como o método a ser utilizado neste trabalho, pois este método apresenta uma boa precisão e rapidez na detecção de valores *outliers*.

Adicionalmente, este capítulo mostrou a importância da análise da incerteza associada às medições no tratamento estatístico dos dados/resultados.

O próximo capítulo apresentará a aplicação da metodologia proposta através de alguns estudos de casos, considerando algumas situações quanto aos procedimentos de medições. Também apresentará uma análise para os resultados obtidos.

## Capítulo 5

# Validação da Metodologia de Medições Proposta: Estudos de Casos

### 5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como principal objetivo validar a metodologia de medição proposta neste trabalho. Alguns estudos de casos são realizados considerando situações onde: a aplicação dos procedimentos de medições é realizada de acordo com a metodologia e quando as medições não seguem os procedimentos propostos. Faz-se também uma análise desses resultados.

### 5.2 Campanha de Medições

Para a validação da metodologia proposta, uma campanha de medições foi realizada no período 2006 a 2007 no Laboratório de Inovação Tecnológica em Telecomunicações da Universidade Federal do Pará. Esse laboratório possui os equipamentos adequados para montagem dos *setups* das medições, conforme mostrado no capítulo 3.

Para realização dessa campanha, foram utilizados os enlaces padrões ETSI (#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7 e #8) como descritos na Tabela 5.1. A escolha desses enlaces foi devido à disponibilidade do uso de simuladores de linha ADSL 400E3, que permitem simular enlaces de padrões europeus de 50 m a 3.700 m com impedância característica da linha de 100 ohms. Além dos simuladores utilizados para os enlaces padrões, também se utilizou um cabo balanceado de par trançado com dez pares de 0,4mm e 500m e com impedância característica de 120 ohms.

A campanha de medições foi realizada em duas etapas. Para a primeira, foram feitas medidas de função de transferência, parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  e de impedância de entrada, utilizando inicialmente os simuladores de linha. Na segunda etapa da campanha de medições, foram realizadas medições dos parâmetros citados anteriormente, utilizando-se um

enlace real, composto de uma seção de cabo telefônico como descrito na Tabela 5.1. O objetivo desta etapa é comprovar que a metodologia pode se aplicada aos enlaces reais encontrados nas atuais redes telefônicas.

Nessas duas etapas, todos os procedimentos de medições, como seleção adequada do equipamento, seleção do BALUN, seleção dos conectores e o tipo de calibração apropriado, foram cuidadosamente realizados. No entanto, devido à sensibilidade dos procedimentos adotados, algumas situações adversas podem influenciar os resultados das medições; diante disso, alguns resultados foram selecionados para serem mostrados e analisados.

**Tabela 5.1:** Descrição dos Cenários Utilizados na Implementação da Metodologia.

Enlace	Número de Seções	Tipo de Seção	Comprimento por Seção (m)	Diâmetro da Bitola por Seção (mm)
ETSI#1	1	Serial	2.550	0,4
ETSI#2	1	Serial	3.400	0,5
ETSI#3	2	Serial/Serial	1.400/1.500	0,4/0,5
ETSI#4	4	Serial/Serial/Serial/Serial	200/900/1.500/500	0,32/0,4/0,5/0,63
ETSI#5	4	Serial/Serial/Serial/Serial	1.450/750/500/500	0,4/0,5/0,63/0,9
ETSI#6	3	Serial/Serial/Serial	1.300/1.250/500	0,4/0,5/0,63
ETSI#7	3	Serial/Serial/Serial	200/600/4.000	0,32/0,4/0,9
ETSI#8	4	Serial/B.Tap/Serial/B. Tap	750/500/1.100/500	0,4/0,4/0,4/0,4
Cabo Real	1	Serial	500	0,4

B.Tap = *Bridged Tap*

### 5.3 Resultados das Medições

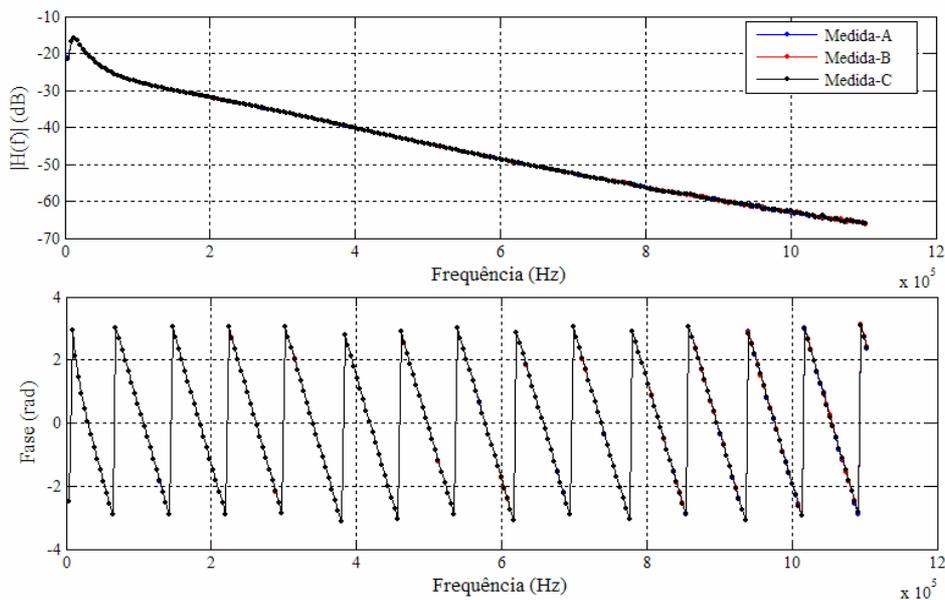
Nesta seção, serão mostrados os resultados das medições obtidos tanto para os simuladores de linha, quanto para o cabo real, como descrita na seção 5.2. No entanto, antes de mostrar os resultados obtidos é importante destacar-se alguns pontos:

- Todos os enlaces descritos acima foram utilizados durante a campanha de medições, porém, devido a grande quantidade de medidas obtidas, apenas alguns resultados foram escolhidos para serem mostrados e analisados.

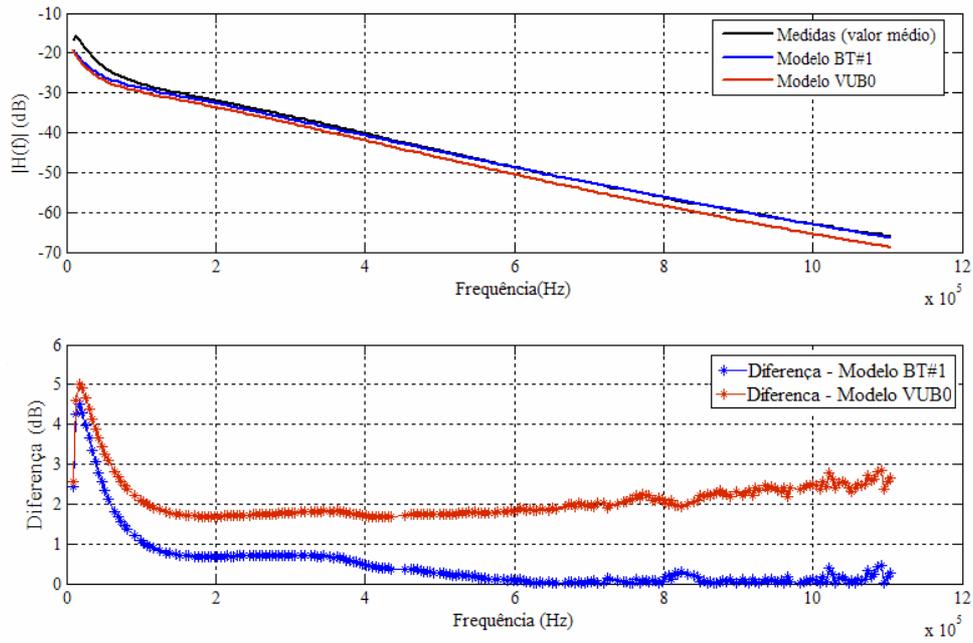
- Todas as medições foram para SELT, devido a grande demanda de medições realizadas durante a fase de execução da metodologia.
- Todas as medições foram realizadas para a faixa de frequência ADSL.
- Durante a campanha de medições optou-se por fazer três vezes a mesma medida para cada parâmetro, ou seja, a quantidade mínima requerida para a análise dos resultados, embora fosse possível uma quantidade maior de medições.
- Os modelos de linha utilizados como referências para análises das medições foram os modelos BT#1 e VUB0, descritos no capítulo dois.

### 5.3.1 Função de Transferência

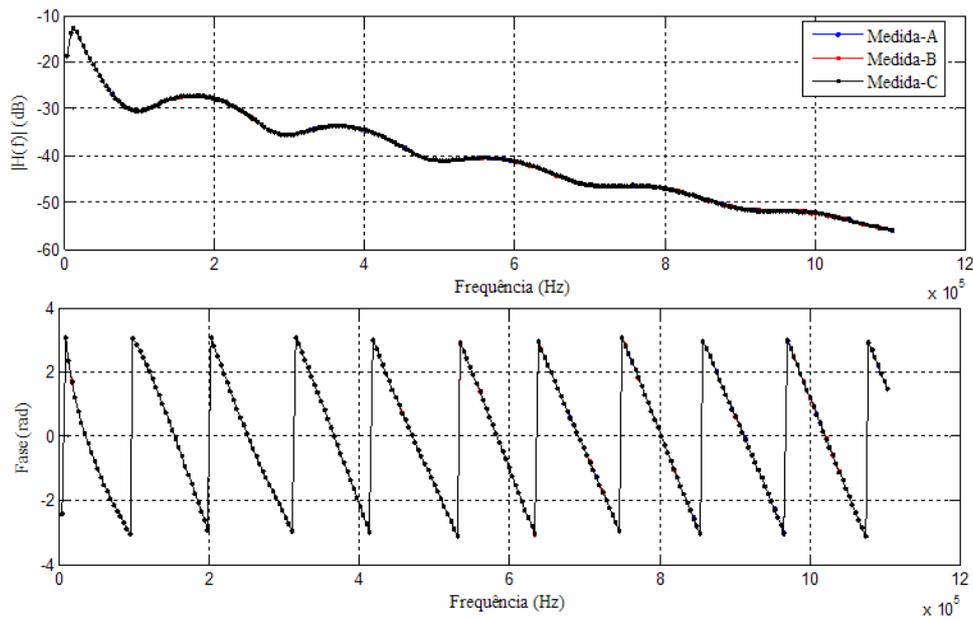
Nesta seção, são mostrados os resultados das medições da função de transferência  $H(f)$  através da aplicação da metodologia definida neste trabalho. As Figuras 5.1 a 5.6 mostram os resultados obtidos.



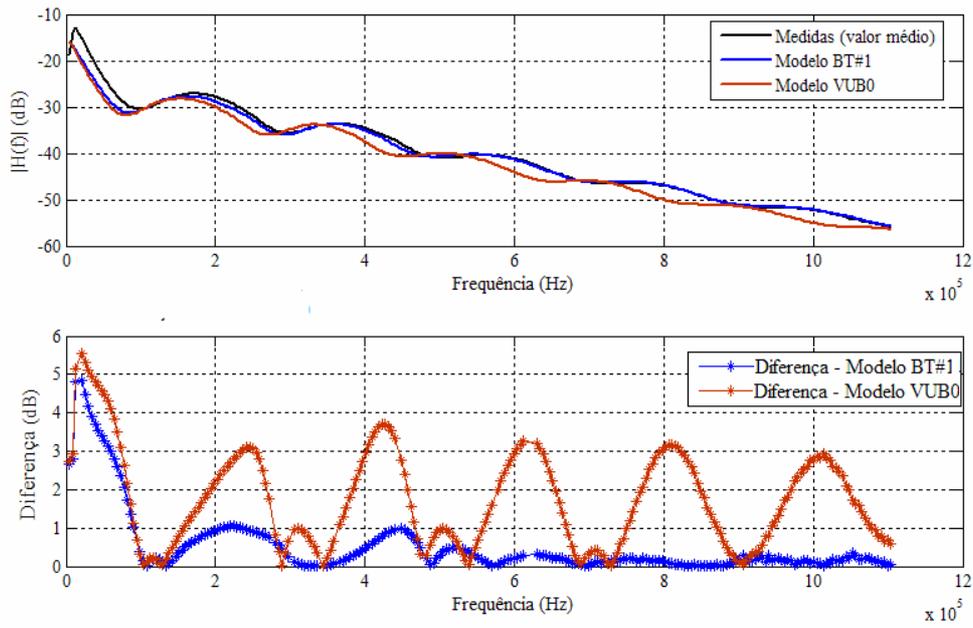
**Figura 5.1:** ETSI#1 – Magnitude e Fase para  $H(f)$ .



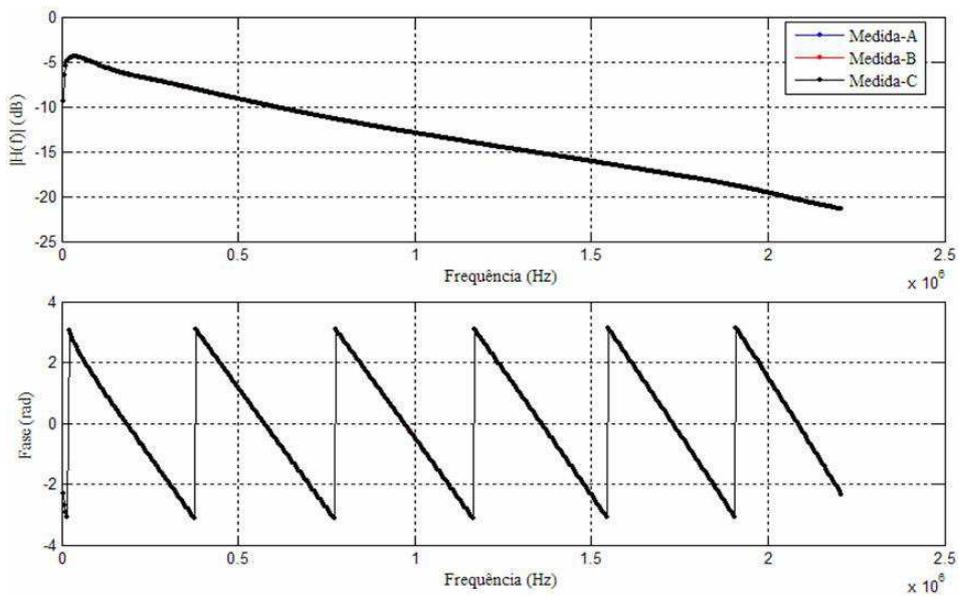
**Figura 5.2:** ETSI#1 - Curva média das medidas  $H(f)$  versus os modelos BT#1 e VUB0.



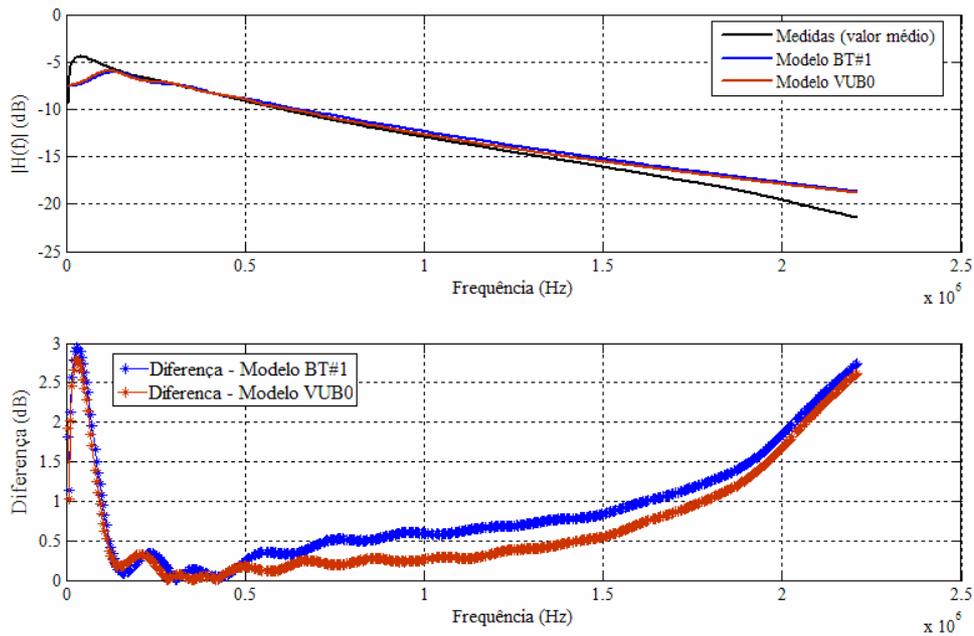
**Figura 5.3:** ETSI#8 - Magnitude e Fase para  $H(f)$ .



**Figura 5.4:** ETSI#8 - Curva média das medidas  $H(f)$  versus os modelos BT#1 e VUB0.



**Figura 5.5:** Cabo Real - Magnitude e Fase para  $H(f)$ .



**Figura 5.6:** Cabo Real - Curva média das medidas  $H(f)$  versus os modelos BT#1 e VUB0.

Os gráficos das Figuras 5.1 e 5.3 mostram os resultados das medições da função de transferência para o enlace padrão ETSI#1 e ETSI#8, usando simulador de linha. O gráfico da Figura 5.5 mostra o resultado para o enlace arbitrário usando um cabo real. Como podem ser observadas, as curvas das três medidas A, B e C apresentam o mesmo comportamento tanto para a magnitude quanto para a fase. São os resultados esperados, visto que se utilizaram os mesmos procedimentos para as três medições. Para ratificar que o procedimento de medição sugerido foi coerente, os resultados foram submetidos a análise estatística (descrita nas Seções 4.5.1 a 4.5.2). Por essa análise, pode observar a baixa quantidade de *outliers*, o baixo desvio padrão e o valor da incerteza associada, nas três medições, como mostrado na Tabela 5.2. Conclui-se então, a coerência dos dados obtidos através da aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

**Tabela 5.2:** Análise Estatística das Medições de H(f).

<b>Enlace</b>	<b>Percentual de <i>Outliers</i> (%)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Incerteza (dB)</b>
ETSI#1	6,5	0,0503	0,1340
ETSI#8	3,9	0,0189	0,0554
Arbitrário	3,6	0,0170	0,0509

Adicionalmente, para comprovar mais uma vez a aplicabilidade da metodologia de medições, estas foram comparadas com um padrão de referência. O padrão de referência utilizado foram os modelos teóricos de linhas BT#1 e VUB0. As Figuras 5.2, 5.4 e 5.6 mostram os gráficos da curva média das três medições versus as curvas geradas pelos modelos. As diferenças entre os modelos e curva das medições são dadas na Tabela 5.3.

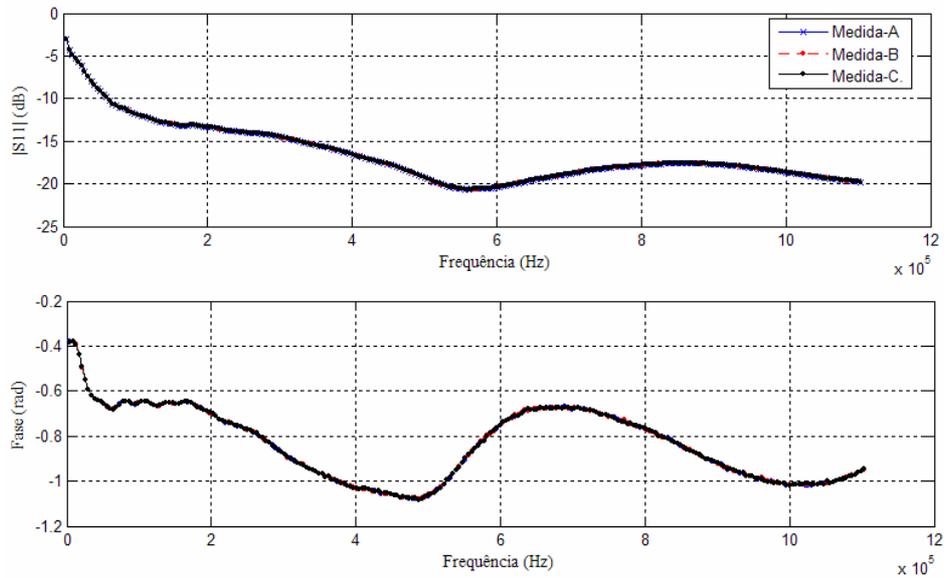
**Tabela 5.3:** Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.

<b>Enlace</b>	<b>Modelo BT#1 Diferença Média (dB)</b>	<b>Modelo VUB0 Diferença Média (dB)</b>
ETSI#1	0	2
ETSI#8	1	2
Arbitrário	1	1

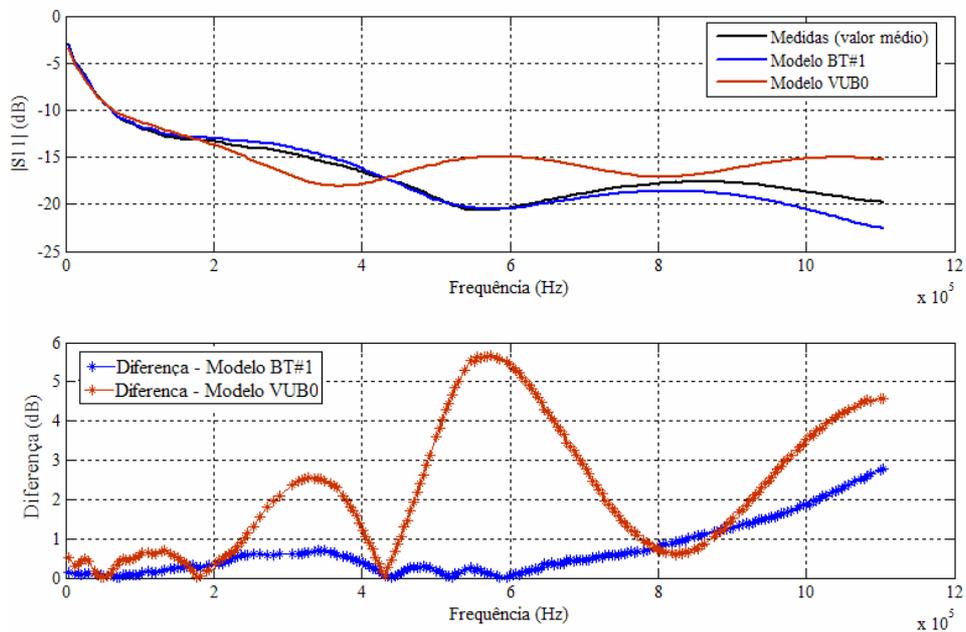
Os resultados mostrados na Tabela 5.3 mostram que as diferenças através do modelo BT#1 apresentam valores menores para os enlaces padrões ETSI#1 e ETSI#8. A consequência é por causa do uso do modelo BT#1 pelo simulador de linha. Já para o enlace arbitrário, observa-se um desvio na curva média das medidas em relação às curvas dos modelos. A consequência desse resultado pode ser atribuída aos parâmetros primários do cabo, que apresentam valores diferentes dos modelos.

### 5.3.2 Parâmetro de Espalhamento

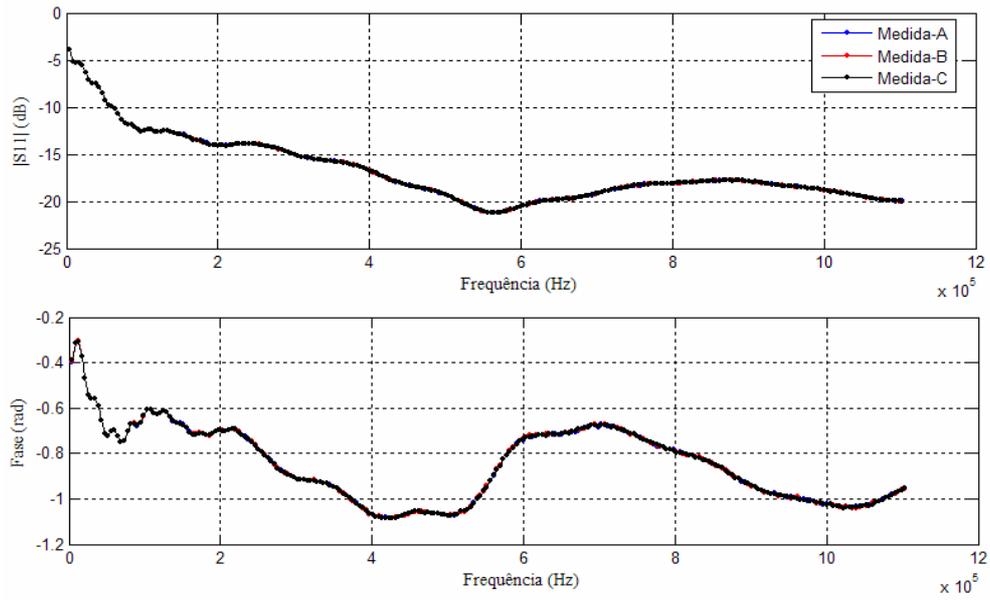
Outro parâmetro medido através da metodologia definida neste trabalho foi o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ . As Figuras 5.7 a 5.12 mostram os resultados obtidos



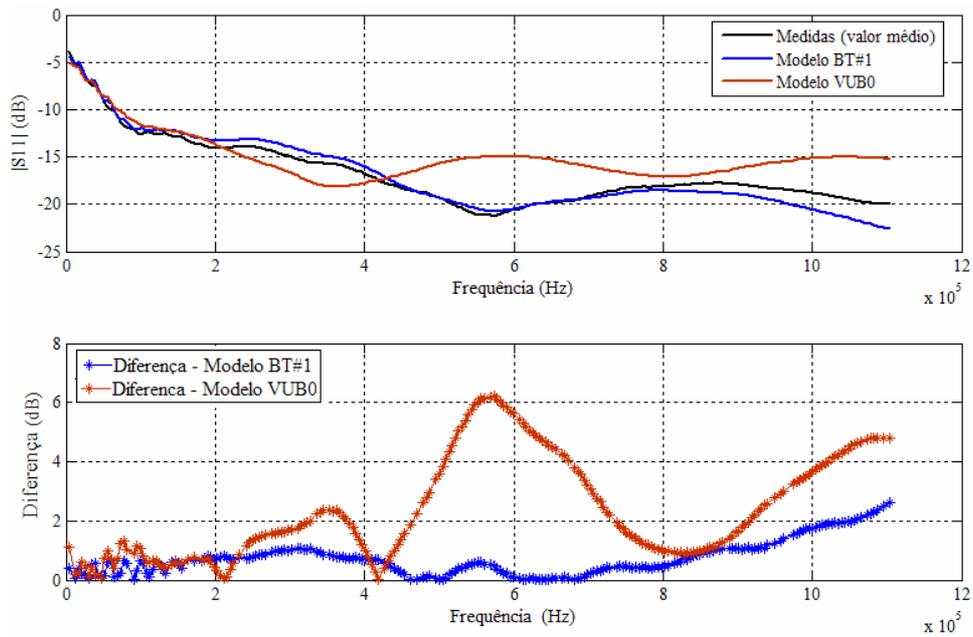
**Figura 5.7:** ETSI#4 - Magnitude e Fase para  $S_{11}$ .



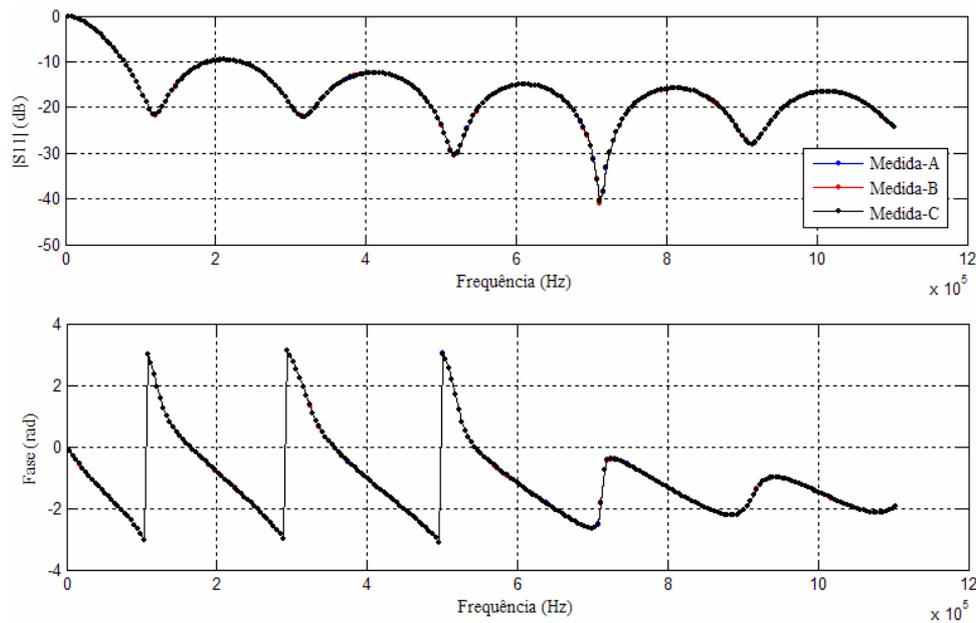
**Figura 5.8:** ETSI#4 - Curva média das medidas  $S_{11}$  versus os modelos BT#1 e VUB0.



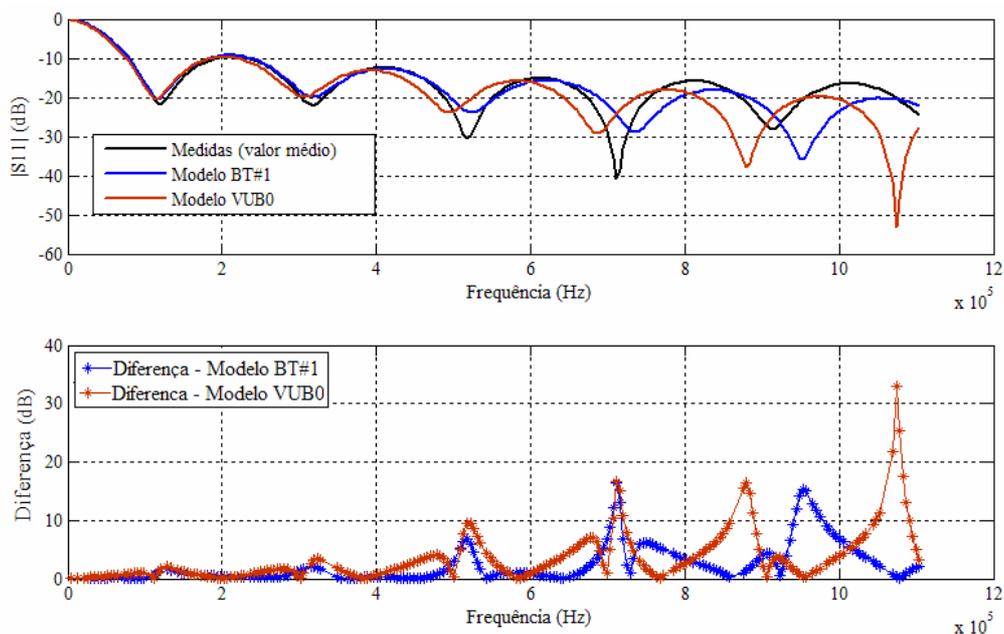
**Figura 5.9:** ETSI#7 – Magnitude e Fase para  $S_{11}$ .



**Figura 5.10:** ETSI#7 - Curva média das medidas  $S_{11}$  versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.



**Figura 5.11:** Cabo Real – Magnitude e Fase para  $S_{11}$ .



**Figura 5.12:** Cabo Real - Curva média das medidas  $S_{11}$  versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.

Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.9 mostram os resultados das medições do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  para os enlaces padrões ETSI#4 e ETSI#7, usando simulador de linha. O gráfico da Figura 5.11 mostra o resultado para o enlace arbitrário usando um cabo real. Assim, como foi observado nas medições da função de transferência, as curvas das três medidas A, B e C apresentam o mesmo comportamento tanto na magnitude como na fase.

Estes resultados podem ser comprovados pela baixa quantidade de *outliers*, pelo desvio padrão e pelo o valor da incerteza associada, nas três medições, como mostrado na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Análise Estatística das Medições de  $S_{11}$ .

<b>Enlace</b>	<b>Percentual de <i>Outliers</i> (%)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Incerteza (dB)</b>
ETSI#4	7,7	0,0140	0,0442
ETSI#7	7,3	0,0144	0,0453
Arbitrário	8,2	0,0168	0,0505

As Figuras 5.8, 5.10 e 5.12 mostram os gráficos da curva média das três medições versus curvas geradas pelos modelos. As diferenças obtidas entre os modelos e a curvas das medições são dadas na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5:** Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.

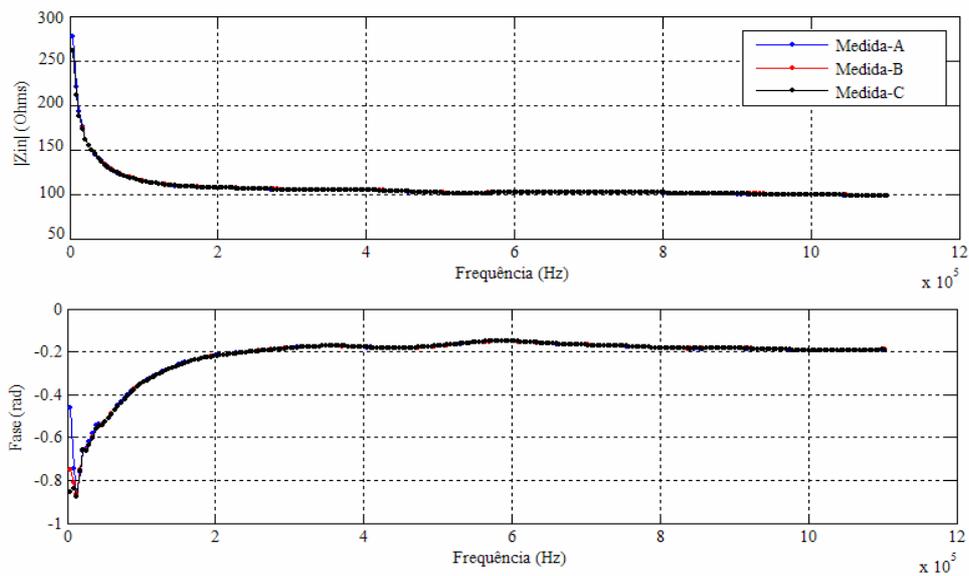
<b>Enlace</b>	<b>Modelo BT#1 Diferença Média (dB)</b>	<b>Modelo VUB0 Diferença Média (dB)</b>
ETSI#4	1	2
ETSI#7	1	2
Arbitrário	2	4

Os resultados mostrados na Tabela 5.5 demonstram que as diferenças através do modelo BT#1 apresentam valores menores para os enlaces padrões ETSI#4 e ETSI#7. A consequência, como citado anteriormente, é devido ao simulador de linha utilizar o modelo BT#1. Porém, para o enlace arbitrário, as diferenças médias obtidas em relação aos dois modelos foram duas vezes maiores que as diferenças dos enlaces ESTI#4 e ETSI#7; essa consequência tem a mesma explicação do caso da função de transferência, ou seja, se dá aos parâmetros primários dos cabos quem não possuem os mesmos valores utilizados pelos modelos.

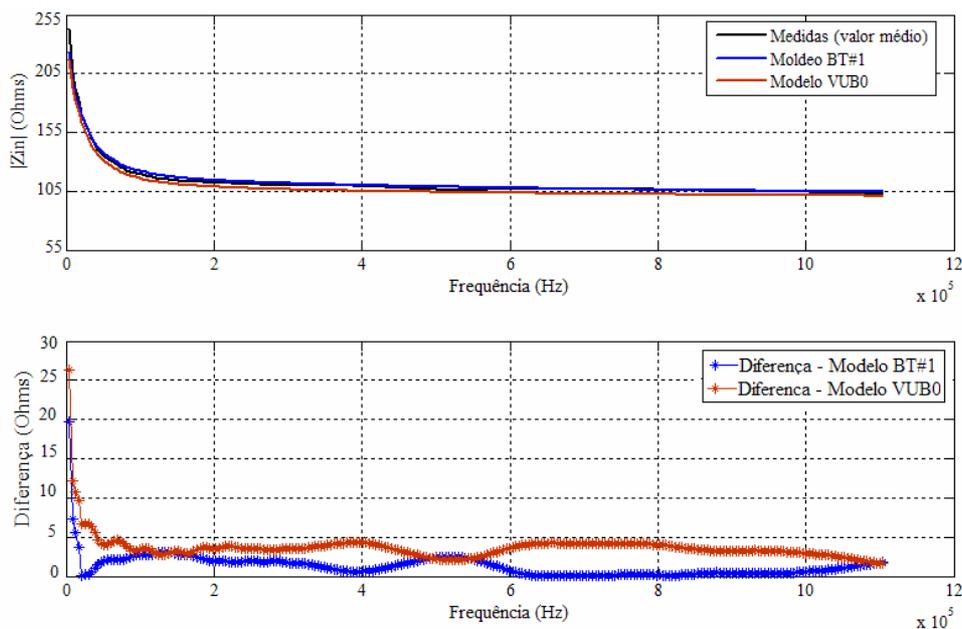
### 5.3.3 Impedância de Entrada

Os resultados para a impedância de entrada  $Z_{in}$  determinados com a aplicação da metodologia são mostrados nas figuras que seguem.

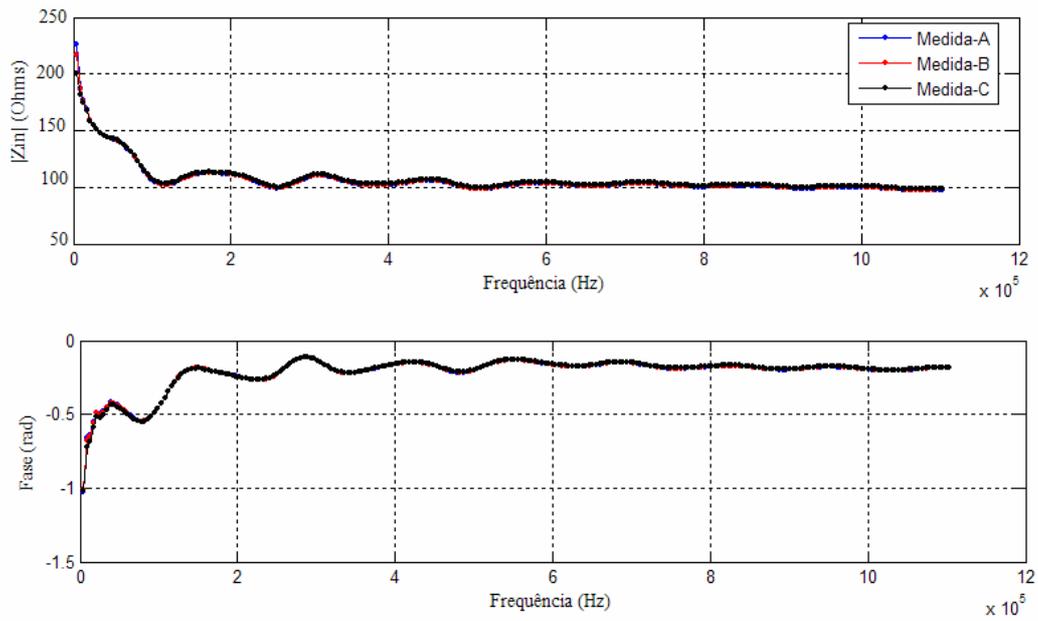
Os gráficos das Figuras 5.13 e 5.15 mostram os resultados das medições da impedância de entrada  $Z_{in}$  para os enlaces padrões ETSI#1 e ETSI#8, usando simulador de linha. O gráfico da Figura 5.17 mostra o resultado para o enlace arbitrário usando um cabo real.



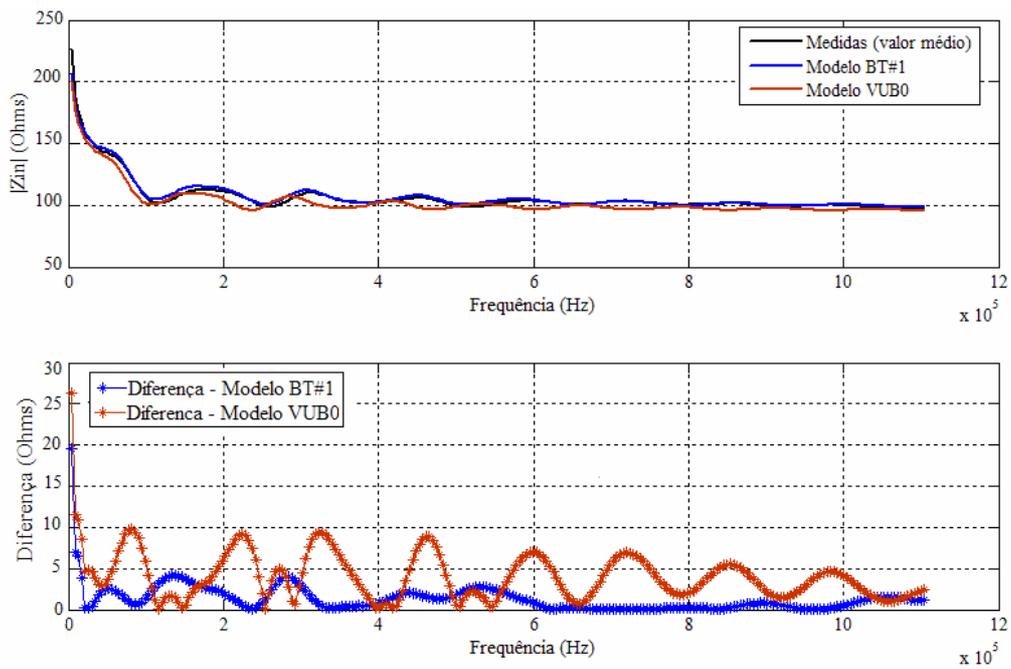
**Figura 5.13:** ETSI#1 – Magnitude e Fase para  $Z_{in}$ .



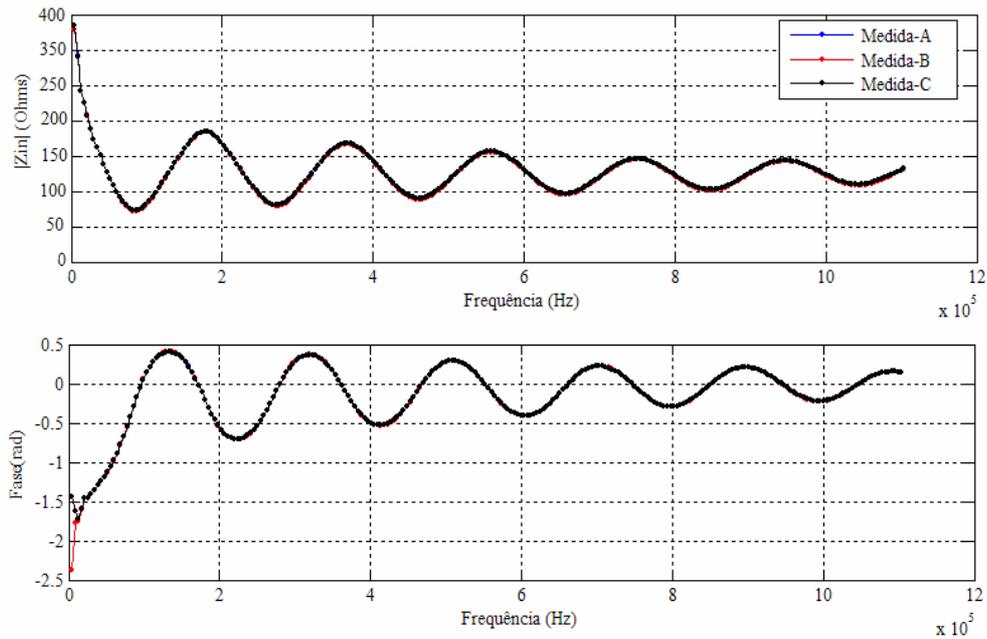
**Figura 5.14:** ETSI#1 - Curva média das medições  $Z_{in}$  versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.



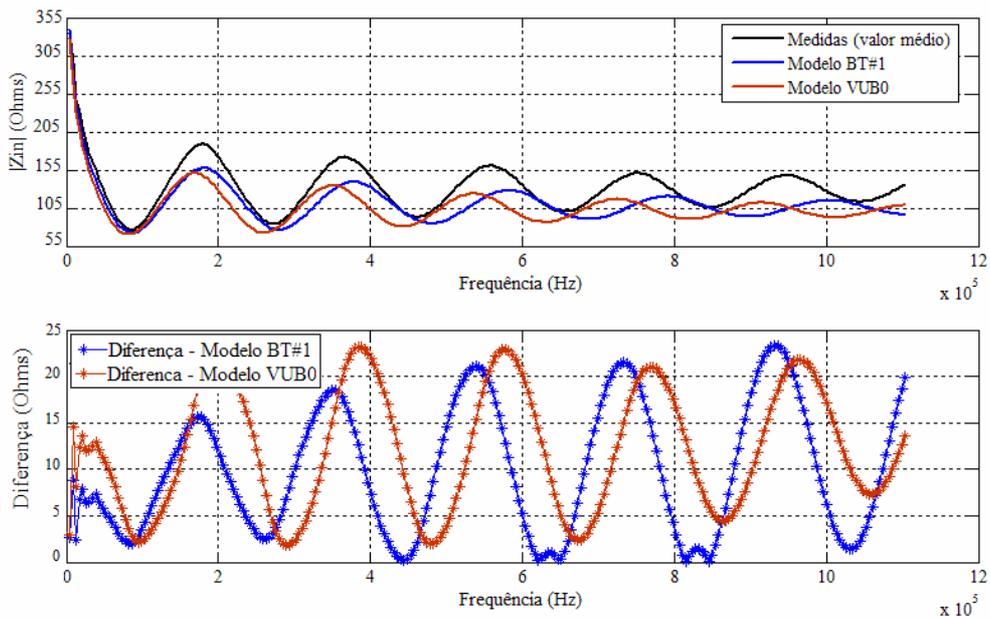
**Figura 5.15:** ETSI#8 – Magnitude e Fase para  $Z_{in}$ .



**Figura 5.16:** ETSI#8 - Curva média das medidas  $Z_{in}$  versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.



**Figura 5.17:** Cabo Real – Magnitude e Fase para  $Z_{in}$ .



**Figura 5.18:** Cabo Real - Curva média das medidas  $Z_{in}$  versus os modelos de linha BT#1 e VUB0.

Como pode ser visto nas curvas acima das três medidas A, B e C apresentam o mesmo comportamento tanto na magnitude e como na fase. Estes resultados podem ser comprovados pela baixa quantidade de *outliers*, pelo desvio padrão e pelo valor da incerteza associada nas três medições como mostrado na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6:** Análise Estatística das Medições de  $Z_{in}$ .

<b>Enlace</b>	<b>Percentual de <i>Outliers</i> (%)</b>	<b>Desvio Padrão (Ohms)</b>	<b>Incerteza (Ohms)</b>
ETSI#1	8,1	0,7337	1,9191
ETSI#8	9,5	0,8955	2,3423
Arbitrário	8,7	0,7965	2,0835

As Figuras 5.14, 5.16 e 5.18 mostram os gráficos da curva média das três medições versus as curvas geradas pelos modelos e as diferenças médias obtidas entre os modelos e a curva média das medidas são dadas na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7:** Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.

<b>Enlace</b>	<b>Modelo BT#1 Diferença Média (Ohms)</b>	<b>Modelo VUB0 Diferença Média (Ohms)</b>
ETSI#1	1	4
ETSI#8	3	6
Arbitrário	10	15

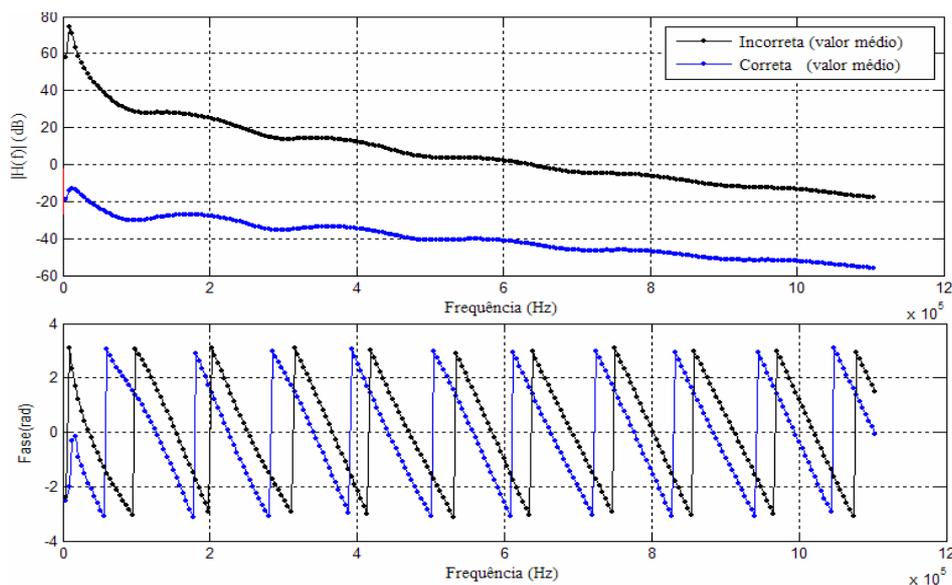
Os resultados mostrados na Tabela 5.7 mostram que as diferenças através do modelo BT#1 apresentam valores menores para os enlaces padrões ETSI#1 e ETSI#8. No entanto, para o enlace arbitrário, observa-se um desvio na curva média das medidas em relação às curvas dos modelos. Da mesma forma, como nos casos anteriores, esse resultado pode ser atribuído aos parâmetros primários do cabo que apresentam valores diferentes dos modelos.

### 5.3.4 Sensibilidade das Medições: Situações Adversas

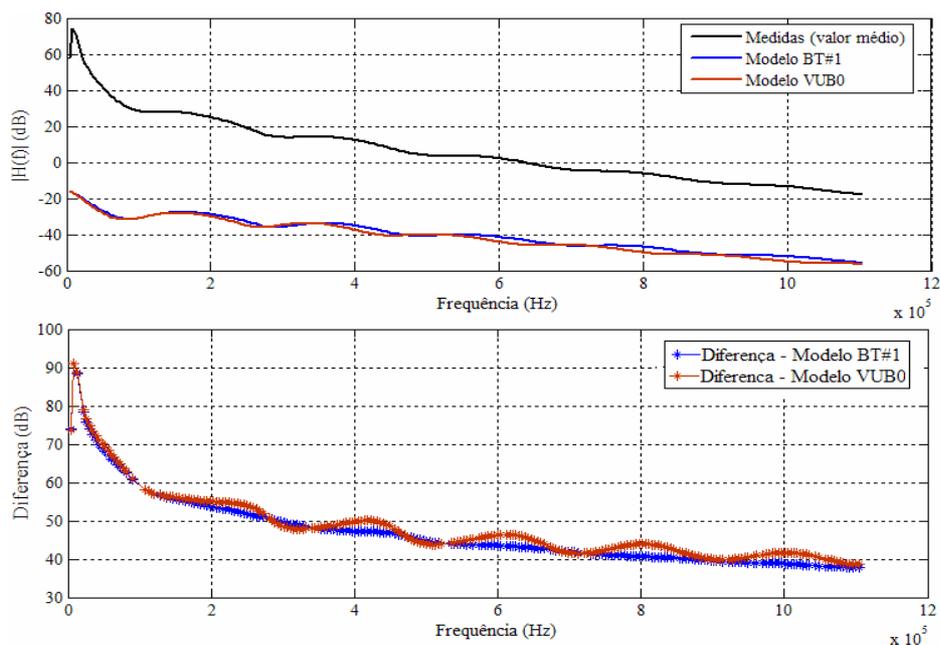
Como descrito na seção 5.2, algumas situações adversas podem ocasionar erros nos resultados das medidas, devido à sensibilidade que estão sujeitas. Essas situações afetam de forma direta o resultado de uma ou mais medições. Os erros mais comuns encontrados muitas vezes provêm do uso incorreto de algum ou mais procedimentos realizados durante a medição. Dentre essas situações, três foram escolhidas para mostrar o impacto que eles causam nos resultados das medições. Essas três situações são mostradas a seguir.

#### 5.3.4.1 Situação 1: Medições realizadas sem o tipo de calibração adequada.

Nesta situação, foram realizadas calibrações não adequadas ao teste. Sendo assim, utilizaram-se três medições da função de transferência para o enlace padrão ETSI#8. A escolha desse enlace foi somente uma forma de mostrar o resultado, que tal situação causa nessas medições. No entanto, a mesma situação pode ser evidenciada em qualquer enlace do assinante. Na figura 5.20 é mostrada a curva média das três medições incorretas, quando não se utiliza o tipo de calibração adequado, versus curva média das mesmas medições, quando se usa a correta calibração. A evidência do impacto dessa situação é mostrada na Figura 5.21, onde é mostrada curva média das medições incorretas com as curvas dos modelos BT#1 e VUB0. A diferença entre tais curvas é muito alta, evidenciando a incoerência das medições. A Tabela 5.9 no final deste capítulo mostra os valores do erro médio encontrado.



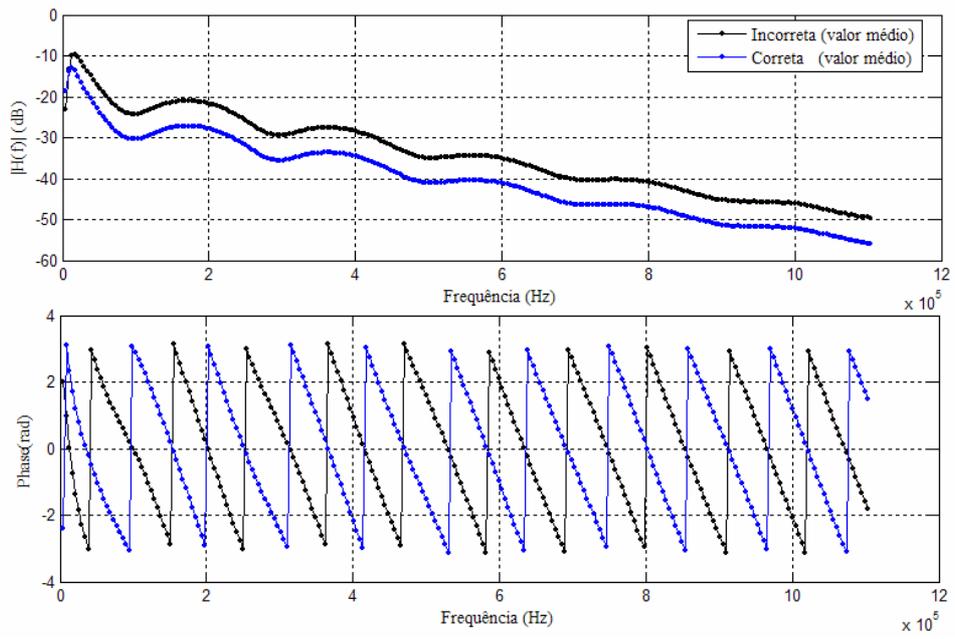
**Figura 5.20:** ETSI#8 - Módulo e Fase para  $H(f)$ .



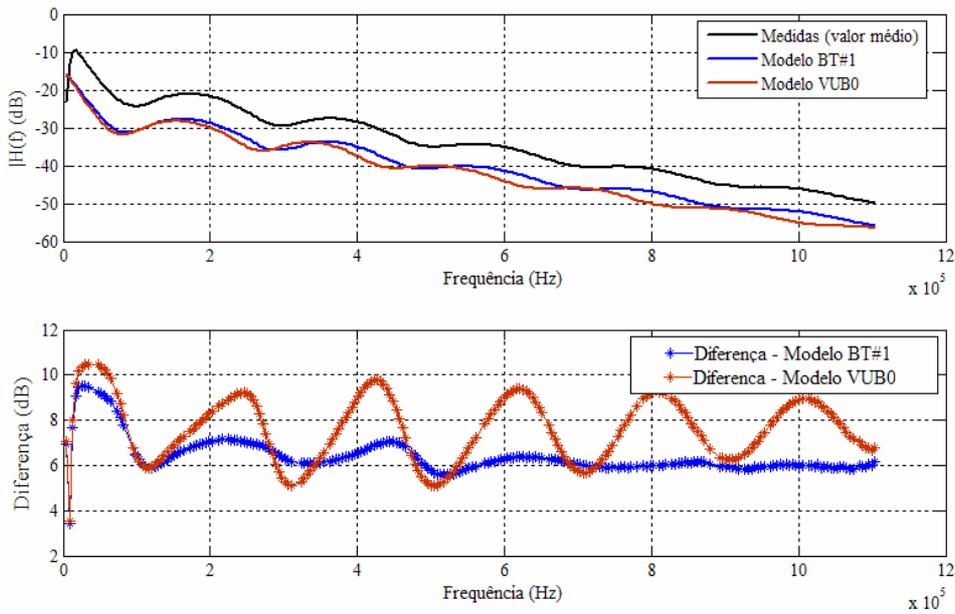
**Figura 5.21:** ETSI#8 - Curva média da magnitude  $H(f)$  e dos modelos de linha BT#1 e VUB0.

#### 5.3.4.2 Situação 2: Medições realizadas sem calibração.

Nesta situação, utilizaram-se também três medições da função de transferência para o enlace padrão ETSI#8. A Figura 5.22 mostra a curva média das três medições incorretas quando não se utiliza nem procedimento de calibração versus curva média das mesmas medições quando se utilizou o procedimento de calibração correto/adequado. A evidência do impacto dessa situação é mostrada na Figura 5.23. Onde é mostrada curva média das medições incorretas com as curvas dos modelos BT#1 e VUB0. A diferença entre tais curvas é mostrada na Tabela 5.9.



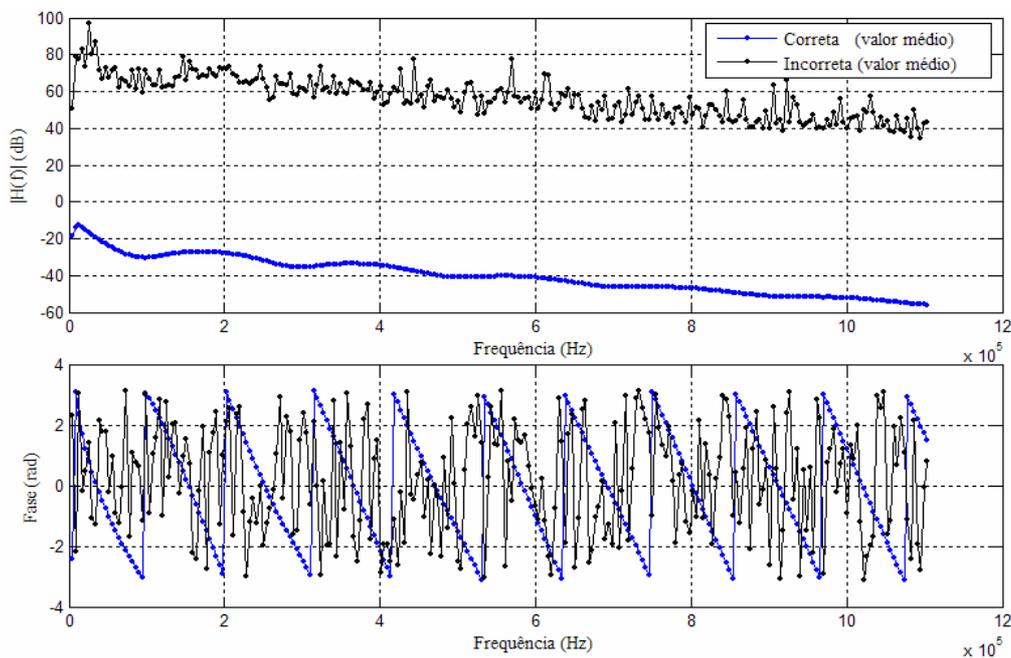
**Figura 5.22:** ETSI#8 - Módulo e Fase para  $H(f)$ .



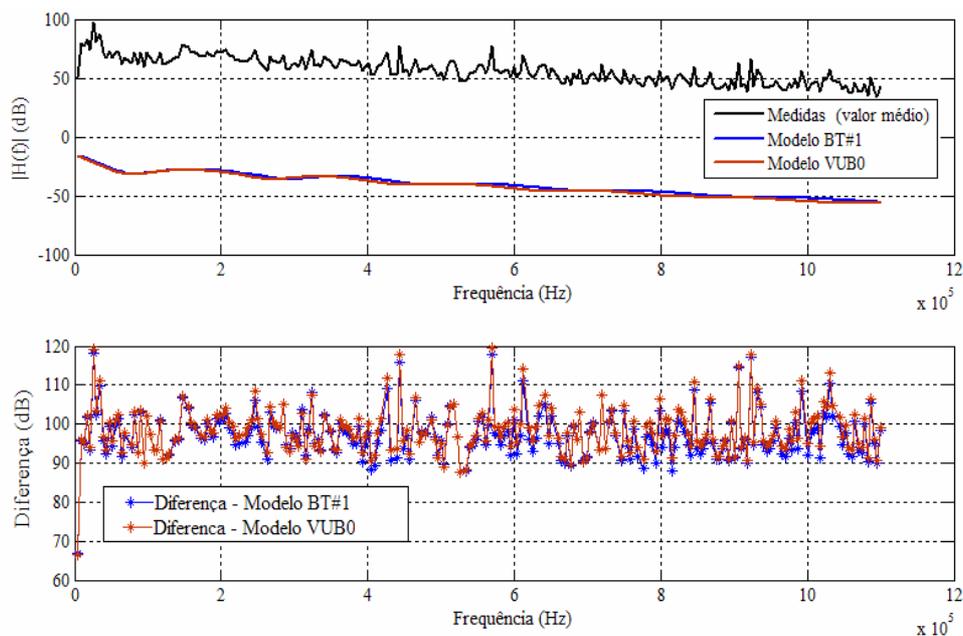
**Figura 5.23:** ETSI#8 - Curva média da magnitude  $H(f)$  e dos modelos de linha BT#1 e VUB0.

### 5.3.4.3 Situação 3: Erro nas medições causado por uma imperfeita conexão dos instrumentos.

Nesta situação, fica evidenciado claramente o erro que uma imperfeita conexão pode causar nos resultados de uma ou mais medições. Também se utilizaram três medições da função de transferência para o enlace padrão ETSI#8. A Figura 5.24 mostra a curva média das três medições incorretas versus a curva média das mesmas medições, quando todos os instrumentos de medições possuem conexões perfeitas. A evidência do impacto dessa situação é mostrada na Figura 5.25, onde é apresentada a curva média das medições incorretas com as curvas dos modelos BT#1 e VUB0. A diferença entre tais curvas é mostrada na Tabela 5.9.



**Figura 5.24:** ETSI#8 - Módulo e Fase para  $H(f)$ .



**Figura 5.25:** ETSI#8 - Curva média da magnitude  $H(f)$  e dos modelos de linha BT#1 e VUB0.

A Tabela 5.8 mostra os resultados da análise estatística das três situações descritas acima e a Tabela 5.9 resume a diferença obtida nas situações citadas.

**Tabela 5.8:** Análise Estatística das Medições de  $H(f)$  para o enlace ETSI#8.

Situação	Percentual de <i>Outliers</i> (%)	Desvio Padrão (dB)	Incerteza (dB)
1	7,7	0,0184	0,0544
2	10,2	0,0206	0,0593
3	8,6	0,0192	0,0560

**Tabela 5.9:** Diferença entre as medições e os modelos BT#1 e VUB0.

<b>Situação</b>	<b>Modelo BT#1 Diferença Média (dB)</b>	<b>Modelo VUB0 Diferença Média (dB)</b>
1	47	48
2	6	8
3	97	98

## 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram mostrados alguns resultados das medições de parâmetros físicos do enlace do assinante. Para esses resultados, alguns estudos de casos relacionados com a implementação da metodologia proposta foram mostrados. Primeiramente, mostraram-se alguns resultados quando todos os procedimentos de medições foram realizados corretamente, isto é, quando os passos sugeridos na metodologia foram rigorosamente seguidos, ou seja, quando:

- a escolha dos dispositivos que compuseram o *setup* de medição foram feitas de maneira adequada, observando-se as características técnicas, bem como a influência destes no processo de medição;
- usa-se um processo de calibração adequado ao procedimento de medição;
- usa-se o tratamento estatístico para a observação de coerência dos resultados.

Adicionalmente, para comprovar a aplicabilidade da metodologia, foram realizadas comparações entre os dados medidos e os modelos teóricos, sendo estes últimos referências para as comparações. Nessas comparações, observou-se que as diferenças entre as curvas médias das medições e as curvas dos modelos utilizados apresentam na, maioria dos casos, valores de ordem aceitável na prática.

Nos casos em que os procedimentos, de alguma forma, não foram realizados adequadamente pode-se observar o aparecimento de erros nos resultados devido à sensibilidade das medições, comprovados por comparação entre os modelos e através da análise estatística, o que novamente mostra que a metodologia é eficaz e coerente.

## Conclusões

A tecnologia DSL mostra-se cada vez mais próxima do ao usuário residencial e comercial de pequeno e principalmente médio porte, como fonte de acesso a Internet em banda larga. Comparada aos outros serviços de acesso à Internet em banda larga, como fibra óptica, cabo e *wireless*, a tecnologia DSL é caracterizada por necessitar de um pequeno tempo de instalação e ativação do serviço, visto que utiliza a infra-estrutura telefônica existente, além do baixo investimento para aquisição do modem DSL. Vale ressaltar que a tecnologia DSL é capaz de fornecer taxas da ordem de 25 Mbps (*downstream*) que são suficientes para as aplicações residenciais.

A infra-estrutura telefônica existente pode não ser adequada para o transporte do serviço DSL, fazendo com que as taxas desejadas não sejam alcançadas. Isso se deve ao fato de que a infra-estrutura telefônica existente foi previamente desenvolvida para suprir as necessidades do serviço telefônico tradicional.

Nesse contexto, destaca-se a necessidade de se qualificar o enlace telefônico do assinante, visto que o seu estado influencia diretamente no desempenho do serviço DSL. Dentre as técnicas de qualificação de enlace existentes, destacam-se os testes que podem ser realizados a partir da Central Telefônica (SELT). Nestes testes, parâmetros são medidos e, com estes resultados, o estado operacional da linha do assinante é identificado.

Em se tratando de um processo de medição de parâmetros, é crucial a observação de um procedimento coerente para que os dados sejam confiáveis e o diagnóstico do estado operacional seja indicativo da qualidade do enlace.

Dentro desse contexto, o presente trabalho apresentou uma metodologia para medições de parâmetros que pode ser utilizada pelos provedores de serviços DSL, com o objetivo de qualificar o enlace telefônico do assinante. A qualificação do enlace responde perguntas a cerca do seu estado, ou seja, através da qualificação torna-se possível identificar e localizar falhas ao longo do enlace do assinante. Dessa forma, o provedor terá condições necessárias para informar ao assinante se o seu enlace está habilitado ou não para o transporte do serviço DSL, ou ainda tomar ações para “corrigir” os problemas existentes.

Por esta metodologia, viu-se que os passos importantes no processo de medição são:

- Escolher adequadamente os dispositivos que compõem o *setup* de medição, observando-se as características técnicas, bem como a influência destes no processo de medição.
- Usar um processo de calibração adequado ao procedimento de medição.
- Usar o tratamento estatístico para a observação de coerência dos resultados.

A aplicabilidade desta metodologia foi verificada através de estudos de casos onde foram realizadas medições de impedância de entrada, função de transferência e parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ .

Na campanha de medições, foram realizadas primeiramente, medições quando todos os procedimentos são realizados de acordo com a metodologia proposta. Para esses casos, os resultados das análises estatísticas mostraram que medições realizadas apresentam uma boa coerência e confiabilidade. Adicionalmente, a metodologia foi testada através de comparação dos resultados obtidos com os respectivos equivalentes teóricos fornecidos pelos modelos de linha. Nessas comparações, observou-se que as diferenças entre as curvas médias das medições e as curvas dos modelos utilizados apresentaram, na maioria dos casos, valores de ordem aceitável na prática. Porém, nos casos onde os procedimentos de alguma forma não foram realizados adequadamente, tais diferenças foram de ordem muito elevada, ratificando mais uma vez a aplicabilidade da metodologia.

O uso da metodologia proposta, quando realizada de forma adequada, permite que os dados obtidos nas medições sejam utilizados para muitas finalidades. Entre essas finalidades, destacam-se a validação de modelos de linha através de simulações computacionais, técnicas de estimação de parâmetros para um determinado enlace desconhecido, novas metodologias para qualificação de enlaces baseadas em técnicas computacionais avançadas e metodologias para detecção de *bridged tap*.

## **Sugestões de Trabalhos Futuros**

Tendo este trabalho como referência, outros trabalhos nessa linha de abordagem podem ser desenvolvidos. Dentre os trabalhos futuros, destacam-se:

- Qualificação do enlace através de medições realizadas nas duas extremidades do enlace (DELT). A metodologia realizada no trabalho é baseada em técnicas SELT (medidas em uma extremidade do enlace), entretanto, algumas propriedades do enlace ficam

mascaradas por reflexões e atenuações. Uma maneira alternativa de se estudar as características de um enlace telefônico é por meio de técnicas DELT, que apresentam vantagens comparadas as SELT. Essas vantagens se devem, principalmente, ao fato de que o DELT usa duas unidades de teste, dessa forma, os efeitos de atenuação e reflexão nos sinais de teste são amenizados.

- Detecção de *Bridged taps* usando Classificação Binária. Uma vez que as medições dos parâmetros físicos do enlace do assinante apresentam precisão nos seus resultados, elas podem ser armazenadas em uma base de dados para uso posterior. Uma utilização dessas medições pode ser para a detecção de *bridged tap*. Como as informações contidas na base de dados não dão nenhuma indicação a priori sobre uma possível topologia, a técnica *Data Mining* (Mineração de Dados) pode ser utilizada para extrair informações escondidas sobre a topologia do enlace. E uma das informações importantes para as operadoras é saber se o enlace possui ou não *bridged taps*. No entanto, para o melhor entendimento sobre esse assunto, são mostrados no Anexo C alguns resultados preliminares, utilizando os dados de medições obtidos através da metodologia proposta neste trabalho.

## Referências

- [1] T. Starr, J. M. Cioffi., and P.J. Silverman, “*Understanding Digital Subscriber Line Technology*”, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [2] J. Reis, “*Caracterização de Enlaces Telefônicos para o Transporte de Serviços DSL (Digital Subscriber Line)*”. TCC, Belém-PA, 2006.
- [3] DSL. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/DSL>. Acessado em 03/2007.
- [4] International Telecommunication Union – Telecommunication G.992.1, “*Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers*”, 1999.
- [5] International Telecommunication Union – Telecommunication G.992.2, “*Splitterless Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers*”, 1999.
- [6] MUSE C2.2 – “*Position paper on loop qualification and monitoring outlining general features the developed loop qualification and monitoring solution should fulfill 2004*”.
- [7] S. Galli, and D. L. Waring, “*Loop Makeup Identification Via Single Ended Testing: Beyond Mere Loop Qualification*”, IEEE Journal On Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 5, June 2002.
- [8] M. Nilsson, “*Management of a DSL Copper Network Using Built-in Loop Qualification Tools*”. Master’s degree project, Stockholm, 2005, Páginas 11-31.
- [9] A. Wia, “*Loop Qualification for xDSL*”, Master of Science Thesis in Digital Signal Processing, Ericsson Telecom AB, Stockholm, February 2001.
- [10] K. Wong, T. Aboulnasr, “*Single Ended Loop Characterization*”. IEEE, 1995.
- [11] C. Neus, P. Boets, L. Van Biesen, “*Estimation of the Archivable xDSL Service*”, Brussels, Belgium, 2006.
- [12] J. L. Fang, C. Zeng, and J. Cioffi, “*Bridged Tap Location Estimation*”, Electrical Engineering Department, Stanford University, California, USA, 2005.
- [13] J.J. Werner, “*The HDSL Environment*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No. 6, August, 1991.
- [14] P. Golden, H. Dedieu, K. Jacobsen, “*Fundamentals of DSL Technology*”, Auerbach Publications, 2006.
- [15] S. Galli and K.J. Kerpez, “*Single-Ended Loop Make-Up Identification- Part I: A Method of Analyzing TDR Measurements*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 2, April 2006, pp528-537.

- [16] Paradyne Corporation, “*The DSL Sourcebook*”, The Comprehensive Resource On Digital Subscriber Line Technology. Version 3.1, 2000.
- [17] American National Standard Institute, T1.413-2001, “*Spectrum Management for Loop Transmission System, American National Standard*”, 2001.
- [18] European Telecommunications Standards Institute, ETSI TS 101 388 V1.3.1 (2002-05), “*Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)*” – European Specific Requirements, ETSI Technical Specification, 2002.
- [19] European Telecommunications Standards Institute, ETSI TS 101 524 V1.2.1 (2003-03), “*Symmetric Single Pair High Bitrate Digital Subscriber Line (SDSL)*” – European Specific Requirements, ETSI Technical Specification, 2003.
- [20] G.H. Im, J.J. Werner, “*Effect of Bridged Taps at VDSL Frequencies*”, Lucent Technologies, September 1997.
- [21] Reis J., et al. “*Characterization of Subscriber Local Loop by Measures and Analysis of Frequency and Impulse Responses*”, Broadband Access Communication Technologies, SPIE, Boston, USA, 2006.
- [22] Bostoen Tom, Boets Patrick, “*Estimation of the Transfer Function of a Subscriber Loop by Means of a One-Port Scattering Parameter Measurement at the Central Office*”. IEEE. 2002.
- [23] Galli Stefano, Kerpez J. Kenneth, “*Single-Ended Loop Make-Up Identification. Part I: A Novel Maximum Likelihood Algorithm*”. IEEE, June, 2003.
- [24] Biesen Van Leo, Boets Patrick, Louge Frank, Bostoen Tom, “*Experts System for the Identification and Classification of the Local Loop*”. IMEKO, June 2004.
- [25] Galli Stefano, Kerpez J. Kenneth, “*Single-Ended Loop Make-Up Identification – Part II: Improved Algorithms and Performance Results*”. IEEE Communications Magazine, April 2006.
- [26] P. Golden, H. Dedieu, K. Jacobsen, “*Fundamentals of DSL Technology*”, Auerbach Publications, 2006.
- [27] J.W. Cook, “*Parametric Modeling of Twisted Pair Cables for VDSL*”, ETSI Contribution TD22, Vienna, Áustria, March 1996.
- [28] V.B. Lawrence et al. “*Broadband Access to the Home on Copper*”, Bell Labs Technical Journal, Summer 1996, pp. 100-114, 1996.
- [29] International Standard IEC, “*Multicore and Symmetrical Pair/Quad Cables for Digital Communications*”, Second Edition, 2001.

- [30] W. Chen, “*DSL Simulation Techniques and Standards Development*”, Macmillian Technical Publishing. 1998.
- [31] Jr. C. John, “*Scattering Parameter Concept, Theory and Applications*”, Technical Report 1402-003, University of Southern California. November, 2002.
- [32] T. Bostoen, P.Boets, M. Zekri, L. Van Biesen, T. Pollet, ”*Estimation of the Transfer Function of a Subscriber Loop by Means of One-Port Scattering Parameter Measurement at the Central Office*”, IEEE Journal on Seleted Areas in Communication-Twisted Pair Transmission, Vol. 20, No. 5, pp. 936-948, June 2004.
- [33] V. Belevitch, “*Theory of the promimity effect in multiwire cables Part I*”, Philips Res. Rep., vol. 32, pp. 1643, September 1997.
- [34] J. B. Edson, L. V. Souza, Castro L. S. Agostinho, et al. “*A Methodology for Measurements of Basic Parameters in a xDSL System*”, Broadband Access Communication Technologies, SPIE Vol. 6390 63900M-1,October, 2006.
- [35] Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer. “*Operation Manual*”. Sixth Edition. Japan, May 2003.
- [36] Agilent Technologies White Paper. “*ADSL Copper Loop Measurements*”, 2000.
- [37] Besser L., Gilmore R. “*Practical FR Circuit Design for Modern Wireless Systems*” Vol. 1. Passive Circuits and Systems. Artech House, Boston, USA, 2003.
- [38] International Standard IEC, “*Multicore and Symmetrical Pair/Quad Cables for Digital Communications*”, Second Edition, 2001.
- [39] Agilent 82357B USB/GPIB Interface for Windows. “*Data Sheet*”, Agilent Technologies, 2007.
- [40] Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer. “*Operation Manual*”. Sixth Edition. Japan, May 2003.
- [41] S. Rabinovich, “*Measurement errors and uncertainties: theory and practice*”, 2<sup>nd</sup> ed., Springer-Verlang New York, 1999.
- [42] Iglewicz, B. and Hoaglin, D. C. “*How to Detect and Handle Outliers*”, American Society for Quality Control, Milwaukee, WI. 1993.
- [43] Outliers: <http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/smprimer/outlier/outlier.html>. Acessado em Abril de 2007.
- [44] Gibbons, R. D. “*Statistical Methods for Groundwater Monitoring*”, John Wiley & Sons, New York. 1994.

- [45] EPA/530-R-93-003, “*Statistical Training Course for Ground-Water Monitoring Data Analysis*”, Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington, DC. 1992.
- [46] EA-4/02 Recommendation. “*Expression of the Uncertainty of Measurement Calibration*”, December, 1999.
- [47] P.J. de F. F, “*Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas*”, Visual Books, November, 2001.
- [48] Vuolo, J. H, “*Avaliação e Expressão de Incerteza em Medição*”, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999.

## **Anexo A**

### **Instruções Técnicas para as Medições em DSL**

Este anexo fornece as instruções técnicas necessárias para realização das medições de função de transferência  $H(f)$ , parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  e da impedância de entrada  $Z_{in}$ .

#### **1.0 Medição da Função de Transferência**

Para realizar as medições da função de transferência são necessários os seguintes equipamentos:

- 1 Analisador de Rede (Agilent 4395A)
- 1 Conjunto de Teste de Transmissão/Reflexão (Agilent 87512A)
- 2 Cabos BNC (Agilent 8120)
- 2 BALUNS 50Ω/100Ω ( North Hills 0301BB)
- 1 Placa GPIB (82357 USB/GPIB)
- 1 Computador (com software Agilent IO Control)
- 1 DUT (Bobina de cabo ou Simulador de Linha ADSL 400E3)
- 2 Conectores RJ45 ou RJ11
- 3 Cargas de Compensação Padrão (ABERTO, CURTO e CARGA)

#### **1.1 Montagem e Configuração do *Setup***

Para obter-se uma melhor precisão das medidas, o analisador de rede Agilent 4395A deverá ser ligado no mínimo 30 minutos antes da montagem e configuração do *setup*.

##### **1.1.1 Montagem do *Setup***

O analisador de rede (Agilent 4395A) é dotado de cinco portas (DC *Source*, RFOUT, R50Ω, A50Ω e B50Ω), onde a primeira etapa é adaptar o conjunto de teste (Agilent 87512A)

nas porta RFOUT, R50Ω e A50 Ω. Feito isso, adaptam-se os cabos BNC (Agilent 8120) na porta do conjunto de teste e na porta B50 Ω do analisador de rede que servirá de saída para o sinal a ser medido.

Para terminar a primeira etapa do *setup* devem-se conectar os dois BALUNS na outras extremidades dos cabos BNC. Como o BALUN é um casador de impedância de 50Ω/100Ω deve-se conectar o lado de 50Ω no cabo BNC, haja vista que o conjunto de teste (Agilent 87512A) envia um sinal com impedância de 50Ω, e conseqüentemente, o lado de 100Ω ficará para a conexão do DUT. Desta mesma maneira coloca-se o outro BALUN na porta de entrada B50Ω. Deve-se ainda conectar o analisador de rede ao computador através da placa GPIB 82357.

### 1.1.2 Configuração do Analisador de Rede 4395A

A segunda etapa do *setup* é a configuração do analisador de rede para a medição da função de transferência. Os procedimentos necessários são:

#### 1.1.2.1 Configurar o tipo de analisador a ser utilizado

Para escolher o tipo de analisador é necessário, pressionar o botão MEAS do Agilent 4395A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- *Analyzer Type*
- *Network Analyzer*

#### 1.1.2.2 Configurar o parâmetro a ser medido

Para escolher o parâmetro a ser medido é necessário pressionar o botão MEAS do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor a seguinte opção:

- Parâmetro S – Trans: *FWD S<sub>21</sub>* [B/R]

### 1.1.2.3 Configurar o formato a ser utilizado

Após a configuração do parâmetro a ser medido, é necessário configurar o formato do sinal utilizado, para isso, deve-se pressionar o botão FORMAT do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- Magnitude em Log (*Log Mag*) para o canal 1
- Fase em Radiano (*Phase*) para o canal 2

### 1.1.2.4 Ativar o canal a ser utilizado

Para visualizar simultaneamente nos dois canais, os sinais escolhidos, deve-se pressionar o botão DISPLAY do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor a seguinte opção:

- Dual CHAN

### 1.1.2.5 Configurar a faixa de frequência a ser utilizada

Para definir a faixa de frequência utilizada nas medições de função de transferência, devem-se pressionar os seguintes botões do analisador de rede 4395A:

- Inicial (*Start*) : 4.3125 kHz
- Final (*Stop*): 1.104 MHz (ADSL) ou 2.208 MHz (ADSL 2+)

### 1.1.2.6 Configurar a largura de banda BW a ser utilizada

Para definir a largura de banda utilizada nas medições de função de transferência, devem-se pressionar o botão BW/AVG do analisador de rede 4395A, e seguida digitar o valor escolhido:

- BW/Avg: 100 Hz

### 1.1.2.7 Configurar o número de pontos a ser utilizado

Logo após a definição da largura de banda, define-se o número de pontos, apertando o botão SWEEP do analisador de rede 4395A, em seguida escolher no visor a opção:

- (*Number of points*): 256 (ADSL) ou 512 (ADSL 2+)

Para confirmar o valor digitado, é necessário pressionar o botão XL que se encontra junto ao teclado numérico do analisador 4395A.

### 1.1.2.8 Executar a escala automática

Para executar a escala automática para as medições de função de transferência, deve-se pressionar o botão SCALE REF do analisador de rede, em seguida escolher no visor a opção:

- *Auto Scale*

## 1.1.3 Calibração

O terceiro passo para o *setup* da função de transferência ser concluído, é a realização dos procedimentos de calibração descritos abaixo:

### 1.1.3.1 Realizar a Calibração Resposta e Isolação (*Response & Isolation Calibration*)

- Pressionar botão CAL do Agilent 4395A e depois selecionar no visor a seguinte opção:
  - CALIBRATE MENU REPOSE & ISOL'N .
- Pressionar RESPONSE.
- Conectar as seguintes cargas padrões nas portas balanceadas de 100  $\Omega$  do BALUNS , então pressionar a tecla correspondente:

Tipo de Medida	Carga Padrão	Pressionar
Medida de Transmissão	THRU	THRU
Medida de Reflexão	OPEN	OPEN
	SHORT	SHORT

- Pressionar **DONE: RESPONSE**.
- Conectar a carga padrão de 100 ou 120  $\Omega$  para isolação (LOAD) nas portas balanceadas de 100  $\Omega$  do BALUNs.
- Pressionar **ISOL'N**.
- Pressionar **DONE RESP ISOL'N CAL**.

### 1.1.4 Medição

Após a calibração, basta conectar-se o cabo ou simulador usando os conectores RJ45 ou RJ11 no analisador de rede para realizar as medições. Caso sejam feitas medições com o simulador de linha ADSL 400E3, deve-se realizar algumas configurações para obterem-se as medidas.

#### 1.1.4.1 Configuração do Simulador ADSL 400E3

Para seleccionar o enlace no simulador, deve-se ter um programa apropriado. Como por exemplo, é utilizado o programa chamado DSL 400E3 que permite simular os enlaces padrões europeus e também enlaces arbitrários. No entanto, antes de começar a configuração, deve-se ligar o simulador de linha ao computador, através do cabo *flat* (serial/paralelo), para que haja comunicação entre eles.

Ao abri-se o programa DSL 400E3, deve-se clicar em na opção *next* para que o reconhecimento entre si seja efetuado. Feito o reconhecimento clica-se na opção *finish*, logo em seguida aparecerá uma tela para que se possa escolher o comprimento do enlace e o tipo

de bitola. Após escolher o enlace a ser utilizado clicar na opção *download* para finalizar a configuração do simulador.

### 1.1.5 Obtenção dos Dados

Realizada a montagem e configuração do *setup*, bem como os procedimentos de calibração necessários para as medições de função de transferência, conectam-se as duas extremidades do cabo real, sendo uma extremidade na porta do BALUN conectado ao conjunto de teste 87512A, e a outra na porta do BALUN conectado na porta B50Ω do analisador de rede 4395A. No caso do simulador de linha ADSL 400E3, conecta-se a sua porta A ao BALUN do conjunto de teste, e a sua porta B ao segundo BALUN conectado na porta B50Ω do analisador de rede.

Para se obter os dados de medições, as informações podem ser transferidas do analisador de rede para o computador através da placa GPIB, para isso é necessário conectar a placa na porta GPIB do Agilent 4395A na porta USB do computador. Feito isso, é possível salvar as informações, usando o programa *Microsoft Excel Intuilink* (responsável por capturar os dados do analisador de rede).

## 2.0. Parâmetro de Espalhamento $S_{11}$

Para realizar as medições do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  são necessários os seguintes equipamentos:

- 1 Analisador de Rede (Agilent 4395A)
- 1 Conjunto de Teste de Transmissão/Reflexão (Agilent 87512A)
- 1 Cabo BNC (Agilent 8120)
- 1 BALUN 50Ω/100Ω ( North Hills 0301BB)
- 1 Placa GPIB (82357 USB/GPIB)
- 1 Computador (com software Agilent IO Control)
- 1 DUT (Bobina de cabo ou Simulador de Linha ADSL 400E3)
- 1 Conector RJ45 ou RJ11
- 3 Cargas de Compensação padrão (ABERTO, CURTO e CARGA)

## 2.1 Montagem e Configuração do Setup

### 2.1.1 Montagem do Setup

Para fazer medição do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  utiliza-se, também, o analisador de rede, porém alguns procedimentos diferentes deverão ser tomados.

Para a montagem do *setup* de medição apenas o conjunto de teste 87512 é utilizado como entrada e saída do sinal. Portanto, usa-se apenas um BALUN e um cabo BNC, ao contrário da função de transferência.

Na montagem do *setup* deve-se conectar o BALUN na extremidade do cabo BNC. Como o BALUN é um casador de impedância de  $50\Omega/100\Omega$  deve-se conectar o lado de  $50\Omega$  no cabo BNC, haja vista que o conjunto de teste (Agilent 87512A) envia um sinal com impedância de  $50\Omega$ , e conseqüentemente, o lado de  $100\Omega$  ficara para a conexão do DUT.

### 2.1.2 Configuração do Analisador de Rede 4395A

A segunda etapa do *setup* é a configuração do analisador de rede para a medição do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ . Os procedimentos necessários são:

#### 2.1.2.1 Configurar o tipo de analisador a ser utilizado

Para escolher o tipo de analisador é necessário, pressionar o botão MEAS do Agilent 4395A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- *Analyzer Type*
- *Network Analyzer*

#### 2.1.2.2 Configurar o parâmetro a ser medido

Para escolher o parâmetro a ser medido é necessário, pressionar o botão MEAS do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor a seguinte opção:

- Parâmetro S – Trans:  $FWD S_{11}$  [A/R]

#### 2.1.2.3 Configurar o formato a ser utilizado

Após a configuração do parâmetro, é necessário configurar o formato do sinal a ser medido, para isso, deve-se pressionar o botão FORMAT do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- Magnitude em Log (*Log Mag*) para o canal 1
- Fase em Radiano (*Phase*) para o canal 2

#### 2.1.2.4 Ativar o canal a ser utilizado

Para visualizar simultaneamente nos dois canais, os sinais escolhidos, deve-se pressionar o botão DISPLAY do analisador de rede 4395A, e escolhe no visor a seguinte opção:

- Dual CHAN

#### 2.1.2.5 Configurar a faixa de frequência a ser utilizada

Para definir a faixa de frequência utilizada nas medições de parâmetro de espalhamento, devem-se pressionar os seguintes botões do analisador de rede 4395A:

- Inicial (*Start*) : 4.3125 kHz
- Final (*Stop*): 1.104 MHz (ADSL) ou 2.208 MHz (ADSL 2+)

#### 2.1.2.6 Configurar a largura de banda BW a ser utilizada

Para definir a largura de banda utilizada nas medições de função de transferência, devem-se pressionar o botão BW/AVG do analisador de rede 4395A, e seguida digitar o valor escolhido:

- BW/Avg: 100 Hz

### 2.1.2.7 Configurar o número de pontos a ser utilizado

Logo após a definição da largura de banda, define-se o número de pontos, apertando o botão SWEET do analisador de rede 4395A, em seguida escolher no visor a opção:

- (*Number of points*): 256 (ADSL) ou 512 (ADSL 2+)

Para confirmar o valor digitado, é necessário pressionar o botão xl que se encontra junto ao teclado numérico do analisador 4395A.

### 2.1.2.8 Executar a escala automática

Para executar a escala automática para as medições de parâmetro de espalhamento, deve-se pressionar o botão SCALE REF do analisador de rede, em seguida escolher no visor a opção:

- *Auto Scale*

## 2.1.3 Calibração

O terceiro passo para o *setup* do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  ser concluído, é a realização dos procedimentos de calibração descritos abaixo:

### 2.1.3.1 Realizar uma Calibração Porta-1 $S_{11}$ (*S<sub>11</sub> 1-Port Calibration*)

- Pressionar botão CAL do Agilent 4395A e depois selecionar no visor a seguinte opção:
  - **CALIBRATE MENU S11 1-PORT.**
- Conectar a carga padrão OPEN para porta 1.

- Pressionar **OPEN**.
- Desconectar a carga padrão OPEN. Então conectar a carga padrão SHORT para a porta 1.
- Pressionar **SHORT**.
- Desconectar a carga padrão SHORT e conectar a carga padrão LOAD de 100 ou 120  $\Omega$ .
- Pressionar **LOAD**.
- Pressionar **DONE 1-PORT CAL** para completar a calibração.

## 2.1.4 Medição

Após a calibração, basta conectar-se o cabo ou simulador usando os conectores RJ45 ou RJ11 no analisador de rede para realizar as medições. Caso sejam feitas medições com o simulador de linha ADSL 400E3, deve-se realizar algumas configurações para obterem-se as medidas.

### 2.1.4.1 Configuração do Simulador ADSL 400E3

Para seleccionar o enlace no simulador, deve-se ter um programa apropriado. Como por exemplo, é utilizado o programa chamado DSL 400E3 que permite simular os enlaces padrões europeus e também enlaces arbitrários. No entanto, antes de começar a configuração, deve-se ligar o simulador de linha ao computador, através do cabo *flat* (serial/paralelo), para que haja comunicação entre eles.

Ao abri-se o programa DSL 400E3, deve-se clicar em na opção *next* para que o reconhecimento entre si seja efetuado. Feito o reconhecimento clica-se na opção *finish*, logo em seguida aparecerá uma tela para que se possa escolher o comprimento do enlace e o tipo

de bitola. Após escolher o enlace a ser utilizado clicar na opção *download* para finalizar a configuração do simulador.

### 2.1.5 Obtenção dos Dados

Realizada a montagem e configuração do *setup*, bem como os procedimentos de calibração necessários para as medições do parâmetro de espalhamento S11 conectam-se as duas extremidades do cabo real, sendo uma extremidade na porta do BALUN conectado ao conjunto de teste 87512A, e a outra extremidade conecta-se as terminações padrões: aberto, curto e carga (100 ou 120  $\Omega$ ). No caso do simulador de linha ADSL 400E3, conecta-se a sua porta A ao BALUN do conjunto de teste, e na sua porta B conecta-se as cargas padrões.

Para se obter os dados de medições, as informações podem ser transferidas do analisador de rede para o computador através da placa GPIB, para isso é necessário conectar a placa na porta GPIB do Agilent 4395A na porta USB do computador. Feito isso, é possível salvar as informações, usando o programa *Microsoft Excel Intuilink* (responsável por capturar os dados do analisador de rede).

### 3.0. Impedância de Entrada $Z_{in}$

Para realizar as medições de impedância de entrada são necessários os seguintes equipamentos:

- 1 Analisador de Impedância de Precisão (Agilent 4294A)
- 1 Teste Fixo (Agilent 16047E)
- 1 BALUN 50 $\Omega$ /100 $\Omega$  ( North Hills 0301BB)
- 1 Placa GPIB (82357 USB/GPIB)
- 1 Cabo Bico Jacaré/BNC
- 1 Computador (com software Agilent IO Control)
- 1 DUT (Bobina de cabo ou Simulador de Linha ADSL 400E3)
- 1 Conector RJ45 ou RJ11
- 3 Cargas de Compensação padrão (ABERTO, CURTO e CARGA)

### 3.1 Montagem e Configuração do Setup

Para obter-se uma melhor precisão das medidas, o analisador de impedância de precisão Agilent 4294A deverá ser ligado no mínimo 30 minutos antes da montagem e configuração do *setup*.

#### 3.1.1 Montagem do Setup

O analisador de impedância 4294A é dotado de 4 portas ( Lcur, Lport, Hport e Hcur) que se adaptam ao teste fixo 16047E, que também possui 4 portas. Conecta-se a porta de  $50\Omega$  do BALUN ao 16047E através de um cabo bico de jacaré/BNC.

Para terminar a primeira etapa do *setup* deve-se conectar o analisador de impedância de precisão ao computador através da placa de aquisição de dados 82357 USB/GPIB.

#### 3.1.2 Configuração do Analisador de Impedância de Precisão 4294A

A segunda etapa do *setup* é a configuração do analisador de impedância para a medição da impedância de entrada  $Z_{in}$ . Os procedimentos necessários são:

##### 3.1.2.1 Configurar o tipo de medida a ser utilizado

Para escolher o tipo de medida a ser utilizado, pressionar o botão MEAS do Agilent 4294A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- Magnitude:  $|Z|$  (*Mag*)
- Fase em Radiano (*Phase*)

##### 3.1.2.2 Configurar o formato da medida a ser utilizada

Para escolher o formato da medida a ser utilizada, pressionar o botão FORMAT do Agilent 4294A, e escolhe no visor as seguintes opções:

- Lin (*Chan A*)
- Log (*Chan B*)

Para poder visualizar os dois canais simultaneamente no analisador 4294A, deve-se apertar o botão DISPLAY, em seguida escolher no visor a opção *Split ON*.

#### 3.1.2.3 Configurar a faixa de frequência a ser utilizada

Para definir a faixa de frequência utilizada nas medições de impedância de entrada, devem-se pressionar os seguintes botões do analisador de impedância 4294A:

- Inicial (*Start*) : 4.3125 kHz
- Final (*Stop*): 1.104 MHz (ADSL) ou 2.208 MHz (ADSL 2+)

#### 3.1.2.4 Configurar o número de pontos a ser utilizado

Logo após a definição da faixa de frequência, define-se o número de pontos, apertando o botão SWEEP do analisador de impedância 4294A, em seguida escolher no visor a opção:

- (*Number of points*): 256 (ADSL) ou 512 (ADSL 2+)

Para confirmar o valor digitado, é necessário pressionar o botão  $\chi$  que se encontra junto ao teclado numérico do analisador 4294A.

#### 3.1.2.5 Executar a escala automática

Para executar a escala automática para as medições de impedância de entrada, deve-se pressionar o botão SCALE REF do analisador 4294A, em seguida escolher no visor a opção:

- *Auto Scale*

### 3.1.3 Calibração

O terceiro passo para o *setup* da impedância de entrada ser concluído, é a realização dos procedimentos de calibração descritos abaixo:

#### 3.1.3.1 Realizar uma Calibração Compensação Fixa (*Fixture Compensation Calibration*)

Pressionar botão CAL do Agilent 4294A e depois seleccionar no visor a seguinte opção:

- CALIBRATE MENU FIXTURE COMP.
- Conectar a carga padrão OPEN.
- Pressionar OPEN.
- Desconectar a carga padrão OPEN, então conectar a carga padrão SHORT.
- Pressionar SHORT.
- Desconectar a carga padrão SHORT e conectar a carga padrão LOAD.
- Pressionar LOAD.
- Pressionar DONE FIXTURE COMP para completar a calibração.

### 3.1.4 Medição

Após a calibração, basta conectar-se o cabo ou simulador usando os conectores RJ45 ou RJ11 no analisador de impedância para realizar as medições. Caso sejam feitas medições

com o simulador de linha ADSL 400E3, deve-se realizar algumas configurações no simulador DSL 400E3 para obterem-se as medidas.

#### 3.1.4.1 Configuração do Simulador ADSL 400E3

Antes de começar a configuração, deve-se ligar o simulador de linha ao computador, através do cabo *flat* (serial/paralelo), para que haja comunicação entre eles.

Ao abri-se o programa DSL 400E3, deve-se clicar em na opção *next* para que o reconhecimento entre si seja efetuado. Feito o reconhecimento clica-se na opção *finish*, logo em seguida aparecerá uma tela para que se possa escolher o comprimento do enlace e o tipo de bitola. Após escolher o enlace a ser utilizado clicar na opção *download* para finalizar a configuração do simulador.

### 3.1.5 Obtenção dos Dados

Realizada a montagem e configuração do *setup*, bem como os procedimentos de calibração necessários para as medições da impedância de entrada, conectam-se as duas extremidades do cabo real, sendo uma extremidade na porta do BALUN conectada ao teste fixo 16047E, e a outra extremidade conecta-se as terminações padrões: aberto, curto e carga (100 ou 120  $\Omega$ ). No caso do simulador de linha ADSL 400E3, conecta-se a sua porta A ao BALUN do teste fixo, e na sua porta B conecta-se as cargas padrões.

Para se obter os dados de medições, as informações podem ser transferidas do analisador de impedância de precisão 4294A para o computador através da placa GPIB. As informações serão salvas usando o programa *Microsoft Excel Intuilink* (responsável por capturar os dados do analisador de impedância).

## Anexo B

### Códigos das Rotinas em Matlab

Neste anexo são mostradas as linhas de código das rotinas criadas em MATLAB, para realização do Teste de Dixon, para o cálculo do desvio padrão e da incerteza nas medições obtidas através da metodologia proposta.

#### 1.0 Teste de Dixon

```
% Teste de Dixon

clc
clear
close all

file1 = 'Medida_A.xls';
file2 = 'Medida_B.xls';
file3 = 'Medida_C.xls';

arquivosaidareal = 'teste_dixon_real.txt';
arquivosaidaimag = 'teste_dixon_imag.txt';

%valor crítico para um nível de 95 % de confiança
vc = 0.970;

A1 = xlsread(file1, 'A16:C271'); % carrega o arquivo
A2 = xlsread(file2, 'A16:C271'); % carrega o arquivo
A3 = xlsread(file3, 'A16:C271'); % carrega o arquivo

freq1 = A1(:,1); % frequência
preal1 = A1(:,2); % parte real
pimag1 = A1(:,3); % parte imaginária

freq2 = A2(:,1); % frequência
preal2 = A2(:,2); % parte real
pimag2 = A2(:,3); % parte imaginária

freq3 = A3(:,1); % frequência
preal3 = A3(:,2); % parte real
pimag3 = A3(:,3); % parte imaginária
```

```

stop = length(freq1)

for i=1:stop

    preal = [preal1(i) preal2(i) preal3(i)];
    B = sort(preal);
    Zhreal = (B(3)-B(2))/(B(3)-B(1));
    Zlreal = (B(2)-B(1))/(B(3)-B(1));
    pimag = [pimag1(i) pimag2(i) pimag3(i)];
    C = sort(pimag);
    Zhimag = (C(3)-C(2))/(C(3)-C(1));
    Zlimag = (C(2)-C(1))/(C(3)-C(1));

    if (Zhreal > vc)
        B(3) = 0;
    end

    if (Zlreal > vc)
        B(1) = 0;
    end

    if (Zhimag > vc)
        C(3) = 0;
    end

    if (Zlimag > vc)
        C(1) = 0;
    end

    if i==1
        fidreal = fopen(arquivosaidareal,'w');
        fidimag = fopen(arquivosaidaimag,'w');
    else
        fidreal = fopen(arquivosaidareal,'a');
        fidimag = fopen(arquivosaidaimag,'a');
    end

    fprintf(fidreal,'%E\t%E\t%E\n', B(1), B(2), B(3));
    fclose(fidreal)

    fprintf(fidimag,'%E\t%E\t%E\n', C(1), C(2), C(3));
    fclose(fidimag)

end

%encontra o total de ocorrencias de 0 nos arquivos
arqreal = load(arquivosaidareal);
arqimag = load(arquivosaidaimag);

nreal = find(arqreal == 0);

```

```

disp('O número de ocorrências fora do padrão na parte real é:')
quantidade_real = length(nreal)

nimag = find(arqimag == 0);
disp('O número de ocorrências fora do padrão na parte imaginária é:')
quantidade_imaginaria = length(nimag)

disp('Teste de Dixon realizado !')

```

## 1.1 Desvio Padrão

```

% Cálculo_Desvio Padrão
%
% Calcula o desvio padrão das partes real e imaginárias das
% medidas realizadas
%

clc
clear
close all

% arquivos de entrada
file1 = 'Medida_A.xls';
file2 = 'Medida_B.xls';
file3 = 'Medida_C.xls';

% arquivo de saída
arquivosaida = 'Arquivo_sdr_sdi.txt';

A1 = xlsread(file1, 'A16:C271'); % carrega o arquivo
A2 = xlsread(file2, 'A16:C271'); % carrega o arquivo
A3 = xlsread(file3, 'A16:C271'); % carrega o arquivo

freq1 = A1(:,1); % frequência - 1
preal1 = A1(:,2); % parte real - 1
pimag1 = A1(:,3); % parte imaginária - 1

freq2 = A2(:,1); % frequência - 2
preal2 = A2(:,2); % parte real - 2
pimag2 = A2(:,3); % parte imaginária - 2

freq3 = A3(:,1); % frequência - 3
preal3 = A3(:,2); % parte real - 3
pimag3 = A3(:,3); % parte imaginária - 3

% tira a média
freq = (freq1 + freq2 + freq3)/3;

```

```

%freq = (freq1 + freq2)/2;
stop = length(freq)

for i=1:stop

    % cria vetor para cálculo do desvio padrão, parte real
    prealvetor = [preal1(i) preal2(i) preal3(i)];
    %prealvetor = [preal1(i) preal2(i)];
    %desvio padrão, linear
    sd_preal(i) = std(prealvetor);

    % cria vetor para cálculo do desvio padrão, parte imag
    pimagvetor = [pimag1(i) pimag2(i) pimag3(i)];
    %pimagvetor = [pimag1(i) pimag2(i)];
    %desvio padrão, linear
    sd_pimag(i) = std(pimagvetor);

    %realiza a criação do arquivo de saída e escreve no formato de tabela
    if i==1
        fid1 = fopen(arquivosaida,'w');
    else
        fid1 = fopen(arquivosaida,'a');
    end

    % salva em arquivo
    % formato frequencia - desv padrão real - desv padrão imag
    fprintf(fid1,'%E\t%E\t%E\n', freq(i), sd_preal(i), sd_pimag(i));
    fclose(fid1)

end

```

## 1.2 Incerteza

```

% Cálculo da incerteza para 3 medições

clc
clear

% Entrar com o valor do Desvio padrão
S = ;

% Incerteza padrão do instrumento
ux1 = 0.0055;

% Número de medições
n = 3;

% Valor de k, lido na tabela de Student

```

```

k = 4.53;

% grau de liberdade de ux1
v1 = inf;

% grau de liberdade de ux2
v2 = n - 1;

% cálculo da incerteza do mensurando
ux2 = S/(sqrt(n));

% cálculo da incerteza combinada
uc = sqrt((ux1)^2 + (ux2)^2);

% cálculo da incerteza expandida
Uc = k * uc;

% cálculo do grau de liberdade efetivo
veff = ((uc)^4)/(( (ux1^4)/v1 )+( (ux2^4)/v2) );

fprintf(1,'O valor de ux2 é %f\n',ux2)
fprintf(1,'O valor de uc é %f\n',uc)
fprintf(1,'O valor de veff é %f\n',veff)
fprintf(1,'O valor de Uc é %f\n',Uc)

```

## Anexo C

### Mineração de Dados: Classificação Binária

A classificação binária permite detectar *bridged taps* em grandes bases de dados utilizando modelos de classificadores. Diante disso, utilizaram-se alguns classificadores para construção de um modelo, a partir da base de dados da campanha de medições realizadas neste trabalho. Porém, vale ressaltar que os resultados obtidos foram referentes aos cenários utilizados nesta metodologia; como somente o cenário ETSI#8 possui uma topologia com presença de *bridged taps*, os classificadores foram treinados utilizando somente um enlace dessa natureza. Para um melhor resultado, seriam necessárias mais medições com diferentes enlaces contendo *bridged taps*. Embora não seja comum apresentar exemplos nessa seção, a seguir serão apresentados os resultados preliminares obtidos para o processo de mineração citado. No entanto, antes de mostrar esses resultados é importante destacar alguns pontos:

- Utilizou-se uma base de dados de medições com 1.500 ocorrências, referentes aos parâmetros utilizados neste trabalho.
- Dividiu-se essa base de dados em três conjuntos independentes: conjunto de treinamento (dados de treino com 500 ocorrências), conjunto de validação (dados de validação com 500 ocorrências) e conjunto de teste (dados de teste com 500 ocorrências).
- Os classificadores utilizados foram: Árvore de decisão J4.8, ANN (*Artificial Neural Network*) e K-NN (*K-Nearest Neighbors*) com K=5.
- O ambiente utilizado na construção dos classificadores foi o software WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*).
- As classes criadas foram: 0 (*sem bridged tap*) e 1 (*com bridged tap*).

❖ Classificador: J4.8

Tempo obtido na Construção do Modelo: 0,94 segundos.

Utilização do conjunto de Validação:

Instâncias Classificadas Corretamente	483	96,6%
Instâncias Classificadas Incorretamente	17	3,4%

Utilização do conjunto de Teste:

Instâncias Classificadas Corretamente	491	98,2%
Instâncias Classificadas Incorretamente	9	1,8%

❖ Classificador: ANN

Tempo obtido na Construção do Modelo: 984,56 segundos.

Utilização do conjunto de Validação:

Instâncias Classificadas Corretamente	484	96,8%
Instâncias Classificadas Incorretamente	16	3,2%

Utilização do conjunto de Teste:

Instâncias Classificadas Corretamente	483	96,6%
Instâncias Classificadas Incorretamente	17	3,4%

❖ Classificador: K-NN

Tempo obtido na Construção do Modelo: 0,02 segundos.

Utilização do conjunto de Validação:

Instâncias Classificadas Corretamente	492	98,4%
Instâncias Classificadas Incorretamente	16	1,6%

Utilização do conjunto de Teste:

Instâncias Classificadas Corretamente	495	99%
Instâncias Classificadas Incorretamente	5	1%

Analisando os resultados obtidos através dos classificadores escolhidos, percebe-se que a quantidade de instâncias classificadas corretamente, quando se usou o conjunto de teste, foi de ordem elevada. Porém, o melhor resultado foi do classificador K-NN, ou seja, este classificador tem a probabilidade de 99% de classificar corretamente enlaces com presença *bridged tap*. Diante desses resultados, demonstra-se que a aplicação desses classificadores na detecção de *bridged tap* pode ser utilizada. No entanto, como estes resultados são preliminares, é necessária uma quantidade maior de dados de medições, para uma análise mais confiável na escolha do melhor classificador realmente a ser utilizado. Como sugestão propõe-se um estudo mais avançado neste assunto.