



**UFPA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

---

*Software para Qualificação de Enlaces em Sistemas xDSL:  
Abordagem por Algoritmos Genéticos*

*Éder Torres Patrício*

2. semestre / 2006

---

Centro Tecnológico  
Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará

Universidade Federal do Pará  
Centro Tecnológico  
Engenharia da Computação

*Éder Torres Patrício*

*Software para Qualificação de Enlaces em Sistemas xDSL:  
Abordagem por Algoritmos Genéticos*

Trabalho submetido ao Colegiado do Curso de  
Engenharia da Computação para obtenção do  
grau de Engenheiro da Computação

**Orientador: Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa**  
**Doutor em Engenharia Elétrica - UNICAMP**

**Co-orientador: Msc. Claudomiro de Souza de Sales Junior**  
**Mestre em Engenharia Elétrica - UFPA**

Belém - PA  
2006

## Resumo

Como a necessidade por conexões de Internet mais rápidas cresceu nos anos 90 ficou óbvio que nem os modems *dialup* ou a tecnologia ISDN (*Integrated Services Digital Network*) ofereceriam taxas de bits suficientes para atender a demanda dos clientes. Nesse contexto surgiu a necessidade de se alcançar taxas de bits maiores em relação às fornecidas pela conexão tradicional discada. Dentre as soluções encontradas para acesso à Internet em alta velocidade, destaca-se a tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*) que utiliza a infraestrutura telefônica existente.

Para que o serviço DSL seja oferecido com excelente qualidade ao assinante, é de fundamental interesse para as companhias telefônicas conhecer o estado do enlace telefônico desse assinante. De posse das informações a cerca do enlace, as companhias telefônicas podem avaliar a habilidade que o enlace apresenta em transportar altas taxas de bits, ou seja, se o serviço DSL poderá ser oferecido com a qualidade desejada.

Portanto, este trabalho apresenta o projeto de um *software* para qualificação de enlaces DSL (ADSL - *Asymmetric Digital Subscriber Line*), utilizando otimização através de algoritmos genéticos. É apresentada a teoria de sistemas DSL e a estrutura que compõe o algoritmo genético utilizado, bem como a metodologia aplicada à integração dessas duas teorias.

Os resultados obtidos pelo *software* são analisados segundo uma métrica de desempenho adotada e através da comparação com dados considerados referências padrões para o *software*.

Palavras-chaves: DSL, algoritmo genético, qualificação de enlaces.

# Sumário

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>10</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2 Sistemas xDSL</b>	<b>14</b>
2.1 Sistemas xDSL e Modelamento . . . . .	15
2.1.1 Modulação . . . . .	16
2.2 ADSL - <i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> . . . . .	17
2.2.1 Definições e Aplicações Primárias . . . . .	17
2.2.2 Propriedades espectrais e coexistência com outros serviços . . . . .	17
2.2.3 Modulação, codificação e decodificação . . . . .	20
2.2.4 Vantagens e Desvantagens de ADSL . . . . .	21
2.3 Qualificação de Enlaces em Sistemas DSL . . . . .	21
2.3.1 Qualificação de Enlaces . . . . .	22
2.4 Modelagem do Enlace de Par Trançado . . . . .	25
2.4.1 Parâmetros Primários e Secundários . . . . .	25
2.4.2 Representação por Quadripolo - Parâmetros ABCD . . . . .	27
2.4.3 Função de Transferência . . . . .	29
2.4.4 Parâmetro de Espalhamento ( $S_{11}$ ) . . . . .	30
2.4.5 Modelo de Linha VUB0 . . . . .	33
<b>3 Algoritmo Genético</b>	<b>35</b>
3.1 Características Gerais . . . . .	35

3.1.1	Definições . . . . .	36
3.1.2	Funcionamento . . . . .	37
3.2	Parâmetros de Configuração do AG . . . . .	40
3.2.1	Tamanho da População . . . . .	40
3.2.2	Taxa ou Probabilidade de Cruzamento . . . . .	41
3.2.3	Taxa ou Probabilidade de Mutação . . . . .	41
3.3	Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos . . . . .	41
3.3.1	Vantagens dos Algoritmos Genéticos . . . . .	41
3.3.2	Desvantagens dos Algoritmos Genéticos . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Aplicação de Algoritmos Genéticos em Sistemas xDSL</b>	<b>43</b>
4.1	Descrição do Problema . . . . .	43
4.2	Procedimento Teórico para Otimização . . . . .	43
4.2.1	Estrutura do Enlace . . . . .	44
4.2.2	Função Custo . . . . .	44
4.2.3	Definição do Indivíduo . . . . .	47
4.3	Considerações sobre Qualificação SELT . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1	Estrutura do Aplicativo . . . . .	49
5.2	Modelagem UML ( <i>Unified Modeling Language</i> ) . . . . .	49
5.2.1	Diagrama de Classes . . . . .	49
5.3	Parâmetros de Configuração do Algoritmo Genético . . . . .	50
5.4	Análise dos Resultados . . . . .	51
5.4.1	Análise dos Resultados da Qualificação por SELT . . . . .	51
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>67</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>70</b>

<b>A</b>	<b>Enlaces ETSI</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>Diagrama de Classes</b>	<b>72</b>
<b>C</b>	<b>Tabelas Comparativas</b>	<b>73</b>

## Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros para simulação . . . . .	51
5.2	Resumo dos resultados . . . . .	64
C.1	Tabela de simulações para ETSI#1 parte 1 . . . . .	74
C.2	Tabela de simulações para ETSI#1 parte 2 . . . . .	75
C.3	Erro e desvio padrão para ETSI#1 . . . . .	75
C.4	Tabela de simulações para ETSI#2 parte 1 . . . . .	76
C.5	Tabela de simulações para ETSI#2 parte 2 . . . . .	77
C.6	Erro e desvio padrão para ETSI#2 . . . . .	77
C.7	Tabela de simulações para ETSI#3 parte 1 . . . . .	78
C.8	Tabela de simulações para ETSI#3 parte 2 . . . . .	79
C.9	Erro e desvio padrão para ETSI#3 . . . . .	79
C.10	Tabela de simulações para ETSI#4 parte 1 . . . . .	80
C.11	Tabela de simulações para ETSI#4 parte 2 . . . . .	81
C.12	Erros (%) para ETSI#4 . . . . .	82
C.13	Erro e desvio padrão para ETSI#4 . . . . .	83
C.14	Tabela de simulações para ETSI#6 parte 1 . . . . .	84
C.15	Tabela de simulações para ETSI#6 parte 2 . . . . .	85
C.16	Erros (%) para ETSI#6 . . . . .	86
C.17	Erro e desvio padrão para ETSI#6 . . . . .	87
C.18	Tabela de simulações para ETSI#7 parte 1 . . . . .	88
C.19	Tabela de simulações para ETSI#7 parte 2 . . . . .	89
C.20	Erros (%) para ETSI#7 . . . . .	90

C.21 Erro e desvio padrão para ETSI#7 . . . . .	91
---	----



## Lista de Figuras

2.1	Esquemático básico de um sistema DSL . . . . .	15
2.2	Modos de operação FDM (a) e ECH (b) . . . . .	19
2.3	Funcionamento de um sistemas QAM de 4 bits . . . . .	21
2.4	Configurações de Testes SELT e DELT . . . . .	24
2.5	Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão . . . . .	25
2.6	Representação em Quadripolo de uma seção de cabo de par trançado . . .	27
2.7	Representação completa de um Quadripolo de um enlace DSL simples . .	29
2.8	Quadripolo caracterizado por uma matriz S . . . . .	30
2.9	Circuito elétrico de um enlace DSL típico . . . . .	31
2.10	Circuito elétrico simplificado de um enlace DSL típico . . . . .	32
2.11	Representação de uma linha de fios paralelos . . . . .	33
3.1	Funcionamento de um algoritmo genético . . . . .	38
4.1	Estrutura do Enlace ( <i>Makeup</i> ) . . . . .	44
4.2	Diagrama de Funcionamento do Algoritmo . . . . .	46
4.3	Representação de um indivíduo . . . . .	47
5.1	Cenário Europeu ETSI#1 . . . . .	52
5.2	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#1 . . . . .	53
5.3	Cenário Europeu ETSI#2 . . . . .	54
5.4	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#2 . . . . .	55
5.5	Cenário Europeu ETSI#3 . . . . .	56
5.6	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#3 . . . . .	57

---

5.7	Cenário Europeu ETSI#4 . . . . .	58
5.8	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#4 . . . . .	59
5.9	Cenário Europeu ETSI#6 . . . . .	60
5.10	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#6 . . . . .	61
5.11	Cenário Europeu ETSI#7 . . . . .	62
5.12	Magnitude de $S_{11}$ e função de transferência para ETSI#7 . . . . .	63
A.1	Enlaces ETSI1, ETSI2, ETSI3, ETSI4, ETSI6 e ETSI7 . . . . .	71
B.1	Diagrama de classes do <i>software</i> . . . . .	72

# 1 Introdução

Como o interesse por conexões de Internet mais rápidas cresceu nos anos 90 ficou óbvio que nem os modems *dialup* ou a tecnologia ISDN (*Integrated Services Digital Network*) ofereceriam taxas de bits suficientes para atender a demanda dos clientes. Novos serviços como *streaming* de áudio e vídeo, jogos de computador *on-line* avançaram somado ao desejo de taxas de dados maiores.

Nesse contexto surgiu a necessidade de se alcançar taxas de bits maiores em relação às fornecidas pela conexão tradicional discada, visto que essas taxas tornam-se menos aptas para suprir as necessidades de usuários residenciais e comerciais. Dentre as soluções encontradas para acesso à Internet em alta velocidade, destaca-se a tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*) que utiliza a infra-estrutura telefônica existente.

A tecnologia DSL utiliza técnicas digitais de processamento de sinais com frequências de até 30 MHz sem interferir na faixa de voz [1]. Sendo capaz de otimizar a utilização da largura de banda do par metálico com velocidades que, dependendo do comprimento do par e da frequência do sinal, variam de 128 kbps a 100 Mbps [1].

Para que o serviço seja oferecido com excelente qualidade ao assinante, é de fundamental interesse para as companhias telefônicas conhecer o estado do enlace telefônico desse assinante. De posse das informações à cerca do enlace, as companhias telefônicas podem avaliar a habilidade que o enlace apresenta em transportar altas taxas de bits, ou seja, se o serviço DSL poderá ser oferecido com a qualidade desejada.

Dessa forma, surgiu o princípio da qualificação de enlaces. A qualificação do enlace requer medidas das características da linha telefônica, isto é feito por um operador presente na companhia telefônica (CO - *Central Office*) que conecta equipamentos de medida especializados ao enlace sob análise. Algumas vezes nem mesmo o acesso através da CO é suficiente para a qualificação da linha, nesses casos um técnico é enviado à residência do cliente (CPE - *Customer Premises Equipment*) para realizar medições por aquele lado do enlace. Nos equipamentos DSL mais modernos, dispositivos foram implementados a fim de realizar medidas automáticas, por exemplo, DSLAM's (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) e modem ADSL2 já podem controlar algumas medidas. Isto significa

que algumas medidas já podem ser realizadas remotamente sem a necessidade de enviar técnico à casa do assinante, o que economiza gastos.

O presente trabalho visa portanto o desenvolvimento de um *software* para qualificação de enlaces DSL focado no padrão ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*). As técnicas utilizadas para qualificação do enlace consideram as características em nível de camada física do enlace, isto é, utilizam os parâmetros de espalhamento e a função de transferência do enlace. Estes parâmetros são utilizados como curvas de referência para o processo de otimização via algoritmo genético. Este último procura uma topologia que melhor represente o enlace a partir das curvas de referência.

Portanto, o trabalho está estruturado como segue:

- Capítulo 2 - Sistemas xDSL: aborda a teoria de sistemas xDSL, definições e propriedades da tecnologia ADSL, técnicas utilizadas para a qualificação do enlace telefônico no transporte do serviço DSL, modelagem do enlace de par trançado e modelo matemático de linhas;
- Capítulo 3 - Algoritmo Genético: este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos envolvendo os algoritmos genéticos.
- Capítulo 4 - Aplicação de Algoritmos Genéticos em Sistemas xDSL: este capítulo mostra como foram integradas as teorias de algoritmos genéticos e sistemas xDSL.
- Capítulo 5 - Resultados: este capítulo apresenta os resultados obtidos pelo *software* desenvolvido para a qualificação de seis enlaces diferentes.

Por fim, o trabalho termina com análises conclusivas onde estão listadas as principais contribuições bem como resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Sistemas xDSL

Como o interesse por conexões de Internet mais rápidas cresceu nos anos 90 ficou óbvio que nem os modems *dialup* ou a tecnologia ISDN (*Integrated Services Digital Network*) ofereceriam taxas de bits suficientes para atender a demanda dos clientes. Novos serviços como *streaming* de áudio e vídeo, jogos de computador *on-line* avançaram somado ao desejo de taxas de dados maiores.

Para atender esta crescente demanda de mercado, os fabricantes de microprocessadores, de equipamentos de comunicação de dados e as operadoras de telecomunicações fizeram altos investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar o acesso remoto na última milha (*last mile*) e possibilitar aplicações que exijam grande largura de banda.

A primeira idéia seria conectar os assinantes a uma rede de fibra óptica, porém não pareceu ser uma alternativa viável. Primeiramente, a instalação de conexões de fibra novas para cada assinante levaria muito tempo e seria bastante caro. Provavelmente assinantes conectados na zona rural não usufruiriam desse mercado, devido ao alto preço que o serviço teria. Conseqüentemente, houve a necessidade por uma técnica que provesse alta taxa de dados, porém que utilizasse a infra-estrutura já existente.

Nesse contexto, desenvolveu-se a tecnologia DSL, termo abreviado de *Digital Subscriber Line*, ou ainda Linha Digital de Assinante, utilizando técnicas digitais de processamento de sinais com frequências até 30 MHz (VDSL2) sem interferir na faixa de voz [1]. Sendo assim capaz de otimizar a utilização da largura de banda do par metálico com velocidades que, dependendo do comprimento do par e da frequência do sinal, variam de 128 kbps a 100 Mbps [1]. A Figura 2.1 ilustra o esquema básico de um sistema DSL.

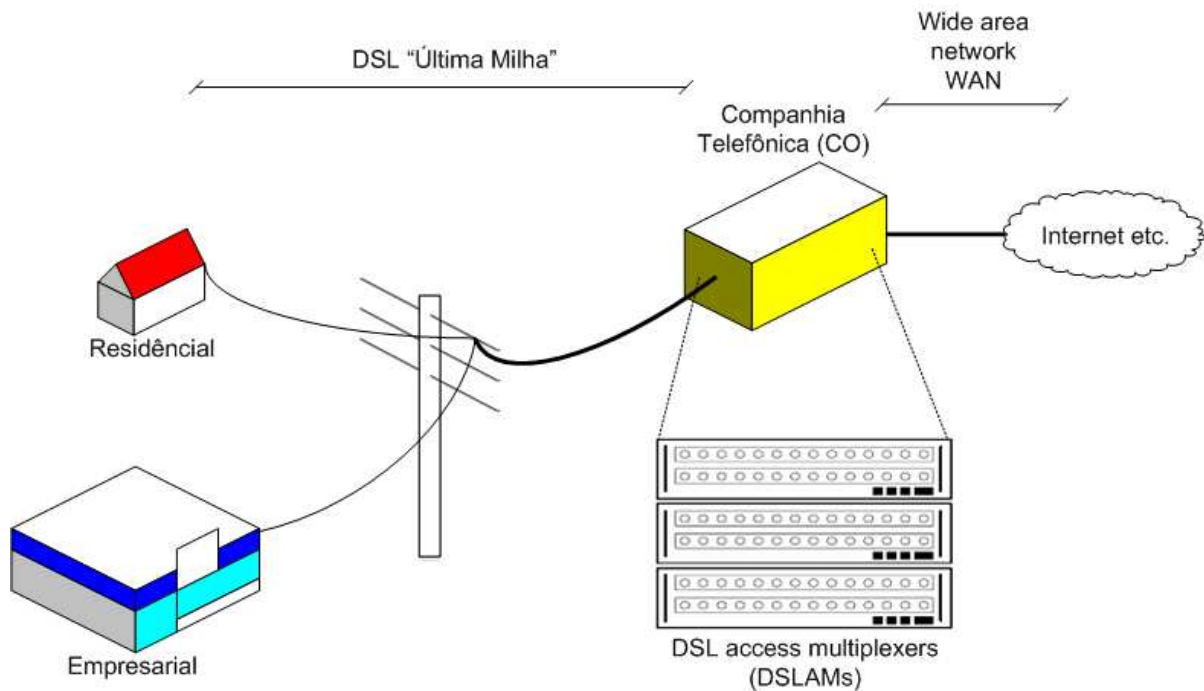


Figura 2.1: Esquemático básico de um sistema DSL

## 2.1 Sistemas xDSL e Modelamento

DSL refere-se freqüentemente como xDSL, onde  $x$  significa a existência de muitas famílias de DSL (HDSL, ADSL, etc.). O DSL e o xDSL são termos genéricos para todos os tipos de linhas digitais de assinante.

As linhas digitais de assinante são linhas de comunicações digitais de alta velocidade. O DSL oferece diversas vantagens sobre outras soluções de alta velocidade para comunicações. A principal é o preço. O fator de economia vem do fato que DSL utiliza as linhas telefônicas convencionais (fios de cobre) existentes. Este fato produz ótimas conseqüências. Diferentemente do sistema de fibra ótica e de outras linhas de comunicação, nenhum cabo novo necessita ser instalado na estrutura física existente. Usando esta infra-estrutura existente, os custos para promover o serviço do DSL são completamente baixos. Companhias telefônicas e outros provedores de serviço podem facilmente adaptar seus serviços atuais ao uso DSL.

Uma outra vantagem está na maneira que a informação é manipulada na rede. A maioria dos sistemas DSL permite a transmissão de voz simultaneamente com tráfego dos dados, pois o tráfego dos dados é dirigido a uma rede de dados baseada em pacotes,

enquanto a informação de voz é emitida à rede telefônica pública comutada (*PSTN - Public Switch Telephone Network*).

Além do preço, a característica mais relevante do DSL à maioria dos consumidores é sua rapidez, quando comparada a um modem (*modulator/demodulator*) analógico. Hoje, o modem mais rápido possui capacidade teórica de 56 kilobits por segundo que é o limite da tecnologia de modem analógica. Por outro lado, o DSL é muito mais rápido que 56 kbps, facilmente chega-se a taxa de 2Mbits por segundo, sendo mais de 30 vezes mais rápido que um modem 56k padrão.

Para utilizar a rede telefônica, os modems comuns atuais operam na faixa de frequência do sinal de voz, conseqüentemente, são limitados em velocidade pelas condições impostas pela rede telefônica. Em geral, as limitações de velocidade também não estão relacionadas à linha do assinante (*local loop*) e sim ao núcleo da rede, que possui filtros que limitam a faixa de voz em 3.4 kHz. Sem esses filtros, os pares metálicos suportam sinais com frequências na faixa de MHz, com atenuação que depende diretamente do comprimento do par metálico e da frequência do sinal.

### 2.1.1 Modulação

Devido a tecnologia DSL ser basicamente da camada física, as transmissões são transparentes a protocolos. Sendo assim, têm-se funcionalidades multiprotocolo, podendo ser utilizados diversos protocolos como IP, IPX, PPP, *Frame Relay*, ATM, etc.

As transmissões DSL utilizam atualmente a modulação DMT (*Discrete Multi-Tone*) - que foi selecionada como padrão pela ANSI (*American National Standards Institute*) através da recomendação *T1.413* e, posteriormente, pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) - descreve uma técnica de modulação por multiportadoras, na qual os dados são coletados e distribuídos sobre uma grande quantidade de pequenas portadoras, com cada uma utilizando um tipo de modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Os canais são criados utilizando-se técnicas digitais conhecidas como FFT - *Fast-Fourier Transform*.

## 2.2 ADSL - *Asymmetric Digital Subscriber Line*

### 2.2.1 Definições e Aplicações Primárias

ADSL é o acrônimo para *Asymmetric Digital Subscriber Line* ou Linha de Digital do Assinante Assimétrica. ADSL deriva seu nome do fato que as taxas de transferências para *downstream* (é a direção a partir do provedor de serviço para o consumidor) são mais rápidas que as taxas para *upstream* (é a direção a partir do consumidor para o provedor de serviço).

ADSL foi desenvolvida originalmente para companhias de telefone que desejavam prover aplicações de vídeo sob demanda. Para fazer isto era necessária uma grande quantidade de dados enviados da central ao consumidor, mas pouco dados precisariam ser enviados na direção contrária. Desde seu desenvolvimento inicial, o foco para ADSL mudou. Estando hoje muito bem adaptada à *internet* onde muito mais dados são enviados como *downstream* que *upstream*.

### 2.2.2 Propriedades espectrais e coexistência com outros serviços

Os modems *dialup* operam na mesma região de frequência que a comunicação de voz (POTS - *Plain Old Telephony System*). Isto significa que eles bloqueiam a linha telefônica para comunicação de voz e possuem uma largura da banda limitada a operar ao valor máximo de 4 kHz. Em outras palavras, possuem baixa capacidade de transferência de dados. ISDN usa uma largura da banda um pouco maior, conseqüentemente pode alcançar taxas de transferência maiores que os modems *dialup*. ISDN não utiliza um conjunto de algoritmos sofisticados para codificação/decodificação, conseqüentemente não explora bem a largura da banda. O sistema ADSL utiliza frequências acima do sinal de voz.

A frequência de ADSL começa na faixa de 26 kHz e estende-se a 1.104 MHz (ADSL) ou 2.208 MHz (ADSL2+). Esta faixa de frequência é dividida entre o canal de *downstream*, que transmite a partir da central telefônica - CO (*Central Office*) até o cliente (assinante) - CPE (*Customer Premises Equipment*), e o canal *upstream* que envia na direção oposta.

A tecnologia ADSL é chamada assimétrica, pois o canal de *downstream* ocupa muito mais largura de banda que o canal de *upstream*. A razão para esta assimetria



deve-se ao fato que a *internet* doméstica é, considerada em primeiro lugar, um serviço para *download*, logo o canal de *upstream* é utilizado principalmente como um canal de controle. Como os programas *peer-to-peer*, que necessitam fazer *upload* contínuo, crescem em popularidade, poderia haver razões para reavaliar tal opinião.

Na ADSL normal, onde o usuário possui o serviço de comunicação de voz normal e um *link* ADSL que usa a mesma linha, o canal *upstream* opera na região de frequência entre 26 kHz e 138 kHz e o canal *downstream* entre 142 kHz e 1.1 MHz. POTS utiliza as frequências mais próximas da frequência nula (corrente contínua) até aproximadamente 4 kHz. Assim há uma frequência de segurança entre POTS e a faixa de *upstream*, esta frequência é conhecida como a banda de guarda.

Filtros separam as faixas diferentes, a banda de guarda é necessária desde que todos os filtros possuem uma imperfeição intrínseca a sua tecnologia, além disso, *buffers* são necessários para separar as bandas com mais eficiência.

Também há aplicações onde ADSL é usado na mesma linha com o ISDN. Isto poderia ser usado, por exemplo, por um escritório pequeno que usa o ISDN para adquirir dois canais de voz separados e o ADSL para adquirir acesso rápido a *Internet*. Nesses casos, o canal de *upstream* ADSL inicia em 138 kHz e estende-se até 276 kHz (aproximadamente) e o canal de *downstream* inicia então em 280 kHz e estendendo-se até o habitual 1.1 MHz ou 2.2 MHz. O deslocamento na frequência é devido ao fato que ISDN tem um espectro mais largo que POTS.

Nas versões iniciais de ADSL, os canais de *downstream* e *upstream* possuíam espectros sobrepostos e um sistema cancelador de eco devia ser utilizado para se ter certeza que um sinal transmitido por uma unidade não seria recebido pela mesma unidade. Entretanto, constatou-se que utilizar bandas de frequência para *downstream* e *upstream* separadas é a melhor forma para se operar o sistema visto que os efeitos do *crosstalk* entre linhas diferentes são reduzidos e também o sistema de cancelamento de eco com largura de banda grande o suficiente seria caro em demasia [2].

Como processadores digitais de sinais mais rápidos foram utilizados nos equipamentos ADSL, melhores filtros digitais puderam ser construídos, logo foi possível ter um intervalo menor entre as regiões de frequência de *upstream* e *downstream* o que minimizou a perda de largura da banda causada devido ao canal de *dowstream* não utilizar frequências iniciando em 26 kHz, como ocorre em um sistema com cancelamento de eco.

Sistemas com bandas de frequência separadas para *upstream* e *downstream* são ditos operando em modo FDM (*Frequency Division Multiplex*), enquanto sistemas que utilizam sobreposição de espectro são ditos operando em modo ECH (*Echo Canceled Hybrid*). A Figura 2.2 mostra os modos de operação FDM e ECH.

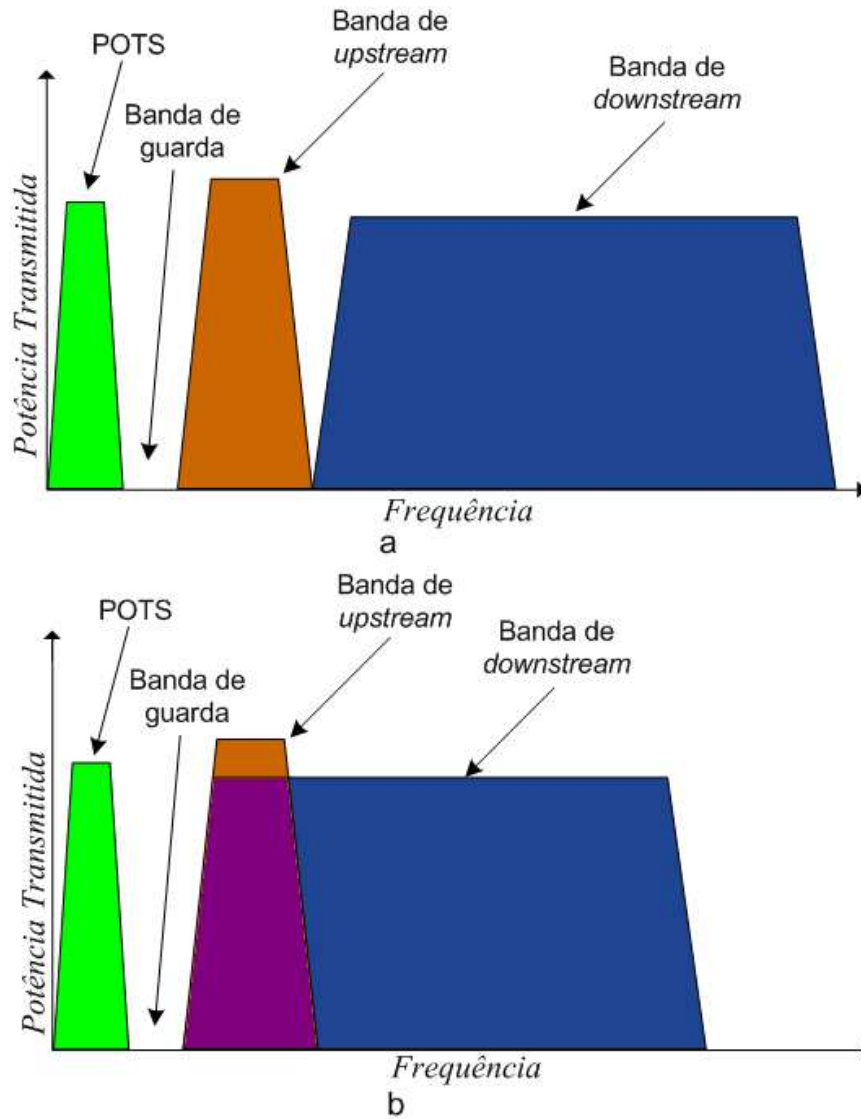


Figura 2.2: Modos de operação FDM (a) e ECH (b)

Em 1996 o primeiro padrão para ADSL *T1.413* foi introduzido pela ANSI (*American National Standard Institute*) [3]. Especificava uma taxa de bit para *downstream* de aproximadamente 6 Mbit/s e 0.6 Mbit/s para *upstream*. A partir que a tecnologia começou realmente a ser implementada aperfeiçoou-se as técnicas alcançando-se uma taxa de bits de 8 Mbit/s.

Em 2002 a ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication*) liberou a recomendação *G992.2* para ADSL2 que definia principalmente um alcance

maior e funções extras (como diagnósticos de enlaces) [4]. Apesar desta recomendação definir 8 Mbit/s como a taxa máxima aproximada, taxas de bits de até 11 Mbit/s não são incomuns quando utiliza-se equipamentos de ADSL2 existentes. No ano seguinte a ITU-T liberou a recomendação *G992.5* que descreveu ADSL2+, uma tecnologia que usa o dobro da largura de banda de ADSL2, podendo alcançar taxas de bits para *downstream* de aproximadamente 25 Mbit/s. A maior parte da largura da banda estendida é atribuída ao canal de *downstream*, entretanto há modos que também expandem o canal de *upstream*, podendo operar a uma taxa de 2.5 Mbit/s.

### 2.2.3 Modulação, codificação e decodificação

Após alguns anos de discussão os fabricantes de equipamentos ADSL tornaram a modulação DMT (*Discrete Multi Tone*) o padrão para a família ADSL. Um sinal modulado DMT é formado por um número de subportadoras que frequentemente são referenciadas por tom. Cada tom transporta parte do total de dados enviados através do canal e a quantidade de informação que cada tom pode transportar está relacionado com a relação sinal ruído - SNR (*Signal-to-Noise Ratio*).

Os tons encontram-se igualmente espaçados e a diferença de frequência entre dois tons consecutivos é de 4312.5 Hz. Os tons são numerados de 0 até 512, onde o tom 0 encontra-se na frequência 0 Hz, o tom 1 na frequência 4312.5 Hz e assim sucessivamente até o tom 512 situado na frequência 2208 kHz (ADSL2+ usa 512 tons, ADSL usa apenas 256 tons). Para cada tom, um modulador QAM (*Quadratic Amplitude Modulator*) é utilizado para representar a informação. Para melhor entendimento, suponha-se que um sistema QAM de 4 bits é utilizado, então 4 bits correspondem a  $2^4=16$  valores diferentes. Uma constelação de 16 números complexos é usada para obter uma única representação para cada um desses valores. O modulador mapeia, nos 4 bits, o ponto correspondente na constelação. O ponto é então enviado através do canal para o receptor. Frequentemente, a amplitude de um seno representa a parte imaginária e a amplitude de um co-seno representa a parte real. Sob condições práticas, o sinal sempre sofrerá distorções quando alcançar o receptor. O demodulador, no receptor, tem acesso à mesma constelação de pontos presente no modulador. A partir desse ponto, o demodulador mapeia de volta para a representação binária de 4 bits. O número de pontos no sistema QAM pode em princípio ser qualquer exponencial da forma  $2^x$ , para  $x$  é o numero de bits. A Figura 2.3

ilustra o princípio de funcionamento de um sistema QAM de 4 bits.

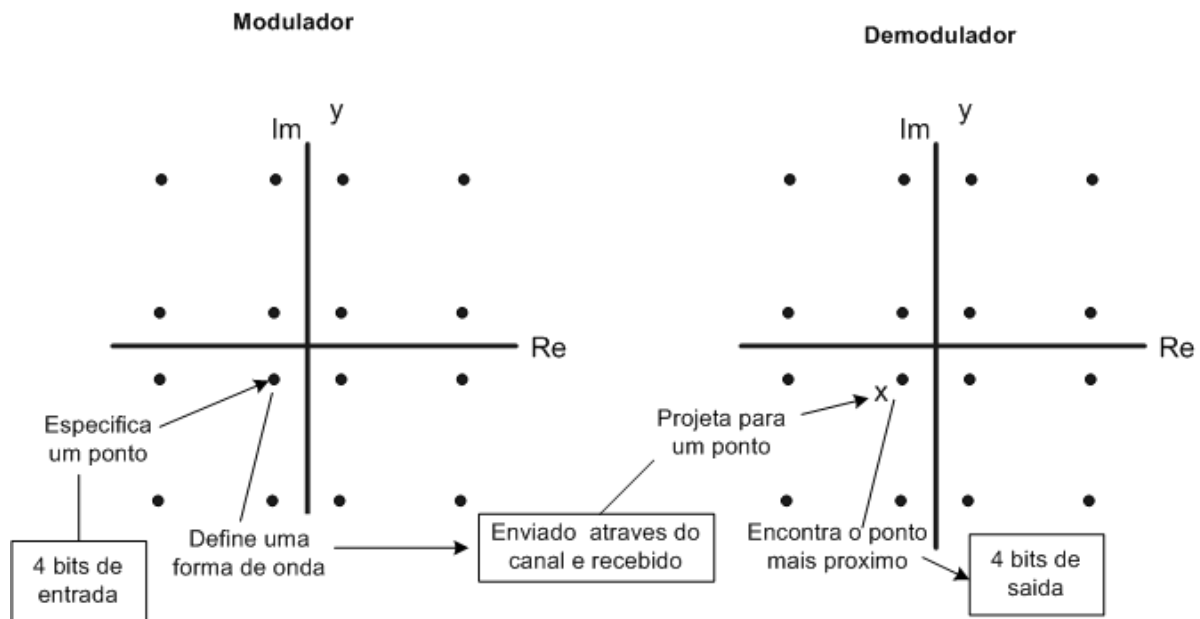


Figura 2.3: Funcionamento de um sistemas QAM de 4 bits

#### 2.2.4 Vantagens e Desvantagens de ADSL

ADSL tem ótimo desempenho para aplicações residenciais. Utiliza as linhas já instaladas virtualmente em todos lugares e coexiste pacificamente com serviço de telefone atual (POTS). ADSL é ideal para a maioria das aplicações domésticas e para pequenas empresas, pois possui uma capacidade alta de *downstream* de dados (até 8 Mbps).

Também há desvantagens na tecnologia ADSL, como a baixa taxa de transferência para *upstream*. Para a maioria das grandes empresas a taxa de *upstream* é frequentemente tão importante quanto a taxa de *downstream* o que faz ADSL limitar-se a basicamente a usuários domésticos. As taxas de transferência de dados para ADSL também sofrem dramaticamente como o aumento do comprimento da linha [5].

### 2.3 Qualificação de Enlaces em Sistemas DSL

A qualificação de enlaces possui papel muito importante no contexto da instalação de serviços baseados em sistemas xDSL, a razão principal é o fato que DSL não pode operar em todos os tipos de enlaces. Então, quando um cliente solicita um serviço baseado em

DSL primeiro é necessário determinar se o enlace do cliente está apto a receber tal serviço DSL. Qualificar o enlace consiste então em estudar se é possível instalar o serviço DSL no enlace sob análise.

### 2.3.1 Qualificação de Enlaces

É fato que o par trançado é parte importante para desempenho de serviços DSL. Assim, os provedores que oferecem serviços DSL são realmente interessados na qualificação de seus enlaces. Dessa forma, antes de iniciar a instalação de um serviço DSL um estudo geral sobre o estado físico do enlace, bem como de suas propriedades básicas é realizado.

Destaca-se ainda que o *status* da linha telefônica (enlace local) 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, alguns 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*), derivações (ou *bridged-taps*) e mudanças de cabos no enlace. Sendo assim antes da instalação do serviço DSL, as operadoras visam obter a maior quantidade possível de informação do enlace local com o intuito de detectar esses elementos e consequentemente removê-los para o desempenho do serviço DSL não ser prejudicado [6].

A qualificação do enlace requer medidas das características da linha telefônica, isto é feito por um operador presente na companhia telefônica (CO) que conecta equipamentos de medida especializados ao enlace sob análise. Algumas vezes nem mesmo o acesso através da CO é suficiente para a qualificação da linha, nesses casos um técnico é enviado à residência do cliente (CPE) para realizar medições. Nos equipamentos DSL mais modernos, dispositivos foram implementados a fim de realizar medidas automáticas, por exemplo, DSLAM's e modems ADSL2 já podem controlar algumas medidas. Isto significa que algumas medidas já podem ser realizadas remotamente sem a necessidade de enviar técnico à CPE, o que economiza gastos.

Dentre as técnicas utilizadas para qualificação de enlaces destacam-se as medições em nível de camada física e simulações por meio de modelos matemáticos que identificam um determinado enlace. Nesse contexto, definem-se as técnicas de monitoramento em uma extremidade do enlace - SELT (*Single-Ended Line Testing*) e as técnicas de

monitoramento nas duas extremidades do enlace - DELT (*Double-Ended Line Testing*).

#### 2.3.1.1 *Single-Ended Line Testing* - SELT

Testes das características elétricas do enlace local realizadas por um único equipamento apropriado, sendo normalmente localizado no lado da CO [8]. 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 dinheiro visto que não há a necessidade de enviar um técnico a residência do assinante. Entretanto, esses testes são mais dependentes do nível do ruído no receptor visto que os sinais de testes devem propagar por todo enlace [9].

#### 2.3.1.2 *Double-Ended Line Testing* - DELT

Testes das características elétricas do enlace local que são realizados em ambos os lados, assinante e 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 [10], [11].

A Figura 2.4 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.

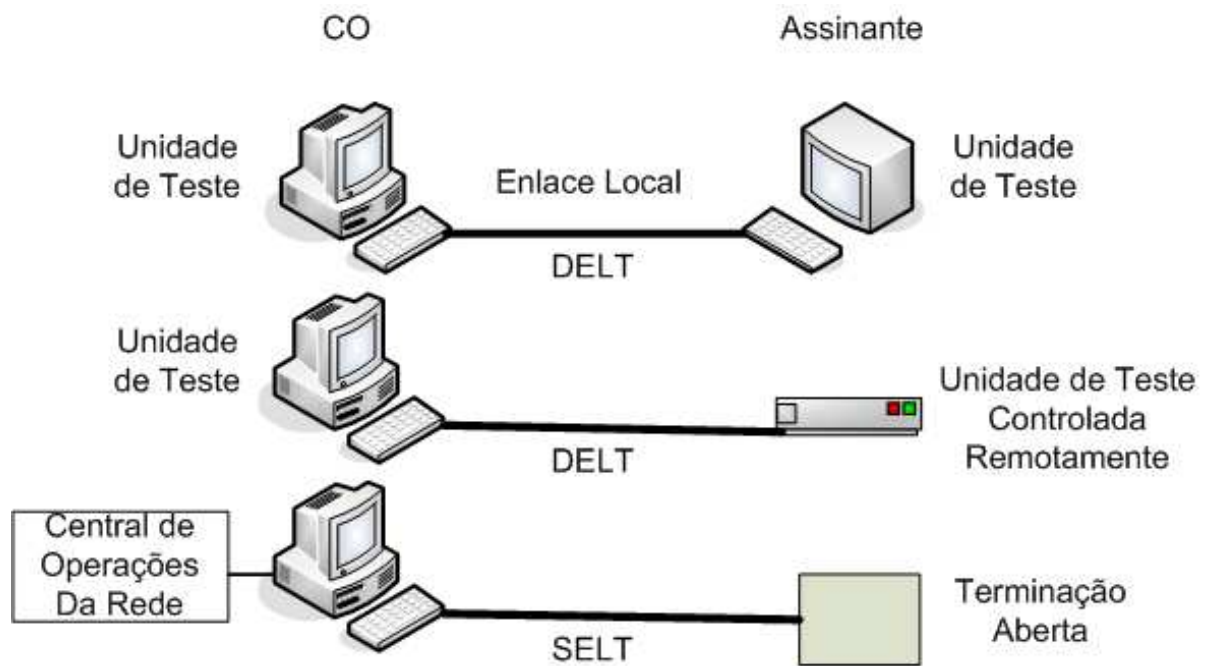


Figura 2.4: Configurações de Testes SELT e DELT

### 2.3.1.3 Variáveis Presentes no Modelo Tradicional Telefônico

As variáveis do sistema telefônico tradicional importantes ao processo de qualificação de enlaces são:

- Comprimento do Enlace: em um enlace simples, com apenas uma seção, é o comprimento da seção a partir da CO até o local do assinante CPE. Quando há mais de uma seção, o comprimento do enlace é formado pelo comprimento individual de cada seção presente no enlace.
- Tipo da seção: pode ser uma seção do tipo serial, seção simples que conecta a CO a CPE diretamente ou através de outras seções seriais, ou seção do tipo derivação (*bridged-tap*), trata-se de uma pedaço de cabo não utilizado e conectado a uma seção serial. A presença de derivações causa uma discontinuidade de impedância no ponto que ela está conectada, causando também uma reflexão fora de fase do sinal original.
- Bitola da seção: Trata-se do diâmetro do cabo de par trançado utilizado na seção.

Destaca-se que os enlaces utilizados foram retirados do padrão ETSI e estão descritos no apêndice A.

## 2.4 Modelagem do Enlace de Par Trançado

A modelagem do canal de par trançado representa um papel muito importante no planejamento e projeto de sistemas DSL. Com modelos de canais exatos, estudos baseados em simulações computacionais podem ser desenvolvidos para melhor entender as potencialidades de transmissão de um enlace local telefônico específico sob diferentes condições.

### 2.4.1 Parâmetros Primários e Secundários

Os parâmetros primários de um cabo de par trançado de cobre são a Resistência ( $R$ ), a Indutância ( $L$ ), a Capacitância ( $C$ ) e a Condutância ( $G$ ), sendo todas variáveis em função da frequência.

O cabo de par trançado é modelado como uma linha de transmissão, que pode ser descrita 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 ilustra Figura 2.5 para um elemento infinitesimal  $dx$  de uma linha de transmissão.

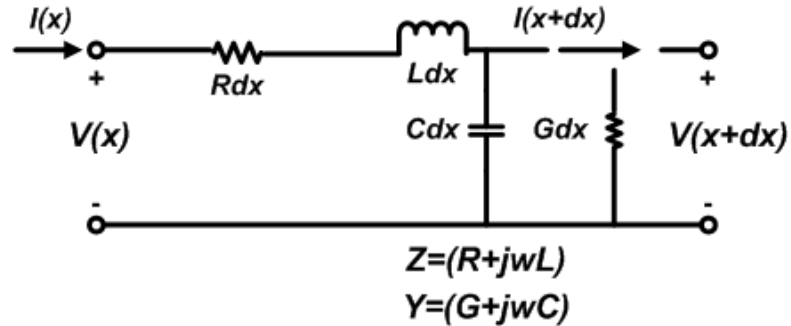


Figura 2.5: Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão

Os parâmetros secundários de um cabo de par trançado de cobre, derivados a partir dos parâmetros primários, são a constante de propagação e a impedância característica. Os parâmetros secundários são também conhecidos por constante de propagação e impedância característica.

Considere um elemento infinitesimal  $dx$  de circuito equivalente de uma linha de transmissão como ilustrado na Figura 2.5. Esse circuito equivalente é excitado por uma onda senoidal de frequência  $f = \omega/2\pi$ .

Então,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  são os parâmetros primários por unidade de comprimento



e função da frequência. Aplicando as equações de Kirchhoff ao circuito equivalente, as duas seguintes equações diferenciais são obtidas.

$$\frac{dV}{dx} = -(R + j\omega L)I \quad (2.1)$$

$$\frac{dI}{dx} = -(G + j\omega C)V \quad (2.2)$$

onde  $V \equiv V(x, \omega)$  e  $I \equiv I(x, \omega)$  são a tensão e a corrente na distância  $x$  respectivamente na linha de transmissão para a dada frequência  $f = \omega/2\pi$ . As equações 2.1 e 2.2 podem ser reescritas da seguinte maneira.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \gamma^2 V \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = \gamma^2 I \quad (2.4)$$

onde a quantidade complexa

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.5)$$

é a constante de propagação da linha de transmissão, que é o primeiro dos parâmetros secundários. Como pode ser visto na Equação 2.5, a constante de propagação é um número complexo e pode ser expresso em função de  $\alpha(\omega)$  e  $\beta(\omega)$ , que são, respectivamente, a constante de atenuação e a constante de fase característica da linha de transmissão.

A solução geral para as equações diferenciais 2.3 e 2.4 são dadas por:

$$V(x, f) = V_0^+ e^{-\gamma x} + V_0^- e^{\gamma x} \quad (2.6)$$

$$I(x, f) = I_0^+ e^{-\gamma x} + I_0^- e^{\gamma x} \quad (2.7)$$

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 2.6 e 2.7 apropriadamente nas equações 2.3 e 2.4 diferenciais de primeira ordem para tensão e corrente, segue o seguinte resultado.

$$Z_0(\omega) = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (2.8)$$

esse resultado é igual a uma constante denominada de impedância característica da linha de transmissão de par trançado.

Esse é o segundo parâmetro dos parâmetros secundários e deve-se enfatizar que  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  ainda são parâmetros por unidade de comprimento e dependentes da frequência.

### 2.4.2 Representação por Quadripolo - Parâmetros ABCD

Uma maneira prática e comum de modelar matematicamente uma linha de transmissão é utilizar a representação em Quadripolo ou rede de duas portas.

Nessa representação, o circuito elétrico da Figura 2.5 pode ser abstraído pela "caixa preta" mostrada na Figura 2.6.

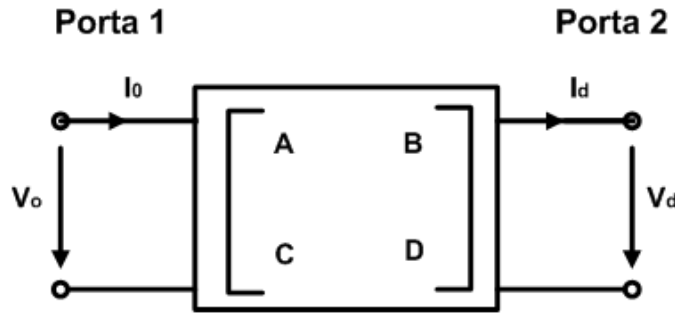


Figura 2.6: Representação em Quadripolo de uma seção de cabo de par trançado

A função de qualquer circuito eletrônico ou a função de transferência de um enlace telefônico de par trançado pode ser derivada da relação entre saída e entrada da tensão ou corrente no quadripolo.

Na Figura 2.6,  $V_0$  e  $I_0$  são a tensão e a corrente na porta de entrada (porta 1) do quadripolo, respectivamente em  $x = 0$ .  $V_d$  e  $I_d$  são a tensão e a corrente na porta de saída (porta 2) do quadripolo na distância  $x = d$  respectivamente.

No modelo, voltagem/corrente de entrada e saída estão relacionadas uma a outra pelos chamados parâmetros ABCD.

Se um segmento de uma linha de transmissão de comprimento  $d$  tem solução  $V_L = V_d$  e  $I_L = I_d$  então,

$$V_L = V(d, f) = V_0^+ e^{-\gamma d} + V_0^- e^{\gamma d} \quad (2.9)$$

$$I_L = I(d, f) = I_0^+ e^{-\gamma d} + I_0^- e^{\gamma d} \quad (2.10)$$

estando as duas ondas de tensão em cada direção relacionadas à mesma direção da onda de corrente pela impedância característica  $Z_0$ , portanto, resolvendo as equações 2.9 e 2.10, encontra-se  $V_0^+$  e  $V_0^-$  como segue.

$$V_0^+ = \frac{1}{2}(V_L + I_L Z_0(\omega))e^{\gamma d} \quad (2.11)$$

$$V_0^- = \frac{1}{2}(V_L - I_L Z_0(\omega))e^{-\gamma d} \quad (2.12)$$

Substituindo esses resultados na solução geral ( $x = 0$ ) de 2.6 e 2.7 e resolvendo para a tensão e corrente em  $x = 0$  em função de  $x = d$ , a seguinte representação em quadripolos é obtida.

$$\begin{pmatrix} V(0) \\ I(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0(\omega) \sinh(\gamma d) \\ \frac{1}{Z_0(\omega)} \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V(d) \\ I(d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V(d) \\ I(d) \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Portanto, os parâmetros ABCD podem ser expressos em termos dos parâmetros secundários como segue.

$$A(s) = D(s) = \cosh(\gamma d) \quad (2.14)$$

$$B(s) = Z_0(\omega) \sinh(\gamma d) \quad (2.15)$$

$$C(s) = \frac{\sinh(\gamma d)}{Z_0(\omega)} \quad (2.16)$$

onde  $s = j\omega = 2\pi f$  é a frequência complexa e  $d$  é o comprimento do cabo.

A modelagem através dos parâmetros ABCD é um método muito útil quando se desejar estudar um enlace telefônico inteiro da CO até o assinante. Cada seção ao longo do enlace de par trançado pode ser representada pela sua própria matriz ABCD. Dessa forma, a matriz ABCD para todo o enlace telefônico de par trançado pode então ser obtida através da multiplicação em cascata de todas as matrizes ABCD de cada seção.

A informação contida na matriz ABCD de um enlace telefônico pode ser facilmente convertida para a representação da impedância de entrada ou para a função de

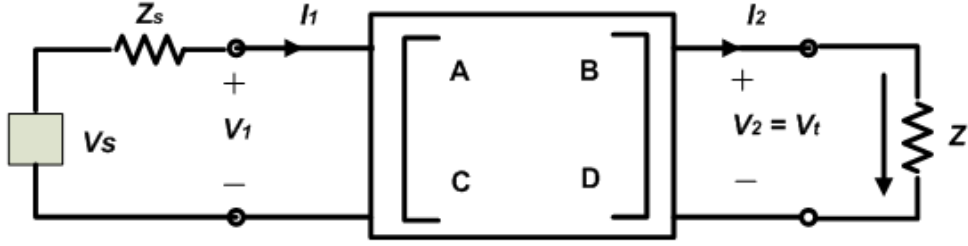


Figura 2.7: Representação completa de um Quadripolo de um enlace DSL simples

transferência do cabo. A Figura 2.7 ilustra o modelo completo para a representação por quadripolo de um enlace DSL simples.

onde  $Z_s$  é a impedância da fonte, nesse caso um transceiver na CO, e  $Z_t$  a impedância no terminal, *transceiver* na CPE.

A partir do esquema mostrado na Figura 2.7 obtém-se também a impedância de entrada da rede  $Z_{in}$  [6], sendo definida como a impedância observada na porta 1 devido a toda a rede.

$$Z_{in} = A/C \quad (2.17)$$

### 2.4.3 Função de Transferência

As características que devem ser determinadas para se identificar exatamente a topologia de um enlace telefônico para um determinado assinante são mudanças de bitolas (cabos diferentes), presença de derivações, comprimento de cada seção e a terminação do enlace. Mudanças de bitola, derivações e terminação do enlace constituem uma mudança de impedância ao longo da linha. Quando um sinal é injetado na linha de transmissão, o sinal sofre distorções de acordo com as características físicas do meio. Essas distorções podem ser modeladas como o efeito de um filtro, onde o filtro é representado por uma função de transferência de cada seção de cabo ao qual o sinal está sendo transmitido [9].

Na Figura 2.7 observa-se que existe transmissão a partir do transmissor DSL presente no lado da CO, isto é, na porta 1, para o receptor DSL no lado da CPE, isto é, na porta 2. Logo de [5] obtém-se que a função de transferência é a razão entre a voltagem na porta 2 e a voltagem na porta 1.

$$H = V_2/V_1 \quad (2.18)$$

da Figura 2.7 também retira-se o sistema:

$$\begin{cases} V_1 = AV_2 + BI_2 \\ I_1 = CV_2 + DI_2 \end{cases} \quad (2.19)$$

substituindo  $V_1$  presente em 2.19 em 2.18 tem-se:

$$H = \frac{V_2}{AV_2 + BI_2} = \frac{1}{A + BI_2/V_2} \quad (2.20)$$

Sabendo que  $V_2/I_2$  é a impedância da carga presente na porta 2,  $Z_L$ , substituindo em 2.20 tem-se:

$$H = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \quad (2.21)$$

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

A matriz de espalhamento ou matriz S também é utilizada para caracterização de enlaces. Ela relaciona as ondas que incidem e refletem nas portas do quadripolo que representa a seção de cabo de par trançado. A Figura 2.8 mostra um dispositivo de duas portas (quadripolo) com a representação das ondas incidentes e refletidas.

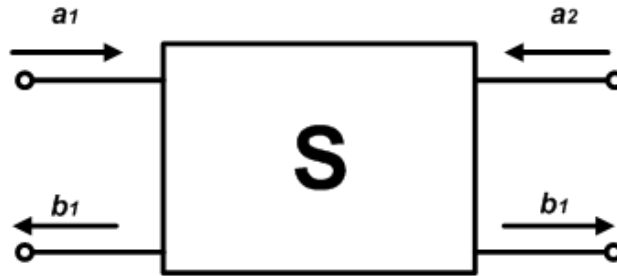


Figura 2.8: Quadripolo caracterizado por uma matriz S

onde a matriz  $S$  é:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Representado um enlace DSL formado pela fonte de sinal DSL presente na CO e pela terminação no lado do assinante, como mostrado na Figura 2.9, pelo seu equivalente e utilizando a matriz S tem-se:

Da Figura 2.8 retira-se o sistema:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

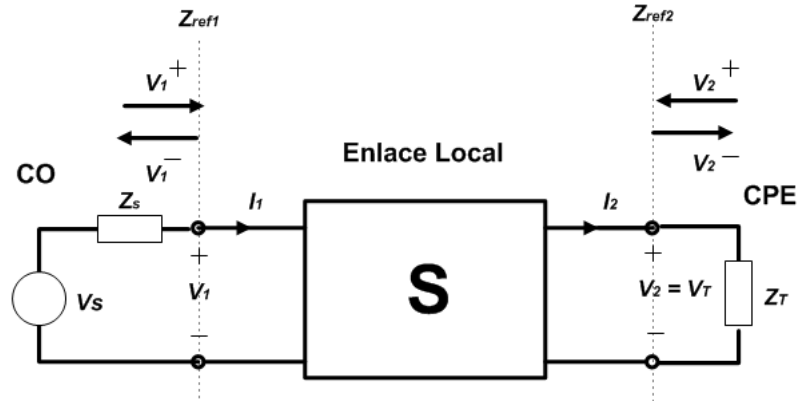


Figura 2.9: Circuito elétrico de um enlace DSL típico

sendo  $a_i$  e  $b_i$  as raízes quadradas das ondas de potência incidentes e refletidas, respectivamente. Portanto,

$$a_1 = \frac{V_1^+}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.24)$$

$$a_2 = \frac{V_2^-}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.25)$$

$$b_1 = \frac{V_1^-}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.26)$$

$$b_2 = \frac{V_2^+}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.27)$$

onde  $Z_0$  é a impedância característica das linhas de transmissão conectadas às portas. Logo, pode-se também escrever,

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^- \quad (2.28)$$

$$V_1^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^- \quad (2.29)$$

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, têm-se:

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \Big|_{V_2^-=0} \quad (2.30)$$

$$S_{12} = \frac{V_1^-}{V_2^-} \Big|_{V_1^+=0} \quad (2.31)$$

$$S_{21} = \frac{V_2^+}{V_1^+} \Big|_{V_2^-=0} \quad (2.32)$$

$$S_{22} = \frac{V_2^+}{V_2^-} \Big|_{V_1^+=0} \quad (2.33)$$

Como somente o lado da rede da CO, isto é, a porta 1, é acessível, a rede pode ser considerada como de uma porta. Logo, toda a informação que pode ser obtida da rede através da porta 1 está contida no parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  da Equação 2.30 que é a razão entre a onda refletida e a onda incidente.

Sabendo que as ondas de tensão são definidas de acordo com uma impedância de referencia [6], tem-se:

$$V_i^\pm = V_i \pm Z_{ref1} I_i \quad (2.34)$$

Definindo a impedância de referencia para a porta 1 como [6]:

$$Z_{ref1} = Z_g = 100\Omega \quad (2.35)$$

Representando o esquema da Figura 2.9 de forma simplificada, usando a notação da impedância de entrada tem-se:

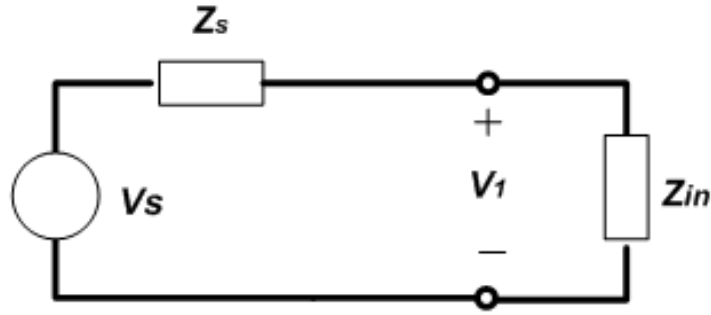


Figura 2.10: Circuito elétrico simplificado de um enlace DSL típico

Da Figura 2.10 obtém que:

$$V_1 = Z_{in} I_1 \quad (2.36)$$

substituindo em 2.30 as equações para  $V_1^+$  e  $V_1^-$  provenientes de 2.34 tem-se.

$$S_{11} = \frac{V_1 - Z_{ref1} I_1}{V_1 + Z_{ref1} I_1} \quad (2.37)$$

substituindo 2.35 e 2.36 em 2.37 tem-se:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \quad (2.38)$$

substituindo 2.17 em 2.38 tem-se:

$$S_{11} = \frac{A - Z_S \cdot C}{A + Z_S \cdot C} \quad (2.39)$$

### 2.4.5 Modelo de Linha VUB0

O modelo de linha VUB0 é a representação matemática de uma linha de transmissão de par trançado. A linha de transmissão de par trançado é modelada como uma linha de composta de dois fios de cobre paralelos. Nesse caso se está interessado somente na propagação das ondas através da linha e não nos efeitos eletromagnéticos que a linha sofre devido a qualquer interação com o ambiente que a contém.

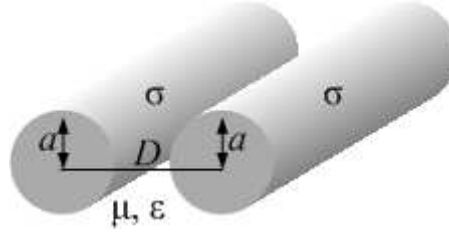


Figura 2.11: Representação de uma linha de fios paralelos

Uma linha de fios paralelos, mostrada na Figura 2.11, consiste em dois condutores cilíndricos circulares paralelos imersos em um dielétrico homogêneo que também é assumido ser linear e isotrópico. Os dois condutores têm o mesmo raio  $a$  e condutividade  $\sigma$  e os centros estão separados por uma distância  $D$ . O dielétrico é caracterizado pela sua permissividade elétrica  $\epsilon$  e permeabilidade magnética  $\mu$ . Hoje em dia, pares trançados são feitos de cobre para os condutores e polietileno (PE) para o dielétrico. A condutividade do cobre é aproximadamente constante e real na faixa de frequência de xDSL. A mesma aproximação é válida para a permissividade elétrica e permeabilidade magnética de PE. Além disso, a condutividade do PE é desprezível. O circuito equivalente da linha de transmissão consiste nos parâmetros primários da linha, isto é, a impedância por unidade de comprimento  $Z_s$  e a admitância paralela por unidade de comprimento  $Y_p$  que dependem da frequência  $f$  e das dimensões geométricas  $a$  e  $D$ , bem como das constantes dos materiais  $\sigma$ ,  $\epsilon$  e  $\mu$  da linha. Outras representações da frequência que serão usadas são a frequência angular  $\omega = 2\pi f$  e a variável independente de Laplace  $s = j\omega$ .

Para a caracterização matemática do modelo VUB0, calcula-se o produto da constante propagação  $\gamma$  e o comprimento  $l$  da linha como uma função da frequência  $s$ , assim quatro parâmetros independentes são definidos:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  [7].

$$\gamma l = \sqrt{Z_s y_p l^2} = \sqrt{a_4 s^2 + a_1 s \sqrt{-s} J_0 / J_1 + a_1 a_3 s^2 \psi / 2} \quad (2.40)$$

na Equação 2.40  $\psi$  é uma função auxiliar dependente da frequência  $s$  e dos parâmetros  $a_2$  e  $a_3$ .



$$\psi = \frac{3a_2^3 J_3 J_2 + 2a_2 J_1 J_2 + a_2^2 J_0 J_3}{a_2^3 J_2 J_3 + a_2 J_1 J_2 + 3a_2^2 J_0 J_3 + J_0 J_1} \quad (2.41)$$

As funções de Bessel  $J_i (i = 0, 1, 2, 3)$  são funções da frequência e do parâmetro  $a_3$ .

$$J_i = J_i(a_3 \sqrt{-s}) \quad (2.42)$$

Os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são relacionados com as dimensões geométricas  $a$ ,  $D$  e  $l$ , e com as constantes do material  $\sigma$ ,  $\epsilon$  e  $\mu$ .

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} \frac{\epsilon}{ar \cos(D/2a)} l^2 \\ a_2 &= (a/D)^2 \\ a_3 &= a \sqrt{\mu \sigma} \end{aligned} \quad (2.43)$$

O parâmetro  $a_4$  é uma função dos parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ . É considerado ainda como um parâmetro independente que atribui ao modelo VUB0 um grau maior de liberdade.

$$a_4 = a_1 a_3 \ln(1/\sqrt{a_2}) \quad (2.44)$$

A função de transferência para o modelo VUB0 é expressa por:

$$e^{-\gamma l} = \exp(-\sqrt{a_4 s^2 + a_1 s \sqrt{-s} J_0/J_1 + a_1 a_3 s^2 \psi/2}) \quad (2.45)$$

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

$$Z_0 = \gamma l / y_p l = (\sqrt{a_4 s^2 + a_1 s \sqrt{-s} J_0/J_1 + a_1 a_3 s^2 \psi/2}) / a_4 s \quad (2.46)$$

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

$$a_5 = \frac{\pi \epsilon}{ar \cosh(D/2a)} \quad (2.47)$$

A linha de transmissão é completamente caracterizada por sua função de transferência e pela impedância característica, que também são chamados parâmetros secundários.

A partir das equações 2.45 e 2.46 representa-se completamente uma linha de transmissão através do modelo de linha VUB0.

## 3 Algoritmo Genético

Algoritmos genéticos ou AG's são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução. Estes algoritmos modelam uma solução para um problema específico em uma estrutura de dados na forma de um ou mais cromossomos e aplicam operadores que re-combinam estas estruturas preservando informações críticas [12].

Foram inventados por John Holland nos anos 60 e desenvolvidos por seus alunos na Universidade de Michigan em meados de 1970. O principal objetivo de Holland não foi desenvolver algoritmos para solucionar problemas genéricos, mas dedicar-se ao estudo formal do fenômeno de evolução, como ocorre na natureza, e desenvolver maneiras de importá-lo aos sistemas de computação [13]. Ele acreditava que as peculiaridades da Evolução Natural poderiam ser implementadas de forma algorítmica a fim de alcançar uma versão computacional dos processos de evolução.

Algoritmos Genéticos basicamente transformam uma população de indivíduos, cada um com um valor associado de *fitness* (adaptabilidade), chamado de aptidão, numa nova geração de indivíduos usando princípios inspirados na Evolução Natural, isto é, na reprodução e sobrevivência dos mais aptos. A cada geração, novos indivíduos são gerados pela aplicação de operadores genéticos de seleção, recombinação (*Crossover*) e mutação. Geralmente, cada indivíduo na população representa a codificação de uma possível solução para um dado problema, o que o Algoritmo Genético faz é procurar a solução que seja boa ou a melhor para o problema sob estudo pela criação genética de populações de indivíduos cada vez mais aptos à função objetivo de interesse.

### 3.1 Características Gerais

Os Algoritmos Genéticos representam uma classe de ferramentas muito versátil e robusta a ser empregada na solução de problemas de otimização, apresentando bom aproveitamento das melhores soluções presentes na população e grande capacidade de exploração do espaço de busca [14]. Além disso, não são métodos de busca puramente aleatórios, pois combinam variações aleatórias com seleção polarizada pelos valores da aptidão atribuída a cada

indivíduo, simulando o papel da pressão exercida pelo ambiente sobre o indivíduo.

Outra propriedade importante dos algoritmos genéticos é que eles mantêm uma população de soluções candidatas enquanto que os métodos alternativos, como o gradiente descendente [15] e simulated annealing [16], processam um único ponto no espaço de busca a cada instante [12].

### 3.1.1 Definições

As principais definições relacionadas com os Algoritmos Genéticos são [14]:

- **Cromossomo:** Cadeia de caracteres que codificam as informações relativas às variáveis (incógnitas) do problema. Cada cromossomo representa deste modo uma solução do problema.
- **Gene:** É a unidade básica do cromossomo. Em geral, cada cromossomo tem um número determinado de genes, e cada grupo de genes no cromossomo descreve uma variável do problema. Estes genes podem ser codificados de forma binária, inteira ou real.
- **População:** Conjunto de cromossomos ou soluções.
- **Numero de Gerações:** O processo de criação de uma nova população de indivíduos, descendentes ou parentes, a partir da população atual, através da aplicação de operações de seleção, recombinação e mutação. Em geral são necessárias várias gerações para a convergência do algoritmo.
- **Numero de Gerações:** O processo de criação de uma nova população de indivíduos, descendentes ou parentes, a partir da população atual, através da aplicação de operações de seleção, recombinação e mutação. Em geral são necessárias várias gerações para a convergência do algoritmo.
- **Operações Genéticas:** Operações que o Algoritmo Genético realiza sobre cada um dos cromossomos. São definidas pelas operações de recombinação (crossover) e mutação.
- **Espaço de Busca ou Região Viável:** É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracteri-

zado pelas funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema a ser resolvido.

- **Função Objetivo:** Contém a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população, mostrando basicamente como está a adaptabilidade dos indivíduos da população. Esta função objetivo é em princípio, calculada para cada cromossomo da população.

### 3.1.2 Funcionamento

O funcionamento de um algoritmo genético segue basicamente a seguinte estrutura [17]: durante uma iteração  $t$ , o algoritmo genético mantém uma população de soluções potenciais (indivíduos, cromossomos, lista de atributos ou vetores) dada por:

$$P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\} \quad (3.1)$$

Cada solução  $x_i^t$  é avaliada e produz uma medida da aptidão do indivíduo, ou *fitness*. Assim, uma nova população (na iteração  $t + 1$ ) é formada privilegiando a participação dos indivíduos mais adaptados, isto é, de maior aptidão. Alguns membros desta nova população passam por alterações, devido às operações de recombinação e mutação, para formar novas soluções potenciais. Este processo se repete até que um número pré-determinado de iterações seja atingido, ou até que um nível de adaptação esperado seja alcançado [12].

A Figura 3.1 ilustra simplificadaamente o funcionamento de um algoritmo genético.

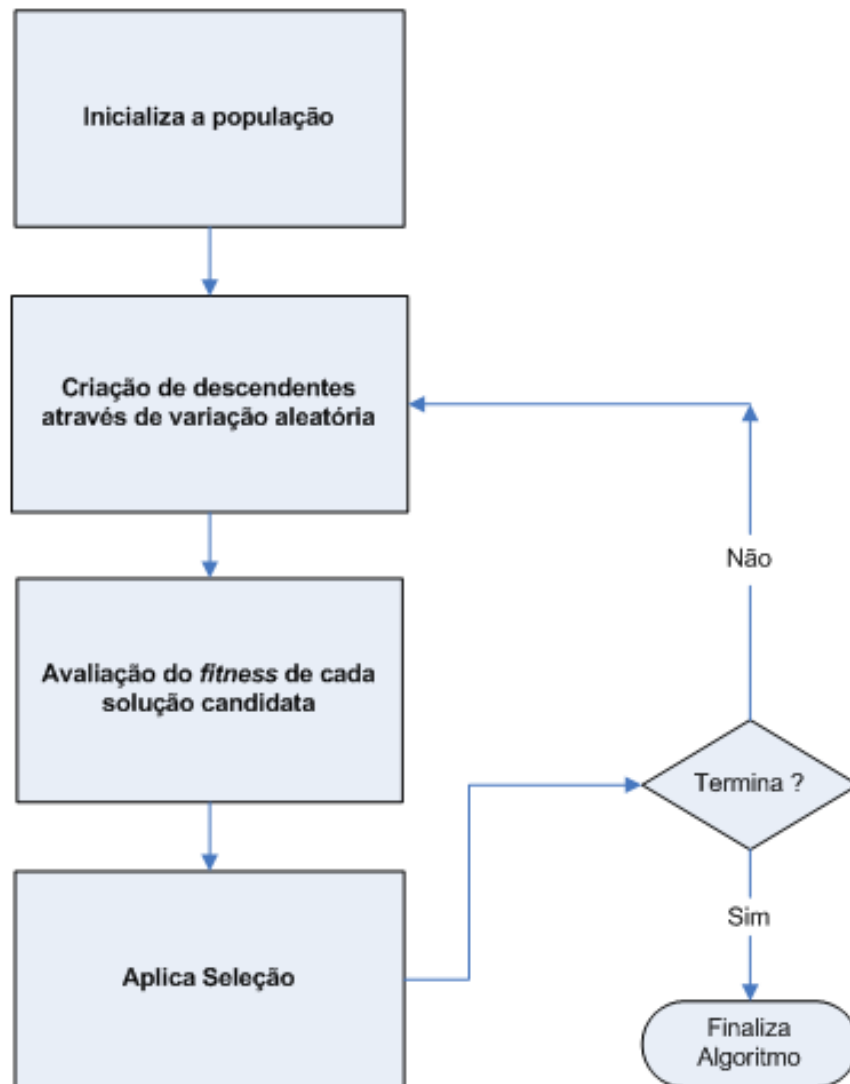


Figura 3.1: Funcionamento de um algoritmo genético

#### 3.1.2.1 Definição da População Inicial

A população inicial de indivíduos ou cromossomos é na maioria das vezes realizada de forma aleatória, mas sempre que possível recomenda-se introduzir na população um ou mais indivíduos que apresentem informações a priori do espaço de soluções.

#### 3.1.2.2 Operadores Genéticos: Recombinação e Mutação

Os operadores genéticos mais freqüentemente utilizados em algoritmos genéticos são a recombinação e a mutação [17].

O operador de recombinação combina as características de dois cromossomos pais para formar dois descendentes similares, isso é feito pela comutação de segmentos

correspondentes nos cromossomos dos pais. Por exemplo, para a codificação binária, se os cromossomos dos pais forem representados por vetores de cinco posições  $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$  e  $(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ , então fazendo o cruzamento após o segundo gene produzir-se-iam os descendentes  $(a_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$  e  $(b_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ . O intuito da operação de recombinação é trocar informação entre soluções potenciais.

O operador de mutação atua alterando arbitrariamente um ou mais genes de um cromossomo em questão. O intuito da operação de mutação é introduzir alguma variabilidade extra na população.

### 3.1.2.3 Seleção de Indivíduos para Reprodução

Seleção é o processo onde os indivíduos com maior valor de aptidão têm a maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes para a geração seguinte. Este operador é a versão artificial da seleção das espécies como ocorre na Teoria da Evolução Natural, que estabelece que os seres mais aptos têm maiores chances de sobreviver, por exemplo, os mais ágeis e menos vulneráveis aos predadores e doenças [14].

O objetivo principal do operador de seleção é copiar boas soluções, eliminando soluções de baixa aptidão. Isto é realizado seguindo os seguintes passos:

1. Identificar boas soluções na população;
2. Realizar múltiplas cópias das boas soluções;
3. Eliminar soluções de baixa aptidão da população o que permite que várias cópias de boas soluções possam ser inseridas na população.

As melhores soluções são guardadas em uma lista de soluções escolhidas ou lista de soluções, que será utilizada para realizar as operações de cruzamento e mutação. Existe um grande número de estratégias de seleção. As mais comuns são seleção pelo torneio, seleção proporcional, e seleção por ranking [18].

### 3.1.2.4 Elitismo

O modelo de seleção elitista normalmente é acoplado a outros métodos de seleção, na tentativa de se aumentar a velocidade de convergência do algoritmo, bem como em aplicações onde possa ser necessário o seu emprego [14].

Este processo simplesmente copia os  $N$  ( $N < 1$ ) melhores indivíduos da população corrente para a próxima geração, garantindo que estes cromossomos não sejam destruídos nas etapas de recombinação e mutação.

Na maioria das implementações, normalmente, pelo menos o elitismo do melhor indivíduo é utilizado.

A principal vantagem deste método é o fato dele garantir a convergência, ou seja, caso o ótimo global seja descoberto durante o processo de busca, o algoritmo genético deve convergir para tal solução.

Sua desvantagem é a possibilidade de forçar a busca, pela presença de mais uma cópia do melhor indivíduo, na direção de algum ponto ótimo local que tenha sido descoberto antes do global, embora normalmente um algoritmo genético escape de tais armadilhas.

Uma alternativa é guardar separadamente a melhor solução encontrada durante a evolução, para no final da execução designá-la como o indivíduo ótimo encontrado, mesmo que ele não esteja presente na última geração da execução (pensar em uma vantagem e uma desvantagem).

## 3.2 Parâmetros de Configuração do AG

A configuração correta dos parâmetros de influência (configuração) é, sem dúvida, um dos aspectos mais relevantes dentro da estratégia dos Algoritmos Genéticos. A eficiência e o funcionamento de um Algoritmo Genético é altamente dependente dos seus parâmetros de controle [14]. Dentre os parâmetros de influencia têm-se o tamanho da população e as probabilidades de cruzamento e mutação.

### 3.2.1 Tamanho da População

O tamanho da população indica o número de cromossomos em cada população, normalmente constante durante a evolução [19].

Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Por outro lado, uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio

do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais [14]. No entanto, para se trabalhar com grandes populações são necessários maiores recursos computacionais ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo maior.

### 3.2.2 Taxa ou Probabilidade de Cruzamento

Este parâmetro indica com qual taxa ou probabilidade irá ocorrer o cruzamento entre indivíduos selecionados na população [14].

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Em contrapartida, se ela for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente da população, ocorrendo perda de estruturas de alta aptidão. Valores baixos podem ainda tornar a convergência do algoritmo muito lenta.

### 3.2.3 Taxa ou Probabilidade de Mutação

A taxa de mutação indica a probabilidade ou taxa em que haverá a mutação de cromossomos nas populações ao longo da evolução [14].

A mutação é empregada para fornecer novas informações dentro das populações, prevenindo que as mesmas se tornem saturadas com cromossomos similares, à medida que visa aumentar a diversidade populacional e possibilita ainda uma maior varredura do espaço de busca. Ressalta-se o cuidado no tratamento da probabilidade de mutação, pois com uma taxa muito alta a busca pode se tornar essencialmente aleatória.

## 3.3 Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos

### 3.3.1 Vantagens dos Algoritmos Genéticos

- São robustos, pouco sensíveis a ótimos locais e aplicáveis a uma grande variedade de problemas.
- Não requerem conhecimentos ou informações dos gradientes da superfície definida pela função objetivo.



- Descontinuidades ou complexidades presentes na superfície acarretam pouco ou nenhum efeito no desempenho da busca.
- Apresentam um bom desempenho para uma grande escala de problemas.
- São de fácil implementação e proporcionam maior flexibilidade no tratamento do problema a ser resolvido.

### 3.3.2 Desvantagens dos Algoritmos Genéticos

- Dificuldade para achar o ótimo global exato com precisão, isto é, ao final do processo pode-se talvez melhorar a solução encontrada através de uma técnica clássica, como gradiente descendente [15].
- Requerem um grande número de avaliações de funções de aptidão.
- Grandes possibilidades de configurações que podem complicar a resolução do problema tratado, isto é, a escolha dos parâmetros de influencia pode ser crucial durante a execução do algoritmo genético.

## 4 Aplicação de Algoritmos Genéticos em Sistemas xDSL

A qualificação de enlaces em sistemas xDSL, mostrada na seção 2.3, é bastante importante para a instalação e conseqüente manutenção de serviços DSL. Dessa forma, a aplicação de técnicas evolutivas para esta qualificação pretende determinar os parâmetros relevantes à qualificação de enlaces, assim, obter a melhor topologia para representar o enlace.

Nesse intuito, o questão principal é definir as interfaces teóricas, e posteriormente computacionais, para relacionar os conceitos da técnica evolutiva e da teoria xDSL apresentada no capítulo 2.

### 4.1 Descrição do Problema

A tarefa principal do *software* desenvolvido é encontrar a topologia de um enlace a partir das informações presentes nas características físicas do enlace, isto é, presentes em nível de camada física. Dessa forma, pretende-se determinar o número de seções de cabo, comprimento de cada seção e tipo das seções (ver seção 2.3.1.3).

### 4.2 Procedimento Teórico para Otimização

Os procedimentos teóricos para qualificação de enlaces via algoritmos genéticos serão definidos e posteriormente aplicados à otimização por SELT, conforme definidos na seção 2.3.

Através do uso do modelo de linha VUB0, mostrado na seção 2.4.5, obtêm-se o parâmetro de espalhamento (parâmetro  $S_{11}$ ) que é configurado como curva de referência (alvo) do processo de otimização. Uma vez que o número de seções de cabo, comprimento, tipo e bitola de cada seção sejam otimizados, o algoritmo procura uma topologia que melhor represente a curva de referência.

### 4.2.1 Estrutura do Enlace

Uma estrutura de dados, mostrada na Figura 4.1, representa a estrutura do enlace DSL (*makeup*), onde se observa que tantas forem as seções presentes no enlace elas sempre possuirão os três parâmetros que as caracterizam: tipo, comprimento e bitola da seção.

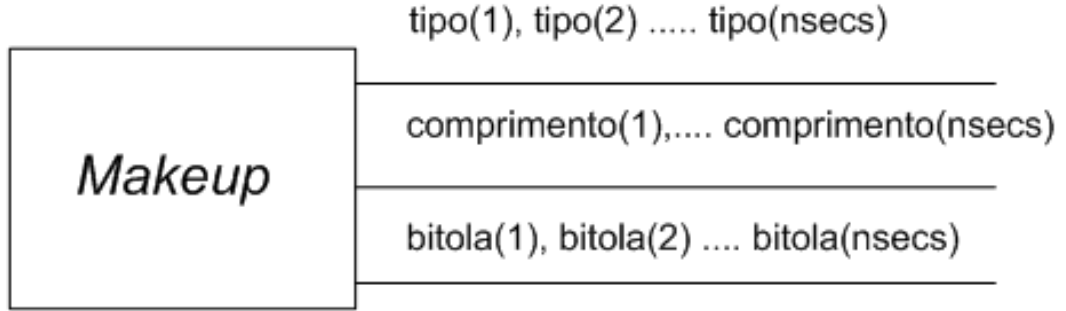


Figura 4.1: Estrutura do Enlace (*Makeup*)

### 4.2.2 Função Custo

Destaca-se primeiramente a necessidade de avaliar o *software* desenvolvido, nesse intuito, o parâmetro  $S_{11}$  de referência foi obtido a partir do modelo de linha. Dessa forma, como o *software* também utiliza o modelo de linha, quando se obtivesse uma solução correta o valor da função custo deveria ser zero. Valores medidos não puderam ser utilizados para validar o algoritmo do *software*, pois possuem erros inerentes as medições, bem como o modelo de linha haja vista que possui erros inerentes a modelagem do cabo de par trançado real, isto é, o modelo de linha não o representa perfeitamente.

Feita essa explanação, defini-se a função custo como um minimizador que quantifica a diferença entre os valores do parâmetro de espalhamento de referência e o valor obtido para esse a partir da decodificação dos indivíduos.

A função custo trabalha como um estimador de máxima verossimilhança probabilística (*maximum-likelihood estimator* - MLE) [20]. A Equação 4.1 mostra o estimador MLE.

$$V(\phi) = \sum_{k=1}^N \frac{|S_{11}^{salvo}(f_k, \phi) - S_{11}^{otimiz}|}{\sigma_{S_{11},k}^2} \quad (4.1)$$

A Equação 4.1 é utilizada para a qualificação do enlace através do uso de SELT. O parâmetro  $\phi$  representa os parâmetros desejados no processo de otimização, neste caso comprimento, tipo e bitola de cada seção presente no enlace.

O parâmetro  $S_{11}^{otimiz}$  é a curva  $S_{11}$  do indivíduo sob análise. O parâmetro  $S_{11}^{salvo}$  é a curva  $S_{11}$  definida como referência no início do processo de otimização. O parâmetro  $\sigma_{S_{11},k}^2$  é a variância para  $S_{11}$  em um dado tom  $k$ .

O valor de cada função custo é utilizado diretamente para qualificar os indivíduos definidos pelo algoritmo genético. Logo, quanto menor o valor da função custo, maior será o *fitness* do indivíduo que a possui.

Para facilitar o entendimento do programa, a Figura 4.2 ilustra o funcionamento do mesmo.

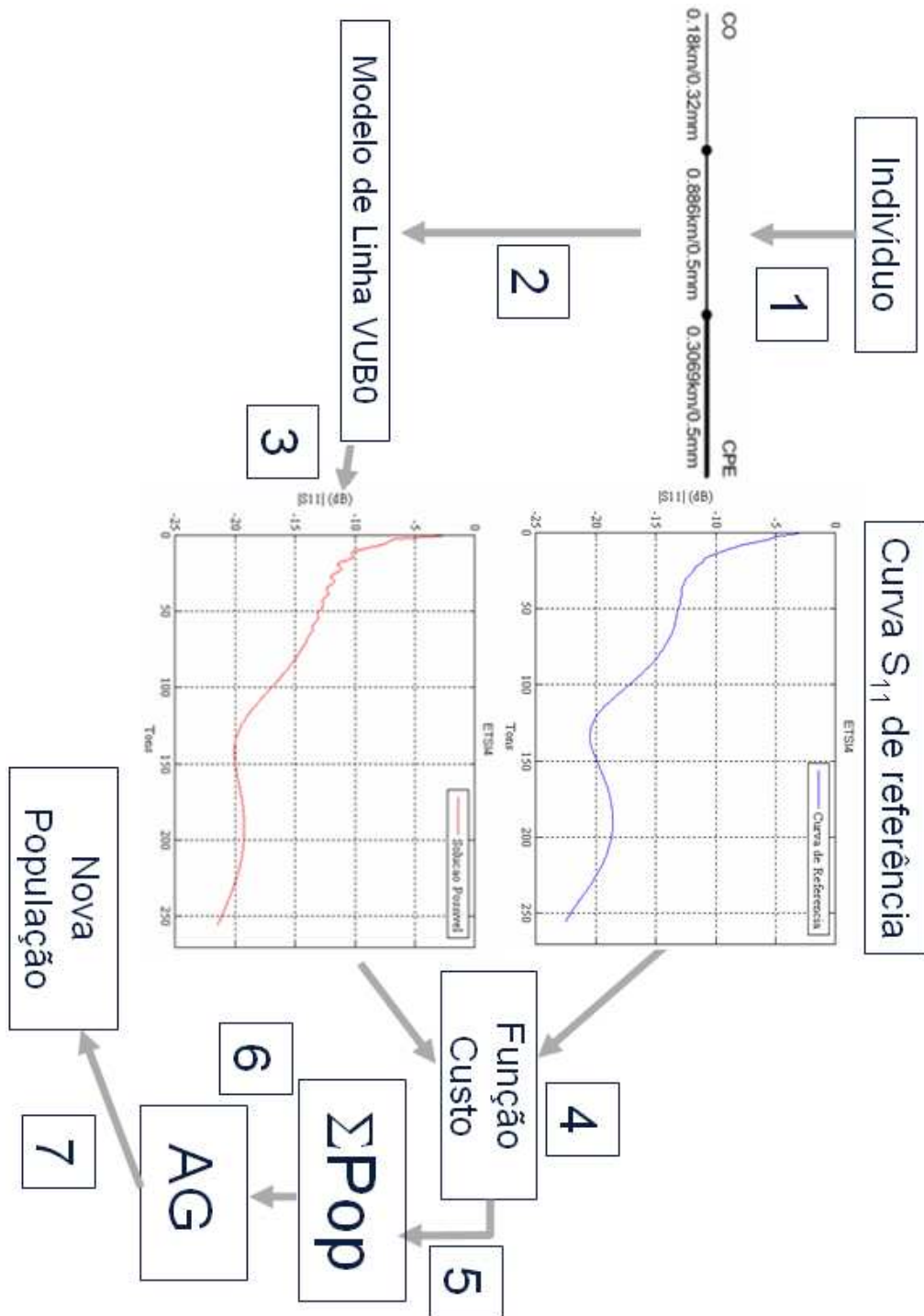


Figura 4.2: Diagrama de Funcionamento do Algoritmo

Segue a explicação de cada passo realizado.

1. Um indivíduo é decodificado e representado por uma estrutura *makeup*.
2. A estrutura *makeup* é aplicada ao modelo de linha VUB0.
3. O modelo de linha retorna o parâmetro de espalhamento da estrutura *makeup* de entrada.

4. As curvas  $S_{11}$  de referência e do indivíduo avaliado são comparadas na função custo e o valor do *fitness* é atribuído ao indivíduo.
5. Os passos de 1 à 4 são repetidos até que todos os indivíduos da população sejam avaliados.
6. Após todos indivíduos serem avaliados a população sofre as operações do AG.
7. Uma nova população é gerada.

### 4.2.3 Definição do Indivíduo

Cada indivíduo da população do AG representa um enlace completo com informações sobre o número de seções, bitola e comprimento de cada seção, número de derivações (*bridgedtap*) e suas posições. Logo, um indivíduo representará toda estrutura do enlace (*makeup*), porem terá a forma de um vetor com seus valores variando de 0 até 1.

A Figura 4.3 ilustra a representação de um indivíduo. Cada seção possui um valor normalizado do comprimento e bitola.

<b>Seção<sub>01</sub></b>
<b>Seção<sub>02</sub></b>
...
<b>Seção<sub>n</sub></b>
<b>BT<sub>2</sub></b>
<b>BT<sub>3</sub></b>
...
<b>BT<sub>nsecs</sub></b>
<b>M</b>
<b>N</b>

Figura 4.3: Representação de um indivíduo

Da Figura 4.3 tem-se:

Seção<sub>n</sub> - *n-ésimo* comprimento e *n-ésima* bitola.

BT<sub>nsecs</sub> - determina se as seções 2 até nsecs são *serial* ou derivação.

M - número de derivações.

N - número de seções.

Destaca-se que  $N$  determina o número de seções variando de um número mínimo até um valor máximo pré-fixado.  $M$  determina o número de derivações, que depende diretamente do número de seções, e  $BT_2$  até  $BT_{nsecs}$  determina a posição de cada derivação.

Basicamente, após cada indivíduo passar pelo processo de decodificação, o resultado será uma estrutura *makeup* representativa do enlace que aquele respectivo indivíduo possui.

A partir da estrutura *makeup* o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  é calculado, através do modelo físico de linha VUB0, e comparado à curva alvo configurada no início do processo de otimização.

### 4.3 Considerações sobre Qualificação SELT

A qualificação de enlaces pela técnica SELT utiliza medidas do parâmetro  $S_{11}$ , isto é, necessita de uma porta de referência somente (ver seção 2.4.4). Destaca-se que o uso de SELT prove resultados imprecisos para casos que a curva alvo  $S_{11}$  representa enlaces complexos, por exemplo, enlaces com mais de 3 seções [10]. Isto acontece pois somente o uso do parâmetro de espalhamento não oferece informações suficientes à técnica de otimização, logo não é possível alcançar bons resultados para a estrutura *makeup*, que representa o enlace.

## 5 Resultados

Neste capítulo será apresentado a implementação computacional de um *software* para qualificação de enlaces em sistemas xDSL através do uso de algoritmos genéticos multi-objetivos, bem como sua estrutura computacional, ferramentas computacionais utilizadas para a implementação e resultados encontrados a partir da avaliação do *software*.

### 5.1 Estrutura do Aplicativo

O *software* desenvolvido foi implementado usando a linguagem de programação C++ [21]. A IDE (*Integrated Development Environment*) de programação utilizada foi o pacote Microsoft Visual C++ .NET 2003 [22]. Destaca-se que classes relacionadas a funções matemáticas complexas (funções de Bessel, por exemplo) e para carregamento de variáveis (presentes em arquivos de texto) foram reaproveitadas de outros projetos já realizados pelos bolsistas do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado - LEA.

### 5.2 Modelagem UML (*Unified Modeling Language*)

A UML é uma linguagem de modelagem não proprietária, tratando-se de um método de desenvolvimento, isto é, auxilia a visualizar a comunicação entre objetos de um sistema [23].

A UML possui uma grande variedade de diagramas, sendo que cada um possui um objetivo específico. Neste trabalho será mostrado (no apêndice B) o diagrama de classes que descreve o *software* desenvolvido.

#### 5.2.1 Diagrama de Classes

O diagrama de classes apresenta a estrutura estática das classes de um sistema onde estas representam as ações que são gerenciadas pela aplicação modelada. Classes podem se relacionar com outras através de diversas maneiras: associação (conectadas entre



si), dependência (uma classe depende ou usa outra classe), especialização (uma classe é uma especialização de outra classe), ou em pacotes (classes agrupadas por características similares).

O diagrama de classes é considerado estático já que a estrutura descrita é sempre válida em qualquer ponto do ciclo de vida do sistema. Um sistema normalmente possui alguns diagramas de classes, já que não são todas as classes que estão inseridas em um único diagrama e certa classe pode participar de vários diagramas de classes.

O diagrama de classes do sistema foi desenvolvido através da técnica de engenharia reversa utilizando o software StarUML 5.0 [24].

As classes desenvolvidas neste trabalho estão divididas em 4 categorias de acordo com as afinidades entre si:

- Bases Matemáticas: classes responsáveis por todos os cálculos matemáticos bases para o *software*, por exemplo, cálculos com funções de Bessel [25]. As seguintes classes pertencem a esta categoria: MaxMin, Bessel e Complex.
- Modelo de linha: classes responsáveis por criar as bases para o modelo de linha VUB0 utilizado no *software*. As seguintes classes pertencem a esta categoria: DSLFlavors, EvalError, Line, Section, Matrix\_abcd, PhysModelContainer e VUB0.
- Algoritmo Evolutivo: classes responsáveis pela lógica do algoritmo evolutivo implementado. As seguintes classes pertencem a esta categoria: AlgorithmGA, Decode, GA, IndGA, e PopGA.
- Carregamento e configuração: classes responsáveis pelo carregamento das curvas alvos e dados referentes à configuração dos parâmetros do algoritmo genético. As seguintes classes pertencem a esta categoria: CLoadScript e Function.

O diagrama de classes do *software* está presente no apêndice B.

## 5.3 Parâmetros de Configuração do Algoritmo Genético

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros de configuração do algoritmo genético para cada simulação. Estes valores restringem o espaço de busca do processo de otimização. Sendo assim, o comprimento de seções seriais variam de 20 metros até 6 quilômetros, enquanto

Tabela 5.1: Parâmetros para simulação

Parâmentos do AG		
	Mínimo	Máximo
Taxa de mutação e <i>crossover</i>	0.01	0.85
Número de indivíduos	30	
Parâmetros do Enlace		
	Mínimo	Máximo
Comprimento de seções seriais (km)	0.02	6
Comprimento de seções derivação (km)	0.1	0.5
Número de derivações	0	1
Número de seções	1	4

seções de tipo derivação podem variar de 100m até 500m. O número de seções pode variar de 1 até 4, logo derivações podem não ocorrer ou no máximo 1 derivação é possível.

## 5.4 Análise dos Resultados

As simulações realizadas englobaram seis cenários europeus definidos da seção 2.3.1.3. Para cada cenário foram realizadas 10 simulações haja vista que a ferramenta de otimização é estocástica. Esta metodologia foi aplicada aos resultados obtidos pela qualificação de enlaces por SELT, conforme explicado na seção 2.3.

Destaca-se ainda que as curvas  $S_{11}$  e função de transferência utilizadas neste trabalho possuem 256 tons de frequência para a banda ADSL (ver seção 2.2.2).

### 5.4.1 Análise dos Resultados da Qualificação por SELT

Como mostrado na seção 4.3 a qualificação de enlaces pela técnica SELT utiliza somente medidas do parâmetro  $S_{11}$ . Assim, o *software* proposto utiliza este parâmetro como informação para encontrar o melhor enlace para representar o parâmetro  $S_{11}$  configurado como referência (alvo).

Foram realizadas 10 simulações para cada um dos cenários utilizados (ver seção

2.3.1.3). A partir destes dados foram criadas tabelas comparativas relacionando todas simulações. As tabelas referentes as simulações estão presentes no apêndice C.

A cada dez gerações do algoritmo genético um arquivo é salvo contendo o *fitness* e a estrutura *makeup* do melhor indivíduo desta geração. Ao final de cada simulação o arquivo mais atualizado é utilizado para a obtenção do parâmetro de espalhamento ( $S_{11}$ ) e a partir da topologia encontrada através da otimização do parâmetro de espalhamento, é calculado a função de transferência usando também o modelo de linha VUB0. Dessa forma, é possível avaliar o erro em dB entre a curva de função de transferência estimada e a curva de função de transferência do enlace real.

O critério de avaliação do algoritmo para qualificação por SELT, para todas as simulações, é baseado em conhecimentos práticos, isto é, para operação de um sistema o nível máximo de erro, tom a tom, aceitável para a função de transferência é definido como 2dB.

#### 5.4.1.1 Cenário ETSI#1

O cenário ETSI#1 é o mais simples do padrão DSL europeu. A Figura 5.1 o ilustra.

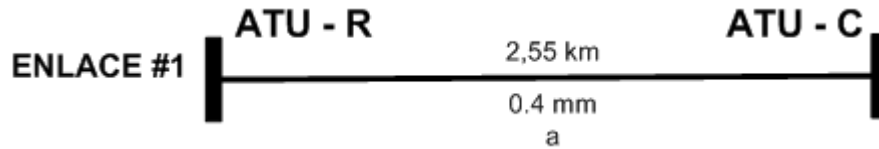


Figura 5.1: Cenário Europeu ETSI#1

A Figura 5.2 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência. Deve ser destacado que devido a otimização ser referente a curva de referência do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ , os erros referentes a essas curvas são bem menores e apresentam menores variabilidade que o caso da função de transferência que é obtida após o processo de otimização.

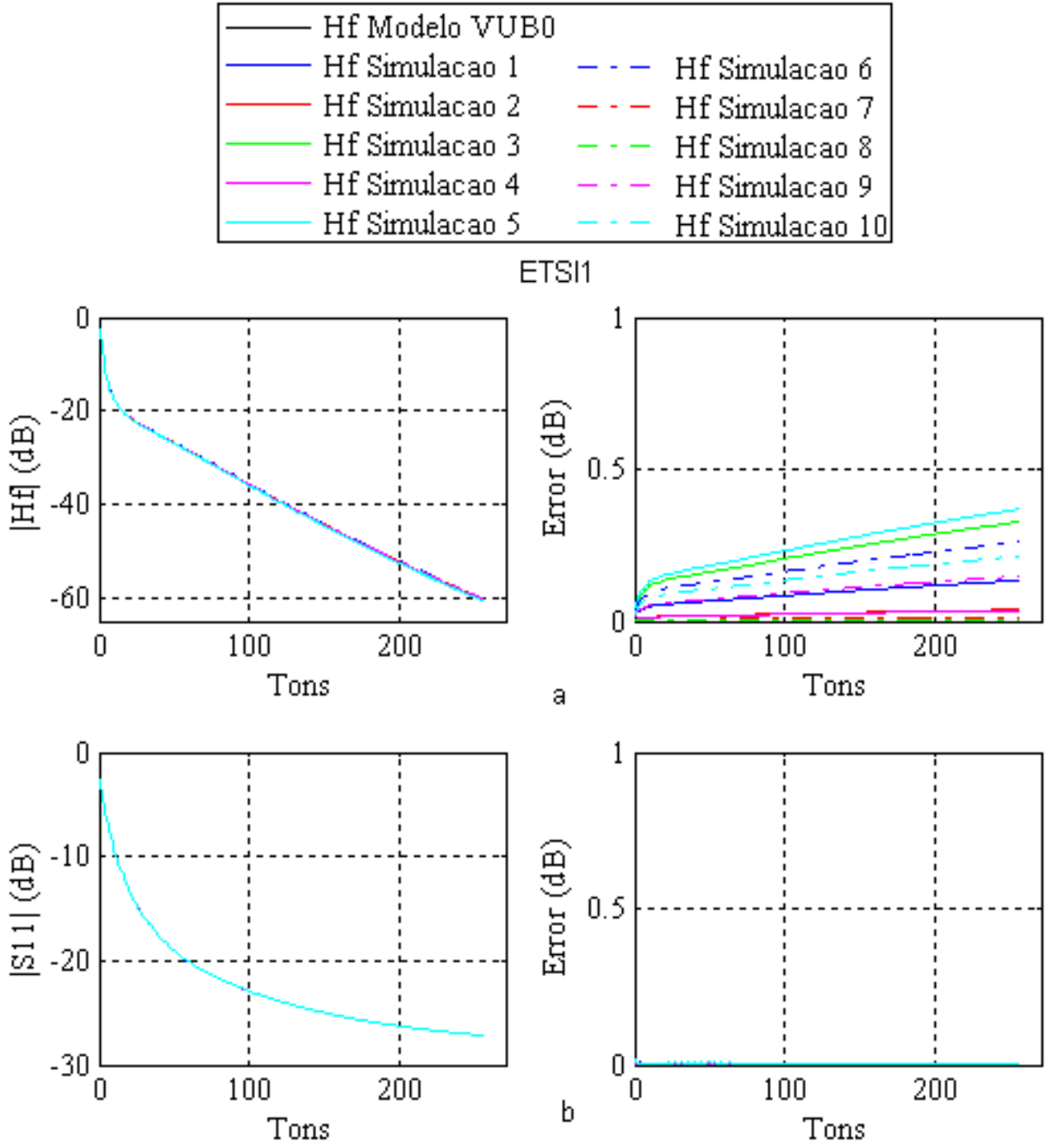


Figura 5.2: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#1

Observa-se que para ETSI#1 tanto  $S_{11}$  quanto a função de transferência apresentaram valores, tom a tom, próximos aos valores de suas respectivas curvas de referência, sendo o erro menor que 0.5dB, logo foi alcançado o critério de 2dB para a função de transferência.

#### 5.4.1.2 Cenário ETSI#2

O cenário ETSI#2 é mostrado na Figura 5.3.

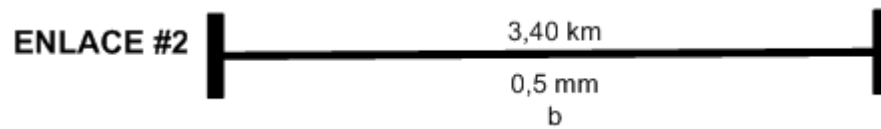


Figura 5.3: Cenário Europeu ETSI#2

A Figura 5.4 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência.

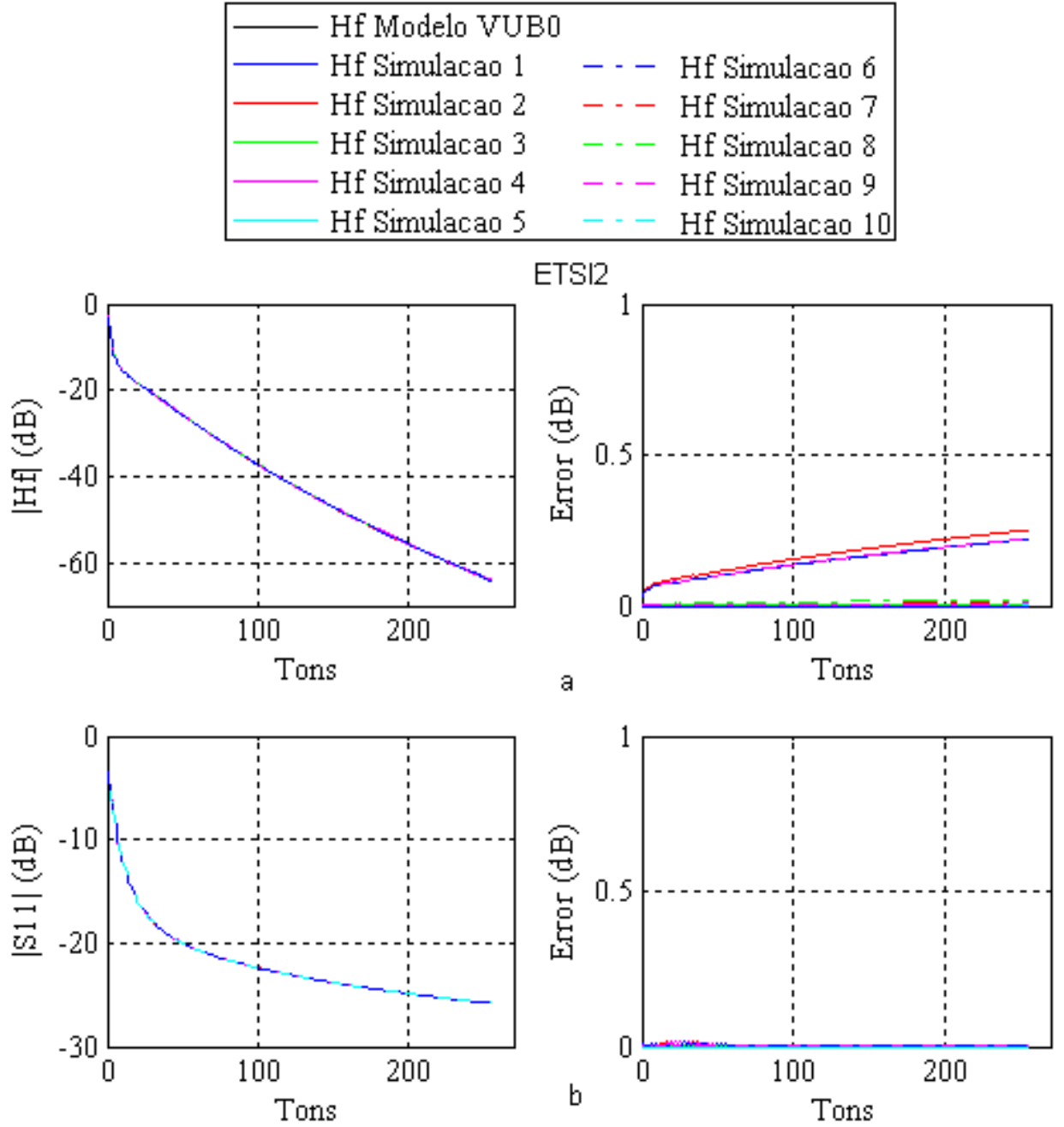


Figura 5.4: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#2

Observa-se que também para ETSI#2 tanto  $S_{11}$  quanto a função de transferência apresentaram valores, tom a tom, próximos aos valores de suas respectivas curvas de referência. A variabilidade do error foi menor que 0.5dB, obedecendo o critério de 2dB para a função de transferência.

#### 5.4.1.3 Cenário ETSI#3

O cenário ETSI#3 é mostrado na Figura 5.5.

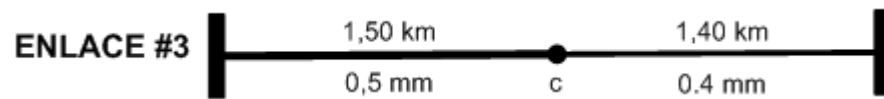


Figura 5.5: Cenário Europeu ETSI#3

A Figura 5.6 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência.

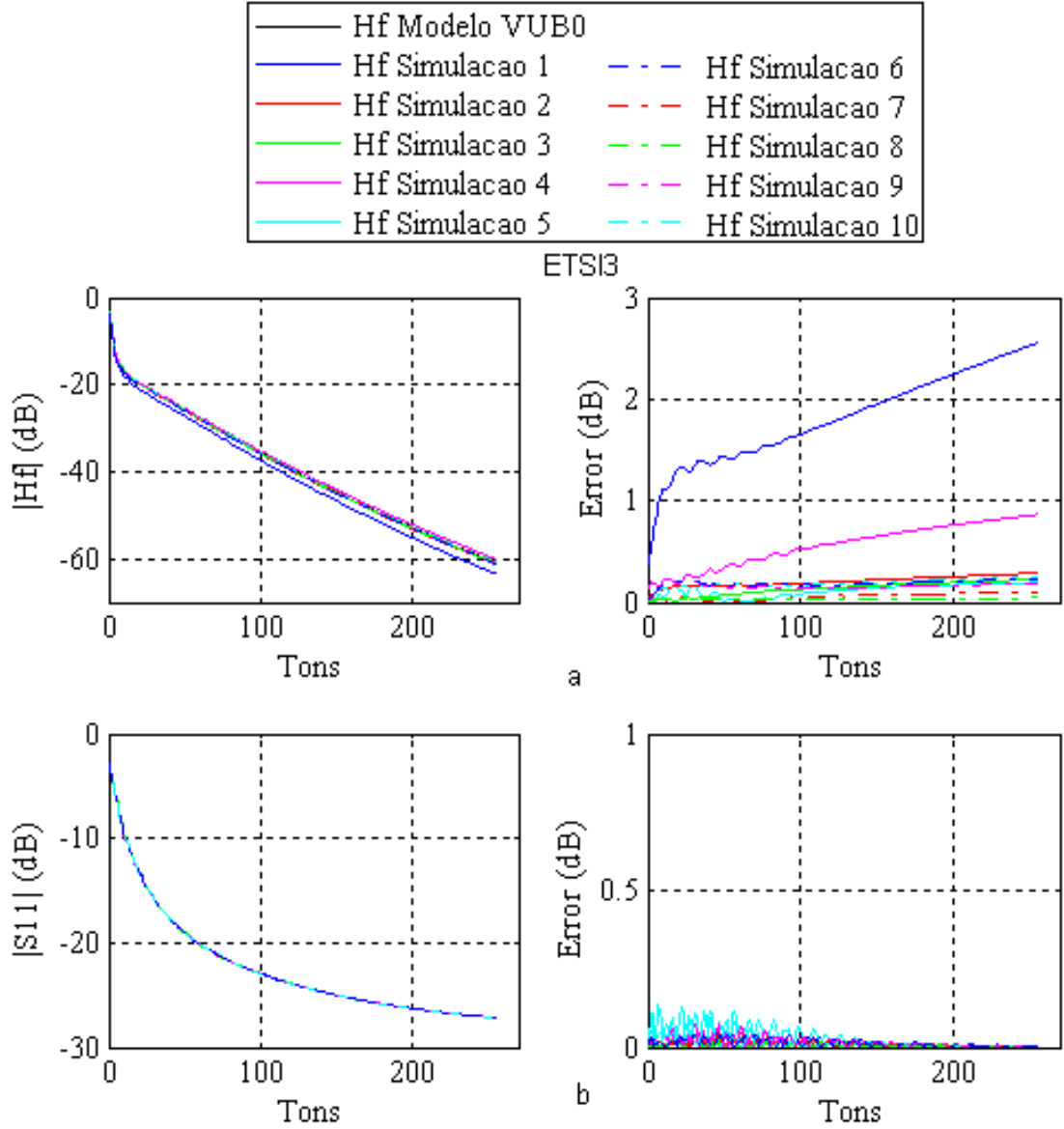


Figura 5.6: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#3

Para ETSI#3,  $S_{11}$  apresentou sua variabilidade de erro menor que 0.5dB. A função de transferência apresentou uma amostra com valores de erro tom a tom superiores ao critério de 2dB, entretanto é necessário salientar que a função de transferência é calculada após o processo de otimização.

#### 5.4.1.4 Cenário ETSI#4

O cenário ETSI#4 é mostrado na Figura 5.7.



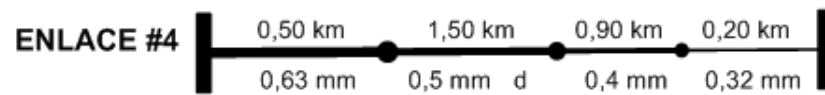


Figura 5.7: Cenário Europeu ETSI#4

A Figura 5.8 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência.

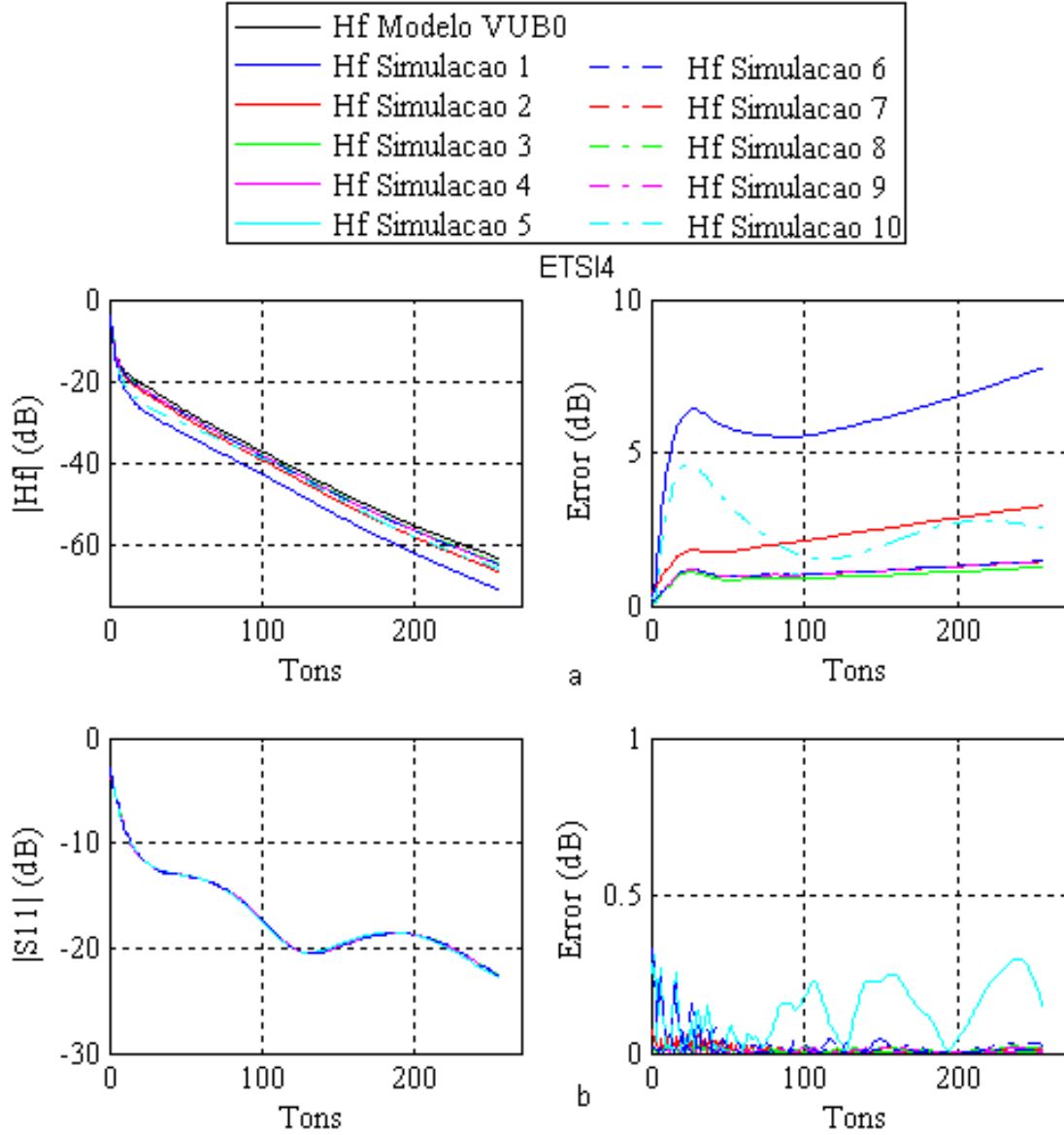


Figura 5.8: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#4

Para ETSI#4,  $S_{11}$  apresentou sua variabilidade de erro menor que 0.5dB. A função de transferência apresentou amostras com valores de erro tom a tom superiores ao critério de 2dB, porém ETSI#4 é um enlace considerado complexo para o processo de otimização haja vista a quantidade de seções e mudanças de bitolas.

#### 5.4.1.5 Cenário ETSI#6

O cenário ETSI#6 é mostrado na Figura 5.9.

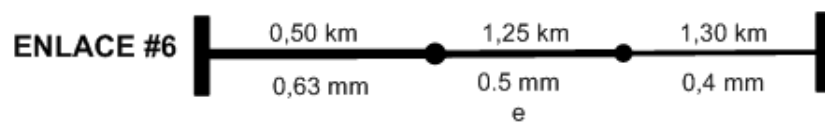


Figura 5.9: Cenário Europeu ETSI#6

A Figura 5.10 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência.

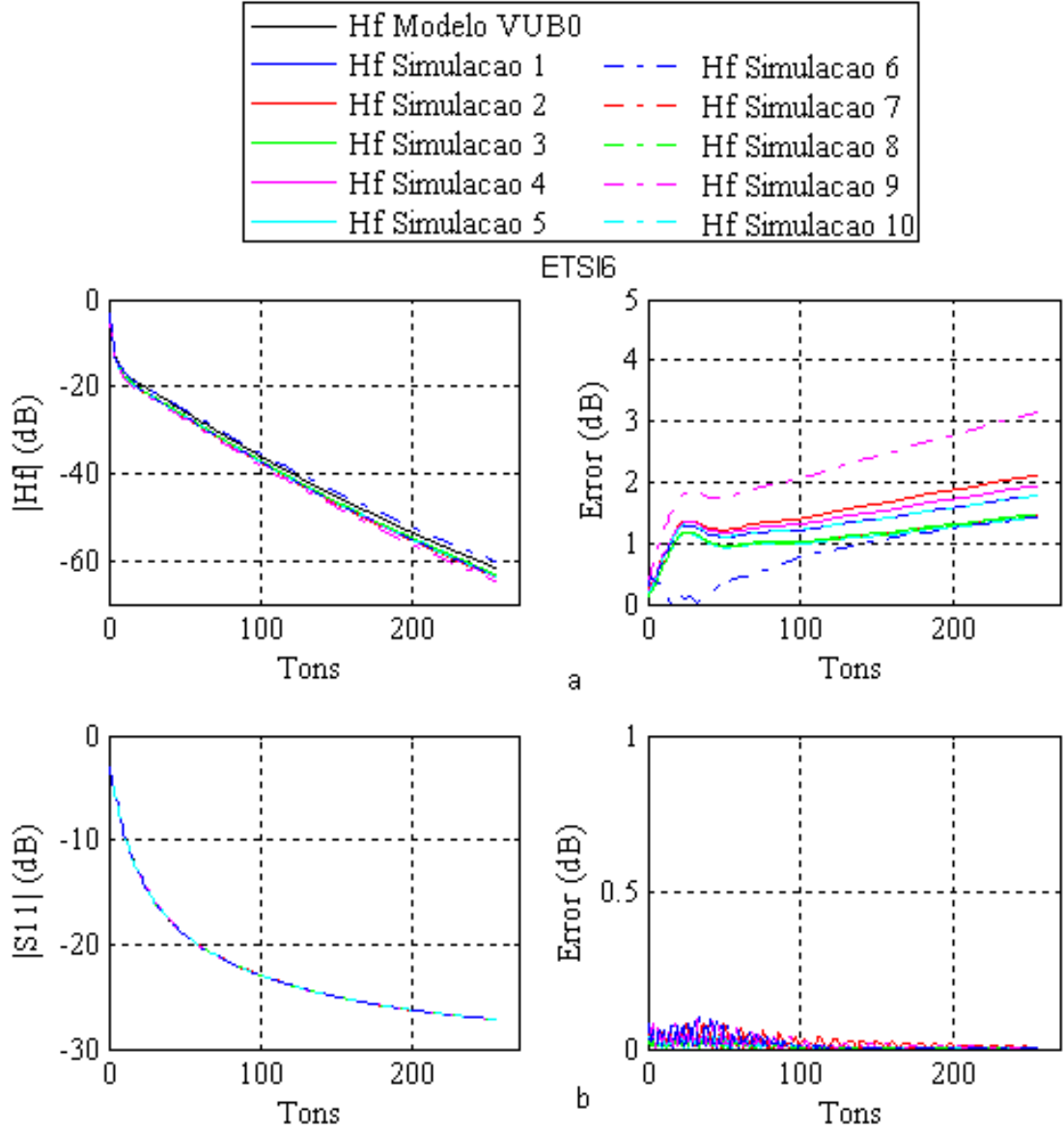


Figura 5.10: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#6

Para ETSI#6,  $S_{11}$  também apresentou sua variabilidade de erro menor que 0.5dB. A função de transferência apresentou amostras com valores de erro tom a tom superiores ao critério de 2dB. As mesmas análises feitas para ETSI#3 e ETSI#4 valem para ETSI#6.

#### 5.4.1.6 Cenário ETSI#7

O cenário ETSI#7 é mostrado na Figura 5.11.

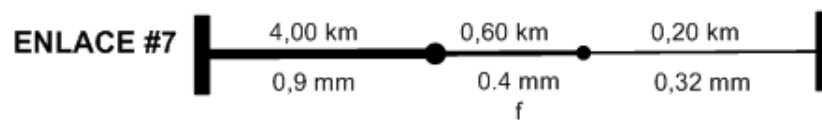


Figura 5.11: Cenário Europeu ETSI#7

A Figura 5.12 mostra o valor absoluto do parâmetro de espalhamento e da função de transferência tom a tom para cada uma das simulações realizadas, bem como seus respectivos erros em relação a curva de referência.

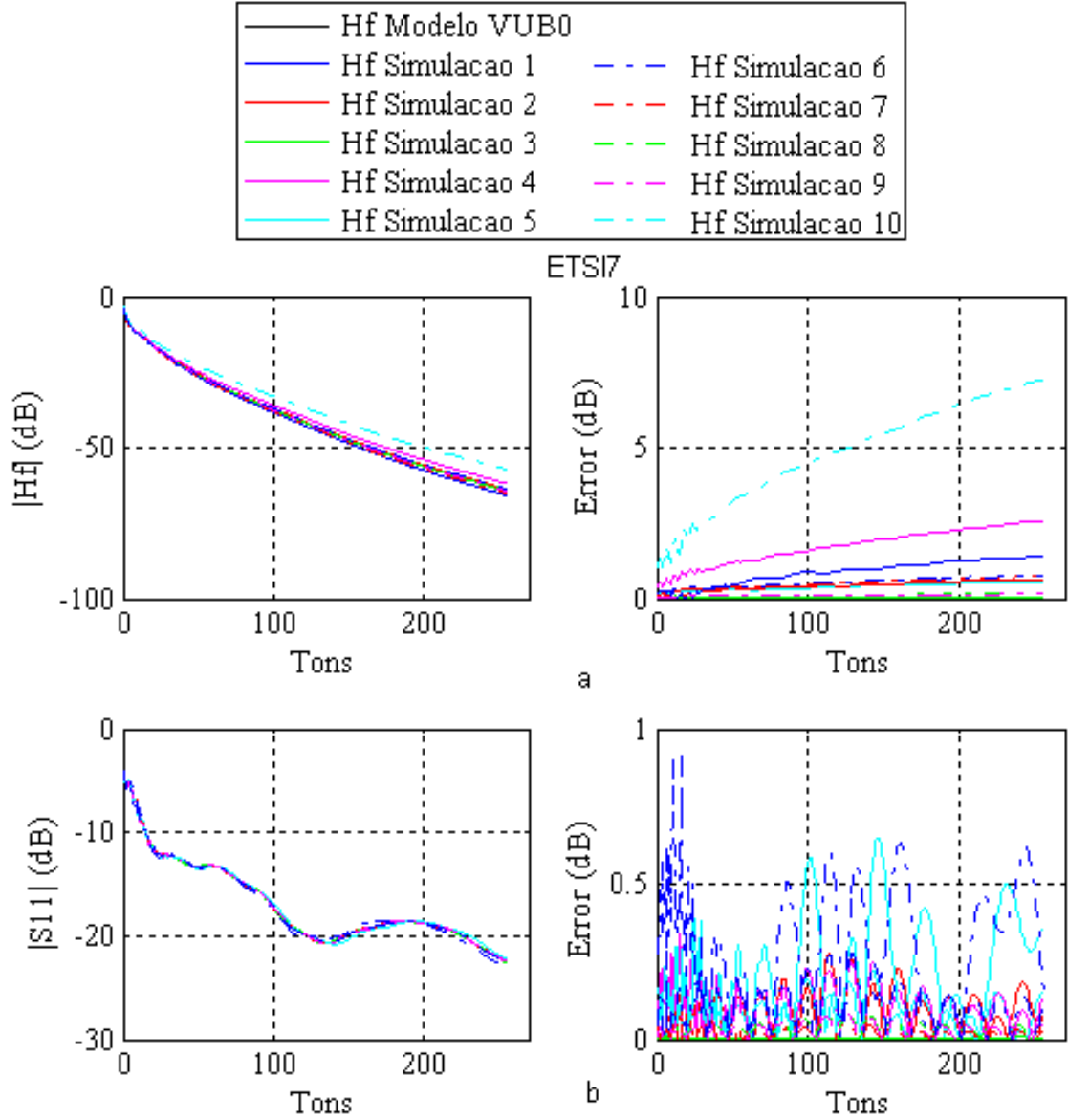


Figura 5.12: Magnitude de  $S_{11}$  e função de transferência para ETSI#7

Para ETSI#7,  $S_{11}$  apresentou sua variabilidade de erro menor que 1dB. A função de transferência apresentou amostras com valores de erro tom a tom superiores ao critério de 2dB. As mesmas análises feitas para ETSI#3 e ETSI#4 valem para ETSI#7.

Para facilitar o entendimento dos resultados, a Tabela 5.2 ilustra o resumo dos resultados obtidos. Um “sim” significa que  $S_{11}$  ou a função de transferência após otimizadas obedeceram o critério de 2dB.

Tabela 5.2: Resumo dos resultados

	Função Transferência
ETSI#1	sim
ETSI#2	sim
ETSI#3	sim, com ressalvas
ETSI#4	não
ETSI#6	sim, com ressalvas
ETSI#7	não

As ressalvas ETSI#3 e ETSI#6 justificam-se pois apenas algumas amostras obtiveram valores para o erro da função de transferência maior que 2dB.

## Conclusões

Este trabalho teve o propósito de apresentar o projeto de um *software* para qualificação de enlaces ADSL. Com o objetivo de cumprir esse intento, foi apresentada a teoria de sistemas DSL e a estrutura que compõe o algoritmo genético utilizado, além disso, destaca-se a metodologia aplicada à integração dessas duas teorias.

Ressalta-se que os resultados obtidos foram satisfatórios dentro do contexto do trabalho, pois mesmo a otimização sendo realizada apenas com a informação de uma porta, o comprimento total do enlace, por exemplo, foi encontrado com erro percentual inferior a 5% na quase totalidade das simulações.

Para os cenários ETSI#1 e ETSI#2, que possuem apenas uma seção, os resultados obtidos representaram com bastante precisão os enlace real, tanto em relação ao comprimento quanto a bitola da seção.

Para ETSI#3, o erro médio da estimação do comprimento das seções individuais variou em torno de 5% a 6% e as bitolas foram encontradas todas corretamente.

Para ETSI#4, que é o enlace mais complexo simulado, os resultados obtidos mostraram que para todas as simulações houve subestimação em uma seção, isto é, a última seção nunca foi encontrada e a terceira seção apresentou o comprimento aproximado das duas ultimas seções. Porém, as informações da primeira seção foram encontradas todas corretamente.

Para ETSI#6 e ETSI#7, houve o mesmo erro de subestimação da última seção, destacando-se também que as informações da primeira seção foram encontradas todas corretamente.

Destaca-se que os resultados para ETSI#4, ETSI#6 e ETSI#7, enlaces mais complexos, são importantes, pois mesmo com os erros observados, as bitolas das seções foram encontradas corretamente, bem com o comprimento da primeira seção, dessa forma, estas informações podem ser de grande valia para os provedores de acesso DSL.

Os resultados encontrados para os enlaces simulados mostram que a abordagem por algoritmos genéticos para qualificação de enlaces em sistemas DSL é uma estratégia



bastante promissora. Ainda que possam ser melhorados com a adição das seguintes melhorias, sugeridas como trabalhos futuros:

- Testar o *software* com curvas de referência medidas a partir de cabos reais.
- Extensão do software para otimização de outro objetivo durante o processo de otimização. Com o advento dos padrões para ADSL2 e ADSL2+ (ITU-T G.992.3 e G.992.5) os modems têm agora a funcionalidade de loop diagnostic, podendo ser obtidas medidas de função de transferência diretamente através de técnicas baseadas em DELT. Dessa, forma seria possível usar medidas de função de transferência como objetivo adicional no processo de otimização. Para tanto, seria necessário a utilizar algoritmos genéticos multiobjetivos.
- Em termos de técnica evolutiva, outra possibilidade seria comparar os resultados obtidos usando outra técnica evolutiva, como por exemplo, o *Particle Swarm Optimization* - PSO.
- Adicionar técnicas analíticas que obtenção de informações a priori do enlace sob teste, e assim diminuir o tempo de convergência do algoritmo desenvolvido.
- Adição de técnicas auxiliares para melhorar a taxa de convergência do algoritmo de otimização, tais técnicas seriam baseadas em restrições no espaço de busca e no aumento de inteligência computacional das técnicas de otimização.
- Aplicação do software para qualificação de enlaces em sistemas de maior largura de banda, como por exemplo, sistemas VDSL.

## Referências Bibliográficas

- [1] International Telecommunication Union Telecommunication G.993.2, VDSL2 - The Ideal Access Technology for Delivering Video Services Revision 2, 2006.
- [2] A First Tutorial on Interconnect Crosstalk, February 12, 2002. Disponível em: <http://vlsicad.ucsd.edu/courses/ece260b-w04/crosstalk-tutorial.pdf>. Acessado em: 23 fev.2007.
- [3] American National Standard Institute T1.413 For telecommunications - Network and Customer Installation Interfaces - Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) metallic interface, 1998.
- [4] International Telecommunication Union - Telecommunication G.992.2, Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers 2 (ADSL2), 2002.
- [5] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [6] T. Bostoen, P. Boets, M. Zekri, L. Van Biesen, T. Pollet and D. Rabijns, *Estimation of the Transfer Function of a Subscriber Loop by Means of One-Port Scattering Parameter Measurement at the Central Office*, IEEE Journal on Selected Areas in Communication-Twisted Pair Transmission, Vol. 20, No. 5, pp936-948, June 2002.
- [7] V. Belevitch, "Theory of the proximity effect in multiwire cablesPart I", Philips Res. Rep., vol. 32, pp. 1643, Sept. 1977.
- [8] MUSE C2.2 Position paper on loop qualification and monitoring outlining general features the developed loop qualification and monitoring solution should fulfil, 2004.
- [9] 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.
- [10] M. Nilsson, *Management of a DSL Copper Network Using Built-in Loop Qualification Tools*. Master's degree project, Stockholm, 2005, Pagnas 11 - 31.

- [11] A. Wia, *Loop Qualification for xDSL*, Master of Science Thesis in Digital Signal Processing, Ericsson Telecom AB, February 2001, Stockholm.
- [12] Whitley, D. (1994). *A genetic algorithm tutorial*. Statistics and Computing 4, 65-85.
- [13] Salvador, Otavio. *Introdução a Algoritmos Genéticos*. Anais do I Workshop de Verão de fundamentos da Computação (WFC'2002), vol. 1, pp. 35-42, 29 e 30 de novembro, 2002.
- [14] Castro, Rodrigo Evangelista de, (2001) *Otimização de Estruturas com Multi-Objetivos via Algoritmos Genéticos*, Tese Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE.
- [15] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, second edition, 2002.
- [16] AARTS, E. & KORST, J. *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*, John Wiley & Sons, 1989.
- [17] MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M. *Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems*, Evolutionary Computation, vol. 4, no. 1, pp. 1-32, 1996.
- [18] Ticona, Waldo Gonzalo Cancino (2003) *Aplicação de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para alinhamento de Seqüências Biológicas*, Dissertação Mestrado - USP - São Carlos.
- [19] Deb, K. [2001], *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, New York.
- [20] R. Pintelon, P. Guillaume, Y. Rolain, J. Schoukens, and H. Van hamme, *Parametric identification of transfer functions in the frequency domain - A survey*, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 39, pp. 2245-2260, Nov. 1994.
- [21] The C++ Resources Network. Disponível em: <http://www.cplusplus.com/>. Acessado em: 15 fev.2007.

- 
- [22] Microsoft Visual Studio 2003 .NET. Disponível em: <http://msdn2.microsoft.com/en-us/vstudio/aa700867.aspx>. Acessado em: 15 fev.2007.
- [23] Unified Modeling Language - UML - by OMG. Disponível em: <http://www.omg.org/UML/>. Acessado em: 15 fev.2007.
- [24] StarUML - The Open Source UML/MDA Platform. Disponível em: <http://staruml.sourceforge.net/en/>. Acessado em: 15 fev.2007.
- [25] Bessel Function from Wolfram MathWorld. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/BesselFunction.html>. Acessado em: 15 fev.2007.
- [26] International Telecommunication Union Telecommunication G.996.1, Test Procedures for Digital Subscriber Line (DSL) Transceivers, 2001.
- [27] International Telecommunication Union Telecommunication G.996.1, Test Procedures for Digital Subscriber Line (DSL) Transceivers, 2001.
- [28] Insertion Loss Measurement Methods - SiteMasters APPLICATION NOTE. March 2003. Disponível em: <http://www.eu.anritsu.com/files/11410-00276.pdf>. Acessado em: 22 fev.2007.

## A Enlaces ETSI

A Figura A.1 ilustra seis cenários de enlaces DSL que posteriormente serão utilizados como alvos no processo de qualificação de enlaces. Os enlaces ilustrados pertencem ao padrão europeu de enlaces DSL [27]. Os cenários de testes europeus ETSI são definidos pelo setor de padronização da ITU (*International Telecommunication Union*) através do documento de recomendação G.996.1 [27].

Destaca-se que para todos cenários adotou-se *Insertion Loss* de 36dB [28]. Os cenários caracterizam-se:

- ETSI#1: É o mais simples dos cenários europeus, consistindo de uma seção serial de 2.55km (para IL=36dB) e bitola 0.4mm (ilustrado na Figura A.1a).
- ETSI#2: Consiste de uma seção serial de 3.4km (para IL=36dB) e bitola 0.5mm (ilustrado na Figura A.1b).
- ETSI#3: Consiste de duas seções seriais de 1.4km (para IL=36dB) e 1.5km, possuindo bitolas de 0.4mm e 0.5mm, respectivamente (ilustrado na Figura A.1c).
- ETSI#4: Consiste de quatro seções seriais de 1.45km (para IL=36dB), 0.75km, 1.5km e 0.5km, possuindo bitolas de 0.32mm, 0.4mm, 0.5mm e 0.63mm, respectivamente (ilustrado na Figura A.1d).
- ETSI#6: Consiste de três seções seriais de 1.3km (para IL=36dB), 1.25km e 0.5km, possuindo bitolas de 0.4mm, 0.5mm e 0.63mm, respectivamente (ilustrado na Figura A.1e).
- ETSI#7: Consiste de três seções seriais de 0.2km, 0.6km (para IL=36dB) e 4km, possuindo bitolas de 0.32mm, 0.4mm e 0.9mm, respectivamente (ilustrado na Figura A.1f).

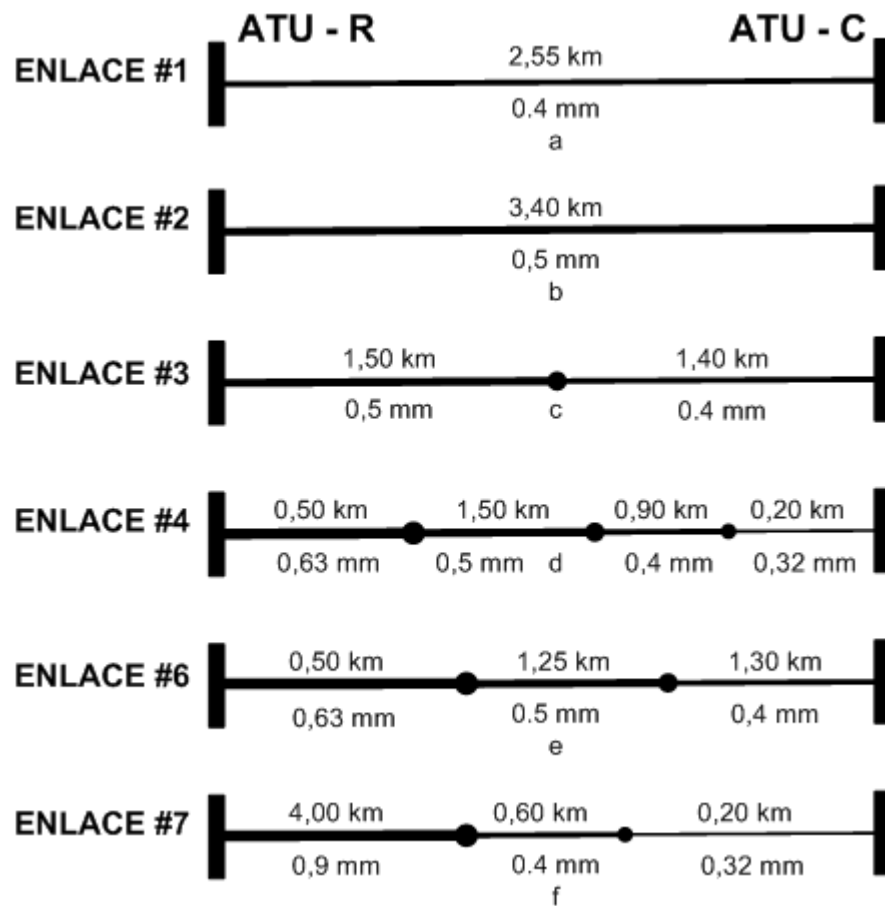


Figura A.1: Enlaces ETSI1, ETSI2, ETSI3, ETSI4, ETSI6 e ETSI7

Os cabos ilustrados pela Figura A.1 são do tipo PE, ou seja, apresentam o polietileno como isolante. Nos enlaces, a letra D representa uma derivação e a unidade remota, que representa o assinante ATU-R, encontra-se no lado esquerdo seguindo a recomendação europeia em [27].



## C Tabelas Comparativas



Tabela C.1: Tabela de simulações para ETSI#1 parte 1

ETSI # 1				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5500		
	bitola (mm)	0,4000		
Simulação1				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5551	Error%	0,2016
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000
Simulação2				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5486	Error%	0,0565
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000
Simulação3				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5626	Error%	0,4925
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000
Simulação4				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5514	Error%	0,0541
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000
Simulação5				
	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5642	Error%	0,5561
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Tabela C.2: Tabela de simulações para ETSI#1 parte 2

Simulação6

	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5400	Error%	0,3910
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Simulação7

	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5495	Error%	0,0216
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Simulação8

	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5502	Error%	0,0059
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Simulação9

	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5443	Error%	0,2220
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Simulação10

	Tipo	Serial		
	comprimento (km)	2,5582	Error%	0,3227
	bitola (mm)	0,4000	Error%	0,0000

Tabela C.3: Erro e desvio padrão para ETSI#1

	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	0,2324	0,0000
Desvio padrão das simulações (%)	0,0070	0,0000

Tabela C.4: Tabela de simulações para ETSI#2 parte 1

ETSI # 2

	Tipo	Serial
comprimento (km)		3,40
bitola (mm)		0,50

Simulação1

	Tipo	Serial		
comprimento (km)		3,40	Error%	0,00
bitola (mm)		0,50	Error%	0,00

Simulação2

	Tipo	Serial		
comprimento (km)		3,41	Error%	0,36
bitola (mm)		0,50	Error%	0,00

Simulação3

	Tipo	Serial		
comprimento (km)		3,40	Error%	0,00
bitola (mm)		0,50	Error%	0,00

Simulação4

	Tipo	Serial		
comprimento (km)		3,41	Error%	0,32
bitola (mm)		0,50	Error%	0,00

Simulação5

	Tipo	Serial		
comprimento (km)		3,40	Error%	0,00
bitola (mm)		0,50	Error%	0,00

Tabela C.5: Tabela de simulações para ETSI#2 parte 2

Simulação6

Tipo	Serial		
comprimento (km)	3,40	Error%	0,00
bitola (mm)	0,50	Error%	0,00

Simulação7

Tipo	Serial		
comprimento (km)	3,40	Error%	0,01
bitola (mm)	0,50	Error%	0,00

Simulação8

Tipo	Serial		
comprimento (km)	3,40	Error%	0,03
bitola (mm)	0,50	Error%	0,00

Simulação9

Tipo	Serial		
comprimento (km)	3,40	Error%	0,01
bitola (mm)	0,50	Error%	0,00

Simulação10

Tipo	Serial		
comprimento (km)	3,41	Error%	0,31
bitola (mm)	0,50	Error%	0,00

Tabela C.6: Erro e desvio padrão para ETSI#2

	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	0,10	0,00
Desvio padrão das simulações (%)	0,01	0,00

Tabela C.7: Tabela de simulações para ETSI#3 parte 1

ETSI # 3						
	Tipo	Serial	Serial			
	comprimento (km)	1,4000	1,5000			
	bitola (mm)	0,4000	0,5000			
Simulação1						
	Tipo	Serial	Serial		Seção1	Seção2
	comprimento (km)	1,2840	1,6563	Error%	8,2871	10,4220
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000
Simulação2						
	Tipo	Serial	Serial			
	comprimento (km)	1,4312	1,4745	Error%	2,2271	1,6980
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000
Simulação3						
	Tipo	Serial	Serial			
	comprimento (km)	1,3717	1,5467	Error%	2,0229	3,1133
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000
Simulação4						
	Tipo	Serial	Serial			
	comprimento (km)	1,4481	1,3971	Error%	3,4357	6,8573
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000
Simulação5						
	Tipo	Serial	Serial			
	comprimento (km)	1,6340	1,3280	Error%	16,7107	11,4658
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

Tabela C.8: Tabela de simulações para ETSI#3 parte 2

## Simulação6

	Tipo	Serial	Serial			
comprimento (km)		1,3520	1,5484	Error%	3,4279	3,2247
bitola (mm)		0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

## Simulação7

	Tipo	Serial	Serial			
comprimento (km)		1,4460	1,4370	Error%	3,2843	4,1997
bitola (mm)		0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

## Simulação8

	Tipo	Serial	Serial			
comprimento (km)		1,3873	1,5140	Error%	0,9107	0,9327
bitola (mm)		0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

## Simulação9

	Tipo	Serial	Serial			
comprimento (km)		1,4685	1,4225	Error%	4,8936	5,1667
bitola (mm)		0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

## Simulação10

	Tipo	Serial	Serial			
comprimento (km)		1,4644	1,4299	Error%	14,0540	4,6767
bitola (mm)		0,4000	0,5000	Error%	0,0000	0,0000

Tabela C.9: Erro e desvio padrão para ETSI#3

	Seção	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	1	5,9254	0,0000
	2	5,1757	0,0000
Desvio padrão das simulações (%)	1	0,0880	0,0000
	2	0,0888	0,0000

Tabela C.10: Tabela de simulações para ETSI#4 parte 1

ETSI # 4

	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	Comp.Total (km)
	comp. (km)	0,20000	0,90000	1,50000	0,50000	3,10000
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,63000	
Simu1						Comp.TotalError%
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20004	0,89961	1,98701	0,00000	0,43048
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu2						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20012	0,88950	2,08701	0,00000	2,47216
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu3						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20020	0,89203	1,98671	0,00000	0,67935
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu4						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,19996	0,89992	1,98664	0,00000	0,43474
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu5						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20312	2,69370	0,00000	0,00000	6,55410
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,00000	0,00000	

Tabela C.11: Tabela de simulações para ETSI#4 parte 2

Simu6						Comp.TotalError%
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,19967	2,46525	0,12626	0,00000	9,96184
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,90000	0,00000	
Simu7						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20004	0,89938	1,98703	0,00000	0,43729
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu8						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20000	0,89977	1,98687	0,00000	0,43090
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu9						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20021	0,90019	1,98599	0,00000	0,43916
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	
Simu10						
	Tipo	Serial	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,20011	0,89965	1,98748	0,00000	0,41158
	bitola (mm)	0,32000	0,40000	0,50000	0,00000	



Tabela C.12: Erros (%) para ETSI#4

Simu1				
	Seção1	Seção2	Seção3	Seção4
Error Comprimento%	0,02000	0,04389	32,46733	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu2				
Error Comprimento%	0,06200	1,16633	39,13400	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu3				
Error Comprimento%	0,10000	0,88556	32,44733	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu4				
Error Comprimento%	0,01950	0,00867	32,44267	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu5				
Error Comprimento%	1,56150	199,30000	100,00000	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	100,00000	100
Simu6				
Error Comprimento%	0,16350	173,91667	91,58267	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	80,00000	100
Simu7				
Error Comprimento%	0,01850	0,06922	32,46867	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu8				
Error Comprimento%	0,00100	0,02556	32,45800	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu9				
Error Comprimento%	0,10450	0,02078	32,39933	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100
Simu10				
Error Comprimento%	0,03649	0,03911	32,49867	100
Error Bitola%	0,00000	0,00000	0,00000	100

Tabela C.13: Erro e desvio padrão para ETSI#4

	Seção	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	1,00000	0,20870	0,00000
	2,00000	37,54758	0,00000
	3,00000	45,78987	18,00000
	4,00000	100,00000	100,00000
Desvio padrão das simulações (%)	1,00000	0,00094	0,00000
	2,00000	0,67473	0,00000
	3,00000	0,77557	0,20224
	4,00000	0,00000	0,00000
Comp.TotalError Médio(%)	1,03		

Tabela C.14: Tabela de simulações para ETSI#6 parte 1

ETSI # 6

	Tipo	Serial	Serial	Serial	Comp.Total (km)
	comp. (km)	1,3000	1,2500	0,5000	3,0500
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,6300	
Simu1					Comp.TotalError%
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2999	1,7352	0,0000	0,4898
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu2					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2669	1,8104	0,0000	0,8964
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu3					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,3000	1,7375	0,0000	0,4102
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu4					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2975	1,7636	0,0000	0,3616
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu5					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2993	1,7535	0,0000	0,0902
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	

Tabela C.15: Tabela de simulações para ETSI#6 parte 2

Simu6	Comp.TotalError%				
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,3062	1,7448	0,0000	0,0308
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu7					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2992	1,7371	0,0000	0,4495
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu8					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,2995	1,7365	0,0000	0,4597
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu9					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,3268	1,7847	0,0000	2,0170
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	
Simu10					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	1,3010	1,5950	0,0000	5,0495
	bitola (mm)	0,4000	0,5000	0,0000	

Tabela C.16: Erros (%) para ETSI#6

Simu1		Seção1	Seção2	Seção3
Comprimento	Error%	0,0092	38,8144	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu2				
Comprimento	Error%	2,5431	44,8320	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu3				
Comprimento	Error%	0,0008	38,9984	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu4				
Comprimento	Error%	0,1938	41,0840	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu5				
Comprimento	Error%	0,0569	40,2792	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu6				
Comprimento	Error%	0,4762	39,5800	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu7				
Comprimento	Error%	0,0600	38,9656	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu8				
Comprimento	Error%	0,0423	38,9224	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu9				
Comprimento	Error%	2,0623	42,7768	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000
Simu10				
Comprimento	Error%	0,0877	27,5976	100,0000
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	100,0000

Tabela C.17: Erro e desvio padrão para ETSI#6

	Seção	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	1	0,5532	0,0000
	2	39,1850	0,0000
	3	100,0000	100,0000
Desvio padrão das simulações (%)	1	0,0136	0,0000
	2	0,0537	0,0000
	3	0,0000	0,0000
Comp.TotalErrorMed%		1,0255	

Tabela C.18: Tabela de simulações para ETSI#7 parte 1

ETSI # 7

	Tipo	Serial	Serial	Serial	Comp.Total (km)
	comp. (km)	0,2000	0,6000	4,0000	4,8000
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu1					Comp.TotalError%
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,1993	0,5741	4,0102	0,3414
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu2					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2006	0,5638	4,0236	0,2493
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu3					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,1999	0,6001	4,0000	0,0007
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu4					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,1997	0,5643	3,8641	3,5821
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu5					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,1957	0,5473	4,2392	3,7962
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	

Tabela C.19: Tabela de simulações para ETSI#7 parte 2

Simu6	Comp.TotalError%				
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2057	0,5389	3,5168	11,2214
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu7					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2000	0,5929	4,0770	1,4565
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu8					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2000	0,5880	4,0114	0,0116
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu9					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2000	0,5891	4,0106	0,0060
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	
Simu10					
	Tipo	Serial	Serial	Serial	
	comp. (km)	0,2000	0,5801	4,0109	0,1861
	bitola (mm)	0,3200	0,4000	0,9000	



Tabela C.20: Erros (%) para ETSI#7

Simu1		Seção1	Seção2	Seção3
Comprimento	Error%	0,3660	4,3110	0,2553
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu2				
Comprimento	Error%	0,3095	6,0307	0,5900
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu3				
Comprimento	Error%	0,0370	0,0130	0,0007
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu4				
Comprimento	Error%	0,1700	5,9457	3,3982
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu5				
Comprimento	Error%	2,1655	8,7807	5,9808
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu6				
Comprimento	Error%	2,8315	10,1833	12,0798
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu7				
Comprimento	Error%	0,0165	1,1868	1,9250
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu8				
Comprimento	Error%	0,0060	1,9978	0,2855
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu9				
Comprimento	Error%	0,0035	1,8090	0,2640
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000
Simu10				
Comprimento	Error%	0,3683	3,3090	0,2730
Bitola	Error%	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela C.21: Erro e desvio padrão para ETSI#7

	Seção	Comprimento	Bitola
Erro médio das simulações (%)	1	0,62738482	0,00
	2	4,35670000	0,00
	3	2,50523250	0,00
Desvio padrão das simulações (%)	1	0,00227584	0,00
	2	0,01908200	0,00
	3	0,17622626	0,00
Comp.TotalErrorMed%		2,08512500	