

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

METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHAS TELEFÔNICAS  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MEDIÇÕES EM UMA E EM DUAS PORTAS

VINICIUS DUARTE LIMA

TD 07/2013

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2013



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

VINICIUS DUARTE LIMA

METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHAS TELEFÔNICAS  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MEDIÇÕES EM UMA E EM DUAS PORTAS

TD 07/2013

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2013

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

VINICIUS DUARTE LIMA

METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHAS TELEFÔNICAS  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MEDIÇÕES EM UMA E EM DUAS PORTAS

Tese de doutorado submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Lima, Vinicius Duarte, 1981-  
Metodologia para estimação da topologia de  
linhas telefônicas através da análise de  
medições em uma e em duas portas / Vinicius  
Duarte Lima. - 2013.

Orientador: Aldebaro Klautau Júnior;  
Coorientador: João Costa.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2013.

1. Linhas telefônicas. 2. Topologia. 3.  
Linhas por assinatura digital. 4. Sistemas  
especialistas (Computação). I. Título.

CDD 23. ed. 621.38784

---

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

**METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHAS  
TELEFÔNICAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MEDIÇÕES EM UMA E EM DUAS  
PORTAS**

**AUTOR: VINICIUS DUARTE LIMA**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 20 DE JUNHO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:

---

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

---

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa  
(CO-ORIENTADOR – UFPA)

---

Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro  
(MEMBRO – ENGGCOMP/UFPA)

---

Prof. Dr. Eduardo Antônio Barros da Silva  
(MEMBRO – UFRJ)

---

Prof. Dr. Licinius Dimitri de Sá Alcântara  
(MEMBRO – ICIBE/UFRA)

---

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo  
(MEMBRO – ENGGCOMP/UFPA)

VISTO:

---

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

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2013

*Dedico este trabalho mais uma vez a todos aqueles que sempre acreditaram mais em mim do que eu mesmo: meus avós, meus pais, minha irmã, minha esposa, meus amigos e meus mestres.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Aldebaro e João por todo o apoio e orientação.

Ao Klas e ao Antoni na Ericsson pelas valiosas contribuições tanto no trabalho em si como para minha experiência profissional em geral.

À Ericsson pelo suporte financeiro e determinação das metas.

À Lilian por sua amizade, e sempre disponibilidade para ajudar, seja imprimindo minha qualificação, seja no apoio logístico no dia da defesa. Também gostaria de agradecer ao Roberto pelas valiosas contribuições e também pela disponibilidade e apoio.

Não posso deixar de lembrar o apoio e contribuições de Gilvan, Claudomiro, Lamartine, Josi, Marco, além de Renan, Ramon, e demais amigos e companheiros do LEA, do LAPS e do LPRAD.

À Carla por sua preocupação, disponibilidade e esforço em imprimir a versão da tese que foi até a banca, quando não pude fazê-lo.

À Kelly, Liane, Janane e Delson pelo contínuo apoio logístico. Além de Darcy que ajudou bastante na parte técnica da defesa.

À minha esposa pelo amor, paciência e pela motivação, além do constante apoio e suporte em todos os aspectos, até mesmo na revisão de minha tese.

Aos meus pais e minha irmã e também a meus amigos que nunca deixaram de acreditar e torcer por mim.

Também sou grato a todos os meus professores e orientadores, pois cada um contribuiu de uma forma ou de outra, para a minha formação e cujos ensinamentos certamente estarão presentes em minhas futuras conquistas.

À Nova Acrópole e a todos nela por compartilhar de um Ideal de vida e me ensinar que podemos ser melhores do que somos, dando-me também algo pelo que lutar todos os dias.

À Deus.

*“Se vais por um caminho que tuas mãos constroem dia após dia, chegarás ao lugar onde deves estar.”*

**Máxima de Ani**

## RESUMO

Nesta tese é proposta uma metodologia para identificação automática de topologias de linhas telefônicas compostas de uma ou mais seções de linha, as quais são utilizadas em sistemas de linhas digitais de assinante (DSL, do inglês *digital subscriber line*). Métodos com esta finalidade são fundamentais para a qualificação da linha com o objetivo de instalação do serviço DSL, em especial na atualização para serviços como o VDSL2 ou para adoção de “vetorização”. Com o intuito de ser relevante para as operadoras na qualificação de uma rede inteira, composta de milhões de linhas, é fundamental que, além de precisão, métodos de qualificação tenham baixo custo computacional. Os métodos desenvolvidos são baseados nessa premissa e fazem análise da resposta ao impulso e da resposta à reflectometria no domínio do tempo de uma dada linha. Esses sinais são analisados utilizando-se um método de detecção de bordas, baseado em transformada *wavelet*, para identificar e extrair características de sinal que contenham informação sobre a topologia da linha. Dependendo das características disponíveis, é utilizado um dos três sistemas especialistas desenvolvidos para interpretação dessas informações e identificação da topologia. Estas metodologias são avaliadas através de um conjunto de teste de linhas reais medidas em laboratório. Seus resultados são comparados com os resultados de dois outros métodos implementados a partir da literatura. Os resultados obtidos mostram que os métodos propostos são eficientes na estimação de informações da topologia da linha e possuem reduzido custo computacional quando comparados às implementações das outras técnicas avaliadas.

**Palavras-chave:** Identificação de topologia de linha, sistema especialista, detecção de borda, DSL.

## ABSTRACT

This thesis proposes new methodologies for automatically identifying topologies of lines with one or more sections in a telephone network, which are used in digital subscriber line (DSL) systems. Methods for this purpose are very important for the line qualification in order to install the DSL service, especially when upgrading to more advanced services such as VDSL or adopting vectoring. In order to be useful to service providers in the qualification of a network, usually consisting of millions of lines, it is desired that, as well being accurate, qualification methods should have low computational cost. The proposed methods are based on this observation and perform an analysis of both impulse response and time domain reflectometry trace of a line under test. These two signals are analyzed using a method based on wavelet transform that identifies and extracts features that contain information about the line topology. Depending on the available features, one of three expert systems developed for interpreting information and identifying the topology is used. A thorough comparison with two state-of-art methods is also presented using several twisted pair copper cables. The results show that the proposed methods provide good accuracy with respect to topology identification at lower computational cost with respect to the other evaluated techniques.

**Keywords:** Line topology identification, expert system, edge detection, DSL.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S_{11}(f)$	Parâmetro de espalhamento em uma porta no domínio da frequência.
$s_{11}(t)$	Parâmetro de espalhamento em uma porta no domínio do tempo.
$H(f)$	Resposta em frequência.
$t$	Tempo em segundos.
$h(t)$	Resposta ao impulso.
$r(t)$	Resposta de uma linha a reflectometria no domínio do tempo.
$Z_{in}(f)$	Impedância de entrada, a qual, ao longo da tese, é utilizada com a consideração da terminação em aberto.
$\Theta$	Topologia de uma linha telefônica.
$\theta_k$	$k$ -ésima seção de linha de uma topologia a partir de um terminal de entrada de referência até um terminal de saída, com $k = 1, 2, \dots, n_s$ .
$n_s$	Número de seções de linha que constituem uma topologia.
$\lambda_k$	Tipo de seção em que a $k$ -ésima seção de linha pode ser classificada, sendo que as classes possíveis são “seção serial” e “derivação”.
$l_k$	Comprimento da $k$ -ésima seção de linha.
$\phi_k$	Tipo de cabo que compõe a $k$ -ésima seção de linha.
$R$	Resistência distribuída por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$L$	Indutância distribuída por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$G$	Condutância distribuída por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$C$	Capacitância distribuída por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$V$	Amplitudes da diferença de potencial em uma dada posição $x$ da linha.
$I$	Amplitude da corrente elétrica em uma dada posição $x$ da linha.
$dV$	Variação de $V$ no comprimento $dx$ .
$dI$	Variação de $I$ no comprimento $dx$ .
$dx$	Comprimento de uma seção de linha infinitesimal.

$\omega$	Frequência angular em rad/s.
$f$	Frequência em Hz.
$\gamma$	Constante de propagação do par trançado.
$\alpha$	Constante de atenuação.
$\beta$	Constante de fase.
$V_0^+$	Tensão incidente num ponto $x$ da linha.
$V_0^-$	Tensão refletida num ponto $x$ da linha.
$I_0^+$	Corrente incidente num ponto $x$ da linha.
$I_0^-$	Corrente refletida num ponto $x$ da linha.
$Z_0$	Impedância característica da seção de linha uniforme.
$Z_L$	A impedância da carga em $x = l$ .
$V_s$	É a tensão na fonte.
$x$	Posição em uma seção de linha de transmissão genérica.
$l$	Comprimento de uma seção de linha de transmissão genérica.
$\Gamma$	Coefficiente de reflexão de tensão.
$Z_P, Z_A$	Impedâncias características da seção de linha posterior e da anterior à descontinuidade, respectivamente.
$T$	Coefficiente de transmissão de tensão.
$V_r(f)$	Sinal de tensão capturado na porta de entrada da linha, em $x = 0$ , quando a mesma é excitada por um determinado sinal de entrada, no domínio da frequência.
$\varepsilon$	Parâmetro que controla a quantidade de <i>roll-off</i> da função janela Kaiser-Bessel.
$L_i$	Comprimento do $i$ -ésimo caminho definido pelos descasamentos de impedância da linha, no qual partes do sinal de entrada podem seguir a partir da porta de entrada até a porta de saída.
$v_p$	Velocidade de propagação do sinal transmitido.
$L_T$	Comprimento serial total, o qual é a soma dos comprimentos das seções seriais.
$\mathbf{L}^2(\mathfrak{R})$	Espaço de Hilbert das funções unidimensionais, cujo quadrado do módulo é integrável.
$f(t)$	Função contínua pertencente a $\mathbf{L}^2(\mathfrak{R})$ .
$P^h, P^r$	Conjuntos das $m_p$ bordas detectadas em $h(t)$ e $r(t)$ , respectivamente.

$m_p$	Número de bordas detectadas.
$p_i^h, p_i^r$	$i$ -ésima borda detectada em $h(t)$ e $r(t)$ , respectivamente.
$t_i^f$	Localização no tempo da $i$ -ésima singularidade.
$b_i^f$	Tipo de borda (subida ou descida) da $i$ -ésima singularidade.
$C^h, C^r$	Conjunto das características de $h(t)$ e $r(t)$ , respectivamente.
$c_i^h, c_i^r$	$i$ -ésima característica identificada em $h(t)$ e $r(t)$ , respectivamente.
$t_i^{h+}$	Estimativa do tempo de chegada do $i$ -ésimo pulso positivo em $h(t)$ .
$t_{ei}^{h+}$	Atraso da singularidade que marca a borda de descida do $i$ -ésimo pulso positivo em $h(t)$ .
$t_j^{r+}$	Estimativa do tempo de chegada do $j$ -ésimo pulso positivo em $r(t)$ .
$t_m^{r-}$	Estimativa do tempo de chegada do $m$ -ésimo pulso negativo em $r(t)$ .
$t_n^{rd}$	Estimativa do tempo de chegada do $n$ -ésimo desvio de decaimento em $r(t)$ .
$t_{ej}^{r+}$	Atraso da borda de encerramento (descida) do $j$ -ésimo pulso positivo em $r(t)$ .
$t_{em}^{r-}$	Atraso da borda de encerramento (subida) do $m$ -ésimo pulso negativo em $r(t)$ .
$q_i$	Tipo da $i$ -ésima característica em $r(t)$ , que pode ser “pulso positivo”, “pulso negativo” e “desvio de decaimento”.
$\psi$	Wavelet mãe, ou simplesmente wavelet.
$s$	Escalamento.
$u$	Translação.
$\psi_{u,s}(t)$	Uma família de wavelets no plano tempo-escala.
$\bar{\psi}$	Complexo conjugado de $\psi$ .
$Wf(u, s)$	Transformada wavelet contínua de uma função $f(t)$ .
$J$	Máximo valor do expoente em $s = 2^j$ para calcular as escalas diádicas.
$N$	Número de momentos nulos de $\psi$ .
$\beta$	Quando $\psi$ tem $N$ momentos nulos pode ser escrita como a derivada de $N$ -ésima ordem de uma função $\beta$ de suporte compacto.
$(u_0, s_0)$	Os máximos locais de $ Wf(u, s_0) $ em cada escala, ou seja, $ Wf(u, s_0) $ é localmente máximo em $u = u_0$ .
$\zeta_i$	Valor de corte proposto para cada $i$ -ésima escala de $Wf(u, s_i)$ , cujo objetivo é remover os espúrios e controlar a sensibilidade de detecção.

$k_s$	Constante de sensibilidade usada para fornecer controle sobre a sensibilidade do algoritmo na busca por extremos locais.
$n$	Número de amostras na escala $s$ que, em $ Wf(u,s) $ , é igual ao número de amostras do sinal $f(t)$ .
$\sigma_{u,s_i}^2$	Variância dos coeficientes da escala $s_i$ .
$e_p(P)$	Erro percentual na estimativa de um parâmetro $P$ .
$p_i^D$	Posição da $i$ -ésima derivação.
$\eta$	Crítério de decisão que define se uma determinada borda corresponde a um pulso ou a um desvio de decaimento.
$r'(t)$	Derivada de primeira ordem de $r(t)$ .
$\sigma_r$	Controla o “nível de rigor” do critério de decisão $\eta$ .
$\Delta t_{ip}$	Intervalo entre a borda de início e a borda de fim de um pulso em $r(t)$ .
$\chi$	Margem arbitrária usada pra levar em consideração erros numéricos, dispersão e ruído.
$\Lambda$	Conjunto dos tipos $\lambda_i$ de cada uma das $n_s$ seções na ordem em que se apresentam na linha.
$\Upsilon$	Conjunto dos comprimentos de cada uma das $n_s$ seções na ordem em que se apresentam na linha.
$\Phi$	Conjunto dos tipos de cabo que constituem cada uma das $n_s$ seções na ordem em que se apresentam na linha.
$t_{ref}$	Tempo de referência em $r(t)$ relacionado a $L_T$ .
$t_s, t_e$	Respectivamente, tempo de início e tempo de fim do intervalo em $r(t)$ que corresponde a uma seção de linha.
$n_h$	Número de pulsos positivos detectados em $h(t)$ .
$\Upsilon^{hD}$	Conjunto dos possíveis comprimentos de derivações obtido em $h(t)$ .
$l_i^{hD}$	$i$ -ésimo possível comprimento de derivação obtido em $h(t)$ .
$\Upsilon^{rD(i)}$	Conjunto dos possíveis comprimentos de derivações obtido para o $i$ -ésimo pulso negativo em $h(t)$ , cujo tempo de chegada é menor que $t_{ref}$ .
$l_j^{rD(i)}$	$j$ -ésimo possível comprimento de derivação obtido para o $i$ -ésimo pulso negativo em $h(t)$ , cujo tempo de chegada é menor que $t_{ref}$ .
$n_{rD(i)}$	Número de comprimentos possíveis para a $i$ -ésima derivação estimada em $r(t)$ .

$n_{\Phi}$	Número de hipóteses para o conjunto $\Phi$ .
$n_{cs}$	Número de conexões serial-serial presentes na linha.
$n_d$	Número de derivações presentes na linha.
$n_{\lambda}$	Número de tipos de cabo que compõe um banco de dados da rede.

## LISTA DE ABREVIATURAS

ADSL	<i>Asymmetric digital subscriber line</i> (versões posteriores: ADSL2 e ADSL2+).
AG	Algoritmo genético.
AWG	<i>American wire gauge</i> .
CTDR	<i>Correlation time domain reflectometry</i> .
DELT	<i>Double ended line test</i> .
DSL	<i>Digital subscriber line</i> .
DSLAM	<i>DSL access multiplexer</i> .
ETSI	<i>European telecommunications standards institute</i> .
FDR	<i>Frequency domain reflectometry</i> .
FEXT	<i>Far-end crosstalk</i> .
FTTH	<i>Fiber to the home</i> .
FTTx	<i>Fiber to the x</i> .
ND	Percentual de acerto na estimação do número de derivações.
NSS	Percentual de acerto na estimação do número de seções seriais.
SED	Sistema especialista DELT proposto nesta tese.
SELT	<i>Single ended line test</i> .
SELT-tdr	Método baseado em SELT proposto na literatura.
SES	Sistema especialista SELT proposto nesta tese.
SESD	Sistema especialista SELT-DELT proposto nesta tese.
TCC	Percentual de topologias que foram corretamente caracterizadas.
TDR	<i>Time domain reflectometry</i> .
TIMEC	Método baseado em SELT e DELT proposto na literatura.
TWC	Transformada wavelet contínua.
VDSL	<i>Very-high-bit-rate DSL</i> (versão mais avançada: VDSL2).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão do mercado de tecnologias de acesso banda larga no mundo de acordo com [1].	1
Figura 2 – Visão geral da metodologia proposta para identificação de topologia de linhas telefônicas.	7
Figura 3 – Exemplo de topologia de linha telefônica com todas as seções $\theta_k$ classificadas.	12
Figura 4 – Seção de linha de comprimento $dx$ com os parâmetros primários por unidade de comprimento.	13
Figura 5 – Representação de uma linha de comprimento $l$ , terminada em uma carga com impedância $Z_L$ .	15
Figura 6 – Representação com parâmetros ABCD de uma linha de comprimento $l$ , terminada em $Z_L$ .	16
Figura 7 – Diagrama de um sistema TDR básico.	18
Figura 8 – Efeito da inclusão do nível DC no pré-processamento de um pulso em uma curva resposta ao impulso.	20
Figura 9 – Detalhe das bordas de subida e descida do pulso apresentado na Figura 8.	20
Figura 10 - Efeito do janelamento no pré-processamento de um pulso em uma curva resposta ao impulso.	22
Figura 11 – Topologia de teste com seis seções e duas derivações, na terceira e na quarta seções.	24

Figura 12 – Quatro percursos definidos pelos descasamentos de impedância da topologia apresentada na Figura 11. ....	24
Figura 13 – Resposta ao impulso simulada para a topologia representada na Figura 11. Pontos vermelhos representam a localização estimada dos tempos de chegada dos pulsos positivos. ....	24
Figura 14 – Respostas ao impulso simuladas para as linhas descritas na Tabela 1. A topologia 0 é tomada como referência e representada em linha contínua preta. ....	26
Figura 15 – Topologia de teste com duas seções seriais. A segunda seção possui tipo de cabo variável. ....	27
Figura 16 – Comparação entre reflectogramas simulados para o tipo de topologia representado na Figura 15. O sinal de entrada é um pulso retangular com 1 $\mu$ s de duração e 10 V e amplitude. A impedância de saída da fonte é 50 ohms. ....	27
Figura 17 – Topologia de teste com três seções seriais, sendo a terceira uma derivação. ....	29
Figura 18 – Resposta TDR simulada para a topologia ilustrada na Figura 17, considerando $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0,5$ mm. Ela é comparada a uma curva de referência simulada para uma topologia de uma seção de mesmo $L_T$ , com $\phi_1 = 0,5$ mm. ....	29
Figura 19 – Processo de extração de características dos sinais de interesse. ....	33
Figura 20 – Em (a) é mostrada uma função retangular contendo duas bordas, cujas localizações estão marcadas por pontos vermelhos. Em (b) o Módulo da TWC da função representada em (a). ....	36
Figura 21 – Resposta ao impulso de uma topologia teste, contendo três pulsos (um deles pouco visível nesta escala). ....	39
Figura 22 – Módulo da TWC analítica do sinal na Figura 21. ....	39
Figura 23 – Linhas de máximos da TWC na Figura 22. ....	40
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de identificação de bordas em $h(t)$ . ....	51
Figura 25 – Fluxograma do algoritmo de identificação de bordas em $r(t)$ . ....	54

Figura 26 – Diagrama representando a seleção dos sistemas especialistas de acordo com as características disponíveis.....	57
Figura 27 – Exemplo de identificação de $\Lambda$ . Em (a) e em (b) são apresentados os sinais $h(t)$ e $r(t)$ , respectivamente, simulados para uma dada linha sob teste. Em (c) é ilustrada a topologia estimada utilizando as regras propostas.....	60
Figura 28 – Exemplo de topologia com duas derivações de mesmo comprimento.....	66
Figura 29 – Resposta ao impulso simulada a partir da topologia ilustrada na Figura 28. ....	66
Figura 30 – Árvore de decisão do SES para interpretação de características $r(t)$ .....	67
Figura 31 – Exemplo de sinal $r(t)$ que pode levar a múltiplas soluções no processo de identificação de topologia. ....	71
Figura 32 – Tipos de topologias obtidas a partir do algoritmo para análise de sinal $r(t)$ . ....	72
Figura 33 – Resultados em relação ao percentual de topologias corretamente caracterizadas (TCC), percentual de acerto na estimação do número de seções seriais (NSS) e do número de derivações (ND). ....	78
Figura 34 – Percentual de topologias corretamente caracterizadas (TCC) por tipo de topologia. ....	78
Figura 35 – Erro médio da estimativa de $L_T$ para todo o conjunto de teste e por tipo de topologia. ....	80
Figura 36 – Desvio padrão do erro médio da estimativa de $L_T$ para cada método sobre todo o conjunto de teste. ....	80
Figura 37 – Comparação entre os resultados obtidos para o critério $e_p(L_T)$ pelos métodos SESD, SED e TIMEC. ....	81
Figura 38 – Comparação entre os resultados obtidos para o critério $e_p(L_T)$ pelos métodos SES e SELT-tdr. ....	82
Figura 39 – Erro na estimação da posição da 1ª derivação.....	83

Figura 40 – Erro na estimação do comprimento da 1ª derivação. ....	85
Figura 41 – Percentual de tipo de cabo corretamente estimado por seção e por cenário. ....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Topologias com o mesmo valor de $L_T$ , mas diferentes posições de uma derivação. A topologia que não possui derivações e foi utilizada como referência para o pulso relacionado à $L_T$ . .....	25
Tabela 2 – Conjunto de validação: topologias para determinar os parâmetros dos métodos de detecção de borda.....	42
Tabela 3 – Resultados da metodologia proposta baseada em TWC para o sinal $r(t)$ , onde $k_s$ é o parâmetro. ....	44
Tabela 4 – Resultados da metodologia proposta baseada em TWC para o sinal $h(t)$ , onde $k_s$ é o parâmetro. ....	44
Tabela 5 – Resultados da metodologia <i>Neus</i> para o sinal $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	45
Tabela 6 – Resultados da metodologia <i>Neus</i> para o sinal $h(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	45
Tabela 7 – Resultados da metodologia baseada em 1ª derivada para o sinal $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	45
Tabela 8 – Resultados da metodologia baseada em 1ª derivada para o sinal $h(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	45
Tabela 9 – Resultados da metodologia baseada em 2ª derivada para o sinal $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	46
Tabela 10 – Resultados da metodologia baseada em 2ª derivada para o sinal $h(t)$ , onde o	

‘Valor de Corte’ é o parâmetro. ....	46
Tabela 11 – Parâmetros selecionados para cada método de detecção de borda. ....	46
Tabela 12 – Conjunto de teste: topologias criadas para realizar a comparação das metodologias de detecção de borda. ....	47
Tabela 13 – Resultados obtidos para aplicação dos métodos de detecção de bordas em $r(t)$ . ..	48
Tabela 14 – Resultados obtidos para aplicação dos métodos de detecção de bordas em $h(t)$ . ..	49
Tabela 15 – Comparação dos resultados da aplicação dos métodos de detecção de bordas no sinal $r(t)$ . ....	55
Tabela 16 – Conjunto de linhas utilizadas para teste das metodologias de identificação de linha. ....	74
Tabela 17 – Tipos de cabos utilizados na construção do conjunto de topologias de teste. ....	74
Tabela 18 – Linhas cujo erro na estimação de $L_T$ resultou acima de 50%. ....	80
Tabela 19 – Estatísticas dos resultados da estimativa da posição das derivações dos tipos de topologia 4, 5 e 6. ....	83
Tabela 20 – Erro na estimação da posição da 2ª derivação. ....	84
Tabela 21 – Estatísticas dos resultados da estimativa do comprimento das derivações das topologias do tipo 4, 5 e 6. ....	85
Tabela 22 – Erro na estimação do comprimento da 2ª derivação. ....	86
Tabela 23 – Resultados do nível de acerto para os critérios de avaliação da classificação da sequência de tipos de cabos de uma linha. ....	87
Tabela 24 – Tempo de processamento médio de cada uma das implementações dos métodos de identificação de topologia abordados, em segundos. ....	89
Tabela 25 – Relação das múltiplas soluções obtidas pelo SES com o tempo de processamento. ....	89

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização e Definição do Problema	1
1.2	Trabalhos Relacionados	4
1.3	Motivações e Objetivos do Trabalho	6
1.4	Contribuições	6
1.5	Organização do Trabalho	8
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS TRANSMITIDOS EM LINHAS TELEFÔNICAS</b>	<b>10</b>
2.1	Caracterização de Topologias de Linhas Telefônicas	10
2.1.1	<i>Limite de Resistência Elétrica e Mudança de Tipos de Cabos</i>	11
2.1.2	<i>Derivações</i>	11
2.2	Características Elétricas de uma Seção de Linha	12
2.2.1	<i>Parâmetros Primários</i>	12
2.2.2	<i>Parâmetros Secundários</i>	13
2.3	Propagação de Tensão e Corrente	14
2.3.1	<i>Coefficientes de Reflexão e de Transmissão</i>	15
2.3.2	<i>Modelo ABCD</i>	16
2.3.3	<i>Modelos de Linha</i>	16
2.4	Obtenção dos Sinais no Domínio do Tempo	17
2.4.1	<i>Nível DC e Simetria Hermitiana</i>	19
2.4.2	<i>Janelamento</i>	21
2.5	Análise das Características da Resposta ao Impulso	22
2.6	Análise das Características da Resposta ao TDR	26
2.6.1	<i>Conexão Serial-Serial</i>	26

2.6.2	<i>Conexão com Terminação em Aberto</i> .....	28
2.6.3	<i>Conexão Serial-Derivação</i> .....	28
<b>CAPÍTULO 3 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS</b> .....		<b>31</b>
3.1	Detecção de Singularidades baseada em Análise Wavelet.....	34
3.1.1	<i>Algoritmo para Detecção de Singularidades via Análise Wavelet</i> .....	36
3.2	Avaliação do Método de Detecção de Bordas.....	40
3.2.1	<i>Determinação de Parâmetros</i> .....	41
3.2.2	<i>Resultados para o Conjunto de Validação</i> .....	44
3.2.3	<i>Comparação dos Métodos de Detecção de Bordas</i> .....	46
3.3	Identificação de Bordas.....	49
3.3.1	<i>Sistema Especialista para Identificação de Bordas na Resposta ao Impulso</i> .....	50
3.3.2	<i>Sistema Especialista para Identificação de Bordas na Resposta TDR</i> .....	51
3.4	Determinação do Parâmetro $\sigma_r$ .....	54
<b>CAPÍTULO 4 SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHA</b> .....		<b>56</b>
4.1	Sistema Especialista SELT-DELT.....	57
4.1.1	<i>Identificação do Conjunto <math>\Lambda</math></i> .....	58
4.1.2	<i>Estimação dos Elementos do Conjunto <math>Y</math></i> .....	61
4.1.2.1	<i>Algoritmo para Estimação do Comprimento de Seções Seriais</i> .....	61
4.1.2.2	<i>Algoritmo para Estimação do Comprimento de Derivações</i> .....	62
4.1.3	<i>Classificação dos Elementos de <math>\Phi</math></i> .....	64
4.2	Sistema Especialista DELT.....	65
4.3	Sistema Especialista SELT.....	66
4.3.1	<i>Soluções Incompletas</i> .....	68
4.3.2	<i>Soluções Completas e Únicas</i> .....	69
4.3.3	<i>Múltiplas Soluções Completas</i> .....	69
<b>CAPÍTULO 5 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE TOPOLOGIAS</b> .....		<b>73</b>
5.1	Conjunto de Teste e Condições Gerais de Avaliação.....	73
5.2	Base de Referência e Comparação com Métodos Descritos na Literatura.....	75
5.3	Resultados e Análises.....	76
5.3.1	<i>Caracterização do Conjunto <math>\Lambda</math></i> .....	76
5.3.2	<i>Estimação do Conjunto de Comprimentos das Seções <math>Y</math></i> .....	79
5.3.2.1	<i>Comprimento Serial Total</i> .....	79

5.3.2.2	Posição das Derivações .....	82
5.3.2.3	Comprimento das Derivações.....	84
5.3.3	<i>Classificação do Conjunto dos Tipos de Cabos das Seções <math>\Phi</math></i> .....	86
5.3.4	<i>Tempo de Processamento e Casos com Múltiplas Soluções</i> .....	88
<b>CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>		<b>90</b>
6.1	Trabalhos Futuros .....	92
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>94</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização e Definição do Problema

A demanda por redes de acesso banda larga está crescendo continuamente no mundo todo. De acordo com [1], até o final de junho de 2012 existiam cerca de 624,1 milhões de assinantes de linhas fixas no mundo todo, representando um crescimento de 2,1% em relação ao trimestre anterior. A tecnologia DSL (do inglês *digital subscriber line*) continua a ser dominante possuindo em torno de 364,1 milhões de assinantes, representando mais de 58% do mercado, como ilustrado na Figura 1, em uma comparação com a utilização de outras tecnologias. É válido notar que, em [1], tecnologias híbridas como o VDSL (do inglês *very-high-bit-rate digital subscriber line*) e o VDSL2 são representadas nas estatísticas de tecnologias FTTx (do inglês *fiber to the x*).

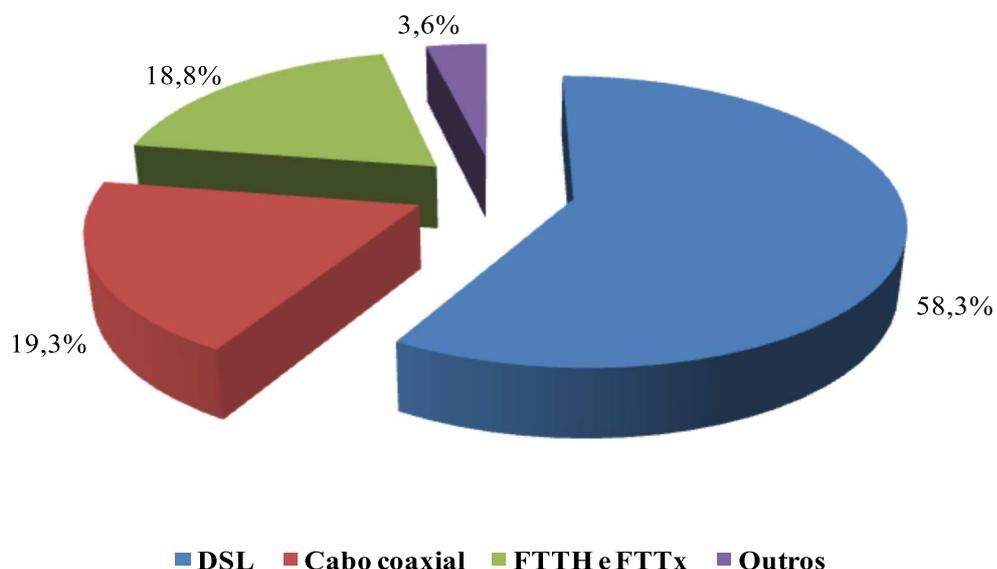


Figura 1 – Divisão do mercado de tecnologias de acesso banda larga no mundo de acordo com [1].

O grande desafio para as agências reguladoras e operadoras de serviços é desenvolver um plano de transição para a próxima geração de redes de acesso que mantenha ou melhore o ambiente competitivo sem inflar o investimento em infraestrutura ou resultar em serviços que sejam inacessíveis.

Tecnologias FTTH (do inglês *fiber to the home*) parecem representar o ápice para redes baseadas em linhas de transmissão, uma vez que fornecem largura de banda extremamente alta em uma rede que ao mesmo tempo será mais simples de gerenciar com menores despesas operacionais. Por outro lado, a implantação de FTTH é bastante dispendiosa, difícil e consome bastante tempo. Nos últimos sete anos, somente pouco mais de 6% das linhas baseadas em cobre foram substituídos por fibra ótica, sendo que essa realização se concentra em poucos países, como a Coreia do Sul, Japão, China e Estados Unidos [2].

Por sua vez, a utilização do DSL como tecnologia de transmissão de dados é atraente porque, uma vez requisitado o serviço, permite um relativamente rápido e barato procedimento de instalação do serviço. Isso se deve principalmente ao fato de o serviço ser fornecido através de uma infraestrutura já existente, que é a rede telefônica. Além disso, a cobertura da rede é ampla em praticamente todas as áreas e nichos de mercado (especialmente os urbanos). Outro ponto positivo, é que não há compartilhamento de largura de banda entre os usuários, diferentemente do que ocorre com a tecnologia que utiliza cabo coaxial, onde quanto maior o número de usuários, menor a largura de banda disponível para cada usuário.

Um meio termo entre ambas as tecnologias são as chamadas terceira e quarta gerações de tecnologias banda larga. Essas são representadas basicamente pelas tecnologias FTTx, que incluem várias combinações híbridas de fibra com cobre, como é o caso do VDSL/VDSL2 (3ª geração), e, mais recentemente, da proposta do G.fast (4ª geração). A ideia básica é levar a fibra ótica da central da operadora de serviço até um ponto de distribuição, a partir do qual uma linha de cobre vai até o usuário, deste modo encurtando a distância e também a atenuação [3].

Entretanto, as redes de cobre telefônicas que servem de infraestrutura para sistemas DSL não foram originalmente projetadas para este tipo de serviço. Além disso, raramente nessas redes há registros detalhados sobre a topologia das linhas e as características físicas dos cabos. Não obstante, a qualidade do serviço é fortemente dependente das características da rede física, que, por si só, contém presença de fatores limitantes diversos para instalação de serviços banda larga, como bobinas de pupinização, derivações e emendas. Conseqüentemente são necessários métodos de qualificação e identificação da estrutura da linha para determinar esses elementos ou avaliar características de interesse.

A topologia de uma linha telefônica pode ser constituída de uma ou mais seções de linha com diferentes características físicas. A identificação destas seções em uma topologia pode ser realizada através do processamento de medições realizadas na linha. Uma vez que essas linhas possuem dois terminais, essas medições podem ser categorizadas como: medições realizadas em apenas um terminal (SELT, do inglês *single ended line test*); e aquelas que requerem equipamentos de medição em ambos os terminais (DELT, do inglês *double ended line test*). Nos dois casos um sinal de teste é injetado na linha em um dos terminais. Este sinal se propaga e a cada descasamento de impedância (como mudança de tipo de cabo ou derivação), parte do sinal é refletida e parte continua se propagando na mesma direção, formando desta maneira o sinal que será registrado. No caso de SELT, o sinal é adquirido no mesmo terminal em que o sinal foi emitido, enquanto que para DELT, o sinal é medido no terminal oposto [4].

A partir de DELT pode-se obter diretamente a função de transferência da linha sob teste, além de sofrer menos interferência e menos atenuação do que SELT, uma vez que o sinal não precisa percorrer duas vezes a linha antes de ser capturado. Por outro lado, a metodologia SELT representa maior economia em termos de tempo e recursos em relação às metodologias DELT, uma vez que requer instalação de equipamento de medição em apenas um terminal e não requer a ida de um técnico até o outro terminal.

Entretanto, deve-se destacar que, quando, por qualquer motivo, DELT não está disponível, existem métodos que permitem estimar a resposta em frequência através de medições SELT [5-7]. Em [8], é apresentado um método para obter uma estimativa da resposta em frequência de linhas telefônicas através de medições de impedância de entrada. Os resultados obtidos pelo método demonstram que se podem alcançar estimativas bastante precisas, até mesmo para linhas com derivações. Esse resultado passa a ter grande importância, uma vez que permite estimar o resultado de uma medição DELT através de uma medição SELT, potencialmente eliminando as principais desvantagens da utilização de metodologias DELT.

De qualquer modo, uma vez que se tenha uma estimativa razoável da topologia da linha, seria possível avaliar características da conexão que geram impacto na qualidade do serviço. Isto daria ao provedor de serviço uma oportunidade de melhorar a estrutura da rede, determinando quais características do enlace estariam interferindo na qualidade do serviço e onde estariam fisicamente localizadas. Além disso, uma vez determinada uma estimativa da topologia, o processo de monitoramento e detecção de faltas poderia ser feito em função de comparação de novos testes com os resultados obtidos inicialmente.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos em identificação de topologia em linhas de par trançado de cobre é baseada na análise de medições SELT, devido principalmente à maior disponibilidade e economia. Em [6, 9-11], é proposta uma solução SELT, que chamaremos aqui de SELT-tdr, para a identificação de topologia de linhas telefônicas através de medidas de reflectometria no domínio do tempo (TDR, do inglês *time domain reflectometry*). Essas medições são tomadas a partir de uma configuração de medição diferencial e analisadas por um algoritmo iterativo baseado no método da máxima verossimilhança. Uma identificação da linha é obtida através da comparação de intervalos selecionados de um sinal medido com intervalos correspondentes em curvas simuladas utilizando modelo de linha. A estimação precisa desses intervalos é fundamental para o método. Entretanto, um método para detectar esses intervalos não é claramente definido.

Em [7, 12, 13] é proposto o uso do parâmetro de espalhamento  $S_{II}(f)$ , medido no domínio da frequência. Após medição, calibração e pré-processamento, importantes características do sinal são interpretadas através de um sistema baseado em redes bayesianas para estimação da topologia da linha. Embora apresente bons resultados, a consideração de que uma parte ou toda a topologia do enlace seja conhecida pode limitar a aplicabilidade da metodologia. O  $s_{II}(t)$  é também analisado em [14] e não há o requisito de conhecimento *a priori* a respeito do tipo de linha e nem disponibilidade de um modelo de linha correspondente. Por outro lado, os autores trabalham sob a consideração de que o conjunto de topologias possíveis é limitado a um conjunto pré-definido. Tal conjunto pode ser estendido sob o custo de um aumento no tempo de processamento. Em [15], é apresentado um algoritmo que visa melhorar o desempenho do estimador baseado em rede bayesiana, descrito acima, fazendo uso do  $S_{II}(f)$  convertido para o domínio do tempo  $s_{II}(t)$ . O método parte do princípio que os picos que ocorrem na curva de  $s_{II}(t)$  correspondem a pulsos refletidos, os quais são caracterizados pelos seguintes atributos: o início e o final de cada reflexão observada, a posição do extremo local e o tipo de extremo (máximo ou mínimo). Além disso, como pode haver sobreposição entre as reflexões, é necessário decompor a curva em uma série de reflexões não interferentes.

Um uso combinado de CTDR (do inglês, *correlation time domain reflectometry*) baseado em código complementar e reflectometria no domínio da frequência (FDR, do inglês *frequency domain reflectometry*) é proposto em [16]. Primeiramente, medições CTDR são

usadas para estimar discontinuidades da linha, como uma hipótese inicial, e então, um método de otimização baseado em FDR é usado para refinar a estimativa.

Note-se que a maioria dos métodos apresentados na literatura parte da ideia que se tem alguma informação *a priori* sobre a topologia da linha, como o comprimento serial total da linha ou que as topologias estão restritas a um dado conjunto restrito.

Em [17], são buscados os limites de metodologias baseadas em SELT e é observado, através de uma perspectiva teórica, que a estrutura de uma rede telefônica nem sempre pode ser identificada através deste tipo de metodologia. Nesse trabalho, diversas técnicas buscando facilitar a identificação são propostas, mas não se tentou obter um algoritmo que buscasse a identificação completa da topologia.

Métodos baseados em DELT também são descritos na literatura e são justificados, em especial, a partir do surgimento dos padrões G.992.3 e G.992.5, nos quais as medidas de funções de transferência podem ser obtidas através de novas funcionalidades de modems ADSL 2 e ADSL 2+ (tecnologias variantes mais avançadas do ADSL, do inglês *Asymmetric Digital Subscriber Line*) [18, 19]. Para esses modems, as medidas são realizadas através da comunicação com o multiplexador de acesso à linha digital do assinante (DSLAM, do inglês *DSL access multiplexer*) na central, permitindo medição nos dois terminais.

O método descrito em [20] utiliza função de transferência para obter a localização de derivações. Por outro lado, apenas um tipo de linha bem específico é analisado pelo método, para o qual define o comprimento e a posição de uma única derivação. Em [21], um método baseado em algoritmo genético (AG), chamado aqui de TIMEC, analisa a resposta em frequência  $H(f)$  (DELT) e o parâmetro de espalhamento  $S_{II}(f)$  (SELT) com um critério multiobjetivo usando modelo de linha como referência para identificação de topologia de linha. O método permite a utilização de conhecimento *a priori* sobre a linha. O uso de AG implica em um relativamente alto custo computacional quando comparado a outros métodos. Em [22], são analisadas características de medições de resposta em frequência (DELT) e TDR (SELT) e buscadas algumas relações com seções que compõem a topologias de uma linha telefônica. Entretanto ainda não há uma sistematização dessas relações.

Em [23] é apresentado um algoritmo que compara cada medição DELT com a resposta ao impulso calculada de um conjunto “canônico” de topologias de linha.

### **1.3 Motivações e Objetivos do Trabalho**

Em relação à identificação da topologia da linha, tanto as metodologias que se utilizam de DELT quanto as que usam SELT, trazem benefícios e têm também suas limitações. Explorar essas características e suas possíveis combinações pode ser a chave para uma qualificação de linha efetiva.

Além disso, é importante considerar a constante e crescente transição para terceira e quarta gerações de banda larga, nas quais a fibra ótica sai da central da operadora até um ponto de distribuição, a partir do qual uma linha de cobre levará o DSL até o usuário [3]. Neste cenário, o sistema de qualificação de linha não necessariamente terá à disposição um computador ou máquina mais poderosa para executar seu processamento. Uma vez que o DSLAM está agora distante da central em um ponto de distribuição, a utilização de métodos que possam ser embarcados no equipamento, que realizem todo o processamento e apenas enviem o resultado – ao invés do conjunto de medições – para a central passa a ser interessante. Para isso, os requisitos de um método de identificação de linha se tornariam mais estritos. Neste cenário, quanto mais simples sua implementação e mais baixo o custo computacional, sem perder a precisão requerida pela operadora, melhor. Estes requisitos seriam ainda importantes para permitir redução do tempo de resposta ao cliente e, com isso, permitir que mais linhas sejam qualificadas em um reduzido período de tempo.

Deste modo, o presente trabalho descreve uma metodologia desenvolvida para a identificação da topologia de linhas telefônicas com aplicação em sistemas DSL. O objetivo é realizar essa tarefa utilizando-se de medições SELT e DELT, separadas ou combinadas, visando tanto uma boa precisão na estimação quanto um baixo custo computacional. A ideia básica é combinar as informações que podem ser extraídas de ambos os tipos de métodos de medição, ampliando as capacidades de cada técnica e compensando suas limitações individuais.

### **1.4 Contribuições**

A principal contribuição da tese é o desenvolvimento de uma metodologia, baseada em sistemas especialistas, para a estimação precisa da topologia de uma linha sob teste, com resultados melhores do que os métodos implementados a partir da literatura, como é mostrado no Capítulo 5. E ainda, com aplicação mais flexível, por possibilitar a utilização de diferentes

tipos de medição na linha. Essa abordagem possibilita a avaliação dos limites de obtenção de informação sobre a topologia para medidas SELT e DELT, de tal maneira que verifique, com isso, as restrições de informação que cada uma delas pode fornecer acerca da topologia.

Especificamente, assume-se que uma topologia pode ser completamente identificada determinando-se três parâmetros essenciais em cada seção de linha: o comprimento, o tipo do cabo e o tipo da seção, a qual pode ser uma derivação ou seção serial. Com o objetivo de estimar estes parâmetros, a resposta ao impulso  $h(t)$  (DELT) e/ou a resposta TDR  $r(t)$  (SELT) são analisadas pelo método. Ambos os sinais podem ser estimados através de medições de resposta em frequência  $H(f)$  e impedância de entrada no domínio da frequência  $Z_{in}(f)$ , respectivamente, utilizando transformada inversa de Fourier e um processamento que será descrito no Capítulo 2. Na Figura 2 é mostrada uma visão geral da estrutura do método, explicitando as etapas através das quais os sinais de entrada podem ser processados para obter uma estimativa da topologia da linha.

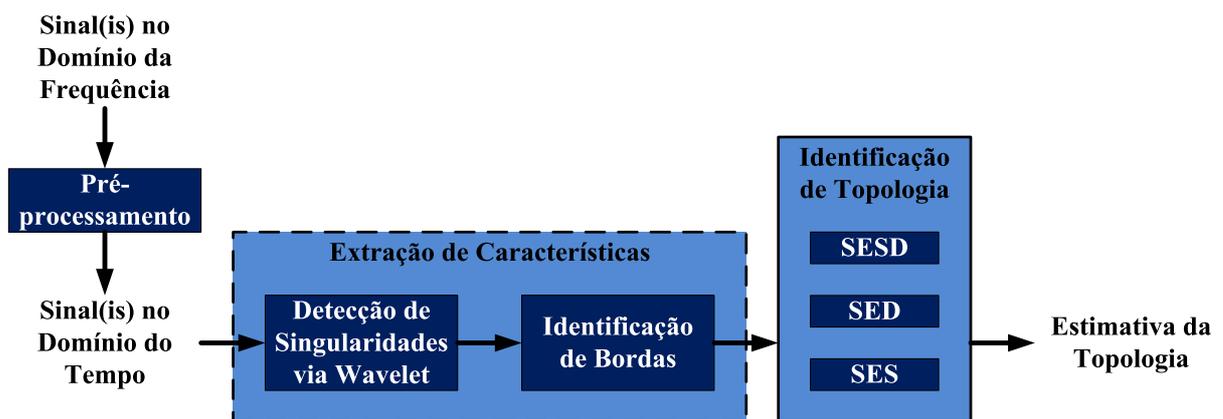


Figura 2 – Visão geral da metodologia proposta para identificação de topologia de linhas telefônicas.

Uma vez obtidos os sinais de interesse no domínio do tempo (através do bloco de pré-processamento ou por medição direta no domínio do tempo), a tese propõe um método para extração de características em  $h(t)$  e  $r(t)$  relacionadas aos elementos da topologia. Essa é uma etapa decisiva do processo de identificação de linhas e que também pode ser utilizada em detecção de faltas em linhas. No Capítulo 3, essa questão é discutida, mostrando que, apesar de sua importância, o tema não é adequadamente tratado na literatura.

Como indicado na Figura 2, o método proposto para extração de características consiste na detecção das bordas (pontos de inflexão) das características do sinal, proposto aqui através da detecção de singularidades via transformada *wavelet*, e na consequente identificação dessas bordas com as categorias de características desejadas. Essa identificação é realizada através de sistemas especialistas – uma para cada tipo de sinal – que relacionam as

bordas detectadas aos elementos de sinal que contenham informação sobre a topologia. O método de detecção de singularidades é avaliado no contexto DSL através da comparação com outras técnicas para identificação de características desejadas no sinal.

Essas características são as entradas para o processo de identificação de topologia propriamente dito. Dependendo do tipo de características disponível – características somente de  $h(t)$  ou de  $r(t)$  ou de ambos – como entrada da etapa de identificação de topologia, foram propostos três sistemas especialistas, desenvolvidos para lidar respectivamente com cada tipo de entrada: o sistema especialista SELT-DELT (SESD), o DELT (SED) e o SELT (SES). O tipo de estimativa pode variar de acordo com o sistema selecionado. Uma contribuição a ser destacada nesta abordagem é a relação feita entre desvios de decaimento no sinal  $r(t)$  com conexões entre seções seriais com o objetivo de utilizar a detecção desses eventos para identificação destes elementos da topologia. Essa abordagem resultou em melhores resultados quando comparada – Capítulo 5 – aos métodos implementados a partir da literatura.

## 1.5 Organização do Trabalho

Neste primeiro capítulo foi brevemente apresentado o contexto da tese e o método proposto para identificação da topologia de linhas telefônicas. Foram também apresentadas as motivações para o trabalho e os principais trabalhos relacionados na literatura. O restante deste trabalho discutirá melhor a estrutura do método proposto e ilustrado na Figura 2, sendo organizado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 é realizada uma caracterização dos principais elementos que compõem a topologia de uma linha telefônica típica. Também é realizada uma revisão dos principais conceitos relacionados à transmissão de sinais na linha. Com base nestes conceitos é apresentada uma discussão que visa sugerir como os sinais de interesse podem ser interpretados no domínio do tempo com o intuito de estimar a topologia. Além disso, o bloco de pré-processamento, indicado na Figura 2, que realiza a operação de estimação dos sinais no domínio do tempo a partir dos sinais no domínio da frequência, também é descrito.
- No Capítulo 3 é descrita a metodologia para extração de características, indicada na Figura 2, a qual é baseada em detecção de singularidades e em sistemas especialistas específicos para cada sinal. É apresentada uma discussão

sobre a abordagem dessa questão na literatura. É também realizada uma comparação do método de detecção de bordas proposto em DSL. Os parâmetros necessários ao método são também obtidos através de conjunto de validação composto por sinais simulados.

- No Capítulo 4 são apresentados os sistemas especialistas que compõem o método para interpretação das características dos sinais de interesse e consequente identificação da topologia da linha. São também descritos os tipos de soluções que podem ser obtidas a partir de cada tipo de sinal.
- O Capítulo 5 apresenta uma avaliação da metodologia proposta nesta tese através da aplicação em sinais medidos em linhas reais. A avaliação também é feita através da comparação com os resultados obtidos pelas implementações de outras duas técnicas do estado da arte de identificação de topologias;
- No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, consistindo de uma análise dos resultados obtidos no Capítulo 5, de suas consequentes aplicações e também de possíveis trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS

### TRANSMITIDOS EM LINHAS TELEFÔNICAS

#### 2.1 Caracterização de Topologias de Linhas Telefônicas

A rede telefônica utilizada em sistemas DSL é um tipo de rede ponto a ponto composta por linhas de par trançado de cobre que conectam um DSLAM ao modem de um usuário. Essas linhas podem ser constituídas de uma ou mais seções de linha com diferentes características físicas e elétricas. Assim, a topologia de uma linha telefônica pode ser representada como um conjunto

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_s}\}, \quad (2.1)$$

onde  $\theta_k$ , com  $k = 1, 2, \dots, n_s$ , representa a  $k$ -ésima seção de linha a partir de um terminal de entrada de referência, que, considerando a linha como um quadripolo, será chamada aqui de porta 1, a um terminal de saída, chamado aqui de porta 2. A variável  $n_s$  representa o número de seções que compõem a topologia. Cada  $\theta_k$  é um subconjunto que pode ser definido por

$$\theta_k = \{\lambda_k, l_k, \phi_k\}, \quad (2.2)$$

onde  $\lambda_k$ ,  $l_k$  e  $\phi_k$  são, respectivamente, o tipo de seção, seu comprimento e o tipo de cabo que compõe a  $k$ -ésima seção de linha. Em relação à  $\lambda_k$ , uma seção de linha pode estar conectada em série (seção serial) ou em paralelo (derivação). Cada seção pode ser formada por um tipo de cabo  $\phi_k$  diferente com propriedades próprias e um dado comprimento.

### 2.1.1 Limite de Resistência Elétrica e Mudança de Tipos de Cabos

No caso da rede telefônica analógica convencional, essa estrutura contendo mais de uma seção, com tipos diferentes de cabo, ocorre devido a uma diretriz de projeto que determina o limite máximo de resistência elétrica admitido pela linha. Isso ocorre devido a um nível mínimo de corrente necessário para que os circuitos envolvidos funcionem. Dessa diretriz resulta que para manter o enlace dentro do limite estabelecido, pode ser necessário constituir enlaces com seções de diferentes diâmetros de condutores, normalmente iniciando na central com seções mais finas, uma vez que uma quantidade maior de pares irá constituir os cabos primários que saem da central, e conectando-se progressivamente a seções de linha mais grossas [24]. Por este motivo, para a maioria dos trabalhos na literatura, estimar  $\phi_k$  corresponde a determinar o diâmetro da seção, normalmente classificando através do sistema AWG<sup>1</sup> (do inglês *American wire gauge*) [6, 11, 13, 14, 21]. Entretanto, o diâmetro não é suficiente para descrever o tipo de cabo. De fato, uma variedade de parâmetros determina o comportamento da linha de transmissão e pode variar de fabricante para fabricante [25]. Ou seja, idealmente,  $\phi_k$  deveria ser representado por um conjunto de propriedades físicas nominais que identificassem o tipo específico de cabo. Na prática, isso poderia ser realizado classificando o modelo do cabo e seu fabricante.

A ocorrência de mudança do tipo de cabo ao longo da linha telefônica resulta na presença de emendas necessárias para fazer a conexão entre as diferentes seções da linha. Essas discontinuidades na linha não causam nenhum efeito no que diz respeito ao serviço de voz, entretanto, para um sinal de banda mais larga resultam em reflexões causando perdas e atenuação que podem afetar serviços DSL.

### 2.1.2 Derivações

Derivações são seções de linha inativas que tem como objetivo conferir flexibilidade ao enlace telefônico, pois permitiam que o provedor, quando um cliente descontinuava o serviço, redirecionasse rapidamente a assinatura para um novo usuário. Essa manobra não tinha efeitos perceptíveis no desempenho dos serviços de voz. Porém, no que diz respeito à transmissão de dados em banda larga, a presença de derivações na topologia da linha introduz indesejáveis nulos na função de transferência do canal e também distorção de fase [26, 27].

---

<sup>1</sup> Esse sistema é baseado no fato de que o fio de cobre, no momento de sua fabricação, começa como uma tira metálica mais grossa a qual é gradualmente estirada para se tornar mais fina. A unidade AWG corresponde ao número de etapas sucessivas necessárias para obter o diâmetro desejado.

Por este motivo, nesta tese,  $\lambda_k$  será classificado como “serial” ou como “derivação”. Uma vez que são seções inativas, todas as derivações são consideradas aqui como tendo um terminal conectado a uma seção serial e o outro terminal em aberto. Um exemplo de topologia completamente caracterizada é apresentado na Figura 3, onde todos os elementos das seções de linha  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  são definidos. Os tipos de cabo  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  e  $\phi_3$  são definidos genericamente como A ou B apenas para fins ilustrativos.

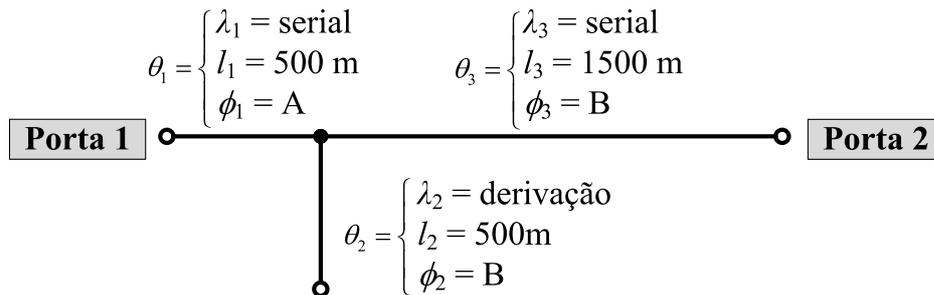


Figura 3 – Exemplo de topologia de linha telefônica com todas as seções  $\theta_k$  classificadas.

Uma vez definida a constituição das topologias de linha que serão estudadas, nas seções seguintes são revisadas as principais propriedades elétricas de uma linha de transmissão. Será analisado como essas propriedades modificam e definem os sinais transmitidos através do percurso em uma linha de transmissão. O objetivo é que a partir da compreensão destes mecanismos, se construa uma relação entre as características do sinal recebido em uma ou ambas as portas e os parâmetros que definem a topologia.

## 2.2 Características Elétricas de uma Seção de Linha

### 2.2.1 Parâmetros Primários

Linhas de transmissão podem ser descritas através de suas características elétricas fundamentais ou parâmetros primários, também conhecidos como parâmetros *RLCG*. Seja uma linha de transmissão uniforme e homogênea<sup>2</sup> de comprimento  $l$  com parâmetros primários distribuídos por unidade de comprimento: a resistência  $R$ , a indutância  $L$ , a condutância  $G$  e a capacitância  $C$ . Esta linha pode ser dividida em  $n$  seções de igual comprimento infinitesimal  $dx$ , representadas equivalentemente pelo circuito de parâmetros

<sup>2</sup> Uma linha de transmissão é considerada uniforme se a área da seção transversal é invariável ao longo de todo o comprimento. Ela será também homogênea se as propriedades elétricas e magnéticas do meio em volta dos condutores são iguais em qualquer ponto de seu comprimento [28].

concentrados mostrado na Figura 4, onde  $V$  e  $I$  representam as amplitudes das tensões e correntes, respectivamente, com  $dV$  e  $dI$  sendo as respectivas variações dessas grandezas no comprimento  $dx$ .

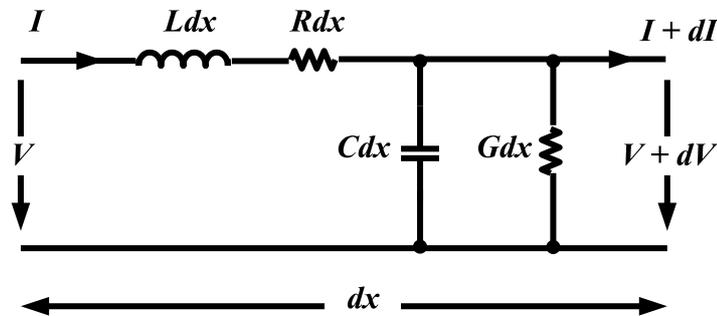


Figura 4 – Seção de linha de comprimento  $dx$  com os parâmetros primários por unidade de comprimento.

A resistência  $R$  de um par trançado de cobre é o dobro da resistência distribuída do condutor mais o efeito de alongamento dos mesmos devido à torção para formação do par. Varia com a frequência e é dependente da temperatura e do diâmetro do condutor. A indutância total  $L$  é a relação entre o fluxo magnético que atravessa o espaço entre os condutores e a corrente que o produz. O afastamento entre condutores influi diretamente no aumento da indutância. Tem mínima variação com a temperatura. A capacitância total  $C$  normalmente se assume constante, mas em caso de envelhecimento do material ou desgaste, pode variar com a temperatura devido à redução na densidade da isolação, expansão do cabo e diminuição da constante dielétrica. A condutância  $G$  representa o inverso da resistência entre os condutores. Seu valor é muito pequeno para as frequências usadas por ADSL e VDSL e pode variar muito para diferentes isolamentos do núcleo [24, 26, 27].

### 2.2.2 Parâmetros Secundários

Em qualquer ponto  $x$  de uma linha de transmissão homogênea as tensões e as correntes podem ser relacionadas através do seguinte sistema de equações diferenciais

$$\begin{cases} dV = -(R + j\omega L)I dx \\ dI = -(G + j\omega C)V dx \end{cases} \quad (2.3)$$

onde  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular em rad/s, sendo  $f$  a frequência em Hz. A partir de (2.3) obtêm-se

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

onde

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

é a constante de propagação do par trançado, a qual tem uma parte real  $\alpha$  chamada de constante de atenuação, que caracteriza a atenuação sofrida por um sinal transmitido através da linha ( $\alpha = 0$  representa uma linha sem perdas), e uma parte imaginária  $\beta$  chamada de constante de fase, que está relacionada à velocidade de propagação do sinal no par trançado.

As soluções de (2.4) em um ponto localizado na distância  $x$  a partir da fonte para uma linha de comprimento  $l$  consistem na soma de tensões e correntes fluindo nas duas direções:

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

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

onde as constantes  $V_0^+$  e  $V_0^-$  representam as tensões incidente e refletida, respectivamente; e  $I_0^+$  e  $I_0^-$  representam as correntes incidente e refletida, respectivamente. Essas constantes são determinadas pelas condições de contorno em  $x = 0$  e  $x = l$ .

A impedância característica  $Z_0$  da seção de linha é definida como a impedância da carga que faz com que a impedância em qualquer ponto  $x$  da linha seja igual e expressa por

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

o que resulta em  $V_0^- = 0$ , caso  $Z_L$ , a impedância da carga em  $x = l$ , seja igual a  $Z_0$ . Note-se que a tensão através da linha, em qualquer ponto  $x$ , é função somente da impedância característica  $Z_0$  e da constante de propagação  $\gamma$ , os quais são chamados de parâmetros secundários da linha [26, 27, 28]. Deste modo, uma dada linha de transmissão pode ser completamente representada por seus parâmetros secundários.

### 2.3 Propagação de Tensão e Corrente

Combinando (2.6) e (2.7), e a partir das condições de contorno, é possível encontrar uma relação entre as tensões e correntes em ambos os terminais da linha:

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(l) \\ I(l) \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

A impedância de entrada  $Z_{in}$ , ilustrada na Figura 5, onde a linha é representada pela

linha pontilhada, é definida como a impedância medida na porta de entrada (em  $x = 0$ ):

$$Z_{in} = \frac{V(0)}{I(0)} = Z_0 \frac{Z_L \cosh(\gamma l) + Z_0 \sinh(\gamma l)}{Z_L \sinh(\gamma l) + Z_0 \cosh(\gamma l)}. \quad (2.10)$$

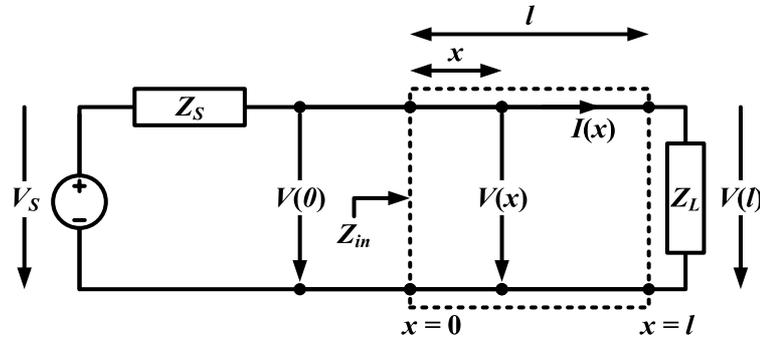


Figura 5 – Representação de uma linha de comprimento  $l$ , terminada em uma carga com impedância  $Z_L$ .

A partir da Figura 5, pode-se calcular a forma de onda do sinal resultante em  $V(0)$ , considerando o divisor de tensão formado por  $Z_{in}$  e  $Z_S$ , a impedância da fonte, através de

$$V(0) = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_S} V_S, \quad (2.11)$$

onde  $V_S$  é a tensão na fonte, indicada na Figura 5.

### 2.3.1 Coeficientes de Reflexão e de Transmissão

Sempre que um sinal é transmitido através da linha e encontra uma descontinuidade, parte é refletida de volta à fonte e parte é transmitida. O coeficiente de reflexão de tensão é a razão da onda refletida com a incidente na descontinuidade e é dada por

$$\Gamma = \frac{V_0^- e^{\gamma x}}{V_0^+ e^{-\gamma x}} = \frac{Z_P - Z_A}{Z_P + Z_A} \quad (2.12)$$

onde  $Z_P$  e  $Z_A$  são as impedâncias características da seção de linha posterior e da anterior à descontinuidade, respectivamente. A parte transmitida e quantificada pelo coeficiente de transmissão de tensão é expressa por

$$T = 1 + \Gamma. \quad (2.13)$$

A forma de um eco depende do tipo de descontinuidade que o gera, definido por  $\Gamma$ , e das seções que precedem à descontinuidade, caracterizadas por  $Z_0$  e  $\gamma$  [26-28].

### 2.3.2 Modelo ABCD

A linha pode ser também descrita através do chamado *modelo ABCD*, ilustrado na Figura 6 com uma representação equivalente à da Figura 5. O modelo ABCD para o quadripolo ilustrado na Figura 6 é dado por

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(l) \\ I(l) \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

onde, por comparação à (2.9),

$$A = \cosh(\gamma l), \quad B = Z_0 \sinh(\gamma l), \quad C = \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) \quad e \quad D = \cosh(\gamma l). \quad (2.15)$$

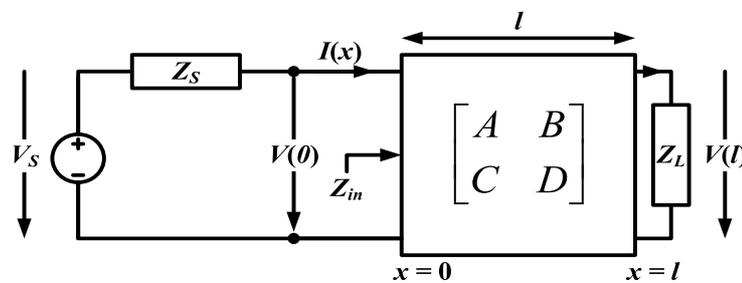


Figura 6 – Representação com parâmetros ABCD de uma linha de comprimento  $l$ , terminada em  $Z_L$ .

Os valores dos parâmetros ABCD são dependentes apenas dos parâmetros secundários. Esse tipo de modelagem é importante na caracterização de linhas obtidas a partir do cascadeamento de diversas subseções consistindo de características elétricas diferentes, como, em geral, acontece na prática. Nesse caso, a matriz ABCD global é obtida explorando a regra da cadeia, ou seja, a matriz resultante é o produto das matrizes ABCD de cada subseção do enlace, na ordem em que se apresenta na estrutura da linha [26-28].

### 2.3.3 Modelos de Linha

Foram propostos diversos modelos que descrevem o comportamento dos parâmetros primários ou secundários de cabos metálicos. Esses modelos podem ser classificados em três categorias: funções racionais, semiempíricos e físicos. Os mais referenciados pelos órgãos internacionais de padronização de telecomunicações como o *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) são os semiempíricos, como o BT#1, o KPN e MAR#2 [29]. Entretanto, esses modelos, no geral, apresentam inconsistências, como comportamento não causal [30]. Por outro lado, modelos físicos [25, 31] são analíticos e construídos através da geometria e das propriedades dos materiais usados na confecção do cabo e, no geral, são mais

consistentes, principalmente, com a representação no domínio do tempo.

Um aspecto importante na escolha de um modelo é que ele deve estar em acordo com as relações de causalidade de Hilbert, pois isso facilita a investigação sobre o comportamento elétrico de um cabo se sua resposta no domínio do tempo é desejada. Por este motivo, é utilizado aqui o modelo físico VUB#0, que é causal e modela com boa precisão diferentes tipos de cabos [32]. Este modelo descreve os parâmetros secundários de uma seção de linha uniforme e homogênea através de equações paramétricas. É definido para um par de condutores e utiliza cinco parâmetros em função de seis características físicas da linha: o comprimento do cabo, o raio dos condutores metálicos, a distância entre os centros dos condutores, a condutividade dos condutores, além da permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do dielétrico que envolve os condutores [5]. Isto significa que, para simular sinais em uma linha é necessário ter um banco de dados com valores típicos dos parâmetros do cabo que se deseja simular.

Em [33], é proposto um método que permite a identificação de parâmetros físicos de linhas de par trançado de cobre a partir de medições de impedância de entrada, utilizando uma combinação de abordagem analítica e processo de otimização. Este método permite a construção de um banco de dados de parâmetros, mesmo que tais informações não estejam disponíveis através da folha de dados que o fabricante fornece junto com os cabos.

Para uma topologia com mais de uma seção, pode-se utilizar um modelo de linha para obter a matriz ABCD de cada seção de linha. Então, a regra da cadeia poderia ser utilizada para encontrar os valores teóricos estimados dos parâmetros ABCD gerais e desse modo simular o comportamento da topologia.

A discussão conduzida nas seções seguintes tem como objetivo sugerir como os sinais de interesse podem ser interpretados com o intuito de estimar a topologia da linha. Para ilustrar esses princípios serão utilizadas simulações de sinais a partir do modelo VUB#0. Por uma questão de simplificação da análise neste capítulo, a configuração dos valores dos parâmetros usados no modelo é baseada em [34] e  $\phi_k$  será representado pelo diâmetro de seus condutores, uma vez que os demais parâmetros do modelo VUB#0 entre os diferentes tipos de cabos são iguais. No Capítulo 5,  $\phi_k$  será representado pelo fabricante e o modelo do cabo.

## 2.4 Obtenção dos Sinais no Domínio do Tempo

Como discutido no Capítulo 1, as metodologias aqui desenvolvidas requerem como

entradas sinais no domínio do tempo: a resposta ao impulso  $h(t)$  e a resposta TDR  $r(t)$ .

A resposta ao impulso de um sistema dinâmico é definida por sua saída quando a entrada é um impulso. Qualquer sistema linear e invariante no tempo pode ser completamente representado por  $h(t)$ , o qual permite obter a reação deste sistema para qualquer excitação externa. Para sistemas contínuos no tempo, o impulso de entrada pode ser modelado como uma função delta de Dirac<sup>3</sup>. Na prática não é possível produzir um impulso perfeito, mas, se for utilizado um pulso curto o bastante, a resposta pode se aproximar da resposta teórica. Entretanto, em muitos sistemas, introduzir um pulso assim pode induzir um comportamento não linear no sistema.

O TDR é uma técnica de medição utilizada para se determinar características de uma linha através da observação da forma de onda refletida em seus descasamentos de impedância. Sua configuração básica é bastante simples e, em geral, consiste na inserção de um sinal de entrada inserido na linha por um gerador de pulso, cuja resposta no tempo é observada por um receptor (como um osciloscópio). Ambos os equipamentos conectados à porta de entrada da linha ou do dispositivo sob teste, como mostrado na Figura 7. Em geral, o TDR utiliza como sinal de entrada um pulso retangular de rápido tempo de subida<sup>4</sup>, que pode ser modificado tanto em largura como em amplitude dependendo do alcance e da precisão com que se planeja medir. Quanto maior o alcance desejado, mais se deve aumentar a largura e a amplitude. Entretanto, a resolução da medição diminui com o aumento da largura do pulso [35].

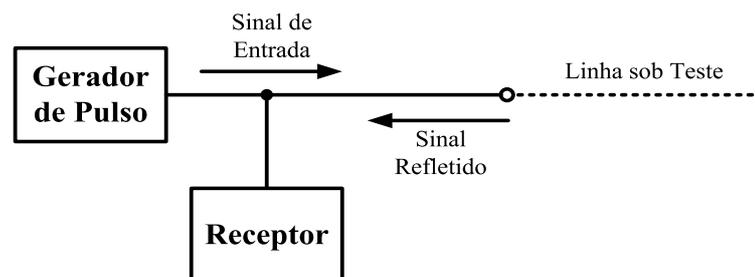


Figura 7 – Diagrama de um sistema TDR básico.

O modelo VUB#0 (como os modelos de linha em geral) permite simular somente respostas do sistema no domínio da frequência, como a resposta em frequência da linha  $H(f)$  e sua impedância de entrada  $Z_{in}(f)$ . Do mesmo modo, algumas vezes na prática, apenas as soluções em frequência estão disponíveis. Nesses casos, é possível obter tanto  $h(t)$  quanto  $r(t)$

<sup>3</sup> A função delta de Dirac representa o caso limite de um pulso cuja largura é feita cada vez mais curta, mas que mantém sua área unitária, o que resulta em pico infinitamente alto [36].

<sup>4</sup> Muitas vezes um sinal degrau é utilizado, o qual pode ser entendido simplesmente como um pulso retangular de duração muito mais longa do que o tempo de retorno esperado para os ecos.

utilizando a transformada inversa de Fourier.

A resposta ao impulso  $h(t)$  pode ser definida como a contraparte no domínio do tempo de  $H(f)$  e, portanto, pode ser obtida através da transformada inversa de Fourier de  $H(f)$ . Com relação à  $r(t)$ , é o sinal capturado na porta de entrada da linha, em  $x = 0$ , quando a mesma é excitada por um determinado sinal de entrada. Essa resposta no domínio da frequência,  $V_r(f)$ , pode ser obtida a partir de  $Z_{in}(f)$  utilizando (2.11), onde  $V_r(f)$  é a tensão resultante  $V(0)$  do divisor de tensão formado por  $Z_{in}(f)$  e  $Z_s(f)$ . Essa expressão é reescrita a seguir:

$$V_r(f) = \frac{Z_{in}(f)}{Z_{in}(f) + Z_s} V_s(f). \quad (2.16)$$

Com isso,  $r(t)$  pode ser obtido através da transformada inversa de Fourier de  $V_r(f)$ .

Entretanto, tanto medições quanto simulações no domínio da frequência não são contínuas sobre uma faixa de frequência infinita. Devido a isto, torna-se necessário lidar com certas limitações que surgem na operação de transformar para o domínio do tempo os sinais obtidos no domínio da frequência. A seguir essas questões são discutidas, sendo conformado o bloco de pré-processamento ilustrado na Figura 2.

#### 2.4.1 Nível DC e Simetria Hermitiana

A simulação através do modelo VUB#0 (assim como medições com equipamentos reais) obtém um sinal constituído de pontos discretos em frequências positivas. Desse modo, nem as frequências negativas e nem o nível DC são obtidos. Sendo tanto  $r(t)$  quanto  $h(t)$  funções reais no domínio do tempo, é assumido que suas transformadas de Fourier exibem simetria hermitiana, ou seja, que o conteúdo das frequências negativas é igual ao conjugado do conteúdo das frequências positivas [36].

Com relação ao nível DC ausente, ele deve ser incluído. Na Figura 8 é ilustrado o efeito da inclusão do nível DC durante o processamento de uma resposta ao impulso. Primeiro é ilustrada uma curva de  $h(t)$  que foi obtida através da transformada inversa de Fourier sem qualquer processamento. Nela se observa uma distorção, um efeito de decaimento antes da borda de subida do pulso. Além disso, há um *offset* negativo. O efeito da oscilação está relacionado à largura de banda limitada e será discutido na Seção 2.4.2. A curva de  $h(t)$  sem processamento na Figura 8 é comparada com uma curva em que o nível DC foi igualado a zero e com outra em que o nível DC foi extrapolado através da função *spline*. Maior detalhe na observação desses efeitos pode ser obtido na Figura 9, onde a visualização é focada nas bordas de subida e descida do pulso. Na curva cujo nível DC foi extrapolado, a amplitude não

apresenta mais o *offset* e está centrada em zero antes do pulso, diferentemente da curva em que o nível foi igualado a zero. Nesta tese, o nível DC é extrapolado a partir de uma função *spline*, mais especificamente a da biblioteca padrão do software Matlab.

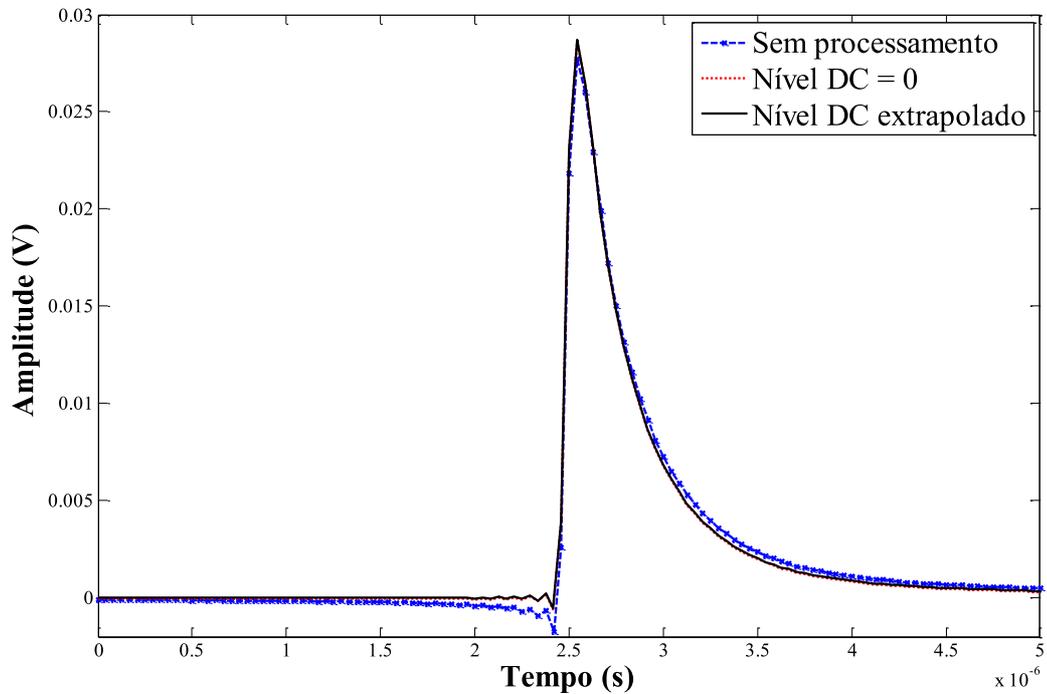


Figura 8 – Efeito da inclusão do nível DC no pré-processamento de um pulso em uma curva resposta ao impulso.

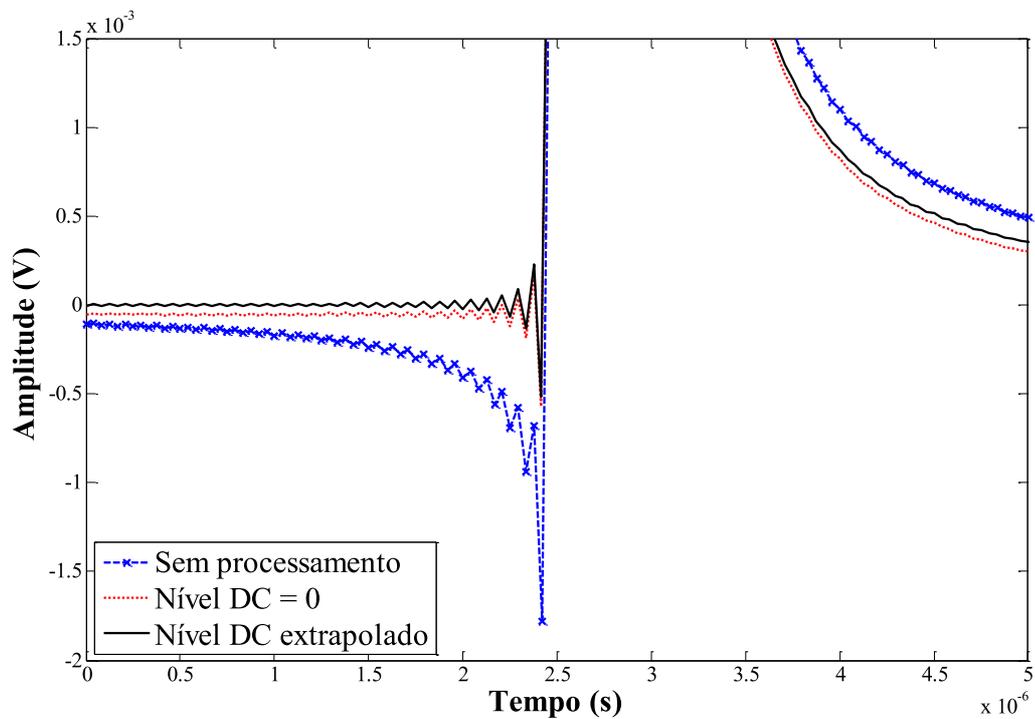


Figura 9 – Detalhe das bordas de subida e descida do pulso apresentado na Figura 8.

### 2.4.2 Janelamento

Devido à largura de banda limitada da análise, o espectro simulado (ou medido) corresponde a uma forma truncada, com características diferentes do espectro ideal. Efetivamente, o truncamento é equivalente ao produto do espectro original com uma janela retangular na frequência. O resultado disso no domínio do tempo é equivalente à convolução do sinal original com uma função *sinc*, o que resulta em sobressinal (*overshoot*) e oscilação na resposta no domínio do tempo, resultante dos lóbulos secundários da função *sinc*. Os efeitos de janelamento são amplamente estudados, mas é mais comum que a janela seja aplicada no domínio do tempo, enquanto que nesse caso a mesma opera no domínio da frequência.

A aplicação de uma função janela ao espectro minimiza as transições bruscas na função truncada, melhorando a faixa dinâmica do sinal no domínio do tempo, controlando os lóbulos laterais criados durante o processo de truncamento do espectro. Por outro lado, a função de janelamento tende a reduzir a “agudez” das transições da resposta no tempo, causando espalhamento nos pulsos, reduzindo a resolução e distorcendo as transições da resposta na frequência. Assim, existe um compromisso entre a amplitude dos lóbulos secundários e a resolução (relacionada ao lóbulo principal) na escolha da função de janelamento [36, 37].

Uma função janela comumente utilizada é a função Kaiser-Bessel, a qual possui um parâmetro  $\varepsilon$  que controla a quantidade de *roll-off* da função janela. Quanto maior o valor de  $\varepsilon$ , menores as amplitudes dos lóbulos secundários [38]. Essa janela (com  $\varepsilon = 12$ ) foi escolhida por ter apresentado um bom compromisso entre a obtenção de um lóbulo principal mais estreito (ou seja, alta resolução no tempo) e lóbulos secundários de menor amplitude. Entretanto, outras janelas foram testadas também e geraram resultados similares.

Na Figura 10 é ilustrado o efeito do janelamento. Ao observar a curva sem qualquer processamento, pode-se notar o efeito da oscilação devido aos lóbulos laterais da janela retangular. Como mostrado na Figura 8 e na Figura 9, esse efeito permanece após a inclusão do nível DC através de extrapolação via função *spline*, como mencionado anteriormente. A resposta ao impulso representada pela linha tracejada vermelha mostra o efeito do janelamento, sem a inclusão do nível DC. Observa-se que a oscilação é mitigada. A curva sólida preta ilustra o efeito da inclusão do nível DC juntamente com o janelamento, combinando os dois efeitos. O resultado é obtenção de um sinal suave, sem *offset* e com o pulso menos espalhado, principalmente em sua borda de descida.

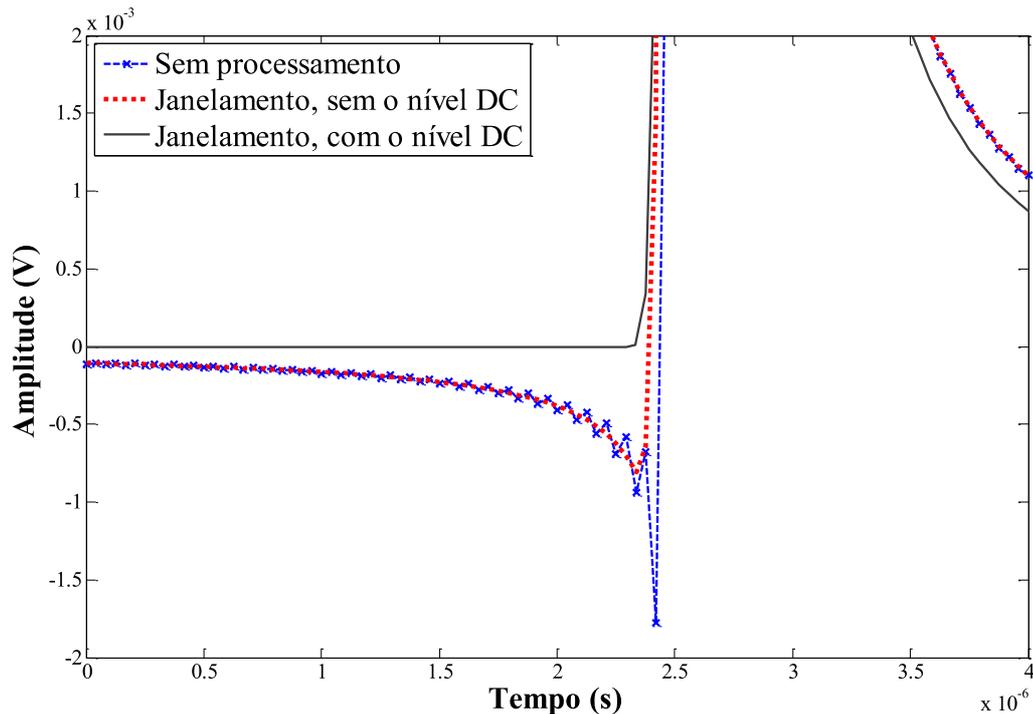


Figura 10 - Efeito do janelamento no pré-processamento de um pulso em uma curva resposta ao impulso.

## 2.5 Análise das Características da Resposta ao Impulso

Na interpretação de  $h(t)$  será considerado que a linha é terminada na porta 2 por um receptor de sinais casado em impedância com a linha sob teste. Além disso, em altas frequências, a impedância característica de uma linha metálica é aproximadamente uma resistência pura [39]. Assim, pode-se considerar, numa primeira análise, que as impedâncias características das seções de uma linha são definidas por valores reais e isto implica que o valor de  $\Gamma$  nos descasamentos é real e  $1 \geq \Gamma \geq -1$ , enquanto que  $T$  é sempre positivo.

Sendo  $T$  sempre positivo e com  $h(t)$  sendo resposta a um impulso (positivo) na entrada da linha, então a parcela transmitida através de cada descasamento de impedância também será positiva. Assim,  $h(t)$  será composto de uma série de pulsos positivos (constituídos por borda de subida e descida, nesta ordem) atrasados no tempo. Cada pulso que se sucede é resultante de um diferente “caminho” tomado por uma parte do sinal de entrada na linha. Considere-se o exemplo de topologia ilustrada na Figura 11 e que um sinal de teste é injetado por uma fonte conectada à porta 1 e medido na porta 2. A Figura 12 ilustra quatro diferentes caminhos definidos pelos descasamentos de impedância da linha que partes do sinal de entrada podem seguir a partir da porta 1 até a porta 2, chamados aqui de  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  e  $\bar{D}$ . Note-se que infinitos caminhos podem ser formados, dividindo o sinal em infinitas partes.

Entretanto, devido à atenuação haverá um limite para o que poderá ser detectado na porta 2. Os caminhos  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  e  $\bar{D}$  representam os percursos que imprimem as assinaturas mais significativas em  $h(t)$ , ou seja, gerando os pulsos que poderão ser visualizados. A Figura 13 mostra a resposta ao impulso simulada para a topologia apresentada na Figura 11. Os tempos de chegada dos pulsos positivos resultantes em  $h(t)$  de cada caminho são representados, respectivamente, por  $t_{\bar{A}}$ ,  $t_{\bar{B}}$ ,  $t_{\bar{C}}$  e  $t_{\bar{D}}$ . O comprimento  $L_i$  do  $i$ -ésimo caminho pode ser calculado pelo tempo de chegada  $t_i$  do  $i$ -ésimo pulso através da expressão

$$L_i = t_i v_p \quad (2.17)$$

onde  $v_p$  é a velocidade propagação do sinal transmitido, a qual depende do tipo de cabo ou da combinação de cabos, da posição do par trançado em relação aos outros pares e também da distância entre condutores. Além disso,  $v_p$  não apenas depende dessas propriedades como também varia com a frequência. Entretanto, muitos desses fatores são inevitáveis e imprevisíveis. Na prática, em técnicas de qualificação, é assumido um valor médio normalmente relacionado ao material do isolante que comumente é associado a um erro mínimo de 3% [35].

O primeiro pulso a alcançar a porta em  $t_{\bar{A}}$  é resultante do caminho  $\bar{A}$ , que é o caminho serial direto da porta 1 até a porta 2 de comprimento  $L_T$ , que é igual ao próprio comprimento  $L_{\bar{A}}$ , o qual é a soma dos comprimentos das seções seriais. É um importante parâmetro na caracterização da topologia, pois define o comprimento de linha que separa um terminal ativo do outro.

A presença de cada derivação origina um novo caminho e conseqüentemente um novo pulso em  $h(t)$ . Na Figura 12, os caminhos  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$  são compostos por derivações que originam pulsos em  $h(t)$ , cujos tempos de chegada são, respectivamente,  $t_{\bar{B}}$  e  $t_{\bar{C}}$ . A partir desses tempos de chegada, os comprimentos dessas derivações, na terceira e na quinta seção, podem ser estimados a partir dos comprimentos dos caminhos  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$  através de

$$l_3 = \frac{L_{\bar{C}} - L_{\bar{A}}}{2} = \frac{(t_{\bar{C}} - t_{\bar{A}})}{2} v_p$$

e

$$l_5 = \frac{L_{\bar{B}} - L_{\bar{A}}}{2} = \frac{(t_{\bar{B}} - t_{\bar{A}})}{2} v_p. \quad (2.18)$$

Ou seja, a estimativa do comprimento de uma derivação a partir de  $h(t)$  é o produto da velocidade de propagação  $v_p$  pela metade da diferença entre os tempos de chegada do pulso

relacionado à derivação e do pulso relacionado à  $L_7$ . É utilizada a metade do intervalo devido ao fato de que os sinais transmitidos através de  $L_{\bar{B}}$  e  $L_{\bar{C}}$  percorrem o dobro do comprimento de suas respectivas derivações.

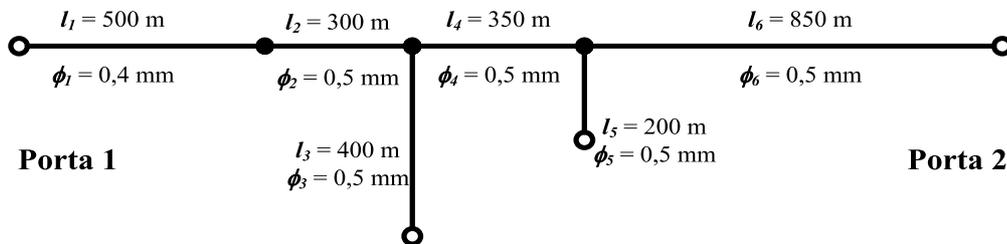


Figura 11 – Topologia de teste com seis seções e duas derivações, na terceira e na quarta seções.

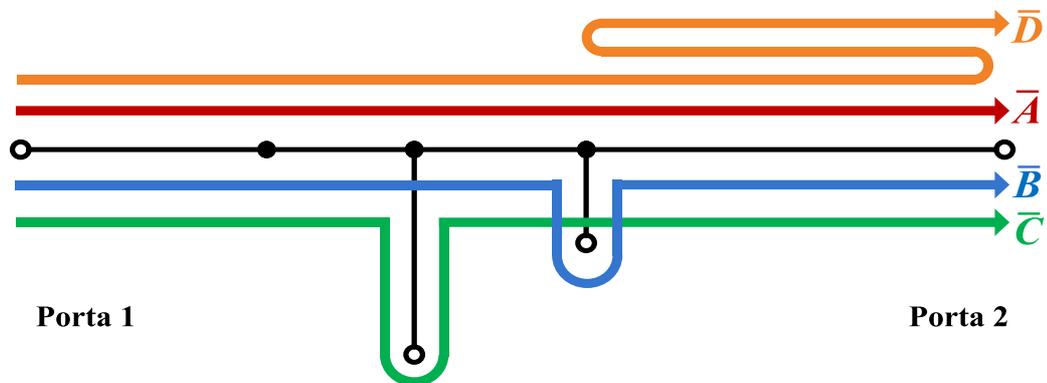


Figura 12 – Quatro percursos definidos pelos descasamentos de impedância da topologia apresentada na Figura 11.

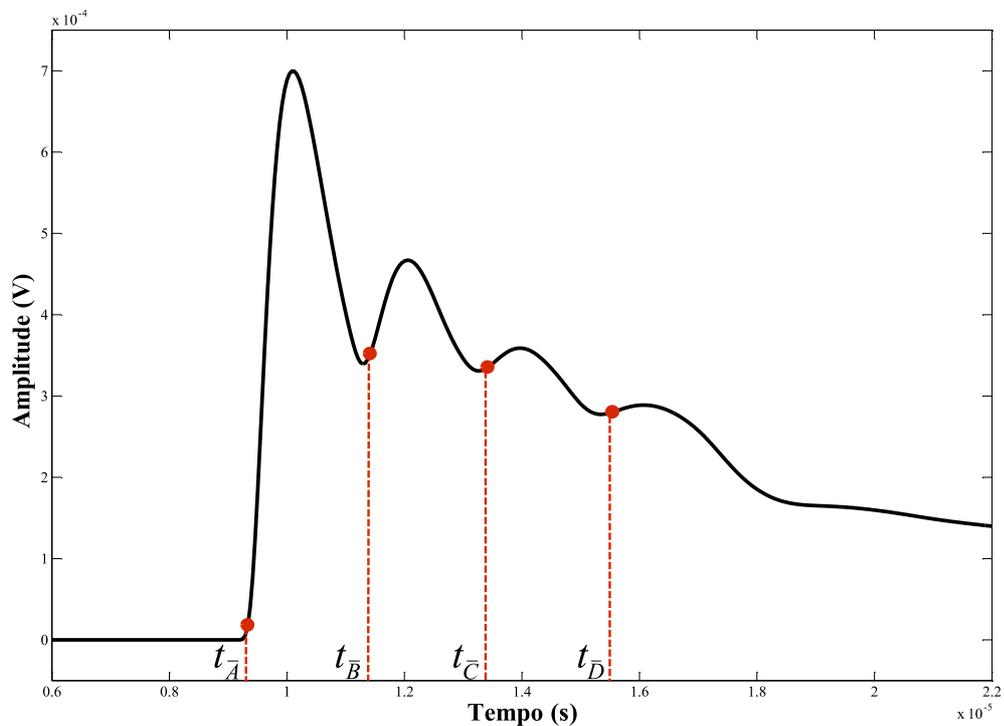


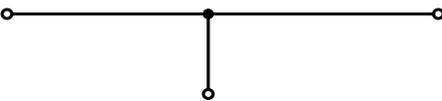
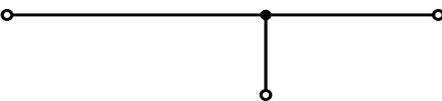
Figura 13 – Resposta ao impulso simulada para a topologia representada na Figura 11. Pontos vermelhos representam a localização estimada dos tempos de chegada dos pulsos positivos.

Entretanto, não é possível determinar a posição das derivações usando somente a resposta ao impulso. Isso quer dizer que não se pode dizer a qual das derivações a estimativa de comprimento pertence. Isso ocorre porque se a posição de uma derivação é modificada, o comprimento do caminho viajado pelo sinal permanece o mesmo chegando com a mesma forma no receptor. Para ilustrar, na Figura 14, são mostradas as respostas ao impulso das topologias descritas na Tabela 1. Pode-se observar que a variação da posição da derivação praticamente não gera efeito na resposta ao impulso. Uma vez que o comprimento da derivação permanece o mesmo em todos os casos, o sinal percorrerá exatamente a mesma distância para alcançar a terminação da linha.

Pulsos positivos adicionais também podem ser gerados por múltiplas reflexões. O caminho  $\bar{D}$  na Figura 12 tomado pelo pulso que alcança o receptor em  $t_{\bar{D}}$  é um exemplo de um pulso gerado por múltiplas reflexões. Isso demonstra que nem todo pulso adicional em  $h(t)$  estará exclusivamente relacionado a uma derivação, mas pode ser considerado como um indício da existência de uma.

Conexões entre seções seriais com diferentes tipos de cabo não geram modificações perceptíveis no sinal resultante. Essas características tornam a análise da topologia a partir de  $h(t)$  uma tarefa longe de ser trivial.

**Tabela 1 – Topologias com o mesmo valor de  $L_T$ , mas diferentes posições de uma derivação. A topologia que não possui derivações e foi utilizada como referência para o pulso relacionado à  $L_T$ .**

Topologia	Descrição Gráfica Proporcional das Topologias	Descrição das Seções					
		Seção 1 Serial		Seção 2 Derivação		Seção 3 Serial	
		$l_1$ (m)	$\phi_1$ (mm)	$l_2$ (m)	$\phi_2$ (mm)	$l_3$ (m)	$\phi_3$ (mm)
0		1500	0,50	-	-	-	-
1		500	0,50	300	0,50	1000	0,50
2		700	0,50	300	0,50	800	0,50
3		900	0,50	300	0,50	600	0,50

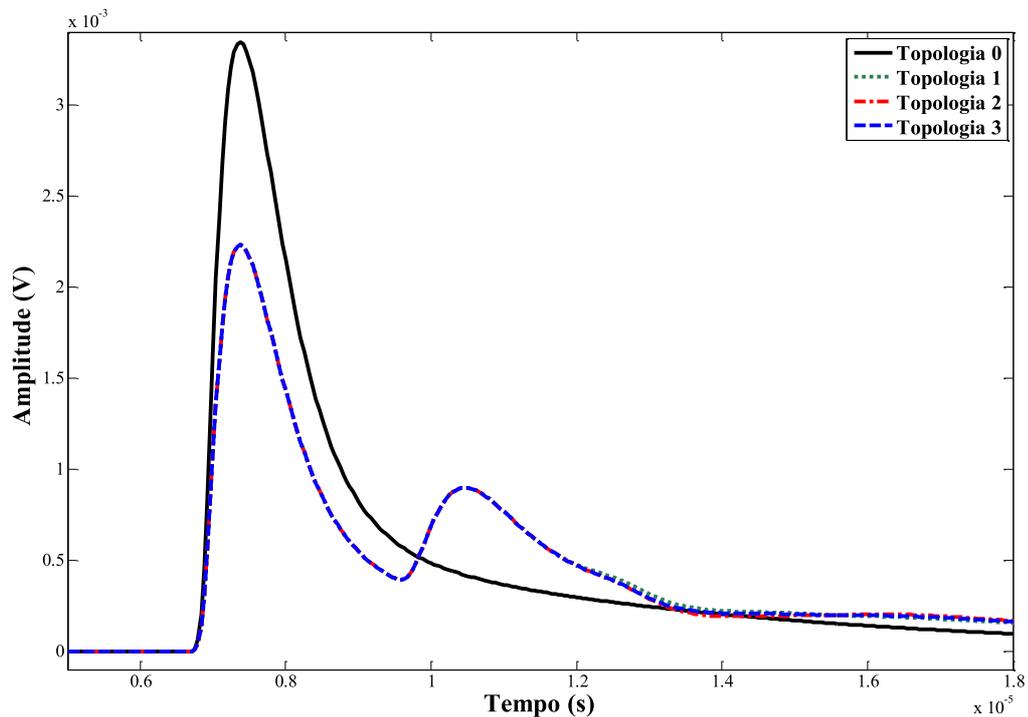


Figura 14 – Respostas ao impulso simuladas para as linhas descritas na Tabela 1. A topologia 0 é tomada como referência e representada em linha contínua preta.

## 2.6 Análise das Características da Resposta ao TDR

Para a interpretação de  $r(t)$ , assume-se que a porta 2 está terminada em aberto. Além disso, as características essenciais de  $r(t)$  são definidas pelos três tipos de descasamentos de linha resultantes da modelagem definida na Seção 2.1: conexão serial-serial, conexão com terminação em aberto e conexão serial-derivação. Cada uma delas é discutida a seguir:

### 2.6.1 Conexão Serial-Serial

Em redes telefônicas típicas, em uma conexão entre duas seções seriais de tipos de cabos diferentes não ocorre um descasamento de impedância grande o bastante para gerar um pulso. Em TDR, normalmente esse tipo de emenda é percebido através de uma sutil mudança no decaimento do sinal. Considerem-se topologias do tipo representado na Figura 15. Utilizando como sinal de entrada um pulso retangular com duração de  $1 \mu\text{s}$  e amplitude  $10 \text{ V}$  e ainda uma fonte cuja impedância de saída é  $50 \text{ ohms}$ , é simulada uma curva de  $r(t)$  para cada topologia obtida variando-se o parâmetro  $\phi_2$ . Na Figura 16, essas curvas simuladas são mostradas. Como mostrado em [9], quando a impedância da seção anterior é menor do que a

da seção subsequente,  $\Gamma$  é positivo e o sinal sofre “decaimento positivo”, ou seja, aumenta a amplitude do sinal recebido. O oposto ocorre quando uma impedância maior é conectada a uma menor. Não obstante, em todos os casos em que ocorre mudança do tipo de cabo, ocorre a variação de decaimento, determinando uma borda entre os dois “momentos” do sinal.

Os tempos de chegada  $t_A$  e  $t_B$  das características geradas pelos descasamentos de impedância indicados por  $A$  e  $B$  na Figura 15, respectivamente, são representados na Figura 16. O tempo de chegada  $t_A$  pode ser usado para estimar a localização do ponto  $A$ , uma conexão serial-serial, através de

$$l_1 = \frac{t_A}{2} v_p. \quad (2.19)$$

De um modo geral, como será visto nos demais tipos de conexão, a posição de um descasamento de impedância na topologia pode ser estimada diretamente através da metade do produto entre o tempo de chegada da característica relacionada e a velocidade de propagação. O produto é dividido por dois devido ao fato de que o sinal refletido diretamente percorre o dobro do caminho da porta 1 até a posição da descontinuidade.

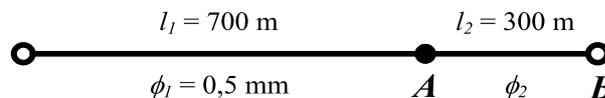


Figura 15 – Topologia de teste com duas seções seriais. A segunda seção possui tipo de cabo variável.

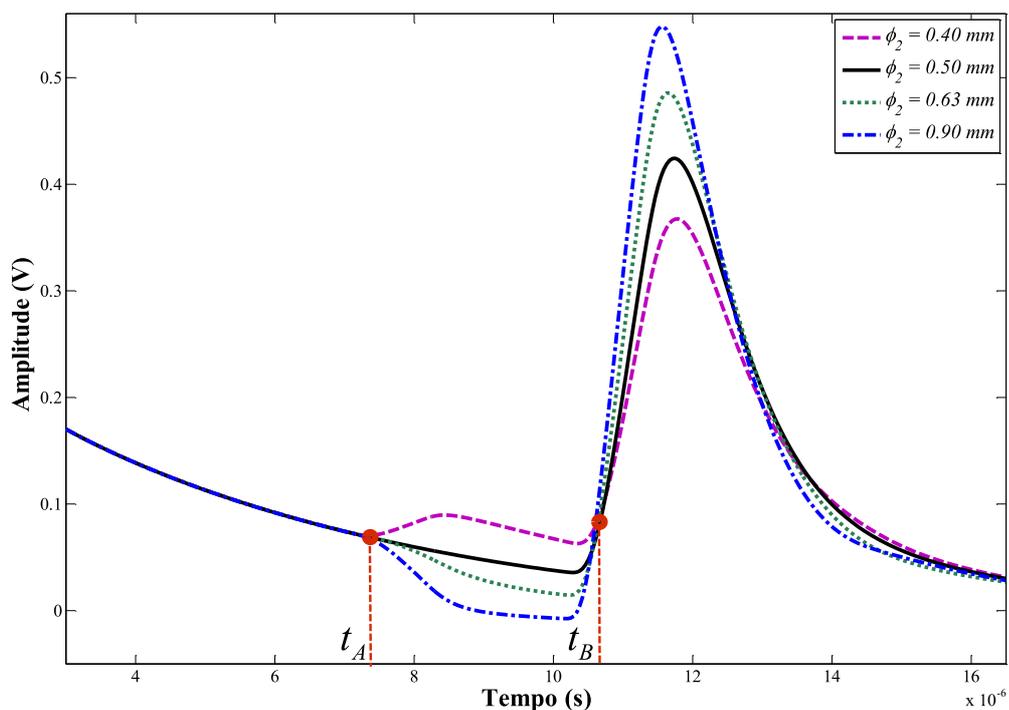


Figura 16 – Comparação entre reflectogramas simulados para o tipo de topologia representado na Figura 15. O sinal de entrada é um pulso retangular com 1  $\mu$ s de duração e 10 V e amplitude. A impedância de saída da fonte é 50 ohms.

### 2.6.2 Conexão com Terminação em Aberto

Para uma seção de linha terminada em aberto ( $\Gamma = 1$ ), se o pulso de entrada for positivo, o pulso refletido diretamente pela terminação também será positivo [9]. No exemplo ilustrado na Figura 16, o pulso relacionado à terminação  $B$  alcança a porta 1 em  $t_B$ . Sendo  $L_T$  a soma dos comprimentos das duas seções, pode então, para este caso, ser estimado por

$$L_T = \frac{t_B}{2} v_p. \quad (2.20)$$

O comprimento  $L_T$  sempre poderá ser estimado a partir do tempo de chegada do pulso positivo relacionado à terminação da linha.

### 2.6.3 Conexão Serial-Derivação

Uma derivação pode ser considerada uma seção cuja impedância está em paralelo com a impedância equivalente das seções seguintes até a porta 2, que está em aberto. Considerando a topologia com três seções ilustrada na Figura 17, pode ser definido que

$$\Gamma = \frac{Z_2 \parallel Z_3 - Z_1}{Z_2 \parallel Z_3 + Z_1}, \quad (2.21)$$

onde  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  são, respectivamente, as impedâncias características da primeira, segunda e terceira seções. Assumindo que  $Z_3$  é maior ou igual a  $Z_2$  e ambos são maiores que zero:

$$\frac{Z_3}{2} \geq Z_3 \parallel Z_2 \geq 0. \quad (2.22)$$

Usualmente, em redes de telecomunicações, as impedâncias de diferentes seções de linha são da mesma ordem de valores. Portanto

$$Z_1 \geq \frac{Z_3}{2} \geq Z_3 \parallel Z_2. \quad (2.23)$$

Conseqüentemente,  $\Gamma < 0$  no descasamento de impedância na conexão da linha com a derivação. Assim, se o pulso de entrada é positivo, um pulso refletido diretamente por uma conexão serial-derivação é negativo. Resultado similar pode ser obtido considerando  $Z_2$  maior ou igual a  $Z_3$ . Na Figura 18 é mostrado o sinal  $r(t)$  simulado para a topologia da Figura 17, considerando  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0,5$  mm. As configurações do TDR definidas na Seção 2.6.1 são mantidas. É possível observar que primeiro pulso a alcançar o receptor na porta 1 é o pulso negativo cujo tempo de chegada é  $t_A$ . Esse pulso é resultante da reflexão direta no descasamento na conexão com a derivação no ponto  $A$ . Deste modo, da mesma forma que fora

discutido na Seção 2.6.1, a posição do ponto  $A$  (e, portanto, da derivação), que é o próprio comprimento da primeira seção, pode ser estimada através de

$$l_1 = \frac{t_A v_p}{2}. \quad (2.24)$$

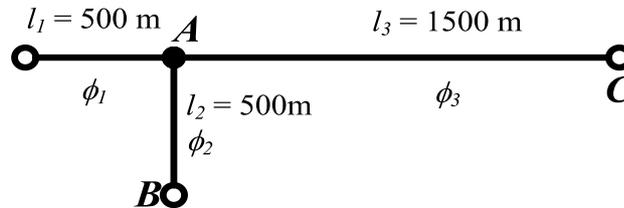


Figura 17 – Topologia de teste com três seções seriais, sendo a terceira uma derivação.

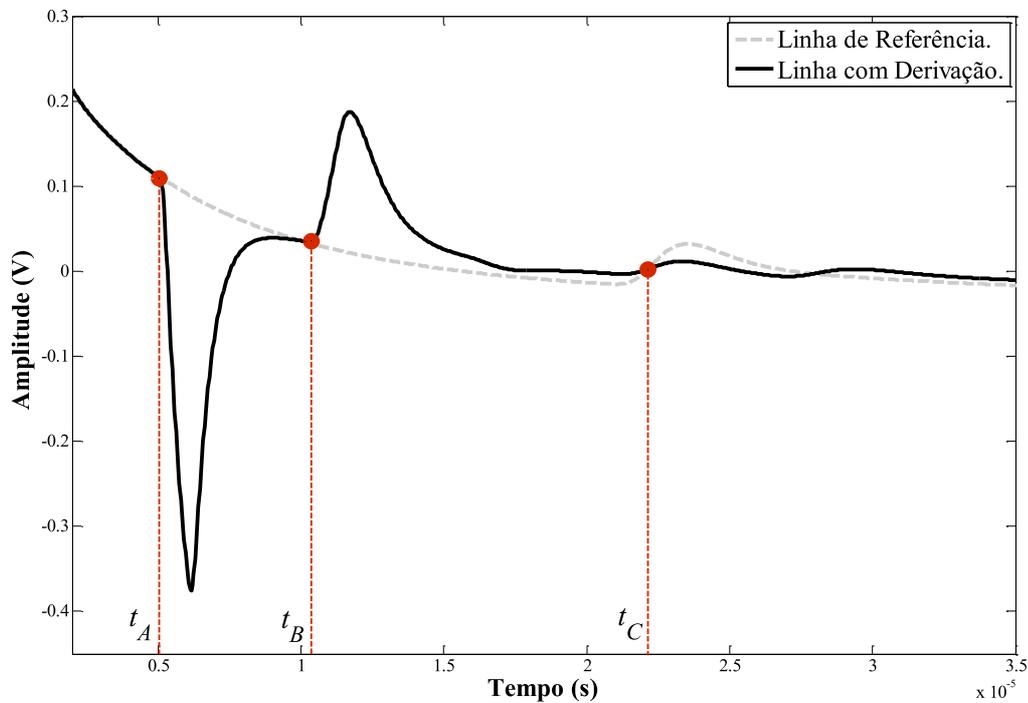


Figura 18 – Resposta TDR simulada para a topologia ilustrada na Figura 17, considerando  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0,5$  mm. Ela é comparada a uma curva de referência simulada para uma topologia de uma seção de mesmo  $L_T$ , com  $\phi_1 = 0,5$  mm.

Como mostrado na Seção 2.6.2, a terminação em aberto da derivação origina um pulso positivo. O intervalo entre o tempo de chegada do pulso negativo que determina a posição da derivação e o tempo de chegada do pulso positivo que é gerado pela terminação da derivação pode ser usado para estimar o comprimento da derivação usando

$$l_2 = \frac{(t_B - t_A)}{2} v_p. \quad (2.25)$$

Assim, o comprimento de uma derivação sempre estará relacionado em  $r(t)$  ao intervalo entre o tempo de chegada de um pulso negativo – relativo ao início da seção – e o

tempo de chegada de pulso positivo – relativo à terminação em aberto da derivação.

O pulso positivo de tempo de chegada  $t_C$  está relacionado à terminação da linha em  $C$ . Entretanto, neste caso, não é possível diferenciar diretamente os pulsos positivos sem informação *a priori*. Ou seja, de um modo geral, pulsos positivos estarão relacionados tanto à terminação da linha quanto à terminação de derivações.

Além disso, do mesmo modo que para  $h(t)$ , pulsos espúrios, tanto positivos quanto negativos, podem surgir devido a múltiplas reflexões do sinal de entrada entre os descasamentos de impedância. Na Figura 18 pode ser observado um pulso positivo a partir de  $2,6 \times 10^{-5}$  s que não está relacionado a nenhuma reflexão direta em qualquer dos descasamentos de impedância, sendo, portanto, resultante de multirreflexão.

## CAPÍTULO 3

### EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

Como visto no Capítulo 2, pulsos e variações no decaimento dos sinais no domínio do tempo são eventos importantes gerados pelos descasamentos de impedância na topologia. Se apropriadamente identificados, esses eventos podem ser utilizados para inferir os parâmetros da topologia de uma dada linha. Efetivamente, quando um técnico especializado avalia curvas como  $h(t)$  e  $r(t)$  com o objetivo de qualificação da linha, o que ele de fato interpreta são essas características, dando seu diagnóstico com base no atraso, no formato e na relação entre elas. A mente especializada, que já sabe o que buscar no sinal, imediatamente reconhece e isola essas características, e seus respectivos intervalos, para em seguida atribuir significado a elas.

De um modo geral, as metodologias descritas na literatura para identificação automática da topologia de uma linha telefônica buscam, de alguma forma, mimetizar esse processo racional humano de interpretação de sinais medidos. Desse ponto de vista, primeiramente, seria fundamental desenvolver um método que automaticamente, com segurança e precisão, detecte e identifique as características de interesse no sinal. Entretanto, a despeito de sua importância, esse não é um assunto tratado com muito destaque na literatura aberta e, pelo interesse comercial e dificuldades do processo de proteção da propriedade intelectual, muitas vezes não são divulgados pela indústria.

O objetivo deste capítulo é resgatar o estado da arte no assunto e realizar uma descrição pormenorizada de um método para extração de características. A seguir, é feita breve descrição da lacuna na literatura por métodos de extração dos eventos de interesse e descrições detalhadas dos mesmos. Em [6, 9-11], como explicado no Capítulo 1, é descrito um método para identificação de topologias fundamentado na análise interativa de intervalos selecionados de uma curva de TDR sinal. Os autores ressaltam, em um único parágrafo em [6], que a estimação precisa desses intervalos é fundamental para o método. Embora a técnica

desenvolvida dependa disso para ser implementada de modo automático, um método para detectar esses intervalos não é definido.

Em [14], é desenvolvida uma solução iterativa – mais tarde utilizada em [7] e [13] – para identificação de características em  $s_{11}(t)$  baseada na modelagem de decaimento do pulso. Em [15], são descritas certas desvantagens desta solução, sendo proposto outro método, que apresenta melhores resultados. Este segundo método combina 1ª e 2ª derivadas do sinal para identificar a posição das características de  $s_{11}(t)$ . Por outro lado, o uso de derivadas na presença de ruído pode ser algumas vezes problemático. Os autores buscam minimizar essa questão utilizando um método de mitigação do ruído que consiste em realizar várias medições do sinal de entrada e utilizar a média dessas medições como entrada do sistema.

Em [40], o autor desta tese apresentou uma metodologia para identificação de ecos na resposta ao TDR em linhas telefônicas. Trata-se de um método iterativo que utiliza a transformada wavelet contínua (TWC), um modelo de reflectograma e um conjunto de regras para identificar, em cada iteração, um eco. Esta metodologia não previa a detecção de desvios de decaimento. Entretanto, obteve bons resultados na identificação de pulsos (ecos) em  $r(t)$ , especialmente em relação à capacidade de diferenciar ecos sobrepostos.

Neste capítulo, é apresentado um método para extração de características que consiste em um aprimoramento do método descrito em [40]. Uma importante melhoria é que iterações são evitadas e é adicionada a capacidade de identificar desvios de decaimento, além de relacioná-los com conexões entre seções seriais, o que não é feito por nenhum dos métodos observados na literatura. O novo método se baseia na consideração de que as transições de estado, ou bordas, que marcam as características de interesse em  $r(t)$  e  $h(t)$  podem ser utilizadas para caracterizá-las. Desde que  $r(t)$  e  $h(t)$  sejam contínuos e pertencentes à  $L^2(\mathfrak{R})$ , o espaço de Hilbert das funções unidimensionais, cujo quadrado do módulo é integrável, bordas podem ser detectadas como singularidades<sup>5</sup> isoladas.

Assim, o método consiste em duas etapas:

1. **Detecção de singularidades através de uma abordagem baseada em TWC:**

A partir do sinal de entrada  $f(t)$  (que pode ser  $r(t)$  ou  $h(t)$ ), esse bloco obtém

$P^f = \{p_1^f, p_2^f, \dots, p_{m_p}^f\}$ , o conjunto das  $m_p$  bordas detectadas em  $f(t)$ , onde

$p_i^f = \{t_i^f, b_i^f\}$ , com  $i = 1, 2, \dots, m_p$ , sendo  $t_i^f$  a localização no tempo da  $i$ -

ésima singularidade e  $b_i^f$  o tipo de borda (subida ou descida). Uma

---

<sup>5</sup> Pontos nos quais uma dada função não é definida ou falha em ser bem caracterizada de algum modo particular, como em relação à diferenciabilidade ou continuidade.

comparação dessa abordagem com a aplicação de 1ª e de 2ª derivadas, além da implementação do método apresentado em [41] é apresentada na Seção 3.2.

2. **Identificação das bordas:** Dois sistemas especialistas, um específico para  $h(t)$  e outro para  $r(t)$ , foram desenvolvidos para estabelecer uma relação das bordas detectadas nos sinais de interesse com pulsos, positivos ou negativos, ou desvios de decaimento.

Para o conjunto das bordas de  $h(t)$ ,  $P^h$ , o sistema especialista retorna  $C^h = \{c_1^h, c_2^h, \dots, c_{m_{ch}}^h\}$ , o conjunto das  $m_{ch}$  características de  $h(t)$ , formado por pulsos positivos, onde  $c_i^h = (t_i^{h+}, t_{ei}^{h+})$ , sendo  $t_i^{h+}$  a estimativa do tempo de chegada do  $i$ -ésimo pulso positivo e  $t_{ei}^{h+}$  o atraso da singularidade que marca a borda de descida do  $i$ -ésimo pulso positivo.

Para o conjunto das bordas de  $r(t)$ ,  $P^r$ , o sistema especialista retorna  $C^r = \{c_1^r, c_2^r, \dots, c_{m_{cr}}^r\}$ , o conjunto das  $m_{cr}$  características de  $r(t)$ , onde

$$c_i^r = \begin{cases} (t_j^{r+}, t_{ej}^{r+}, q_i), & \text{se } c_i^r \text{ representa o } j\text{-ésimo pulso positivo.} \\ (t_m^{r-}, t_{em}^{r-}, q_i), & \text{se } c_i^r \text{ representa o } m\text{-ésimo pulso negativo.} \\ (t_n^{rd}, q_i), & \text{se } c_i^r \text{ representa o } n\text{-ésimo desvio de decaimento.} \end{cases}, \quad (3.1)$$

sendo que  $t_j^{r+}$ ,  $t_m^{r-}$  e  $t_n^{rd}$  são, respectivamente, os tempos de chegada estimados do  $j$ -ésimo pulso positivo, do  $m$ -ésimo pulso negativo e o  $n$ -ésimo desvio de decaimento. As variáveis  $t_{ej}^{r+}$  e  $t_{em}^{r-}$  são os atrasos das respectivas bordas de encerramento (descida e subida, respectivamente). E  $q_i$  é o tipo de característica, que pode ser “pulso positivo”, “pulso negativo” e “desvio de decaimento”.

Esse processo de extração de características é ilustrado na Figura 19. O bloco de detecção de singularidades é descrito na Seção 3.1 e os sistemas especialistas para identificação de bordas são descritos na Seção 3.3.

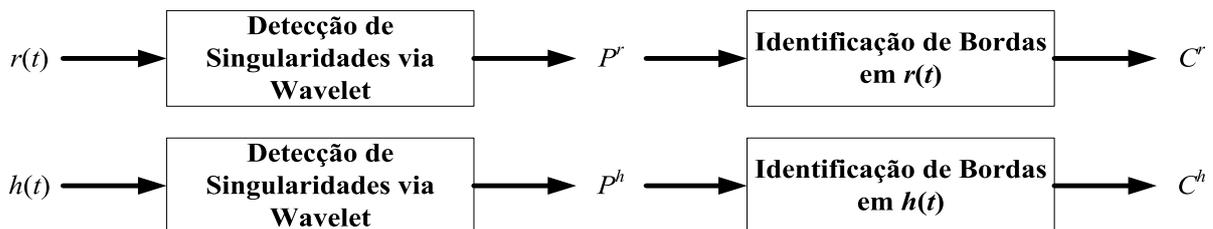


Figura 19 – Processo de extração de características dos sinais de interesse.

### 3.1 Detecção de Singularidades baseada em Análise Wavelet

O objetivo do algoritmo descrito nesta seção é a detecção das singularidades presentes em um dado sinal de interesse para relacioná-las com as bordas que delimitam ou marcam a localização dos pulsos e mudanças de decaimento no sinal. Em [42, 43] é descrita uma metodologia multi-escala baseada em TWC que permite detecção com robustez de singularidades em sinais unidimensionais e bordas em imagens. A seguir, uma adaptação dessa abordagem para aplicação em sistemas DSL é descrita.

A TWC de uma dada função contínua  $f(t) \in \mathbf{L}^2(\mathfrak{R})$  pode ser calculada através da convolução de  $f(t)$  com um conjunto de funções *wavelet* escaladas. Uma wavelet mãe, ou simplesmente wavelet, é uma função  $\psi \in \mathbf{L}^2(\mathfrak{R})$  contínua tanto no tempo quanto na frequência com

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (3.2)$$

normalizada  $\|\psi\| = 1$  e centralizada na vizinhança de  $t = 0$ . Uma família de wavelets no plano tempo-escala é obtida pelo escalamento de  $\psi$  por  $s$  sobre a translação em  $u$

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi} \left( \frac{t-u}{s} \right), \quad (3.3)$$

onde  $\bar{\psi}$  é o complexo conjugado de  $\psi$ . Cada uma das funções  $\psi_{u,s}$  permanecem normalizadas:  $\|\psi_{u,s}\| = 1$ . A TWC de  $f(t)$  no tempo  $u$  e na escala  $s$ , calculada com respeito à  $\psi(t)$  é dada por

$$Wf(u,s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{u,s}(t) dt = f(u) * \psi_s(u), \quad (3.4)$$

onde  $*$  representa a operação de convolução e

$$\psi_s(u) = \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi} \left( \frac{-u}{s} \right). \quad (3.5)$$

Uma das características mais cruciais de uma função wavelet na avaliação da regularidade local de um sinal é o número de *momentos nulos* (sendo o termo em inglês *vanishing moments*) [43]. Se  $\psi$  tem  $N$  momentos nulos, definidos por

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0 \quad \text{para } 0 \leq k < N, \quad (3.6)$$

e um suporte compacto, então  $\psi$  pode ser escrito como a derivada de  $N$ -ésima ordem de uma função  $\beta$  também de suporte compacto tal que

$$\psi(t) = (-1)^N \frac{d^N \beta(t)}{dt^N} \quad (3.7)$$

com

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \beta(t) dt \neq 0. \quad (3.8)$$

Assim, utilizando a wavelet  $\beta$ , a TWC resultante é um operador diferencial multi-escala de ordem  $N$  e (3.4) pode ser reescrita como

$$Wf(u, s) = s^N \frac{d^N}{du^N} [f(u) * \beta_s(u)] \quad (3.9)$$

com

$$\beta_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\beta}\left(\frac{-t}{s}\right). \quad (3.10)$$

Se  $N = 1$ , os máximos do módulo da TWC correspondem aos máximos da derivada de primeira ordem de  $f$  suavizada por  $\beta_s(u)$ . Os máximos locais do módulo da TWC em cada escala podem ser descritos como qualquer ponto  $(u_0, s_0)$  tal que  $|Wf(u, s_0)|$  seja localmente máximo em  $u = u_0$ . Isto implica que a derivada de  $Wf(u, s)$  no ponto  $s_0$  será igual a zero. Estes pontos devem ser máximos locais estritos tanto à direita quanto à esquerda de  $u_0$ , para evitar ter qualquer máximo local quando  $|Wf(u, s)|$  na escala  $s_0$  é constante. Dessa forma, pode ser definido o termo *linha de máximos* para descrever qualquer curva conectada  $s(u)$  em  $Wf(u, s)$  ao longo da qual todos os pontos são máximos locais. As singularidades presentes em  $f(t)$  são detectadas seguindo essas linhas de máximos locais conectados do módulo da TWC das escalas de menor resolução convergindo até as de maior resolução e encontrando a abscissa onde esses máximos locais convergem [43].

Na Figura 20(a) é mostrada uma função retangular cujo módulo de sua TWC, mostrado na Figura 20(b), é calculado utilizando a derivada de primeira ordem da função gaussiana como wavelet. A regularidade local do sinal é caracterizada pelo decaimento da amplitude da TWC através das escalas. As singularidades contidas na função projetam máximos locais por todas as escalas do módulo da TWC. Esse “distúrbio” pode ser percebido como um tipo de *cone de influência* do ponto singular ao longo do plano espaço-escala. Cada cone neste exemplo contém uma linha de máximos a qual converge em direção à sua respectiva singularidade. Note-se que para se estimar uma singularidade em um dado sinal, não é suficiente ter um máximo local na escala de maior resolução no módulo da TWC. É necessário que esse máximo seja resultado da convergência de uma linha de máximos locais conectados.

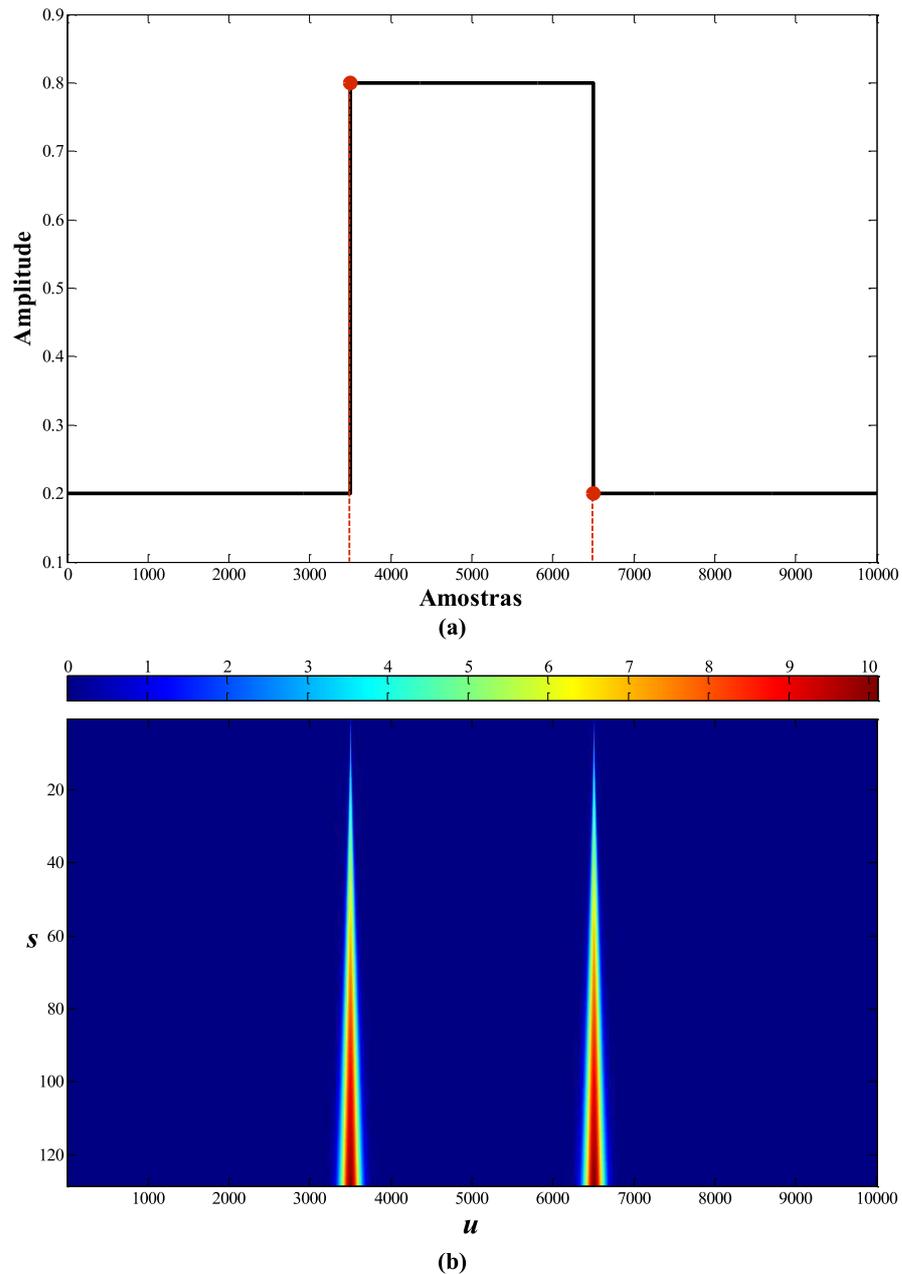


Figura 20 – Em (a) é mostrada uma função retangular contendo duas bordas, cujas localizações estão marcadas por pontos vermelhos. Em (b) o Módulo da TWC da função representada em (a).

### 3.1.1 Algoritmo para Detecção de Singularidades via Análise Wavelet

Com base na teoria descrita anteriormente, o processo para detecção de singularidades nos sinais  $r(t)$  e  $h(t)$  pode ser definido de acordo com as seguintes etapas:

1. **Escolha da wavelet mãe.**

Foi observado anteriormente, que, para detectar uma singularidade em um sinal  $f(t)$ , é necessário que os máximos locais em  $|Wf(u,s)|$  pertençam a uma linha de máximos. Esta deve permanecer conectada (não ser interrompida) ao longo das escalas, convergindo no valor da abscissa que corresponde à

singularidade na escala de mais alta resolução. Entretanto, essa condição não é garantida para qualquer wavelet  $\psi$ . Em [43], é provado que, se  $\beta$  é uma função gaussiana, os máximos locais do módulo da TWC de qualquer função contínua  $f(t) \in \mathbf{L}^2(\mathfrak{R})$  estão em linhas de máximos que não são interrompidas. Então, com o objetivo de garantir a detecção, através da continuidade das linhas de máximos, as transformadas wavelet dos sinais de interesse são calculadas aqui utilizando como wavelet mãe a primeira derivada normalizada da função gaussiana. Derivadas de outras ordens podem também ser utilizadas obtendo os mesmos resultados.

Além disso, a TWC é calculada para a escala diádica  $s = 2^j$ , onde  $j = 1, 2, \dots, J$ .

## 2. Aquisição dos máximos locais e supressão de máximos espúrios.

Como mais uma garantia para que todas as linhas de máximos propaguem-se continuamente, é considerado que no cálculo dos máximos locais, espúrios podem ser gerados por erros numéricos, em especial em regiões onde a TWC é próxima à zero. A estratégia adotada nesta tese para remover os espúrios, ao mesmo tempo controlando a sensibilidade de detecção, é baseada na definição de valores de corte em cada escala de  $|Wf(u,s)|$ . Definir um único valor pode ser errôneo, pois cada escala tem um conteúdo de energia diferente. Estes valores devem ser proporcionais em cada escala, de tal forma que excluam pequenas variações, como em geral são os erros numéricos. A média aritmética de cada escala poderia ser utilizada para definir um limiar simples, entretanto, a maior parte do conteúdo das escalas, especialmente as de mais alta resolução, são constituídas de valores próximos à zero. Isso reduziria muito a média, tornando-a susceptível a pequenas variações. Considerando a grande variação entre a amplitude dos máximos locais significativos e os espúrios causados por erros numéricos, a variância do conteúdo de cada escala pode ser usada para aumentar o valor de limiar obtido pela média e garantir que os máximos significativos sejam armazenados. Assim, o valor de corte proposto para cada  $i$ -ésima escala é

$$\zeta_i = k_s \left[ \frac{\sum_{j=1}^n |Wf(u_j, s_i)|}{n} + \sigma_{u,s_i}^2 \right], \quad (3.11)$$

onde  $s_i$  é  $i$ -ésima escala,  $n$  é o número de amostras na escala que, em  $|Wf(u,s)|$ ,

é igual ao número de amostras do sinal  $f$ , e  $\sigma_{u,s_i}^2$  é a variância do módulo dos coeficientes da escala  $s_i$ . A constante de sensibilidade  $k_s$  é usada para fornecer controle sobre a sensibilidade do algoritmo na busca por extremos locais. Por exemplo, definir  $k_s = 0,5$  significa duplicar a sensibilidade padrão ( $k_s = 1$ ) do algoritmo em relação à detecção de singularidades, enquanto que definir  $k_s = 2$  implica em diminuir a sensibilidade padrão pela metade.

Note-se que, uma vez definido um parâmetro de controle de  $k_s$  que precisa ser ajustado pelo usuário, os termos definidos dentro dos colchetes em (3.11) exercem o papel de referencial proporcional em cada escala.

Definidos os valores de  $\zeta_i$ , o algoritmo seleciona todos os coeficientes cujo valor absoluto é menor do que o limiar de cada escala  $\zeta_i$  e os substitui por zero. Então, a partir dessa TWC modificada, as linhas de máximos são obtidas.

É importante notar que o critério definido pela constante  $k_s$  é o que determina a sensibilidade geral do processo de detecção de bordas e pode impactar na capacidade de detectar ou não uma determinada característica em um sinal.

### 3. Cálculo das linhas de máximos e identificação das singularidades do sinal.

Como descrito anteriormente, a localização da borda é determinada pela abscissa para a qual a correspondente linha de máximos converge. É possível que ocorra a formação de mais de uma linha de máximos convergindo para a mesma abscissa. Entretanto, mesmo que haja duas ou mais linhas de máximos convergindo para um ponto, somente uma singularidade será contabilizada, pois estes máximos locais são provocados pela mesma singularidade.

Além disso, na saída do algoritmo – tomando agora a singularidade como borda da característica – também é estimado o tipo de borda  $b_i^f$ . Uma borda é considerada de *subida* quando se refere a uma transição de uma amplitude menor para uma maior. Uma borda de *descida* é o oposto. Se a linha de máximos no módulo da TWC do sinal correspondente à borda (singularidade) sob avaliação for constituída por máximos no valor absoluto da TWC, então a borda é de subida. Caso seja constituída por mínimos, a borda é de descida.

Como exemplo, na Figura 21 é mostrado o sinal simulado  $h(t)$  de uma topologia de teste. Na curva estão contidos três pulsos cujas bordas de subida e descida são marcadas por duas singularidades, incluindo um (o terceiro) que não pode ser percebido nesta visualização da curva. Na Figura 22 é mostrado o módulo da TWC de  $h(t)$  calculado para  $J = 128$ . Pode-se

observar que para cada singularidade há um distúrbio, que terá amplitude maior, quanto mais brusca for a variação do sinal naquela região. Os máximos desses cones convergem das escalas de menor resolução para as de maior resolução, formando linhas de máximos, que indicam as posições das singularidades. Na Figura 23 são mostradas as linhas de máximos do módulo da TWC.

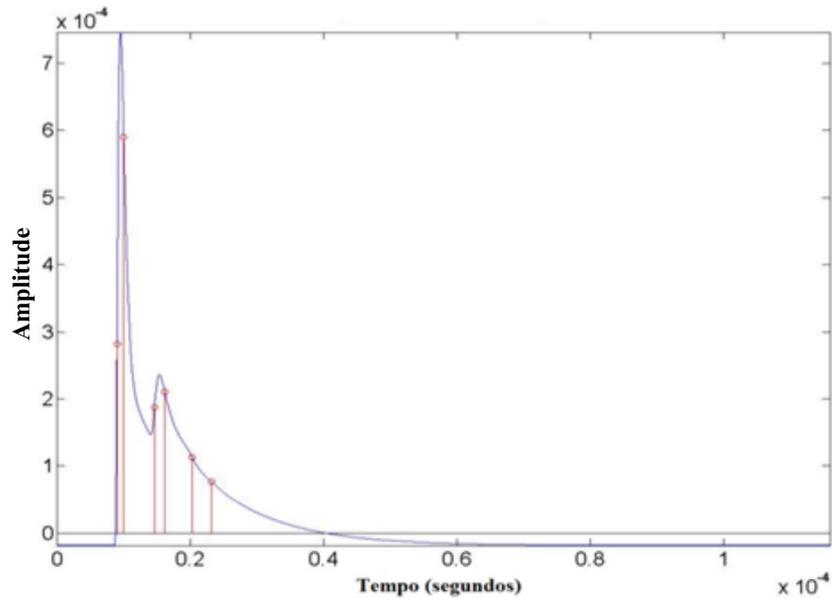


Figura 21 – Resposta ao impulso de uma topologia teste, contendo três pulsos (um deles pouco visível nesta escala).

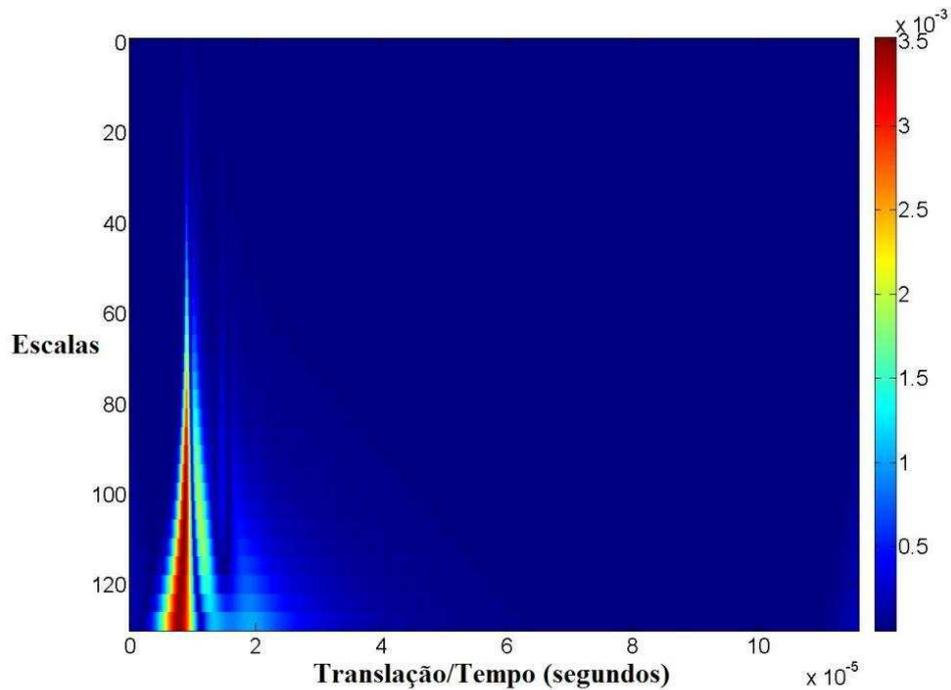


Figura 22 – Módulo da TWC analítica do sinal na Figura 21.

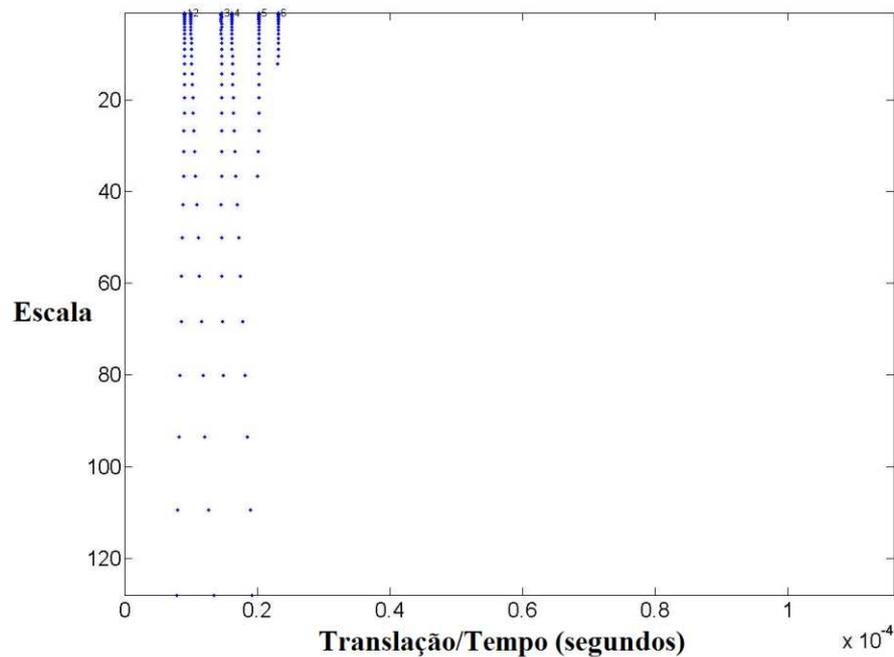


Figura 23 – Linhas de máximos da TWC na Figura 22.

### 3.2 Avaliação do Método de Detecção de Bordas

Em algumas aplicações, há vasta disponibilidade de algoritmos que podem ser usados para fins de comparações, até mesmo com o código fonte disponibilizado. Contudo, como mencionado, essa não é a realidade no atual contexto e algum esforço foi despendido para adaptar os métodos da literatura da forma mais fiel e eficaz possível.

Assumindo postura conservadora, o método descrito a seguir para detectar bordas não é aqui considerado como completamente desenvolvido pelo autor, dado que os princípios do mesmo no aspecto de usar wavelets para estimar singularidades são usados em diversas aplicações. Mas a adequação de estimativa de singularidades para DSL e o sistema que detecta características a partir destas singularidades, é uma contribuição desse trabalho, que também realiza uma avaliação sistemática do método proposto. Esta avaliação é realizada através de comparação: a utilização da primeira e da segunda derivadas e de uma implementação da técnica descrita em [15].

Na primeira derivada do sinal sob teste, a localização das bordas é obtida a partir dos máximos ou mínimos locais, enquanto que na segunda derivada é obtida pelos cruzamentos com o zero. Em ambos os casos, para prevenir espúrios, é definido um valor de corte na primeira derivada, abaixo do qual, bordas obtidas são desconsideradas.

O método definido em [15], referido aqui pelo nome da primeira autora, *Neus*, não

pode ser aplicado diretamente, uma vez que é definido para análise de um  $s_{11}(t)$  modificado por um método de pré-processamento [7], o qual, não é utilizado aqui em  $h(t)$  e  $r(t)$ . O método é originalmente baseado na identificação de pares de máximo-mínimo ou mínimo-máximo em torno de cruzamentos com o zero na segunda derivada do sinal. Para garantir que os pares sejam válidos, é imposto um conjunto de restrições aos valores do sinal, da 1ª e da 2ª derivadas. Assim, um par mínimo-máximo na segunda derivada só será válido se:

1. A amplitude do par está acima de um valor de corte;
2. O mínimo e o máximo têm amplitudes comparáveis;
3. Existe um mínimo correspondente na primeira derivada; e
4. O reflectograma é negativo no ponto de mínimo.

Para um par máximo-mínimo as regras são similares. As primeiras duas são iguais, a terceira requer um máximo correspondente na primeira derivada e a quarta não existe. É importante notar que, com a quarta regra para o par mínimo-máximo implementada para os sinais  $h(t)$  e  $r(t)$ , a detecção de pulsos foi inviabilizada devido ao decaimento dos sinais, que praticamente não existe em [15], devido ao pré-processamento. Por isso, os resultados mostrados a seguir são para o algoritmo implementado sem essa regra. Além disso, os autores mencionam exceções a essas regras em casos especiais, os quais não são especificados.

### 3.2.1 Determinação de Parâmetros

Como a maioria dos métodos de extração de características em reconhecimento de padrões ou inteligência computacional, cada um dos métodos descritos possui um parâmetro a ser determinado. Assim, é necessário definir os parâmetros de cada técnica antes de se realizar a comparação, o que é conhecido na literatura especializada como seleção do modelo [44], [45]. Para isso, é definido um conjunto de validação [45], descrito na Tabela 2, composto de topologias criadas para determinar o valor dos parâmetros em cada método. Esse conjunto não é chamado aqui de conjunto de treino, pois os métodos aqui usados não possuem uma etapa de treino similar à exigida por redes neurais artificiais ou máquinas de vetores de suporte [45]. Como o conjunto é utilizado na determinação de limiares apenas, o mesmo é denotado como validação para não induzir o leitor de que há uma etapa de treino.

Para composição do conjunto de validação (disjunto do conjunto de teste), os sinais  $h(t)$  e  $r(t)$  são simulados usando o modelo VUB#0 da maneira descrita na Seção 2.4.

Tabela 2 – Conjunto de validação: topologias para determinar os parâmetros dos métodos de detecção de borda.

Tipo	Topologia	Linha	$\theta_1$		$\theta_2$		$\theta_3$	
			$l_1$ (m)	$\phi_1$ (mm)	$l_2$ (m)	$\phi_2$ (mm)	$l_3$ (m)	$\phi_3$ (mm)
1		1	400	0,4				
		2	800	0,4				
		3	1200	0,4				
		4	1600	0,4				
		5	2000	0,4				
2		6	400	0,4	1800	0,5		
		7	800	0,4	1400	0,5		
		8	1200	0,4	1000	0,5		
		9	1600	0,4	600	0,5		
		10	2000	0,4	200	0,5		
3		11	400	0,4	400	0,4	1800	0,4
		12	800	0,4	400	0,4	1400	0,4
		13	1200	0,4	400	0,4	1000	0,4
		14	1600	0,4	400	0,4	600	0,4
		15	2000	0,4	400	0,4	200	0,4
4		16	500	0,4	200	0,4	1000	0,4
		17	500	0,4	400	0,4	1000	0,4
		18	500	0,4	600	0,4	1000	0,4
		19	500	0,4	800	0,4	1000	0,4
		20	500	0,4	1000	0,4	1000	0,4

Cada tipo de topologia foi estabelecido para avaliar a capacidade de detecção de um evento específico. Todos os critérios de avaliação, em cada tipo de topologia, são definidos como o erro médio percentual da estimativa de algum elemento de linha relacionado ao evento que se deseja detectar:

$$e_p(P) = \frac{|P - \hat{P}|}{P} \times 100, \quad (3.12)$$

onde  $P$  é o valor do parâmetro da linha e  $\hat{P}$  é a estimativa desse valor. Note-se que não se está estimando topologia alguma. Em todos os casos, a posição ideal das singularidades nos sinais para obter os valores dos elementos da topologia é conhecida *a priori* e isso é usado para verificar a eficiência dos métodos.

Os critérios a serem avaliados através dos tipos de topologia para cada tipo de sinal são descritos a seguir:

- Topologias do tipo 1:
  - $r(t)$ : o método deve detectar o pulso positivo relacionado ao comprimento  $L_T$ , avaliado através do critério  $e_p(L_T)$ . Para isso, deve ser capaz de encontrar as bordas de subida e de descida relacionadas ao pulso separadas por um intervalo equivalente ao do pulso de entrada. A

estimativa para  $L_T$  é estimada através do tempo de chegada do pulso, como indicado em (2.20). Qualquer singularidade detectada antes é considerada um falso positivo.

- $h(t)$ : a descrição do objetivo é exatamente a mesma dada para  $r(t)$  exceto que não há especificação de intervalo entre as bordas e  $L_T$  é estimado através de (2.17), com  $i = 1$ .
- Topologias do tipo 2:
  - $r(t)$ : o método deve detectar o desvio de decaimento relacionado ao comprimento  $l_1$ , avaliado através do critério  $e_p(l_1)$ . O algoritmo de avaliação estima  $l_1$  através de (2.19).
  - $h(t)$ : não é possível detectar a conexão serial-serial.
- Topologias do tipo 3:
  - $r(t)$ : dado que o comprimento da derivação é fixo, o método deve detectar o pulso negativo relacionado à posição da derivação  $p_1^D$ , que é igual a  $l_1$ , avaliado através do critério  $e_p(p_1^D)$ .
  - $h(t)$ : esta topologia foi desenvolvida para avaliação da capacidade de detecção da posição da derivação, o que não pode ser avaliado por  $h(t)$ .
- Topologias do tipo 4:
  - $r(t)$ : não é possível diferenciar o pulso positivo relacionado ao comprimento da derivação daquele relacionado ao comprimento  $L_T$  sem um método de classificação das bordas em características. Assim, nada é avaliado para  $r(t)$  nesta topologia.
  - $h(t)$ : o método deve detectar o pulso positivo relacionado ao comprimento da derivação na segunda seção  $l_2$ , avaliado através do critério  $e_p(l_2)$ .  $l_2$  é estimado através de (2.18), mudando o índice de 3 para 2.

Basicamente, para cada método de detecção de bordas foram atribuídos diversos valores (busca dos limiares por “grid” pré-estabelecido) para os seus respectivos parâmetros. Para cada um desses parâmetros, o método sendo avaliado foi aplicado a cada uma das topologias do conjunto de validação descritas na Tabela 2. O objetivo é detectar os pulsos e desvios de decaimento relacionados aos descasamentos em cada tipo de topologia.



Tabela 5 – Resultados da metodologia *Neus* para o sinal  $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	3,19	3,19	3,19	2,17	2,17	2,17	<b>2,09</b>	2,09	2,09	2,09
	Nº falhas em identificar $L_T$	4	4	4	3	3	3	<b>2</b>	2	2	2
$e_p(l_1)$	Erro em %	-	-	-	4,45	-	-	-	-	-	-
	Nº falhas em identificar $l_1$	5	5	5	4	5	5	<b>5</b>	5	5	5
$e_p(p_1^D)$	Erro em %	3,19	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	<b>2,20</b>	2,20	2,20	2,20
	Nº falhas em identificar $p_1^D$	4	2	2	2	2	2	<b>2</b>	2	2	2

Tabela 6 – Resultados da metodologia *Neus* para o sinal  $h(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	8,97	8,97	8,97	8,97	8,97	8,97	8,97	8,97	<b>8,97</b>	-
	Nº falhas em identificar $L_T$	4	4	4	4	4	4	4	4	<b>4</b>	5
$e_p(l_2)$	Erro em %	-	-	-	2,41	2,41	2,41	2,41	5,57	<b>6,49</b>	6,49
	Nº falhas em identificar $l_2$	5	5	5	4	4	4	4	2	<b>1</b>	1

Tabela 7 – Resultados da metodologia baseada em 1ª derivada para o sinal  $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	3,19	2,63	2,45	<b>2,19</b>	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
	Nº falhas em identificar $L_T$	4	2	1	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
$e_p(l_1)$	Erro em %	-	17,19	11,24	<b>11,28</b>	11,28	11,28	11,28	11,28	11,28	11,28
	Nº falhas em identificar $l_1$	5	4	2	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
$e_p(p_1^D)$	Erro em %	-	3,19	2,63	<b>2,19</b>	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
	Nº falhas em identificar $p_1^D$	5	3	2	<b>0</b>	1	1	1	1	1	1

Tabela 8 – Resultados da metodologia baseada em 1ª derivada para o sinal  $h(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	-	20,35	8,28	<b>7,10</b>	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10
	Nº falhas em identificar $L_T$	5	4	1	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
$e_p(l_2)$	Erro em %	-	-	8,97	<b>6,42</b>	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86
	Nº falhas em identificar $l_2$	5	5	4	<b>1</b>	2	2	2	2	2	2

Tabela 9 – Resultados da metodologia baseada em 2ª derivada para o sinal  $r(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	3,19	2,63	2,45	<b>2,19</b>	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
	Nº falhas em identificar $L_T$	4	2	1	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
$e_p(l_1)$	Erro em %	-	17,19	-	<b>18,21</b>	18,21	18,21	18,21	18,21	18,21	18,21
	Nº falhas em identificar $l_1$	5	4	5	<b>4</b>	4	4	4	4	4	4
$e_p(p_1^D)$	Erro em %	-	3,19	3,19	<b>3,19</b>	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19
	Nº falhas em identificar $p_1^D$	5	3	4	<b>4</b>	4	4	4	4	4	4

Tabela 10 – Resultados da metodologia baseada em 2ª derivada para o sinal  $h(t)$ , onde o ‘Valor de Corte’ é o parâmetro.

Critério	Modo de Avaliação do Critério	Valor de Corte									
		$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$e_p(L_T)$	Erro em %	-	20,35	8,28	<b>7,10</b>	7,10	2,07	-	-	-	-
	Nº falhas em identificar $L_T$	5	4	1	<b>0</b>	0	2	5	5	5	5
$e_p(l_2)$	Erro em %	-	-	8,97	<b>6,42</b>	5,86	-	-	-	-	-
	Nº falhas em identificar $l_2$	5	5	4	<b>1</b>	2	5	5	5	5	5

Tabela 11 – Parâmetros selecionados para cada método de detecção de borda.

Tipo de Sinal	Wavelet	Neus	1ª Derivada	2ª Derivada
$r(t)$	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$h(t)$	1,00	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

### 3.2.3 Comparação dos Métodos de Detecção de Bordas

Com o objetivo de avaliar o desempenho da abordagem proposta para detecção de bordas em  $h(t)$  e em  $r(t)$  em comparação com as demais discutidas anteriormente, foi criado um conjunto de teste constituído de três tipos de topologia, somando, ao todo, 15 linhas formadas por cabos reais, descritas na Tabela 12. Essas linhas são constituídas por dois tipos de cabos: Ericsson TEL 481 02, com 0,4 mm de bitola e Ericsson TEL 313 000, com 0,5 mm de bitola, chamados aqui de A e B, respectivamente.

Uma vez definidos os parâmetros a partir de um conjunto de validação, como descrito na seção anterior, cada método de detecção de bordas foi aplicado aos sinais medidos no conjunto de teste. Os sinais no domínio do tempo foram obtidos pelas etapas descritas na Seção 2.4 através das medições de resposta em frequência  $H(f)$  e da impedância de entrada com carga em aberto  $Z_{in}(f)$ . Essas medições foram realizadas em laboratório utilizando um

analisador de rede Agilent 4395A, para medir  $H(f)$ , e um analisador de impedância Agilent 4394A, para medir  $Z_{in}(f)$ . A faixa de frequência utilizada foi de 4,3125 kHz a 4,416 MHz, com cada medição tendo 1028 pontos espaçados uniformemente com intervalo de 4,3125 kHz. Para cada linha foram realizadas cinco medições de  $H(f)$ , e  $Z_{in}(f)$ . O sinal de entrada utilizado nos testes é a média dessas cinco medições, com o objetivo de mitigar o ruído.

Para realizar apropriadamente a conexão entre equipamentos de medição e linhas sob teste, foram utilizados baluns North Hills 0306LB, que convertem 50 ohms de canal desbalanceado em 124 ohms de canal balanceado e trabalham na faixa de 1 kHz a 20 MHz.

Tabela 12 – Conjunto de teste: topologias criadas para realizar a comparação das metodologias de detecção de borda.

Tipo	Topologia	Linha	$\theta_1$		$\theta_2$		$\theta_3$	
			$l_1$ (m)	$\phi_1$	$l_2$ (m)	$\phi_2$	$l_3$ (m)	$\phi_3$
1		1	500	A				
		2	1000	A				
		3	1500	A				
		4	500	B				
		5	1000	B				
		6	1500	B				
2		7	500	A	500	B		
		8	400	A	250	B		
		9	1000	A	650	B		
		10	750	A	100	B		
		11	400	A	1000	B		
3		12	1000	A	200	A	400	A
		13	400	A	500	A	150	A
		14	400	A	500	B	250	A
		15	1000	A	200	B	400	A

São seguidos os mesmos critérios da avaliação com o conjunto de validação. Cada tipo de topologia tem como objetivo avaliar a capacidade de detectar um tipo de características de ao menos um dos sinais de interesse:

- Topologia do tipo 1: em  $r(t)$ ,  $e_p(L_T)$  é utilizado para avaliar a capacidade de detectar pulsos positivos através da detecção de suas duas bordas espaçadas pela largura de pulso do sinal de entrada. Em  $h(t)$ , o mesmo critério é utilizado para avaliar a detecção do primeiro pulso positivo.
- Topologias do tipo 2: em  $r(t)$ ,  $e_p(l_1)$  é usado na avaliação da detecção de um desvio de decaimento.
- Topologias do tipo 3: em  $r(t)$ ,  $e_p(p_1^D)$  é usado para avaliar a detecção de pulso negativo. Em  $h(t)$ ,  $e_p(l_2)$  é usado para avaliar a detecção de pulsos positivos posteriores ao relacionado a  $L_T$ .

Além disso, outros dois critérios de avaliação são observados: as falhas em identificar uma determinada borda desejada e o número de espúrios detectados pelo método. Quanto menos desses dois critérios forem registrados, melhor o desempenho do método. Do mesmo modo, quanto menor o erro médio, melhor o desempenho. Os resultados médios obtidos para aplicação dos métodos de detecção de bordas em  $r(t)$  e  $h(t)$  são mostrados, respectivamente, nas Tabelas 13 e 14.

A precisão expressa pelos erros percentuais é fundamental, mas também é fundamental que a característica relacionada ao tipo de descontinuidade seja detectada. A não detecção resultará necessariamente em erro de classificação nos algoritmos seguintes. Igualmente, a detecção de pontos espúrios poderá levar à confusão na identificação das características do sinal e conseqüente erro na identificação da topologia.

Tabela 13 – Resultados obtidos para aplicação dos métodos de detecção de bordas em  $r(t)$ .

Tipo de Topologia	Característica desejada	Crítérios	Wavelet	Neus	1ª Derivada	2ª Derivada
1	Pulso positivo	$e_p(L_T)$ médio (%).	3,38	3,19	3,19	3,19
		Desvio padrão de $e_p(L_T)$ (%).	1,33	1,45	1,45	1,45
		Média de falhas de identificação da característica desejada por linha.	0,00	0,17	0,00	0,00
		Número médio de espúrios por linha.	0,83	9,67	7,33	7,17
2	Desvio de decaimento	$e_p(I_1)$ médio (%).	2,72	4,63	2,19	2,19
		Desvio padrão de $e_p(I_1)$ (%).	1,03	4,37	0,55	0,55
		Média de falhas de identificação da característica desejada por linha.	0,00	0,20	0,00	0,00
		Número médio de espúrios por linha.	0,60	4,00	9,20	5,20
3	Pulso negativo	$e_p(p_1^D)$ médio (%).	3,88	4,28	2,94	2,94
		Desvio padrão de $e_p(p_1^D)$ (%).	2,33	3,00	0,84	0,84
		Média de falhas de identificação da característica desejada por linha.	0,00	0,33	0,00	0,00
		Número médio de espúrios por linha.	0,00	3,33	9,00	4,00

Tabela 14 – Resultados obtidos para aplicação dos métodos de detecção de bordas em  $h(t)$ .

Tipo de Topologia	Característica desejada	Critérios	Wavelet	Neus	1 <sup>a</sup> Derivada	2 <sup>a</sup> Derivada
1	Primeiro pulso positivo	$e_p(L_T)$ médio (%).	2,10	2,10	2,10	2,10
		Desvio padrão de $e_p(L_T)$ (%).	2,13	2,13	2,13	2,13
		Média de falhas de identificação da característica desejada por linha.	0,00	0,17	0,00	0,00
		Número médio de espúrios por linha.	0,00	29,67	0,17	0,00
3	Pulso positivo relacionado a $l_2$	$e_p(l_2)$ médio (%).	5,13	5,13	5,13	5,13
		Desvio padrão de $e_p(l_2)$ (%).	1,70	1,70	1,70	1,70
		Média de falhas de identificação da característica desejada por linha.	0,00	0,00	0,25	0,25
		Número médio de espúrios por linha.	0,75	34,75	1,25	1,25

De um modo geral, os erros médios percentuais obtidos pelos métodos comparados estiveram sempre na mesma ordem de grandeza, muitas vezes alcançando resultados iguais. Entretanto, o método baseado em wavelet e os baseados nas derivadas obtiveram melhores resultados em relação a falhas na identificação do que o método *Neus*. Mas, principalmente, o método baseado em wavelet foi o mais bem sucedido em relação à susceptibilidade a detecção de espúrios. Sugerindo desse modo, pelos números obtidos, a fragilidade dos métodos baseados em derivadas em relação a pequenas variações que naturalmente ocorrem em sinais medidos em linhas reais. O método proposto baseado em wavelet apresenta precisão similar, mas com maior robustez em relação a sinais medidos, sujeitos a ruído e outras distorções, principalmente em relação à resposta TDR.

### 3.3 Identificação de Bordas

Uma vez estimados os conjuntos  $P^h$  e  $P^r$  das bordas de  $h(t)$  e  $r(t)$ , o próximo passo para a extração das características dos sinais de interesse é determinar o tipo de característica a que essas bordas estão relacionadas. O objetivo dessa seção é descrever os dois sistemas especialistas, um específico para  $h(t)$  e outro para  $r(t)$ , que foram desenvolvidos nesta tese para estabelecer uma relação das bordas detectadas nos sinais de interesse com pulsos,

positivos ou negativos, e desvios de decaimento.

### 3.3.1 Sistema Especialista para Identificação de Bordas na Resposta ao Impulso

Na Seção 2.5 foi visto que uma curva de resposta ao impulso é caracterizada por pulsos positivos distintos (quando estão sobrepostos, simplesmente se somam formando um único pico maior). Suas bordas tendem a ter inclinação mais brusca.

Assim, como visto anteriormente no início do capítulo, as características  $c_i^h$  do sinal  $h(t)$  são pulsos positivos formados por duas bordas: a primeira de subida e a segunda de descida. Dessa forma, o algoritmo de classificação das bordas consiste em encontrar pares de bordas de subida e descida consecutivas e nesta ordem.

Assim, dado o conjunto  $P^h$ , o algoritmo é definido a seguir:

1. Seja  $i = 1$  e  $j = 1$ ;
2. Verificar para a borda  $p_i^h$ , se  $b_i^h = 'subida'$ .
  - i. Se sim, vá para 3;
  - ii. Se não, repita 2 com  $i = i + 1$ , a menos que  $i > m_P$ , pois nesse caso o algoritmo é encerrado;
3. Verificar para a borda  $p_{i+1}^h$ , se  $b_{i+1}^h = 'descida'$ .
  - i. Se sim,  $c_j^h = (t_i^h, t_{i+1}^h)$ , sendo  $t_j^{h+} = t_i^h$  e  $t_{ei}^{h+} = t_{i+1}^h$ . Repita 2 com  $i = i + 1$  e  $j = j + 1$ , a menos que  $i > m_P$ , pois nesse caso o algoritmo é encerrado;
  - ii. Se não, repita 2 com  $i = i + 1$ , a menos que  $i > m_P$ , pois nesse caso o algoritmo é encerrado;

O algoritmo descrito acima, e representado na Figura 24, simplesmente verifica, para cada borda detectada, se ela, juntamente com a borda seguinte faz um par de bordas de subida e de descida em sequência. É importante notar que o algoritmo considera que não deve haver nenhum ponto detectado entre duas bordas consecutivas que representem um pulso positivo em  $h(t)$ , ou seja, não devem ocorrer pulsos sobrepostos.

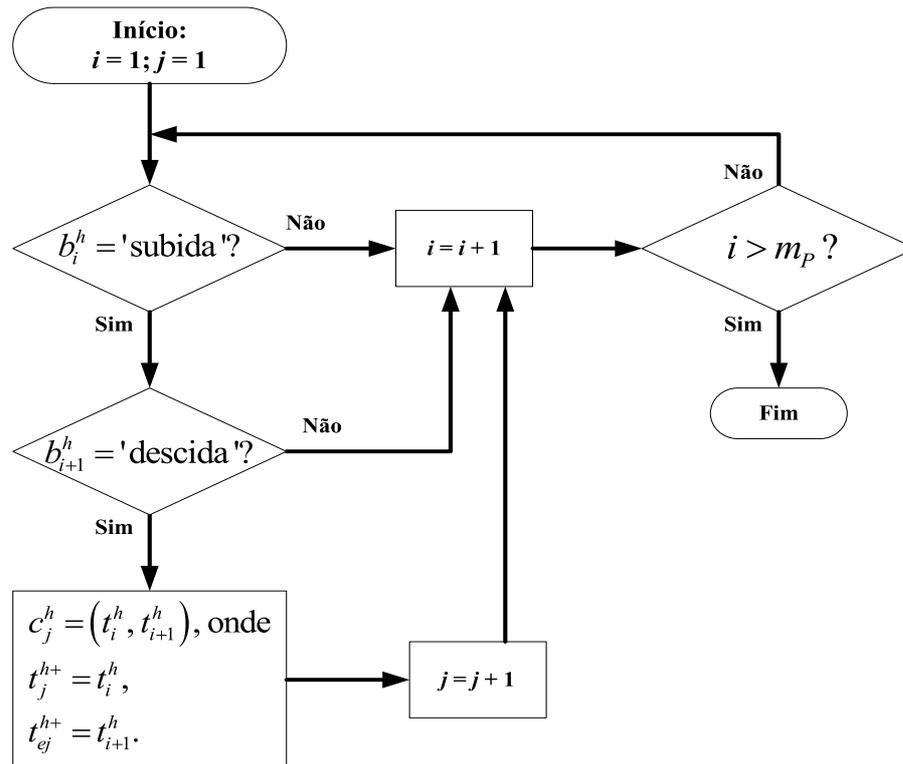


Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de identificação de bordas em  $h(t)$ .

### 3.3.2 Sistema Especialista para Identificação de Bordas na Reposta TDR

Com relação a sinais obtidos por TDR, como descrito em (3.1), para as características  $c_j^r$  presentes no sinal,  $q_j$  pode ser definido como pulso negativo ou positivo, ou ainda como desvio de decaimento. Pulsos são representados por um par de bordas que os delimitam. Quando o pulso é positivo a borda de início é de subida e a de fim de descida e o oposto quando o pulso é negativo. No caso de variações de decaimento, elas são representadas por apenas uma singularidade mais suave. Além disso, essas três características tem um comportamento mais suave e mais “espalhado” que o dos pulsos de  $h(t)$ . Pode então ocorrer sobreposição de eventos gerando características misturadas. Desse modo, o algoritmo, diferente do caso de  $h(t)$ , deve considerar a ocorrência de detecção de bordas válidas entre as bordas que caracterizam um pulso, por exemplo.

A primeira questão é determinar se uma borda  $p_i^r$  caracteriza um pulso ou um desvio de decaimento. Uma vez que conexões com derivações e terminações de seções de linha geram eventos no sinal mais abruptos (pulsos) que conexões entre seções seriais de tipos de cabos diferentes (desvios de decaimento), observa-se, por simulação e em medições, que a inclinação da linha tangente em  $t_i^r$  relacionado a um pulso seja maior do que se fosse relacionado a um desvio de decaimento. Ou seja, que a derivada de primeira ordem em uma

borda relacionada a um pulso é maior que quando está relacionado a um desvio de decaimento. Com isso, é definido o seguinte critério de decisão:

$$\eta = \frac{\max_{r' \in \mathbb{R}} (r'(t_i^r))}{\sigma_r} \quad (3.13)$$

onde, se a derivada de primeira ordem de  $r(t)$  em  $t_i^r$ ,  $r'(t_i^r)$ , for menor que  $\eta$ ,  $c_j^r$  é definido como desvio de decaimento ( $q_j = \text{'desvio de decaimento'}$ ), de outro modo é definido como um candidato a pulso, o qual ainda deverá satisfazer condições definidas mais adiante nesta seção. A variável  $\sigma_r$  determina o “nível de rigor” do critério de decisão  $\eta$ . Quanto maior  $\sigma_r$ , mais suave deverá ser a transição de estados em um desvio de decaimento para que ele seja detectado. O fato de  $\eta$  ser definido como um valor relativo a partir da seleção do maior valor da primeira derivada de  $r(t)$  nas localizações  $t_i^r$  é importante, pois relativiza um critério que pode ser modificado devido à atenuação do sinal. Se fosse um valor fixo, o mesmo critério de decisão não poderia ser usado para diferenciar essas características ao mesmo tempo em linhas curtas e linhas longas.

Uma vez definida a distinção entre desvios de decaimento e pulsos, é necessário identificar corretamente os pulsos – negativos ou positivos – levando em consideração que eles podem estar sobrepostos. Para isso, as seguintes considerações são adotadas em relação ao sinal  $r(t)$ :

- O sinal de excitação no TDR é um pulso retangular de banda larga com largura e amplitude conhecidas; e
- O canal de propagação é aproximadamente um sistema linear e invariante no tempo. Ou seja, considera-se que para os comprimentos considerados, pode ser assumido que a dispersão tem influência mínima nos resultados.

Essas considerações implicam que o sinal atravessando a linha conservará algumas características do sinal de entrada. Cada pulso, assim como o sinal de entrada, será composto por uma borda de subida e uma de descida, ou vice-versa, cujo intervalo de tempo definido entre eles é aproximadamente o mesmo da largura do pulso de entrada. Desta forma, a duração do pulso recebido (intervalo entre a borda de início e a borda de fim) deve ser aproximadamente a mesma do pulso de entrada  $\Delta t_{ip}$ . Com isso,  $t_i^r$  é definido como a borda de início de um pulso se as seguintes condições são verdadeiras:

1. Existe um  $t_k^r$ , onde  $i < k \leq m_p$ , onde  $b_k^r \neq b_i^r$ , ou seja, são tipos de borda diferentes, dentro do intervalo  $\Delta t_{ip} \pm \chi$ , onde  $\chi$  é uma margem arbitrária usada

para levar em consideração erros numéricos, dispersão e ruído.

- a. Se mais de uma borda cumpre esta condição, é selecionada aquela cujo intervalo  $(t_k^r - t_i^r)$  resulte em um menor erro absoluto quando comparado a  $\Delta t_{ip}$ .
2. Existe somente um máximo (se  $p_i^r$  é uma borda de subida) ou mínimo (se  $p_i^r$  é uma borda de descida) local no intervalo  $[t_i^r, t_k^r]$ .
3.  $t_i^r$  não é borda de fim de um pulso anterior e o extremo local no intervalo  $[t_i^r, t_k^r]$  não é mais próximo do zero do que os outros pontos no intervalo.

Se as condições acima são verdadeiras, o algoritmo verifica se  $p_i^r$  é uma borda de subida. Se sim,  $p_i^r$  e  $p_k^r$  correspondem às bordas de um pulso positivo. De outro modo, correspondem as de um pulso negativo.

No caso de ao menos uma das condições ser falsa, verifica-se se algum pulso foi identificado até o momento. Se não, a borda corresponde a um desvio de decaimento e nenhum pulso poderá ser detectado no sinal (uma vez que o critério de decisão é definido por um desvio de decaimento). Caso contrário,  $p_i^r$  é um espúrio do processo de detecção de borda. Na Figura 25, o algoritmo descrito acima é ilustrado através de um fluxograma.

É importante destacar que, diferente do sistema especialista que identifica as bordas de  $h(t)$ , na identificação das características de  $r(t)$  é necessária a definição do parâmetro  $\sigma_r$ , que é utilizado para definir se uma borda pertence a um pulso ou a um desvio de decaimento. Na seção seguinte, este parâmetro é determinado para o uso nesta tese através de um conjunto de validação.

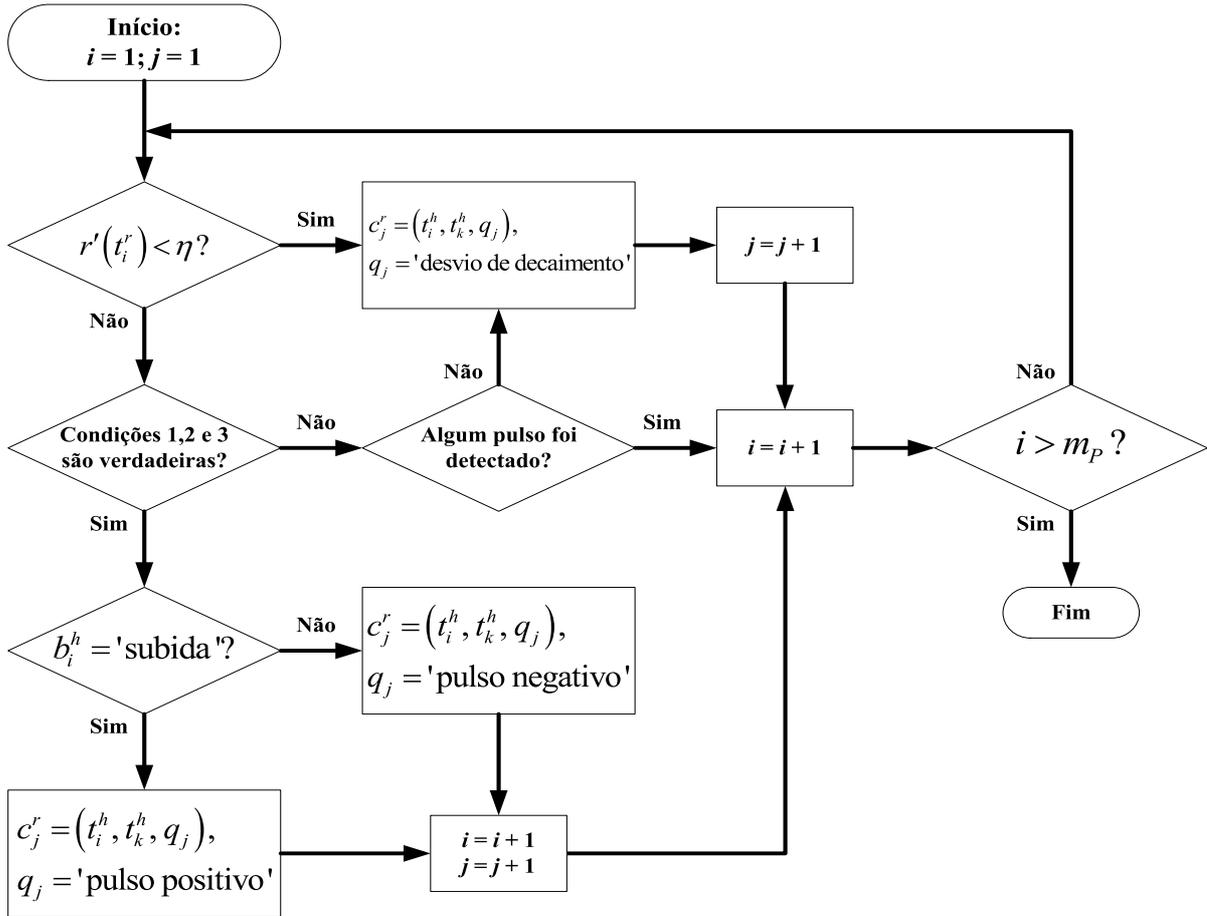


Figura 25 – Fluxograma do algoritmo de identificação de bordas em  $r(t)$ .

### 3.4 Determinação do Parâmetro $\sigma_r$

O método descrito na seção anterior requer a determinação do parâmetro  $\sigma_r$ , o qual define o critério de decisão  $\eta$  que determina se a borda pertence a um pulso ou desvio de decaimento em  $r(t)$ . Para obtenção deste valor é novamente utilizado o conjunto de validação descrito na Tabela 2. São atribuídos diversos valores para  $\sigma_r$  e, para cada um, o método de extração de características é aplicado na classificação das singularidades obtidas pelo método wavelet no sinal  $r(t)$  em cada linha. Os critérios seguidos são aqueles especificados na Seção 3.2.1 para  $r(t)$  na obtenção dos parâmetros dos métodos de detecção de borda.

Assim, a precisão da identificação que permite calcular o parâmetro em questão (posição do pulso negativo para estimar a posição de uma derivação, por exemplo) e o número de vezes que a correspondente característica não foi identificada são avaliados. Não houve ocorrências de troca de identificação entre características. Os resultados são resumidos na Tabela 15, onde a coluna relacionada ao valor do parâmetro que minimiza o erro do

critério e o número de falhas em identificações da característica é destacada. Nesse caso, o valor obtido para  $\sigma_r$  é 3.

Tabela 15 – Comparação dos resultados da aplicação dos métodos de detecção de bordas no sinal  $r(t)$ .

Critério	Avaliação	$\sigma_r$							
		2	3	4	5	10	20	50	100
$e_p(L_T)$	Erro em %.	0,71	<b>0,71</b>	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
	Nº de não identificações.	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
$e_p(l_1)$	Erro em %.	9,54	<b>8,27</b>	8,27	8,27	8,27	8,27	8,27	8,27
	Nº de não identificações.	3	<b>2</b>	2	2	2	2	2	2
$e_p(p_1^D)$	Erro em %.	3,59	<b>3,59</b>	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
	Nº de não identificações.	1	<b>1</b>	1	1	1	1	1	1

É válido notar que os resultados não variam com o aumento do valor de  $\sigma_r$  a partir de 3. Esse resultado sugere que a variação de  $\sigma_r$ , uma vez alcançado um limiar ótimo, poderá ter pouco ou nenhum efeito sobre os resultados de um eventual processo de identificação de topologia. No capítulo seguinte são descritos sistemas especialistas que utilizam como entrada os conjuntos de características  $C^h$  e  $C^r$ , obtidos pelo método descrito no presente capítulo.

# CAPÍTULO 4

## SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA ESTIMAÇÃO DA TOPOLOGIA DE LINHA

Uma vez que as características dos sinais de teste foram extraídas, a próxima etapa consiste em avaliar essa informação e classificá-la com o intuito de obter conhecimento sobre a topologia da linha sob teste. O objetivo deste capítulo é descrever o método desenvolvido nesta tese para identificação de topologia com base nas características extraídas.

Esse método consiste na utilização de um conjunto de sistemas especialistas que utilizam modelos explícitos de conhecimento, com os quais interpretam as características extraídas de  $h(t)$  (DELT) e de  $r(t)$  (SELT). Estes modelos foram desenvolvidos através da sistematização em um conjunto de regras das relações entre as características de um sinal transmitido através de uma linha multisseção e seus descasamentos de impedância. Deste modo, como mencionado no Capítulo 1, foram desenvolvidos três sistemas de identificação de topologia, ilustrados na Figura 26, que são selecionados de acordo com as características de sinal disponíveis:

- **SESD:** é selecionado quando as características extraídas tanto de  $h(t)$ ,  $C^h$ , quanto de  $r(t)$ ,  $C^r$ , estão disponíveis, combinando-as de tal forma que obtém uma estimativa da topologia da linha  $\hat{\Theta}$ .
- **SED:** utiliza somente as características de  $h(t)$ , mas somente é capaz de estimar algumas informações sobre a topologia, descritas na Seção 4.2.
- **SES:** é selecionado quando somente as características de  $r(t)$  estão disponíveis. Embora possa fornecer uma estimativa completa da topologia de linha  $\hat{\Theta}$ , o tipo de solução fornecido pode variar e dependerá das características

identificadas no sinal, como descrito na Seção 4.3.

Por fim, quando nenhuma característica de sinal pôde ser obtida pelos algoritmos descritos no Capítulo 3, mesmo quando há sinais fornecidos, o método então não retorna nenhuma solução.

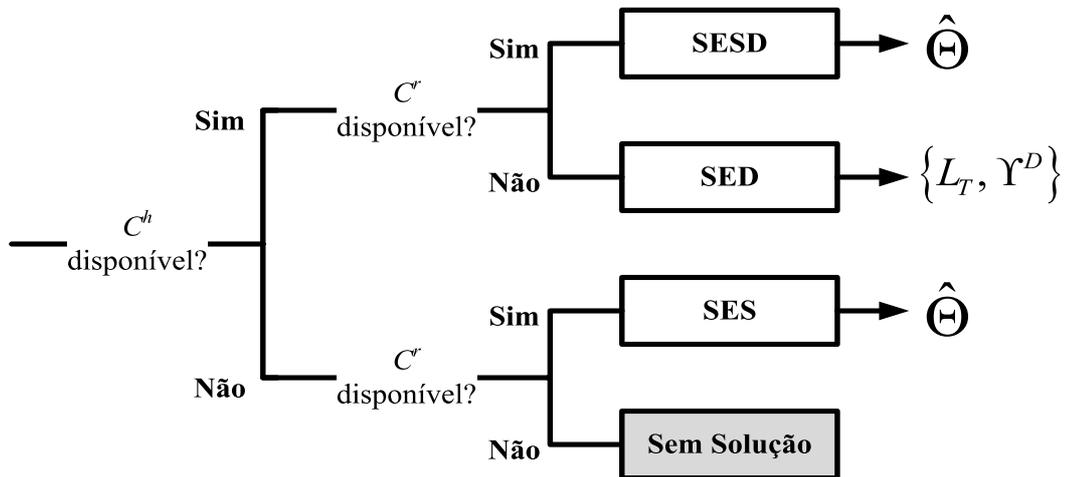


Figura 26 – Diagrama representando a seleção dos sistemas especialistas de acordo com as características disponíveis.

É importante destacar que os sistemas de identificação propostos (assim como a maioria dos métodos de identificação de topologia na literatura) assume que os parâmetros físicos das linhas de uma rede têm comportamento estacionário no tempo e no espaço. Ou ainda assume que a variação desses parâmetros é suficientemente lenta. Uma variação abrupta poderia ter impacto direto na forma do sinal e, conseqüentemente, nas características identificadas neste sinal. Entretanto, mudanças abruptas poderiam ser consideradas como faltas na linha a serem diagnosticadas, o que está fora do escopo deste trabalho.

Cada um dos algoritmos ilustrados na Figura 26 e comentados anteriormente é descrito nas seções seguintes.

#### 4.1 Sistema Especialista SELT-DELT

A partir do modelo de topologia de linha de transmissão descrito na Seção 2.1 podem-se definir os conjuntos

$$\begin{aligned}
 \Lambda &= \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_s}\}, \\
 \Upsilon &= \{l_1, l_2, \dots, l_{n_s}\}, \mathbf{e} \\
 \Phi &= \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n_s}\}.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

O SESD consiste de três algoritmos que estimam sequencialmente os conjuntos definidos em (4.1). Esses algoritmos são explicados a seguir.

#### 4.1.1 Identificação do Conjunto $\Lambda$

A identificação do conjunto  $\Lambda$  determina o “formato” da linha através da estimativa do número de seções  $n_s$  e do tipo  $\lambda_i$  de cada seção (seção serial ou derivação) na ordem em que se apresenta na linha. Como visto no Capítulo 2, a posição de um descasamento de impedância na topologia pode ser estimada sequencialmente a partir dos eventos de sinal detectados em  $r(t)$ . Ou seja, o começo e o fim das seções são representados pelo tempo de chegada de pulsos positivos e negativos e desvios de decaimento dentro do intervalo delimitado por  $t = 0$  e um tempo de referência  $t_{ref}$ , o qual corresponde à  $L_T$ .

Conexões serial-serial estão relacionadas a desvios de decaimento, conexões serial-derivação a pulsos negativos e conexões com terminações em aberto, tanto de derivações quanto do terminal de saída da linha, correspondem a pulsos positivos. Entretanto, não é possível diferenciar sem informação *a priori* pulsos positivos gerados pela reflexão direta em terminações de derivações daqueles relacionados ao terminal de saída da linha.

O conhecimento de  $L_T$  permitiria identificar o pulso positivo relacionado ao terminal da porta 2. O parâmetro  $L_T$  pode ser estimado a partir do tempo de chegada do primeiro pulso positivo em  $h(t)$ , como indicado no Capítulo 2, através de

$$\hat{L}_T = t_1^{h+} v_p, \quad (4.2)$$

onde  $t_1^{h+}$  é o tempo de chegada do primeiro pulso positivo em  $h(t)$ . Partindo desta informação pode-se encontrar o pulso positivo em  $r(t)$  que corresponde a  $\hat{L}_T$ , cujo tempo de chegada estimado por sua borda de subida que esteja mais próximo do tempo de referência

$$t_{ref} = \frac{2\hat{L}_T}{v_p}. \quad (4.3)$$

Com isso, são definidas as seguintes regras para avaliação de  $r(t)$  dentro do intervalo  $[0, t_{ref}]$  e obtenção de uma estimativa para  $\Lambda$ :

- Assume-se que a primeira seção de linha é sempre serial.
- Para cada desvio de decaimento detectado é incluída na topologia uma nova seção em série.
- Para cada pulso negativo detectado são incluídas uma derivação e uma seção serial, nesta ordem.

Observe-se que pulsos negativos espúrios podem ocorrer, representando uma fonte de erro para essas regras. Entretanto, eles são raros no intervalo  $[0, t_{ref}]$  e normalmente são consequência de multirreflexão nas terminações em aberto, o que costuma resultar em forte atenuação. De um modo geral, podem ser identificados observando pulsos negativos cujos tempos de chegada são múltiplos inteiros de algum pulso positivo.

Como exemplo, na Figura 27 são mostrados, respectivamente em (a) e (b), os sinais  $h(t)$  e  $r(t)$  simulados para uma topologia de teste. A partir da estimação de  $t_1^{h+}$ , é obtida uma estimativa para  $L_T$  e com isso estima-se  $t_{ref}$ . O tempo de chegada do pulso positivo mais próximo de  $t_{ref}$  em  $r(t)$  é  $t_2^{r+}$ . Assim, as três regras descritas são aplicadas em  $[0, t_2^{r+}]$ : iniciando-se por seção serial, para o tempo de chegada do desvio de decaimento  $t_1^{rd}$  e do pulso negativo se inclui, respectivamente, uma seção serial e um par derivação mais seção serial, resultando em  $\Lambda = \{\text{serial, serial, derivação, serial}\}$ . Este resultado é ilustrado, fora de escala, na Figura 27(c).

Pode-se então resumir o algoritmo para obtenção de estimativa para  $\Lambda$  nas seguintes etapas:

1. Estimar  $L_T$  a partir do tempo de chegada  $t_{1+}^h$  do primeiro pulso positivo em  $h(t)$ ;
2. Calcular  $t_{ref}$ ;
3. Estimar o pulso positivo em  $r(t)$  cujo tempo de chegada é mais próximo de  $t_{ref}$ ;
4. Aplicar para cada característica detectada no intervalo  $[0, t_{ref}]$  em  $r(t)$  as três regras definidas para estimação de  $\Lambda$ .

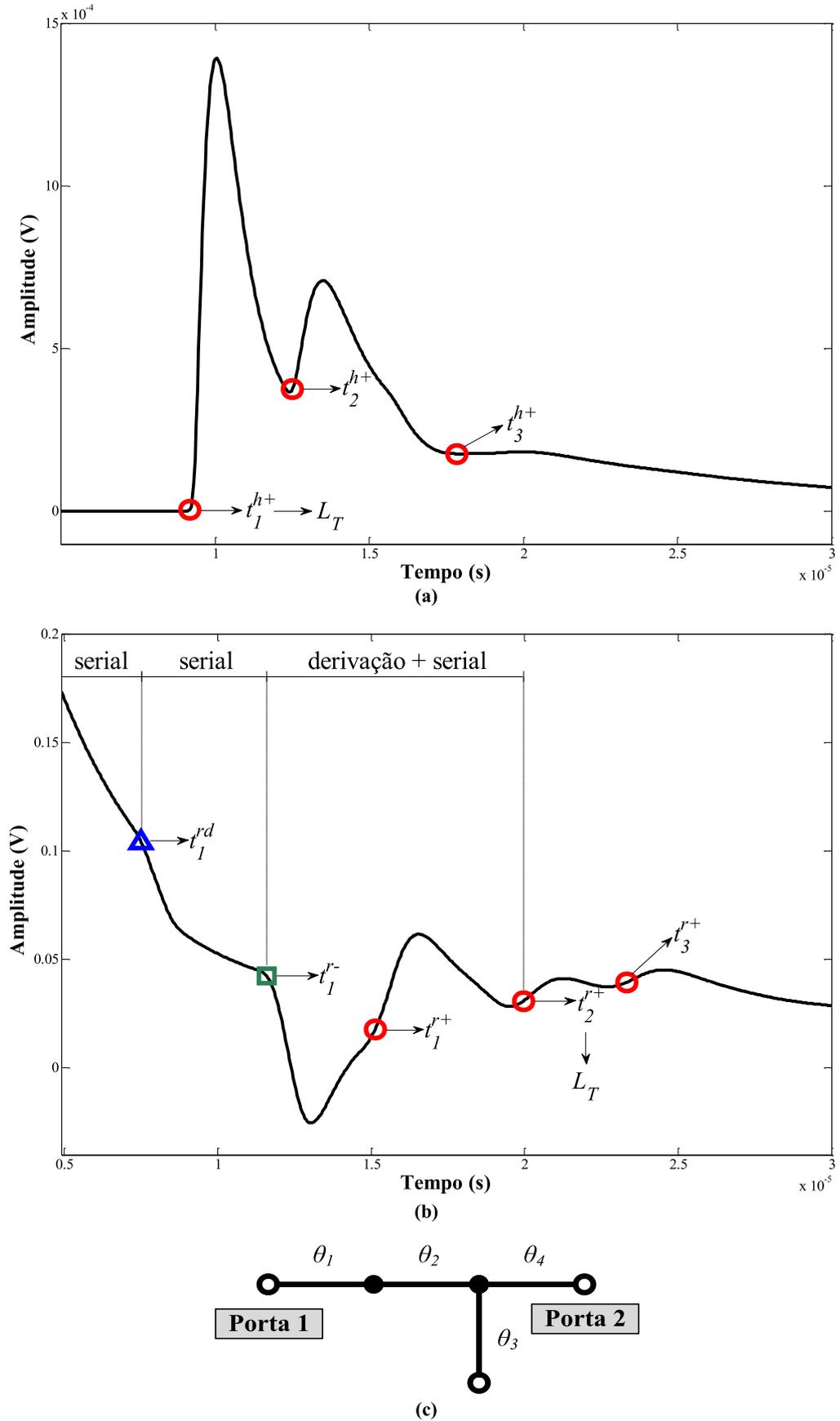


Figura 27 – Exemplo de identificação de  $\Lambda$ . Em (a) e em (b) são apresentados os sinais  $h(t)$  e  $r(t)$ , respectivamente, simulados para uma dada linha sob teste. Em (c) é ilustrada a topologia estimada utilizando as regras propostas.

#### 4.1.2 Estimação dos Elementos do Conjunto $\Upsilon$

Dada uma estimativa de  $\Lambda$ , o método proposto para estimar os elementos de  $L$  – os comprimentos das seções – é dividido em duas partes, uma para estimar o comprimento de seções seriais e outra para derivações. Em ambas as partes a ideia básica é a mesma: encontrar o tempo de início  $t_s$  e tempo de fim do intervalo  $t_e$  em  $r(t)$  que corresponde a uma seção de linha. Ambos os valores são definidos por bordas de características geradas por descasamentos de impedância. O intervalo definido entre esses dois atrasos pode ser utilizado para estimar o comprimento da  $k$ -ésima seção através de

$$l_k = \frac{(t_e - t_s)}{2} v_p. \quad (4.4)$$

##### 4.1.2.1 Algoritmo para Estimação do Comprimento de Seções Seriais

Os valores de  $t_s$  e  $t_e$  são determinados a partir dos tempos de chegada estimados das características de  $r(t)$  relacionadas aos elementos da topologia que estão antes e após a seção sob análise, na ordem definida em  $\Lambda$ . Caso o elemento que preceda a seção serial seja:

- O início da linha (ou seja, o equipamento de medição na porta 1),  $t_s = 0$ ;
- Uma derivação,  $t_s$  é igual à estimativa do tempo de chegada do pulso negativo referente à derivação anterior à seção serial sob análise; e
- Outra seção serial,  $t_s$  é igual ao tempo em que ocorre a borda que representa o desvio de decaimento que encerra a seção serial anterior.

Caso o elemento após a seção serial sob análise seja:

- O final da linha (circuito aberto na porta 2),  $t_e$  é igual ao tempo em que ocorre a borda de subida do pulso correspondente à  $L_T$ ;
- Uma derivação,  $t_e$  é igual ao tempo em que ocorre a borda de início do pulso negativo que corresponde à derivação posterior à seção serial sob análise; e
- Outra seção serial:  $t_e$  é igual ao tempo em que ocorre a borda que representa o desvio de decaimento que inicia a seção serial posterior.

Uma vez obtidos os valores de  $t_s$  e  $t_e$ , a estimativa do comprimento da seção é obtido através de (4.4).

Considerando ainda o exemplo ilustrado na Figura 27, os comprimentos das seções seriais  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , e  $\theta_3$  são obtidos por

$$\begin{aligned}
l_1 &= \frac{(t_1^{rd} - 0)}{2} v_p, \\
l_2 &= \frac{(t_1^{r-} - t_1^{rd})}{2} v_p, \\
l_4 &= \frac{(t_2^{r+} - t_1^{r-})}{2} v_p.
\end{aligned} \tag{4.5}$$

#### 4.1.2.2 Algoritmo para Estimação do Comprimento de Derivações

Os pulsos detectados em  $h(t)$  após o primeiro pulso podem conter informação sobre o comprimento das derivações. Uma vez que eles também podem ser pulsos espúrios gerados por multirreflexão, estimativas obtidas através desses pulsos podem ser consideradas como possíveis valores de comprimento para derivações presentes ou não na topologia. Assim, a partir dos  $n_h$  pulsos positivos detectados em  $h(t)$ , calculam-se os elementos do conjunto de comprimentos possíveis de derivações

$$\Upsilon^{hD} = \{l_1^{hD}, l_2^{hD}, \dots, l_{(n_h-1)}^{hD}\}, \tag{4.6}$$

através de

$$l_{j-1}^{hD} = \frac{(t_j^{h+} - t_1^{h+})}{2} v_p, \tag{4.7}$$

onde  $t_j^{h+}$  é o tempo de chegada  $j$ -ésimo pulso detectado em  $h(t)$ , tal que  $1 < j \leq n_h$ ,  $t_1^{h+}$  é o tempo de chegada do primeiro pulso detectado em  $h(t)$ .

Em relação à  $r(t)$ , o comprimento de uma derivação é estimado a partir dos tempos de chegada de um par de pulsos, onde o primeiro é negativo e o segundo é positivo. Entretanto, como visto na Seção 2.6, sem informação *a priori* ou externa, não é possível determinar qual o pulso positivo correspondente a um determinado pulso negativo.

Uma estratégia para resolver este problema é estimar todos os comprimentos possíveis em  $r(t)$  para cada eco negativo. Ou seja, para cada pulso negativo – correspondente a uma derivação – todos os pulsos positivos que o sucedem fornecem um comprimento possível para aquela derivação. Mesmo o pulso positivo relacionado à  $L_T$  deve ser incluído devido à possibilidade de sobreposição e soma de pulsos. Com isso, o  $i$ -ésimo pulso negativo correspondente a  $i$ -ésima derivação define o conjunto de comprimentos possíveis de derivações em  $r(t)$

$$\Upsilon^{rD(i)} = \{l_1^{rD(i)}, l_2^{rD(i)}, \dots, l_{n_{rD(i)}}^{rD(i)}\} \tag{4.8}$$

onde  $n_{rD(i)}$  é o número de comprimentos possíveis para a  $i$ -ésima derivação, sendo igual ao

número de pulsos positivos que sucedem o  $i$ -ésimo pulso negativo correspondente a  $i$ -ésima derivação. Cada comprimento possível pode ser estimado por

$$l_m^{rD(i)} = \frac{(t_m^{r+} - t_i^{r-})}{2} v_p, \quad (4.9)$$

onde  $t_m^{r+}$  é o tempo de chegada estimado do  $m$ -ésimo pulso positivo detectado após  $t_i^{r-}$ , o tempo de chegada estimado do  $i$ -ésimo pulso negativo sob análise.

Nesta abordagem, uma vez que  $h(t)$  tende a ser mais preciso, o algoritmo estima o comprimento da  $i$ -ésima derivação em  $\Lambda$  como o elemento de  $\Upsilon^{hD}$  que obtém o menor erro absoluto na comparação com os elementos do conjunto correspondente  $\Upsilon^{rD(i)}$ .

No exemplo representado na Figura 27, uma derivação foi estimada, a seção  $\theta_3$ . Uma vez que três pulsos positivos foram detectados em  $h(t)$ , o conjunto  $\Upsilon^{hD}$  contém dois elementos dados por

$$\begin{aligned} l_1^{hD} &= \frac{(t_2^{h+} - t_1^{h+})}{2} v_p \quad \text{e} \\ l_2^{hD} &= \frac{(t_3^{h+} - t_1^{h+})}{2} v_p. \end{aligned} \quad (4.10)$$

O conjunto  $\Upsilon^{rD(i)}$  relacionado ao único pulso negativo detectado contém três elementos, determinados por

$$\begin{aligned} l_1^{rD(i)} &= \frac{(t_1^{r+} - t_1^{r-})}{2} v_p, \\ l_2^{rD(i)} &= \frac{(t_2^{r+} - t_1^{r-})}{2} v_p \quad \text{e} \\ l_3^{rD(i)} &= \frac{(t_3^{r+} - t_1^{r-})}{2} v_p. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Assim, o comprimento da seção  $l_3$  é estimado como o elemento de  $\Upsilon^{hD}$  que minimiza a função

$$y = |l_i^{hD} - l_j^{rD(i)}|, \quad (4.12)$$

para todo  $i = \{1,2\}$  e  $j = \{1,2,3\}$ .

Após estimar os comprimentos de todas as seções,  $L_T$  é estimado através de (4.2). Uma vez que, o comprimento das seções seriais é calculado com base nas características de  $r(t)$  e  $L_T$  é estimado através de  $h(t)$ , pode haver diferenças nos valores estimados devido à dispersão e erros numéricos. Como o valor do comprimento serial total obtido por  $h(t)$  tende a ser mais confiável, as seções seriais são então ajustadas proporcionalmente ao valor calculado para  $L_T$ .

### 4.1.3 Classificação dos Elementos de $\Phi$

Assumindo que uma rede telefônica seja composta de um conjunto finito de tipos de cabo, para uma dada topologia de linha, o conjunto  $\Phi$  seria composto de uma combinação de elementos deste conjunto de tipos de cabo da rede. Ou seja, uma vez obtidas estimativas para  $\Lambda$  e  $Y$ , um conjunto de hipóteses pode ser gerado para  $\Phi$  a partir de um banco de dados que contenha os tipos de cabos que compõem a rede.

Considere-se o exemplo ilustrado na Figura 27. Considere-se ainda que a rede, da qual esta topologia faz parte, possui três tipos de cabos. Tendo sido estimadas 4 seções, com uma derivação na terceira seção, pode-se calcular o número de hipóteses  $n_\Phi$  para o conjunto  $\Phi$ . Neste cálculo, deve-se levar em conta que, uma conexão somente entre seções seriais implica que as duas seções envolvidas possuam tipos de cabos diferentes. Deste modo, três tipos de cabo podem constituir a primeira seção de linha, enquanto somente dois podem constituir a segunda, dado que deve ser diferente da primeira. Tanto a terceira quanto a quarta seção não possuem a mesma limitação, uma vez que a terceira é uma derivação. Deste modo, para uma rede com três tipos de cabos diferentes, o valor de  $n_\Phi$  para a topologia da Figura 27(c) é

$$n_\Phi = 3 \times 2 \times 3 \times 3 = 54. \quad (4.13)$$

Assim,  $n_\Phi$  é o produto do número de hipóteses para cada seção de linha. A primeira seção sempre poderá ser formada pelo número de tipos de cabo  $n_\lambda$  que compõe o banco de dados da rede, enquanto que cada seção serial seguinte à outra seção serial pode ser formada por  $(n_\lambda - 1)$  possibilidades. Segundo a consideração adotada na Seção 4.1.1, uma derivação é sempre seguida de uma seção serial – mesmo que muito curta – e nenhuma das duas possuem restrições quanto ao tipo de cabo. Com isso, esse par de seções implica em  $(n_\lambda)^2$  possibilidades. Esse raciocínio indutivo permite obter  $n_\Phi$  para qualquer topologia a partir de

$$n_\Phi(n_\lambda, n_{cs}, n_d) = n_\lambda (n_\lambda - 1)^{n_{cs}} (n_\lambda)^{2n_d} = (n_\lambda - 1)^{n_{cs}} n_\lambda^{2n_d+1}, \quad (4.14)$$

onde  $n_{cs}$  é o número de conexões serial-serial e  $n_d$  é o número de derivações presentes na linha. Então, a partir de (4.14), para o mesmo exemplo da Figura 27, pode-se calcular também  $n_\Phi(4, 1, 1) = 192$ ,  $n_\Phi(5, 1, 1) = 500$ ,  $n_\Phi(6, 1, 1) = 1080$ ,  $n_\Phi(7, 1, 1) = 2058$ , e assim por diante.

Essas hipóteses são aqui testadas a partir do uso de um modelo de linha causal com parâmetros físicos, como o VUB#0, o qual poderia ser configurado de modo a simular as propriedades de cada tipo de cabo presente na linha. Assim, para cada hipótese de  $\Phi$ , podem ser geradas curvas de  $h(t)$  e/ou  $r(t)$  e comparadas com os sinais obtidos por medição das linhas

reais, adotando-se um critério de avaliação, como o erro médio quadrático. A hipótese selecionada é aquela obtém o menor erro na comparação com a medição.

Essa abordagem pressupõe que se conheçam os tipos de cabo que constituem a rede e, mais importante, as propriedades físicas desses tipos de cabo. Em [33], é proposto um método que permite a identificação de parâmetros de amostras de pares trançados de cobre a partir de medições de impedância de entrada através de uma combinação de abordagem analítica e processo de otimização. Uma técnica como essa pode ser muito importante no caso de abordagens como a proposta nesta seção, pois torna possível a obtenção de parâmetros físicos desconhecidos dos tipos de cabo em uma dada rede, tendo como requisito a posse de um conjunto de amostras para realizar o teste.

Partindo-se do pressuposto que os tipos de cabo e suas propriedades são conhecidos, observa-se outra questão: a complexidade. Quanto maior o conjunto de tipos de cabos que constituem uma rede, maior o número de hipóteses de  $\Phi$  para uma determinada topologia.

## 4.2 Sistema Especialista DELT

Embora medições DELT permitam identificar a resposta em frequência  $H(f)$  do canal, o que é fundamental no cálculo da capacidade do canal por exemplo, não é possível estimar completamente a topologia de uma linha através de uma medição DELT sem redundância. Como visto no Capítulo 2, somente algumas informações da topologia podem ser estimadas diretamente através de  $h(t)$ :

- O comprimento  $L_T$  pode ser estimado usando o tempo de chegada do primeiro pulso positivo detectado através de (4.2);
- O conjunto de comprimentos possíveis de derivações  $\Upsilon^{hD}$  é estimado através do tempo de chegada dos pulsos detectados em  $h(t)$  após o primeiro pulso. Seus elementos são obtidos através (4.7).

Assim, o conjunto solução para um estimador baseado nas regras descritas, o SED, acima é  $S = \{L_T, \Upsilon^{hD}\}$ . É importante observar que o número de elementos em  $\Upsilon^{hD}$  não representa diretamente o número de derivações uma vez que pulsos espúrios gerados por multirreflexão podem ocorrer, como é o caso ilustrado na Figura 13. Outro evento que pode ocorrer é presença de duas ou mais derivações com o mesmo comprimento. Neste caso, os pulsos gerados por ambas as derivações percorrem a mesma distância e alcançam ao mesmo tempo o receptor. Os pulsos são somados na saída formando um único pulso. Na Figura 28 é

ilustrado um exemplo simulado de uma topologia com duas derivações de mesmo comprimento. Na Figura 29 é mostrada sua respectiva resposta ao impulso. O tempo de chegada indicado do segundo pulso positivo detectado está relacionado a ambas as derivações.

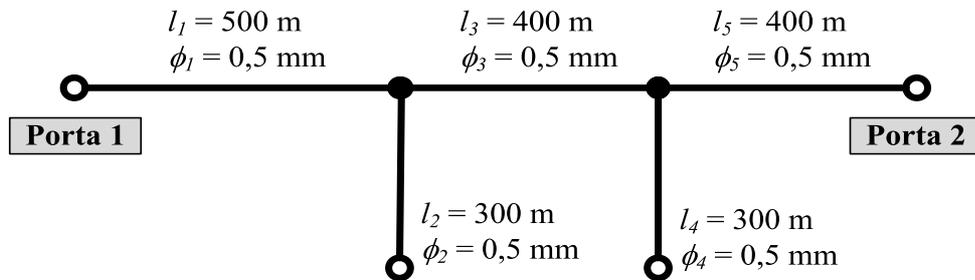


Figura 28 – Exemplo de topologia com duas derivações de mesmo comprimento.

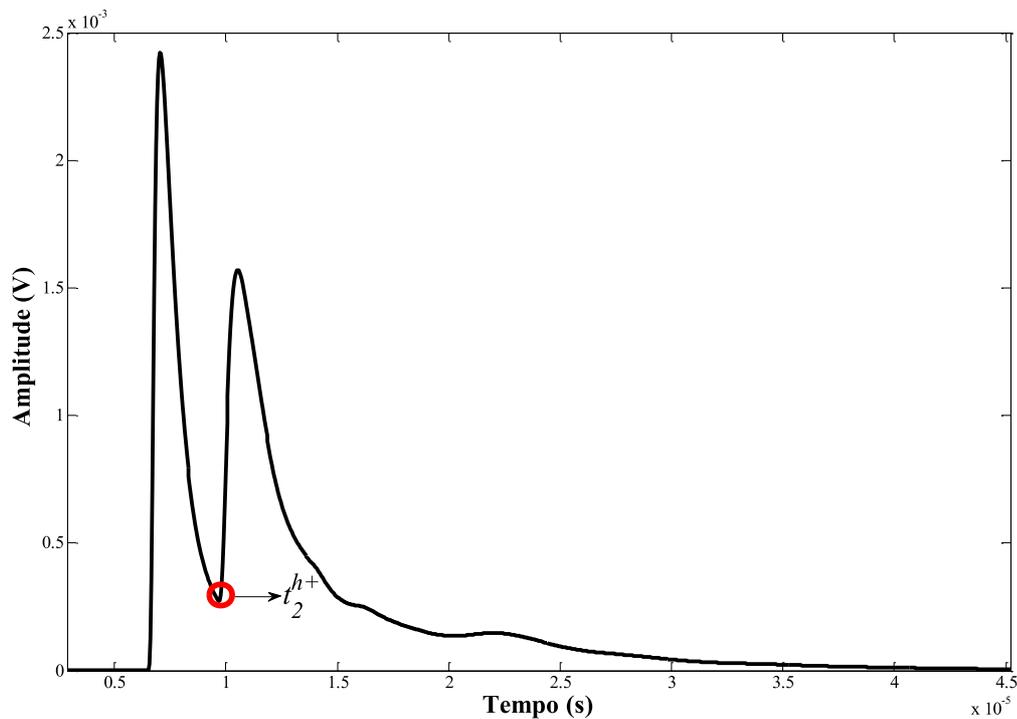


Figura 29 – Resposta ao impulso simulada a partir da topologia ilustrada na Figura 28.

### 4.3 Sistema Especialista SELT

Como explicado no Capítulo 1, técnicas baseadas na análise de medições SELT partem da consideração que se pode identificar a topologia de uma rede telefônica analisando as reflexões identificadas no sinal. Entretanto, este raciocínio implicitamente assume que cada descontinuidade gera uma assinatura única em um sinal refletido, a partir da qual uma

determinada linha pode ser identificada. Em [17], é mostrado, a partir de um ponto de vista teórico, que duas linhas de transmissão diferentes podem gerar respostas SELT idênticas. Por consequência, nem sempre será possível identificar a topologia de uma linha a partir de medições geradas por reflectometria.

O sistema especialista proposto para a análise das características extraídas de  $r(t)$ , o SES, ilustrado na Figura 26, pode obter três tipos de soluções: soluções incompletas, soluções completas e únicas e múltiplas soluções completas. A ocorrência dessas soluções depende do tipo de característica identificado em  $r(t)$ . Na Figura 30 é mostrada a árvore de decisão que determina o tipo de solução que será obtida. Nesta árvore, os nós verificam se um determinado tipo de atributo (pulsos positivos e negativos e desvios de decaimento) foi identificado no sinal e as folhas indicam as classes de soluções. Para cada classe de solução um algoritmo é definido. Essas oito classes podem ser agrupadas num dos três tipos de soluções, como indicado na Figura 30. De um modo geral, as regras definidas para cada classe de soluções são casos especiais do sistema definido na Seção 4.1. A seguir, os algoritmos para as diferentes classes de solução são descritos.

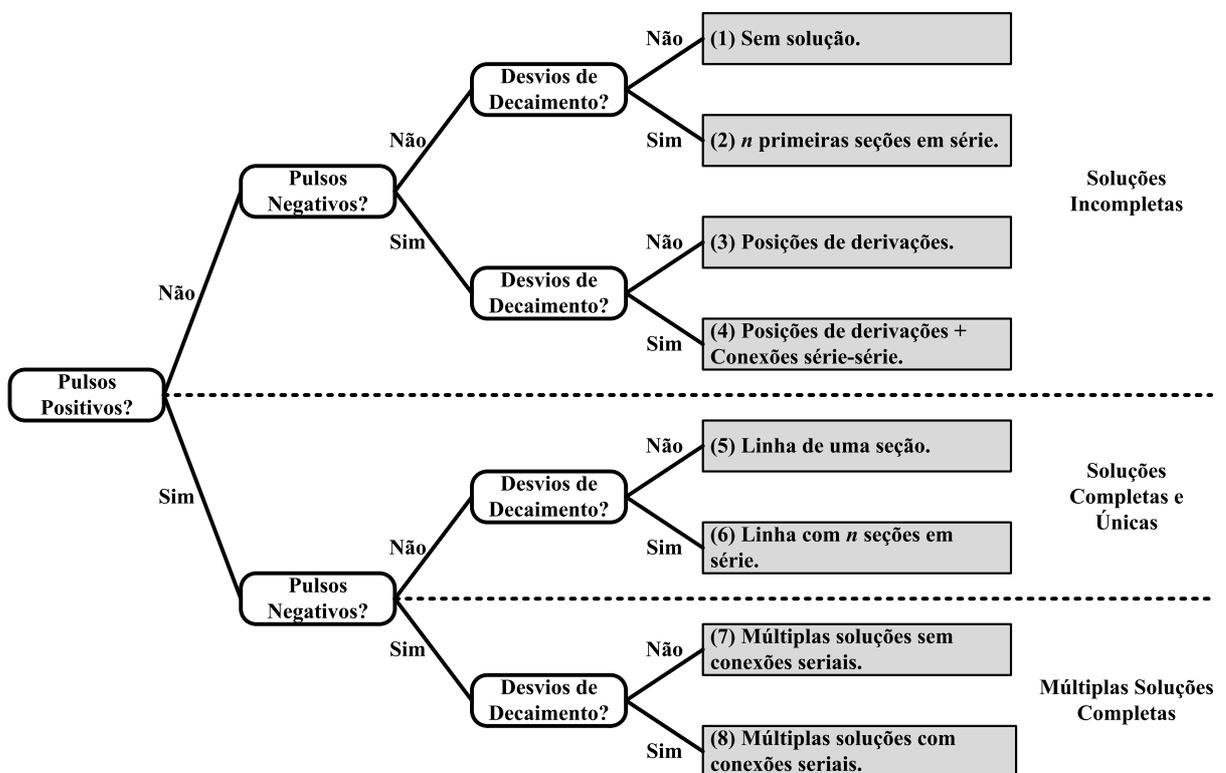


Figura 30 – Árvore de decisão do SES para interpretação de características  $r(t)$ .

### 4.3.1 Soluções Incompletas

Como pode ser observado na Figura 30, esse tipo de solução ocorre devido a não identificação de pulsos positivos em  $r(t)$ . Na Seção 2.6, foi estabelecido que a reflexão direta de um pulso positivo na terminação em aberto de uma seção da linha gera um pulso positivo no receptor na porta de entrada. Com isso, sem esse evento detectado no sinal, não é possível lançar uma hipótese sobre  $L_T$  e o comprimento de derivações. Dessas circunstâncias podem ser obtidas 4 classes distintas de soluções, as quais seguem descritas a seguir:

- Classe (1): Quando nenhuma característica é detectada em  $r(t)$ , não é possível estimar nenhuma informação sobre a topologia da linha. Esse tipo de caso raramente ocorre. Uma situação na qual isso pode acontecer é o caso no qual os descasamentos de impedância característicos da linha estão distantes o bastante para que o desvanecimento do sinal impeça que pulsos e desvios de decaimento possam ser detectados.
- Classe (2): Caso somente desvios de decaimento sejam detectados, as primeiras seções da topologia estimada são seções em série. Os comprimentos dessas seções são obtidos como na Seção 4.1.2.1, onde o desvio de decaimento indica o final de cada seção em série. Após a última borda detectada, somente se pode afirmar que há uma seção serial, mas não se pode definir o comprimento e nem nenhuma informação sobre as seções seguintes. Pode-se ainda estimar o tipo de cabo de cada uma dessas seções estimadas através de comparação dos intervalos correspondentes em  $r(t)$  com sinais simulados.
- Classe (3): Refere-se ao caso em que somente pulsos negativos são detectados. Neste caso, somente se pode estimar a posições de derivações correspondentes a estes pulsos através de

$$p_i^d = \frac{t_i^{r-}}{2} v_p, \quad (4.15)$$

onde  $t_i^{r-}$  é a localização no tempo da borda de início do  $i$ -ésimo pulso negativo referente à  $i$ -ésima derivação.

- Classe (4): O algoritmo da classe (4) é simplesmente a combinação dos algoritmos das classes (2) e (3). Ocorre quando pulsos negativos e desvios de decaimento são detectados.

### 4.3.2 Soluções Completas e Únicas

As classes (5) e (6) definem soluções nas quais se obtém uma única estimativa de toda a topologia. Isso ocorre devido à ausência de pulsos negativos e presença de um ou mais pulsos positivos. Se não há pulsos negativos, o sistema especialista estima que também não existam derivações. Portanto, o primeiro pulso positivo a alcançar necessariamente diz respeito à terminação da linha. Assim,  $L_T$  é estimado através de

$$L_T = \frac{t_1^{r+}}{2} v_p. \quad (4.16)$$

No caso da classe (5),  $L_T$  é o suficiente para identificar a linha, uma vez que nenhum desvio de decaimento foi detectado e  $\Lambda$  é identificado como possuindo uma única seção em série com comprimento  $L_T$ .

Para a classe (6), assume-se que a primeira seção de linha é sempre serial. Do mesmo modo que na Seção 4.1, para cada desvio de decaimento detectado é incluída na topologia uma nova seção em série. Os comprimentos dessas seções são estimados através de (4.4), onde  $t_s$  e  $t_e$  são determinados de maneira similar ao definido na Seção 4.1.2.1, excluindo os itens referentes a derivações.

Tanto para a classe (5) quanto para a (6), o tipo de cabo que compõe cada seção da linha é obtido pelo mesmo procedimento descrito na Seção 4.1.3.

### 4.3.3 Múltiplas Soluções Completas

Como discutido no Capítulo 2, quando pulsos negativos e positivos são simultaneamente detectados em  $r(t)$ , os pulsos positivos refletidos diretamente de uma descontinuidade correspondem a terminações em aberto, tanto de derivações quanto do terminal de saída da linha. Entretanto, não é possível diferenciar os gerados pela reflexão direta em terminações de derivações daquele relacionado ao terminal de saída da linha sem informação *a priori* sobre  $L_T$ .

Uma exceção para essa situação é o caso em que o primeiro pulso negativo ocorre após um ou mais pulsos positivos. Na presença de derivações em uma linha, o descasamento de impedância no início da primeira derivação sempre estará mais próximo do terminal de entrada que todas as terminações em aberto presentes na linha. Portanto, neste caso, o primeiro pulso a ser detectado deveria ser negativo. Se o primeiro pulso detectado for positivo, então não há derivações e este pulso está relacionado à  $L_T$ . Pulsos positivos

posteriores são resultantes de multirreflexão.

Assim, se o primeiro pulso detectado é positivo, então o algoritmo elimina todas as características (pulsos e desvios de decaimento) detectadas após este primeiro pulso positivo e redireciona as características restantes ou para o algoritmo da classe (5) ou da (6), dependendo da ocorrência ou não de desvios de decaimento.

No restante desta seção, será considerado que um pulso negativo é detectado antes de um positivo. Neste caso, um modo de abordar o problema apresentado para as classes (7) e (8) é considerar várias hipóteses para a topologia. Para definir uma hipótese de topologia a partir de um dado sinal  $r(t)$ , pode-se seguir o seguinte algoritmo:

1. Selecionar arbitrariamente um dos pulsos positivos a partir do qual será estimado um valor de  $L_T$ .
2. Seguir o procedimento para identificação de  $\Lambda$  descrito na Seção 4.1.1.
3. Seguir o procedimento para identificação de  $L$  descrito na Seção 4.1.2 até a etapa de estimação do comprimento das derivações. Neste momento, cada pulso negativo deve ser combinado arbitrariamente a um determinado pulso positivo para obter a estimativa dos comprimentos das derivações. Com isso, é obtida uma hipótese para os conjuntos  $\Lambda$  e  $L$ .
4. Seguir o procedimento descrito na Seção 4.1.3 para classificação dos elementos de  $\Phi$ . Com isso, se obtém uma hipótese para a topologia da linha.

Assim, variando-se a escolha do pulso relacionado à  $L_T$  e dos pulsos positivos combinados aos negativos para obter os comprimentos das derivações se obtém outras hipóteses.

Considere-se o exemplo do sinal  $r(t)$  simulado e representado na Figura 31. Uma vez que pulsos positivos e negativos foram detectados, múltiplas soluções completas devem ser estimadas. Como nenhum desvio de decaimento foi detectado, então este caso se enquadra na classe (7). As combinações possíveis de hipóteses são descritas abaixo:

- $L_T$  é estimado a partir de  $t_1^{r+}$ :
  - Somente  $t_1^{r-}$  está dentro do intervalo  $[0, t_1^{r+}]$ . Isso significa que para essa escolha de  $t_{ref}$ , todas as hipóteses geradas terão conjunto  $\Lambda$  como representado na Figura 32(a), com apenas uma derivação.
  - $t_1^{r-}$  é combinado com os quatro tempos de chegada de pulsos positivos seguintes, gerando quatro possibilidades de comprimento para essa derivação. Por consequência, 4 hipóteses de topologia são obtidas.

- $L_T$  é estimado a partir de  $t_2^{r+}$ :
  - Os tempos de chegada  $t_1^{r-}$  e  $t_2^{r-}$  estão dentro do intervalo  $[0, t_2^{r+}]$ . Isso significa que para essa escolha de  $t_{ref}$ , todas as hipóteses geradas terão conjunto  $\Lambda$  como representado na Figura 32(b), com duas derivações.
  - Do mesmo modo que antes,  $t_1^{r-}$  pode ser combinado com os quatro tempos de chegada de pulsos positivos seguintes. O pulso negativo relacionado a  $t_2^{r-}$  entretanto só pode ser combinado com  $t_2^{r+}$ ,  $t_3^{r+}$  e  $t_4^{r+}$ , uma vez que  $t_1^{r+} < t_2^{r-}$ . Por consequência, três possibilidades de comprimentos para essa derivação podem ser obtidas. Combinando-se as duas derivações, 12 hipóteses são estimadas para essa escolha de  $t_{ref}$ .
- $L_T$  é estimado a partir de  $t_3^{r+}$  e  $t_4^{r+}$ :
  - Para cada uma dessas escolhas arbitrárias para  $t_{ref}$ , o resultado será similar ao caso de  $t_2^{r+}$ . Com isso, para cada um dos dois casos são obtidas 12 hipóteses de topologias estimadas.

Para o exemplo do sinal representado na Figura 31, o sistema especialista encontraria ao todo 40 hipóteses para a topologia relacionada ao sinal. Uma forma de selecionar a melhor hipótese é simular  $r(t)$  para cada topologia hipotética e comparar com o sinal medido. A hipótese cujo sinal simulado obtiver a melhor métrica de comparação, como o mínimo erro médio quadrático entre sinal medido e simulado, é escolhida.

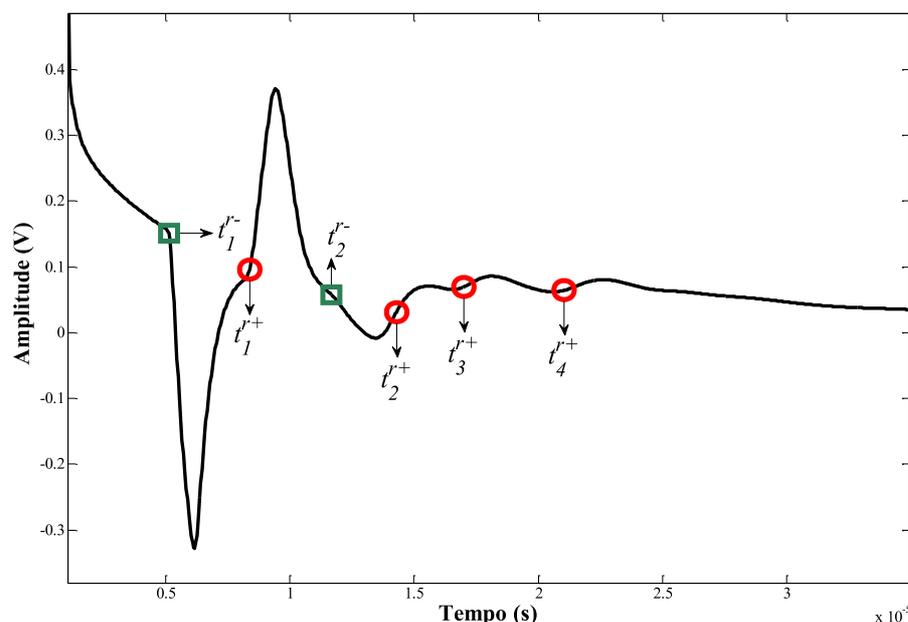


Figura 31 – Exemplo de sinal  $r(t)$  que pode levar a múltiplas soluções no processo de identificação de topologia.

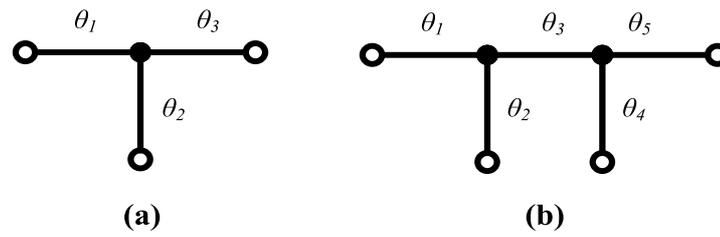


Figura 32 – Tipos de topologias obtidas a partir do algoritmo para análise de sinal  $r(t)$ .

No capítulo a seguir, a robustez das metodologias propostas é testada a partir de medições com cabos reais e comparação com métodos extraídos da literatura.

# CAPÍTULO 5

## AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE TOPOLOGIAS

### 5.1 Conjunto de Teste e Condições Gerais de Avaliação

Com o objetivo de avaliar as metodologias desenvolvidas neste trabalho, foi criado um conjunto de teste composto por medições em laboratório executadas em um conjunto de linhas reais, com diferentes topologias. Esse conjunto de linhas de teste, descrito na Tabela 16, foi construído utilizando três diferentes tipos de cabos de par trançado de cobre, os quais são descritos na Tabela 17.

O conjunto de teste é composto de 33 linhas agrupadas em 6 tipos de topologia. Os três primeiros tipos de topologia são constituídos apenas de seções seriais (uma, duas e três, respectivamente), enquanto que os tipos 4 e 5 possuem uma derivação e o tipo 6 possui duas. O objetivo deste conjunto de teste é representar o cenário mais simples possível, aumentando a complexidade gradualmente para medir a variação do comportamento das metodologias.

Do mesmo modo descrito para o conjunto de teste descrito na Seção 3.2.3, para cada linha de teste foram realizadas medições de resposta em frequência  $H(f)$ , parâmetro de espalhamento de uma porta  $S_{11}(f)$  e impedância de entrada com carga em aberto  $Z_{in}(f)$ . Essas medições foram realizadas em laboratório utilizando um analisador de rede Agilent 4395A, para medir  $H(f)$  e  $S_{11}(f)$ , e um analisador de impedância Agilent 4394A, para medir  $Z_{in}(f)$ . A faixa de frequência utilizada foi também de 4,3125 kHz a 4,416 MHz, com cada medição tendo 1028 pontos espaçados uniformemente com intervalo de 4,3125 kHz. Para cada linha foram realizadas cinco medições de  $H(f)$ ,  $S_{11}(f)$  e  $Z_{in}(f)$ . O sinal utilizado nos testes é a média dessas cinco medições, com o objetivo de mitigar o ruído.

Tabela 16 – Conjunto de linhas utilizadas para teste das metodologias de identificação de linha.

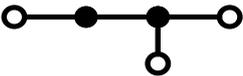
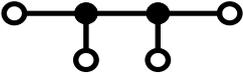
Tipo	Topologia	Linha	$\theta_1$		$\theta_2$		$\theta_3$		$\theta_4$		$\theta_5$	
			$l_1$ (m)	$\phi_1$	$l_2$ (m)	$\phi_2$	$l_3$ (m)	$\phi_3$	$l_4$ (m)	$\phi_4$	$l_5$ (m)	$\phi_5$
1		1	400	A								
		2	500	A								
		3	1000	A								
		4	1500	A								
		5	400	B								
		6	500	B								
		7	1000	B								
		8	1500	B								
2		9	500	A	500	B						
		10	500	A	1000	B						
		11	1000	A	400	B						
		12	400	A	250	B						
		13	1000	A	650	B						
		14	750	A	100	B						
		15	400	A	1000	B						
3		16	1000	A	500	B	200	C				
		17	200	A	1000	B	500	A				
		18	500	A	250	B	100	C				
		19	400	A	700	B	100	C				
		20	750	A	100	B	100	C				
		21	250	A	1000	B	200	C				
4		22	500	A	200	A	1000	B				
		23	1000	A	200	A	400	A				
		24	400	A	500	A	150	A				
		25	400	A	500	B	250	A				
		26	1000	A	200	B	400	A				
		27	400	A	500	B	150	A				
5		28	200	A	500	B	500	A	500	B		
		29	1000	A	150	B	500	B	100	B		
		30	500	A	200	B	250	B	500	B		
6		31	700	A	100	B	250	A	500	B	400	A
		32	500	A	100	B	400	A	250	B	200	A
		33	1000	A	500	B	400	A	150	B	100	A

Tabela 17 – Tipos de cabos utilizados na construção do conjunto de topologias de teste.

Cabo	Descrição
A	Ericsson TEL 481 02, 16 pares com bitola 0.4 mm e impedância característica de 120 ohms.
B	Ericsson TEL 313 0005/30, 30 pares com bitola 0.5 mm e impedância característica de 120 ohms.
C	Furukawa CTP/APL65, 10 pares com bitola 0.65 mm e impedância característica de 100 ohms.

Os sinais de entrada no domínio do tempo,  $h(t)$  e  $r(t)$ , foram obtidos de acordo com o processamento descrito na Seção 2.4. Todos os sinais foram processados utilizando um computador com seguinte configuração: processador Intel Core 2 Duo E4500, 2.20 GHz, com 2 GB de memória RAM.

## 5.2 Base de Referência e Comparação com Métodos Descritos na Literatura

Para esta avaliação, os sistemas especialistas desenvolvidos nesta tese foram executados utilizando as configurações de parâmetros obtidas no Capítulo 3, repetidas a seguir:

- SES:  $k_s$  é definida como 0,02 para análise de  $r(t)$  e o fator de decisão  $\eta$  é obtido a partir de  $\sigma_r = 3$ .
- SED:  $k_s$  é definida como 1 para análise de  $h(t)$ .
- SESD: são utilizados todos os parâmetros definidos acima para SES e SED.

Múltiplas soluções na estimação de topologia podem ser obtidas através de SES. Neste caso, a solução escolhida pelo algoritmo para participar da avaliação nas seções a seguir é definida de acordo com o critério descrito na Seção 4.3.3, ou seja, é a solução a que apresentar o menor erro na comparação do sinal medido com o sinal simulado através de modelo de linha para a topologia estimada. Como será observado na Seção 5.3.4, essa abordagem terá um impacto aumentando o custo computacional do sistema nos casos de múltiplas soluções.

SESD e SES também podem obter estimativas incompletas para as topologias. Entretanto, para o conjunto de teste apresentado, isso ocorreu somente para a linha 32, onde SESD estimou corretamente a topologia, mas não foi capaz de estimar o comprimento da segunda derivação, como será comentado mais tarde. O SED é apto a estimar somente o comprimento serial total  $L_T$ , o conjunto dos possíveis comprimentos de derivações  $\Upsilon^{hD}$  sem determinar a ordem. Apenas por uma questão de avaliação de SED, será obtida uma estimativa do número de derivações através do número de elementos de  $\Upsilon^{hD}$ .

As metodologias desenvolvidas nesta tese são também avaliadas através de comparação com os resultados obtidos pelas implementações de duas metodologias da literatura, já discutidas no Capítulo 1, as quais foram representadas por siglas: o TIMEC [21] e o SELT-tdr [6, 11]. Essas duas metodologias já foram comparadas em outro trabalho utilizando linhas simuladas por modelo de linha [21]. Nesta primeira comparação, o TIMEC apresentou melhor desempenho geral em relação à identificação das topologias. Entretanto, no atual trabalho, é proposta uma comparação a partir de medições obtidas de linhas reais. Além disso, uma vez que utilizam como entradas sinais diferentes – SELT-tdr é baseado na análise somente de medições de uma porta enquanto o TIMEC utiliza medições em ambas as portas – uma comparação pode ser interpretada como mais justa quando realizada entre algoritmos que

utilizam o mesmo tipo de informação de entrada. Com isso, os resultados serão analisados comparativamente de três maneiras:

- Algoritmos que combinam sinais SELT e DELT: aqui são comparados diretamente os resultados de SESD e TIMEC.
- Algoritmo cuja entrada é um sinal DELT: sempre que aplicável ao critério de avaliação, os resultados de SED serão comparados aos demais.
- Algoritmos cuja entrada é um sinal SELT: neste caso são comparados os resultados de SES e SELT-tdr, sendo que ambos utilizam  $r(t)$  como entrada; e,
- Comparação dos cinco algoritmos no geral.

Os resultados obtidos pelo TIMEC e pelo SELT-tdr são gerados através das mesmas implementações, ou seja, os mesmos códigos, que geraram os resultados apresentados em [21], os quais foram gentilmente cedidos pelos autores do artigo. Deste modo, o TIMEC é o código original realizado pelo autor e o SELT-tdr foi codificado seguindo os algoritmos descritos em [6], exceto pela utilização de derivadas para detectar os intervalos de análise, uma vez que o processo de obtenção desses intervalos não é descrito em [6]. Em [21], é explicado que para dados simulados, esta implementação obteve resultados similares aos apresentados em [11].

O modelo de linha utilizado por todos os métodos é o VUB#0. O banco de dados de tipos de cabos utilizado pelos algoritmos é composto pelos cabos apresentados na Tabela 17, cujos parâmetros do modelo foram obtidos utilizando o método descrito em [33]. Além disso, foi incluído no banco de dados um cabo teórico de 0,9 mm de diâmetro dos condutores, cujos parâmetros físicos são definidos em [34].

### 5.3 Resultados e Análises

Os resultados obtidos são avaliados de acordo com um conjunto de figuras de mérito associadas às características das topologias e do processo de identificação, descritas nas seções a seguir.

#### 5.3.1 Caracterização do Conjunto $\Lambda$

Primeiramente é avaliada a capacidade dos métodos de caracterizar topologia, definindo o número de seções e se essas seções são seriais ou derivações. Essa avaliação é

realizada a partir de três critérios:

- O percentual de topologias que foram corretamente caracterizadas (TCC) pelos algoritmos, medindo assim a capacidade de estimar correta e completamente o número de seções e o tipo de cada seção;
- O percentual de acerto na estimação do número de seções seriais (NSS);
- O percentual de acerto na estimação do número de derivações (ND).

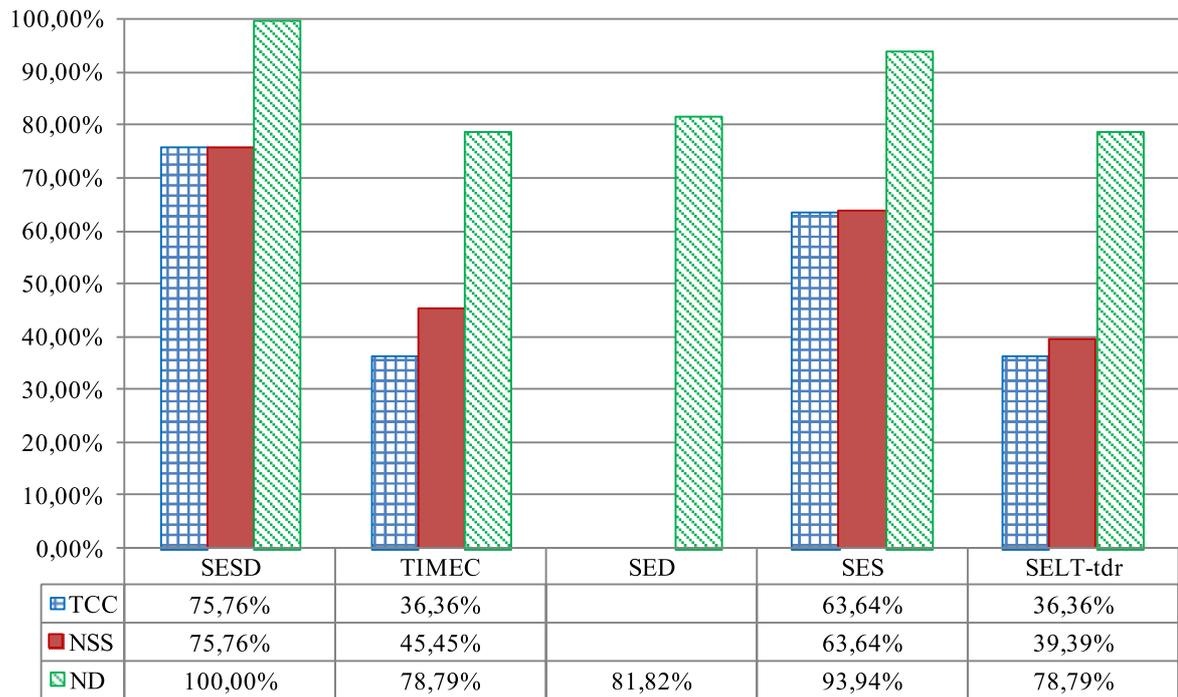
Os parâmetros TCC e NSS não podem ser avaliados para o módulo SED, devido às limitações de informação em  $h(t)$ , descritas no Capítulo 4. Na Figura 33 são comparados os resultados dos três critérios obtidos para o conjunto de teste.

Comparando-se os resultados de SED e TIMEC, o primeiro obtém melhores resultados nos três critérios, enquanto o segundo se mostra equiparável ao SELT-tdr. É possível observar que o SED foi capaz de estimar corretamente o número de derivações em todas as linhas. Assim, pode-se verificar que os erros na caracterização completa da topologia estiveram ligados a não identificação de seções seriais, principalmente para os tipos de topologia 3 e 5. Na Figura 34, os resultados para o critério TCC são mostrados por tipo de topologia.

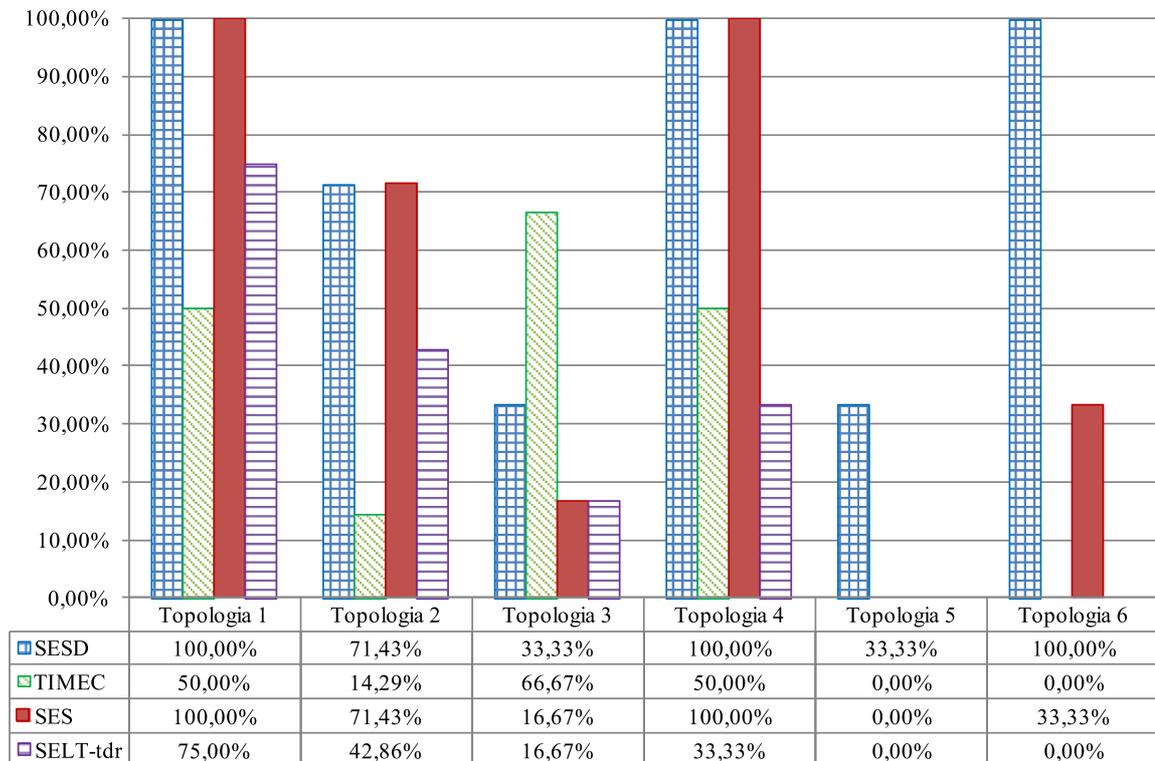
SED consegue obter melhor resultado que o TIMEC em relação à estimação do número de derivações.

Na comparação entre SES e SELT-tdr, o primeiro supera o segundo em todos os critérios. O módulo SES falha em identificar as topologias em duas das três linhas do tipo de topologia 6, mas assim como no caso de SED tem como sua principal dificuldade identificar algumas das conexões serial-serial. O algoritmo SELT-tdr tem desempenho próximo ao do TIMEC e não consegue identificar nenhuma linha das topologias 5 e 6. Seu maior sucesso é na identificação das linhas de uma seção, ou nas primeiras seções das topologias 2 e 3. Ainda assim é superado nas topologias 1 e 2 pelo módulo SES.

Com relação ao desempenho no geral, os melhores resultados foram obtidos pelo módulo SED em todos os critérios. Observa-se também, em relação às SED e SES, que o desempenho decai com o aumento do número de conexões entre seções seriais mais do que com a inclusão de derivações. Isso é esperado, considerando que uma conexão serial-serial gera uma característica de sinal muito mais sutil e difícil de detectar do que uma conexão serial-derivação. O mesmo ocorre dos cenários de 4 a 6, onde o pior desempenho ocorre exatamente as linhas do tipo 5, onde existe uma conexão serial-serial. Em todos os casos, o que ocorre é a não identificação de uma seção serial. Com o aumento da sensibilidade na avaliação de  $r(t)$ , através da manipulação de  $k_s$ , essa seção serial pode ser identificada.



**Figura 33 – Resultados em relação ao percentual de topologias corretamente caracterizadas (TCC), percentual de acerto na estimação do número de seções seriais (NSS) e do número de derivações (ND).**



**Figura 34 – Percentual de topologias corretamente caracterizadas (TCC) por tipo de topologia.**

No entanto, esses resultados são superiores aos obtidos pelo TIMEC e pelo SELT-tdr, a exceção do cenário 3, onde o TIMEC foi capaz de estimar corretamente mais linhas. Nenhum dos dois algoritmos foi capaz de identificar completa e corretamente a topologia dos cenários 5 e 6. Os erros relacionados ao TIMEC incluem a estimação de seções que não

existem, incluindo até mesmo derivações que não estão na topologia. O SELT-tdr apresenta problemas principalmente ao identificar derivações.

### 5.3.2 Estimação do Conjunto de Comprimentos das Seções Y

#### 5.3.2.1 Comprimento Serial Total

Uma das figuras de mérito mais importantes durante o processo de identificação da topologia de uma linha de transmissão é o comprimento serial total  $L_T$ . A capacidade de estimar este parâmetro corretamente é avaliada através do erro percentual na estimação de  $L_T$

$$e_p(L_T) = \frac{|L_T - \hat{L}_T|}{L_T} \times 100, \quad (4.17)$$

onde  $\hat{L}_T$  é o valor de  $L_T$  estimado pelo algoritmo de identificação.

Em alguns casos, os métodos obtêm estimativas de topologia muito distintas do real, o que leva a um erro muito grande na estimativa de  $L_T$ . Esses casos, embora não sejam dominantes, afetam fortemente a estatística geral, levando a uma distorção nos resultados, dificultando a comparação. Desse modo, é adotado o seguinte critério: erros acima de 50% na estimativa de  $L_T$  são considerados como falha do algoritmo em estimar o parâmetro. Esses resultados são avaliados separadamente na Tabela 18, para cada metodologia. Nessa tabela são indicados o número de linhas em que  $e_p(L_T)$  é maior que 50%, a média e o desvio padrão desses erros e as linhas (com o índice da Tabela 16) em que isso ocorreu. Os resultados de  $e_p(L_T)$  abaixo de 50% são mostrados na Figura 35, onde é comparada a média de  $e_p(L_T)$  obtida por cada metodologia para todo conjunto de teste e para cada tipo de topologia. Na Figura 36 é mostrado o desvio padrão de  $e_p(L_T)$  para todo o conjunto de teste.

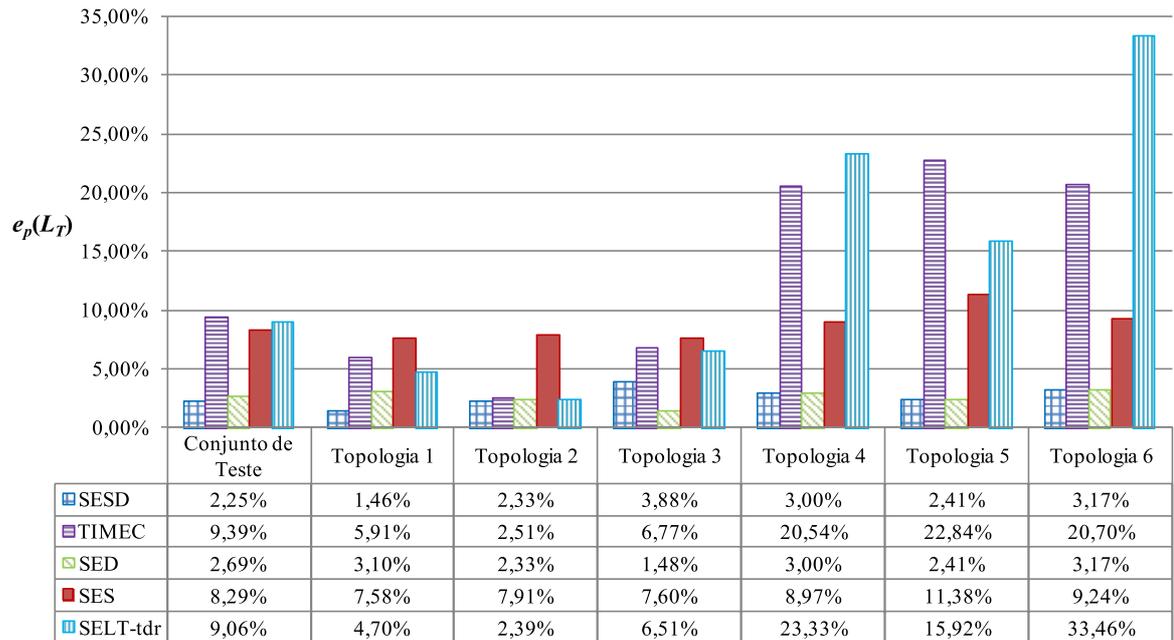
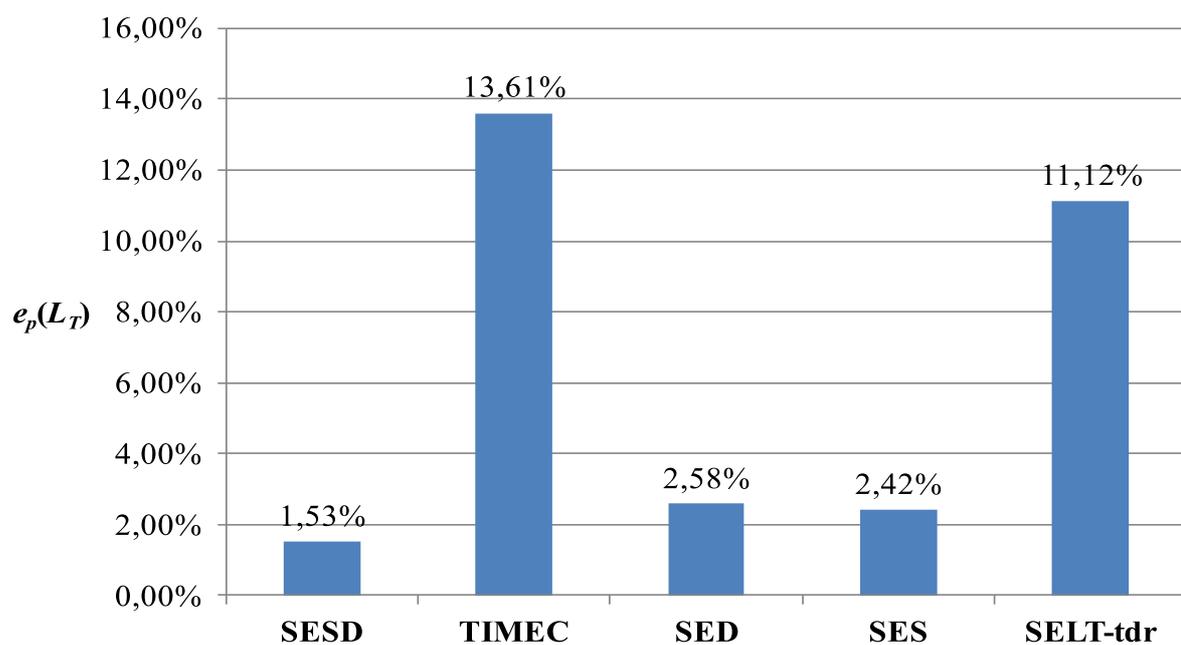
Os algoritmos de SESD e SED foram os únicos que mantiveram todos os resultados abaixo de 50%, enquanto que o TIMEC falha seis vezes neste critério, sendo cinco dessas falhas em cenários com derivações. Note-se que entre os que geraram erros acima de 50%, o SES foi o que obteve a menor média.

SESD e SED obtêm resultados muito próximos, diferindo somente os tipos de topologia 1 e 3, com vantagem para SESD. Ambos obtiveram resultados melhores que o TIMEC na média em todos os cenários. O SES obtêm melhores resultados que o SELT-tdr principalmente nos cenários mais complexos (topologias do tipo 4, 5 e 6).

Os desvios padrão amostrais ilustrados na Figura 36 mostram que SESD, SES e SED tiveram menor variabilidade de resultados que TIMEC e SELT-tdr.

Tabela 18 – Linhas cujo erro na estimação de  $L_T$  resultou acima de 50%.

Métodos	Número de Linhas	Média dos Erros Acima de 50%	Desvio Padrão dos Erros Acima de 50%	Linhas em que Ocorreram os Erros Acima de 50%
SESD	0	-	-	-
TIMEC	6	186,61%	121,69%	11; 24; 26; 27; 31; 32
SED	0	-	-	-
SES	2	64,69%	18,72%	22; 27
SELT-tdr	9	80,62%	11,86%	13; 14; 16; 17; 20; 21; 22; 29; 32

Figura 35 – Erro médio da estimativa de  $L_T$  para todo o conjunto de teste e por tipo de topologia.Figura 36 – Desvio padrão do erro médio da estimativa de  $L_T$  para cada método sobre todo o conjunto de teste.

Na Figura 37 é apresentada uma comparação linha a linha dos resultados de SESD, SED e TIMEC. SESD e SED obtêm praticamente os mesmos resultados, sendo mais estáveis (o valor máximo obtido foi 12,22%) que os obtidos pelo TIMEC, cujos resultados variam de 0,11% a 47,28% (dos resultados abaixo de 50%).

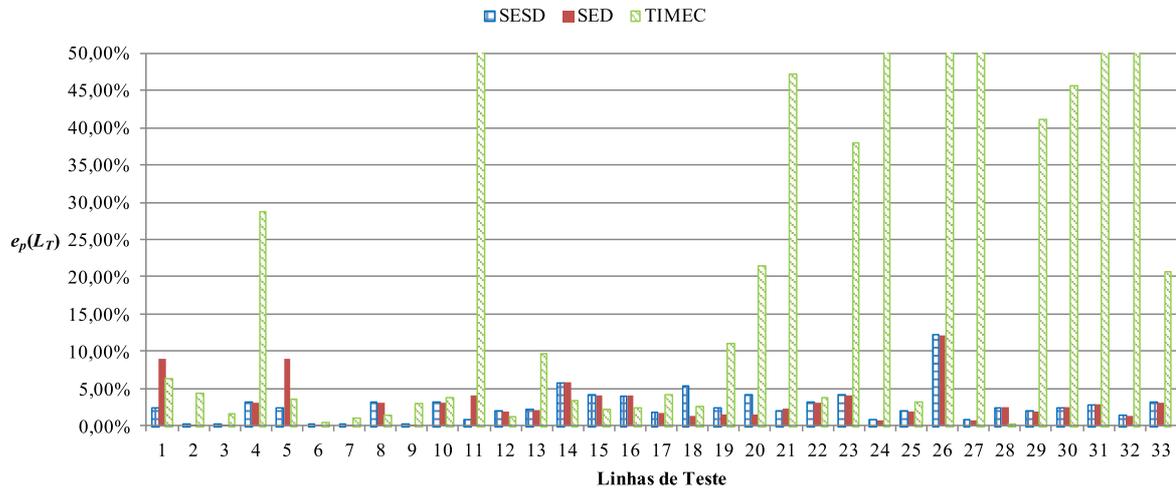


Figura 37 – Comparação entre os resultados obtidos para o critério  $e_p(L_T)$  pelos métodos SEDS, SED e TIMEC.

Em relação ao critério de 50% de erro, SES teve somente duas falhas, enquanto que SELT-tdr, foi o que mais falhou, apresentando 9 falhas, cinco das quais no cenário 3. Na média geral – Figura 35 – SES supera o SELT-tdr. Essa vantagem é construída para os tipos de topologia 4, 5 e 6 onde os resultados do SELT-tdr pioram drasticamente. Enquanto isso, SES mantém o desempenho estável nos tipos 1, 2 e 3, onde o algoritmo de SELT-tdr leva vantagem.

Na Figura 38 é mostrada uma comparação entre os resultados dos dois métodos linha a linha. Observa-se que, é mantida a estabilidade dos resultados de SES no conjunto de teste, à exceção das já citadas linhas 22 e 27. Assim como o TIMEC, o SELT-tdr tem fraco desempenho nas linhas com topologias mais complexas.

Na média, os melhores resultados foram obtidos pelo SESD. Entretanto, dos cinco métodos testados, SES obteve, na média, os piores resultados para os cenários de 1 a 3. Esses resultados são compensados pela estabilidade de resultados.

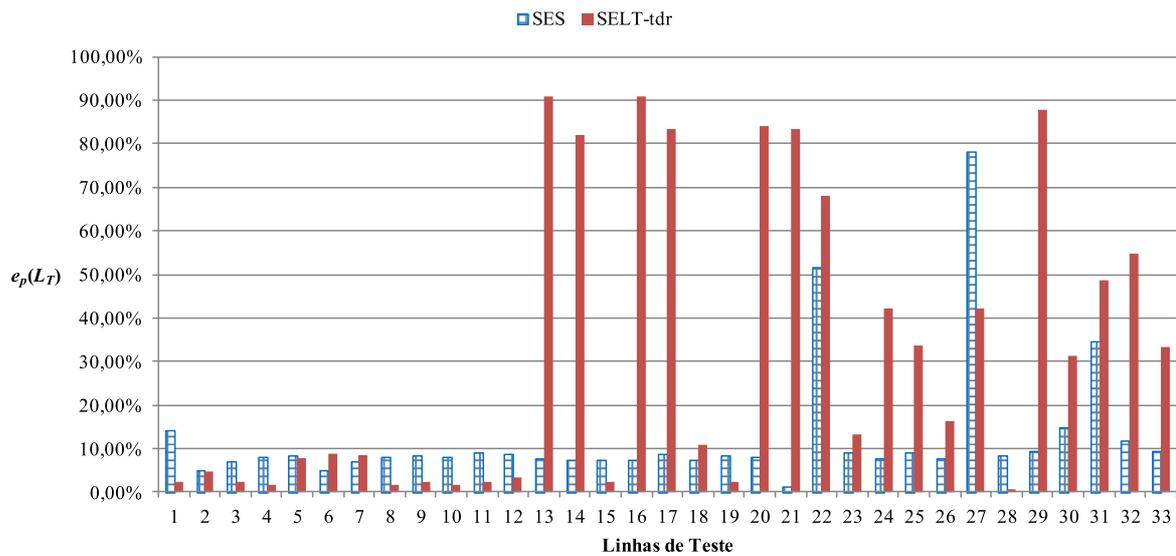


Figura 38 – Comparação entre os resultados obtidos para o critério  $e_p(L_T)$  pelos métodos SES e SELT-tdr.

### 5.3.2.2 Posição das Derivações

Outro critério a ser avaliado é a identificação das derivações ao longo da linha. Um algoritmo deve ser capaz de localizar derivações para o caso de necessidade de manutenção, alteração da linha ou mesmo previsão de desempenho. Das 33 linhas do conjunto de teste, 12 possuem derivações, conformando os tipos de topologia 4, 5 e 6. Desse modo, somente as linhas 22 a 33 serão utilizadas para avaliação da capacidade de identificação das derivações.

Primeiro será avaliada a capacidade de localizar a posição das derivações presentes em uma linha. Isso é feito através da definição do erro percentual na estimação da posição da  $i$ -ésima derivação  $p_i^D$  definido por

$$e_p(p_i^D) = \frac{|p_i^D - \hat{p}_i^D|}{p_i^D} \times 100, \quad (4.18)$$

onde  $\hat{p}_i^D$  é o valor de  $p_i^D$  estimado pelo método de identificação. Na Tabela 19 são apresentadas algumas estatísticas dos resultados da identificação das derivações e da estimação de suas posições. Os critérios adotados na tabela são: o critério de 50% de erro, considerado anteriormente para  $L_T$ ; percentual de linhas cuja primeira ou segunda derivação não foi identificada; e o número de linhas que tiveram alguma derivação erroneamente incluída.

Com base na Tabela 19, observa-se que o SESD consegue melhores resultados tanto nos critérios relacionados à primeira como à segunda derivação. O SESD identificou todas as derivações em avaliação e estimou suas posições, enquanto o TIMEC não conseguiu identificar três das primeiras derivações das linhas e também não identificou a segunda derivação de nenhuma das linhas que possuem duas derivações. Das nove derivações

identificadas usando o TIMEC, seis foram identificadas com  $e_p(p_1^D)$  maior que 50%.

Tabela 19 – Estatísticas dos resultados da estimativa da posição das derivações dos tipos de topologia 4, 5 e 6.

	SESD	TIMEC	SES	SELT-tdr
Percentual de linhas identificadas com $e_p(p_1^D) < 50\%$ .	100,00%	25,00%	91,67%	58,33%
Percentual de linhas cujo $p_1^D$ não foi identificada.	0,00%	25,00%	8,33%	41,67%
Número de linhas que tiveram uma derivação erroneamente incluída.	0	3	0	0
Percentual de linhas identificadas com $e_p(p_2^D) < 50\%$ .	100,00%	-	33,33%	-
Linhas cujo $p_2^D$ não foi identificada	0,00%	100,00%	66,67%	100,00%
Número de linhas que tiveram uma segunda derivação erroneamente incluída.	0	0	0	1

Na Figura 39 são comparados, linha por linha, os valores para  $e_p(p_1^D)$  das linhas 22 a 33. Cada espaço em branco indica um caso onde o método não identificou a derivação. Mais uma vez o SESD se mostrou mais estável que o TIMEC, que apresentou uma variabilidade de resultados muito maior que o SESD, o qual manteve os resultados abaixo de 10%, com exceção da linha 23. Na Tabela 20 são apresentados os resultados da estimação da posição da segunda derivação das linhas 31 a 33. O SESD obtém uma média de erro de 6,80%, enquanto que o TIMEC não foi capaz de identificar essas derivações em nenhuma das três linhas. Outro ponto a ser observado é que o TIMEC estimou derivações que não existiam em três linhas.

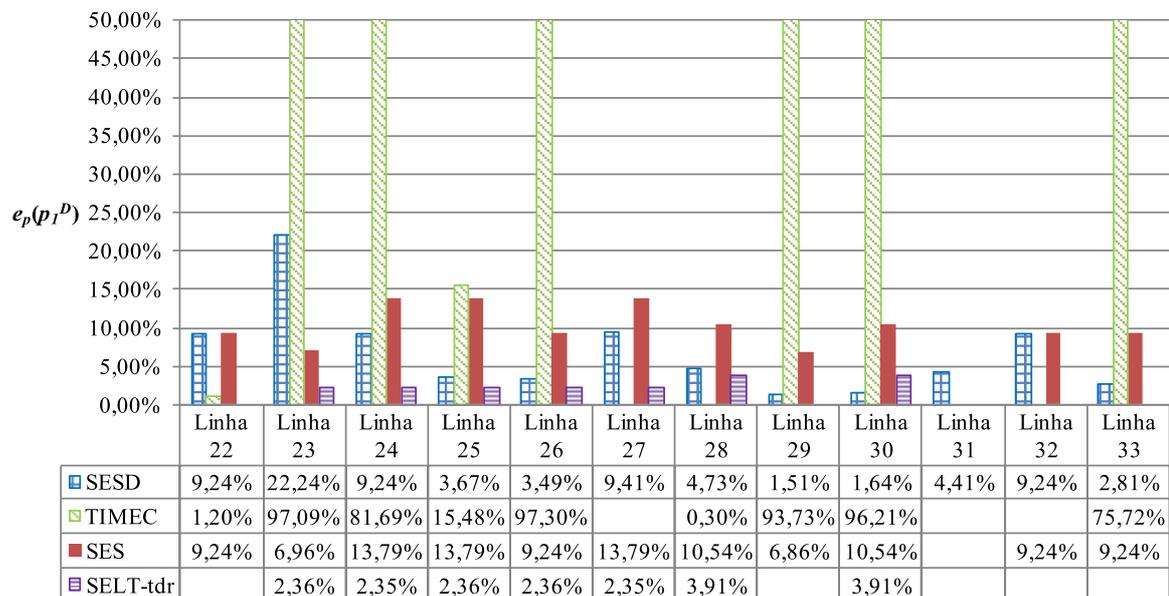


Figura 39 – Erro na estimação da posição da 1ª derivação.

Tabela 20 – Erro na estimação da posição da 2ª derivação.

Linha	SESD	TIMEC	SES	SELT-tdr
31	7,23%	-	-	-
32	8,73%	-	13,79%	-
33	1,26%	-	-	-

O SES identificou mais derivações que o SELT-tdr, falhando em apenas um caso, enquanto que o segundo não capaz de identificar a primeira derivação em cinco linhas. Por outro lado, comparando-se os sete casos em que ambos encontraram a primeira derivação o SELT-tdr supera o em precisão SES. Com relação à segunda derivação, o SELT-tdr não foi capaz de identificar nenhuma das segundas derivações das topologias do tipo 6 e ainda incluiu uma segunda derivação inexistente na linha 26. O módulo SES não inclui nenhuma derivação inexistente e identifica a segunda derivação de uma das três linhas em questão.

No geral, a melhor média na estimação da posição de derivações, quando estimada corretamente, é do SELT-tdr. Por outro lado, SESD não apenas identificou todas as derivações como mantém os resultados abaixo de 10% (mais uma vez, à exceção da linha 23), mesmo na estimação da segunda derivação das linhas da topologia do tipo 6.

### 5.3.2.3 Comprimento das Derivações

A avaliação da estimação do comprimento  $l_i^D$  da  $i$ -ésima derivação é realizada através do erro médio percentual expresso por

$$e_p(l_i^D) = \frac{|l_i^D - \hat{l}_i^D|}{l_i^D} \times 100, \quad (4.19)$$

onde  $\hat{l}_i^D$  é o valor estimado de  $l_i^D$ .

Para efeito de comparação com os demais métodos, é avaliado se o módulo SED consegue gerar ao menos uma estimativa adequada para cada derivação na linha. Assim, foi definido no algoritmo de avaliação, tomar o elemento de  $\Upsilon^{hD}$  que seja a estimativa mais próxima do comprimento real de cada derivação como resultado. Seria considerado erro somente no caso de não detectar nenhum pico adicional.

Na Tabela 21 são mostradas estatísticas dos resultados dos cinco algoritmos para a estimação dos comprimentos das derivações. Dessa vez, o módulo SESD falhou em uma das linhas (linha 33) obtendo erro acima de 50%. Ainda assim, esse resultado foi superior ao obtido pelo TIMEC que obteve erro abaixo de 50% apenas para metade das linhas avaliadas. Considerando somente as cinco linhas em que ambos encontraram a primeira derivação, a

média dos erros obtida pelo SESD foi de 4,26%, enquanto que o TIMEC obteve 12,17% de erro na média.

Tabela 21 – Estatísticas dos resultados da estimativa do comprimento das derivações das topologias do tipo 4, 5 e 6.

	SESD	TIMEC	SED	SES	SELT-tdr
Percentual de linhas identificadas com $e_p(l_1^D) < 50\%$ .	91,67%	50,00%	91,67%	25,00%	41,67%
Percentual de linhas cujo $l_1^D$ não foi estimado.	0,00%	16,67%	8,33%	8,33%	41,67%
Percentual de linhas identificadas com $e_p(l_2^D) < 50\%$ .	66,67%	0,00%	66,67%	0,00%	0,00%
Percentual de linhas cujo $l_2^D$ não foi estimado.	33,33%	100,00%	0,00%	66,67%	100,00%

Na Figura 40 são comparados, linha a linha, os resultados obtidos para  $e_p(l_i^D)$ . Assim como nos critérios anteriores, o TIMEC apresentou uma variabilidade maior do que a apresentada pelo SESD, o que pode indicar maior confiabilidade nos resultados deste último método. Com relação às linhas com duas derivações, embora o SESD tenha identificado todas as topologias e as posições das duas derivações, ele não foi capaz de estimar o comprimento da segunda derivação da linha 32.

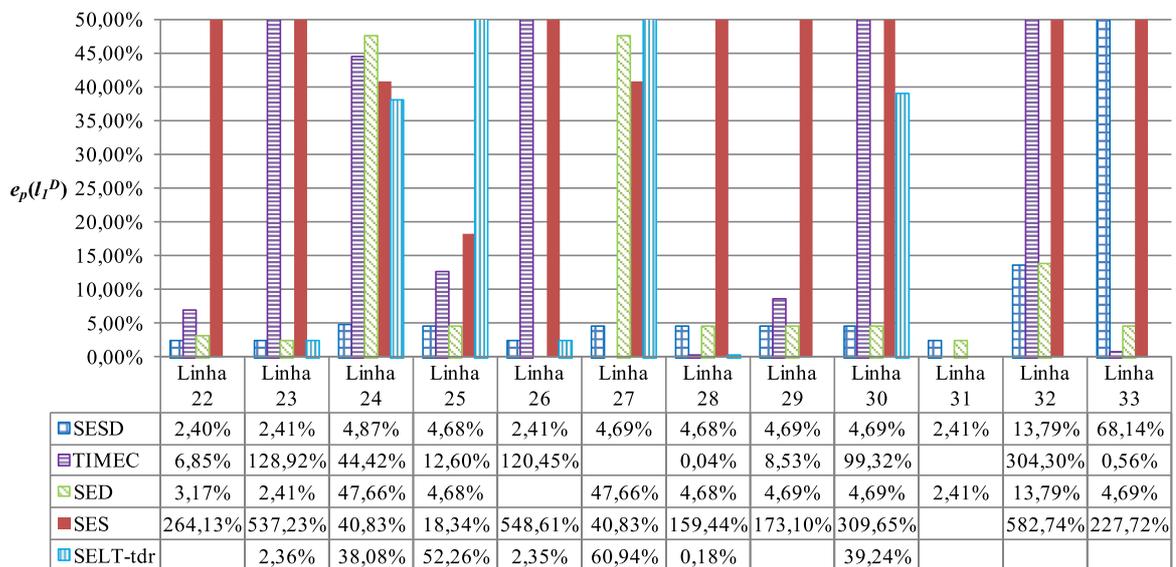


Figura 40 – Erro na estimacão do comprimento da 1ª derivao.

Os resultados para as demais linhas são mostrados na Tabela 22, de onde se pode calcular que a média de erro obtido pelo SESD foi de 5,45%. O TIMEC não conseguiu estimar nenhuma segunda derivao.

Tabela 22 – Erro na estimação do comprimento da 2ª derivação.

Linha	SESD	TIMEC	SED	SES	SELT-tdr
31	4,69%	-	4,69%	-	-
32	-	-	50,20%	391,58%	-
33	6,20%	-	6,20%	-	-

Com o mesmo número de linhas identificadas, SED obteve estatísticas similares às do SESD, embora não tenha sido possível detectar a derivação da linha 26. No que diz respeito aos comprimentos apresentados na Figura 40, os dois sistemas apresentaram resultados idênticos em sete das dez linhas que ambos conseguiram identificar simultaneamente.

Entretanto, considerando essas mesmas dez linhas, a média dos erros obtida pelo SESD foi 4,93%, enquanto que o SED obteve 13,58%. Por outro lado, na comparação com o TIMEC entre as seis linhas que ambos conseguiram simultaneamente identificar, o SESD obteve 11,59% de erro médio, ao passo que o TIMEC alcançou 12,17%, sendo resultados muito próximos. No que diz respeito à segunda derivação, o SED identificou as três, mas uma delas com erro acima de 50% (50,20% na linha 32). Nas demais linhas, este módulo obteve exatamente o mesmo resultados que SESD, como pode ser visto na Tabela 22.

Com relação à comparação de resultados dos algoritmos que utilizaram entradas SELT, o SELT-tdr foi o que conseguiu o maior número de resultados dentro da faixa de 50% de erro. Apesar de o módulo SES ter falhado em identificar a posição de apenas uma primeira derivação, para a maioria das linhas, obteve resultados muito acima de 50%. No caso das linhas com duas derivações, o SES identifica a posição da segunda derivação de uma das três linhas, mas o erro na estimativa do comprimento fica muito acima de 50%.

No geral, os melhores resultados para estimativa dos comprimentos das derivações foram obtidos pelo SESD.

### 5.3.3 Classificação do Conjunto dos Tipos de Cabos das Seções $\Phi$

Para avaliar a capacidade dos algoritmos de classificar os tipos de cabos das seções de linha são definidos inicialmente os seguintes critérios:

1. O percentual de linhas em que todos os tipos de cabo, de cada seção, foram corretamente classificados;
2. O mesmo critério anterior, mas considerando como número total de linhas as topologias que tiveram o conjunto  $\Lambda$  corretamente identificado; e,
3. O critério 1, considerando somente as linhas 1, 2, 3, 6, 24 e 26, ou seja, as

linhas que SESD, TIMEC, SES e SELT-tdr identificaram corretamente o conjunto  $\Lambda$  simultaneamente.

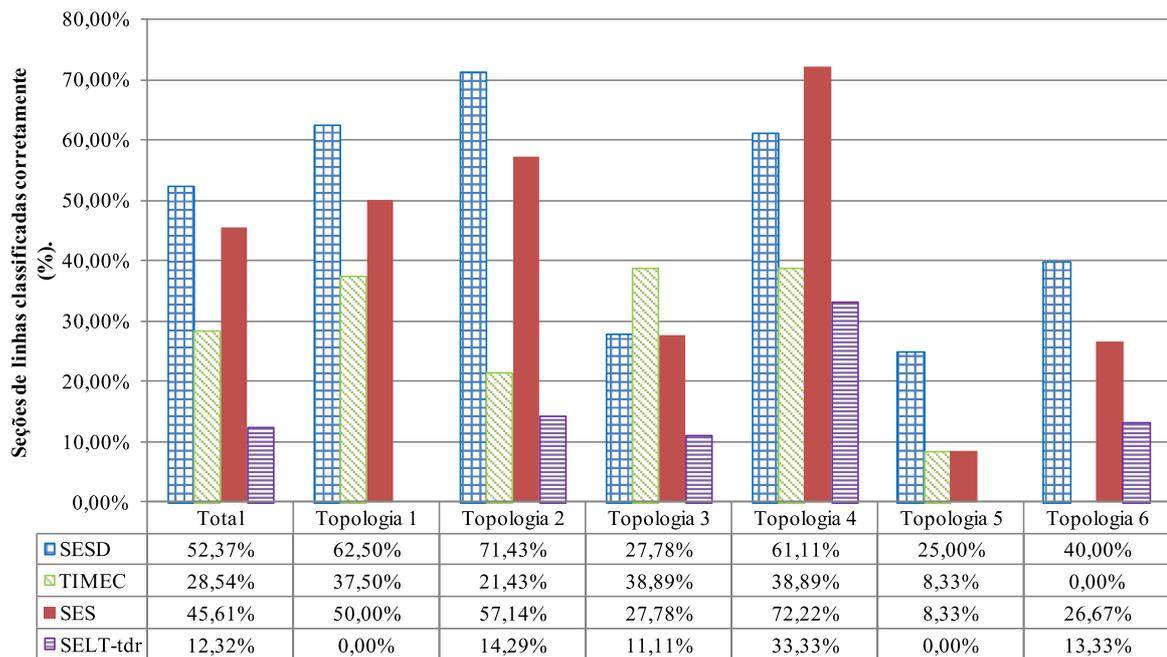
Na Tabela 23 são mostrados os resultados para estes critérios. Os melhores resultados são obtidos por SESD e SES, onde o SESD consegue encontrar a sequência correta em 12 das 33 linhas e o SES consegue em 10. O TIMEC classifica corretamente somente a sequência das linhas 1, 2 e 3, enquanto que o SELT-tdr não obteve sucesso na classificação completa em nenhuma das linhas.

**Tabela 23 – Resultados do nível de acerto para os critérios de avaliação da classificação da sequência de tipos de cabos de uma linha.**

	<b>SESD</b>	<b>TIMEC</b>	<b>SES</b>	<b>SELT-tdr</b>
<b>Critério 1</b>	36,36%	9,09%	30,30%	0,00%
<b>Critério 2</b>	48,00%	25,00%	47,62%	0,00%
<b>Critério 3</b>	66,67%	50,00%	50,00%	0,00%

Em uma comparação direta entre SESD e o TIMEC, considerando somente as linhas em que ambos caracterizaram a topologia corretamente, o primeiro consegue classificar corretamente 60% das sequências de tipos de cabos, enquanto que o TIMEC obtém 30% como resultado.

Por outro lado, mesmo quando a topologia de linha não é completamente identificada pelos algoritmos, algumas seções podem ser identificadas corretamente. Ou seja, se uma linha de transmissão tem quatro seções, podem-se identificar três dessas seções, desde que a seção obedeça ao critério de 50% para verificar se está posicionada corretamente. Com isso, define-se outro critério: o percentual de seções de linhas cujo tipo de cabo foi classificado corretamente. Esse critério considera o número de seções corretamente classificado pelo algoritmo sobre o total de seções de linha que compõe o conjunto de teste. Na Figura 41 são ilustrados os resultados para esse critério para o conjunto total de seções de linha e para cada tipo de topologia.



**Figura 41 – Percentual de tipo de cabo corretamente estimado por seção e por cenário.**

No geral, o SESD classifica corretamente um maior número de seções de linha do que o TIMEC e esse resultado só não se repete para as topologias do tipo 3. Considerando-se somente as dez linhas que ambos caracterizaram a topologia completamente, o SESD foi capaz de classificar corretamente 76,67% dos tipos de cabos das seções de linhas, enquanto que o TIMEC conseguiu 58,33%.

Comparando-se os resultados de SES e SELT-tdr, o primeiro realiza melhor a tarefa em todos os cenários. Considerando-se, somente as topologias identificadas por ambos simultaneamente, o SES classifica 57,92% das seções de linha com o tipo correto de cabo, enquanto que SELT-tdr faz isso para 22,08% dos casos.

#### 5.3.4 Tempo de Processamento e Casos com Múltiplas Soluções

Na Tabela 24 são mostradas as médias, em segundos, dos tempos de processamento que as implementações dos métodos de identificação de topologia abordados nesta tese utilizaram para realizar a estimação das topologias das linhas. Os tempos indicados são a média geral e a média para cada tipo de topologia.

O SED é o mais rápido, mas também o que possui o algoritmo mais simples e limitado. O SESD é muito mais rápido que o TIMEC.

Na média geral, o SES é superado pelo SELT-tdr. Entretanto, esse resultado se deve aos tipos de topologias 4, 5 e 6, onde ocorrem as múltiplas soluções estimadas pelo SES.

Observe-se que para os tipos de topologia 1, 2 e 3, os tempos de processamento são menores. Na Tabela 25 é mostrada a relação entre o número de soluções obtidas pelo SES, o tempo de processamento utilizado para obter essas respostas e a complexidade da linha que está sendo avaliada.

**Tabela 24 – Tempo de processamento médio de cada uma das implementações dos métodos de identificação de topologia abordados, em segundos.**

	<b>SESD</b>	<b>TIMEC</b>	<b>SED</b>	<b>SES</b>	<b>SELT-tdr</b>
<b>Média Geral</b>	<b>1,23</b>	<b>1442,23</b>	<b>0,10</b>	<b>18,33</b>	<b>7,04</b>
<b>Desvio Padrão Geral</b>	<b>2,63</b>	<b>690,35</b>	<b>0,02</b>	<b>60,23</b>	<b>5,48</b>
<b>Topologia 1</b>	0,21	1700,24	0,09	0,19	3,14
<b>Topologia 2</b>	0,25	1716,54	0,09	0,25	5,49
<b>Topologia 3</b>	0,35	1141,06	0,09	0,20	7,11
<b>Topologia 4</b>	0,70	1220,67	0,09	27,26	13,68
<b>Topologia 5</b>	0,91	1391,30	0,11	104,49	3,62
<b>Topologia 6</b>	9,36	1210,52	0,16	41,14	11,03

**Tabela 25 – Relação das múltiplas soluções obtidas pelo SES com o tempo de processamento.**

<b>Linha</b>	<b>Número de Soluções</b>	<b>Tempo de Processamento (s)</b>
<b>23</b>	9	3,66
<b>25</b>	36	13,93
<b>26</b>	9	3,56
<b>27</b>	24	141,77
<b>29</b>	9	3,58
<b>30</b>	40	309,40
<b>32</b>	4	17,91
<b>33</b>	4	1,68
<b>Média</b>	<b>16,88</b>	<b>61,94</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>14,49</b>	<b>110,64</b>

# CAPÍTULO 6

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese descreve o desenvolvimento de uma completa e inédita metodologia para estimação da topologia de linhas telefônicas. A metodologia foi desenvolvida com base na análise da resposta ao impulso e da resposta ao TDR, sendo composta de dois blocos independentes:

- Extração das características dos sinais de interesse; e
- Interpretação dessas características para obtenção de estimativa da topologia através de sistemas especialistas.

Deve-se notar que a utilização explícita (por ambos os blocos) dos desvios de decaimento para identificação de emendas entre seções seriais é uma das contribuições dessa tese, pois trabalhos anteriores usaram apenas análise de pulsos [6, 9, 11, 15], e comparações de curvas medidas com modelos de linha e/ou de decaimento de sinal [6, 14, 21]. Através dessa abordagem é possível relacionar diretamente uma característica de sinal com uma conexão entre seções seriais com diferentes tipos de cabo, com boa precisão, como é possível observar no Capítulo 5.

O método descrito para extração de características é constituído também de dois blocos: detecção de bordas e identificação dessas bordas com as características dos sinais de interesse. Para o primeiro bloco é proposta uma abordagem baseada em TWC, a qual é comparada a métodos baseados na 1ª e 2ª derivadas dos sinais, incluindo um dos poucos trabalhos relacionados na literatura [15]. Na comparação geral, a principal vantagem do método baseado em TWC foi a capacidade de sempre detectar as características e evitar espúrios resultantes de ruído. É importante destacar que, não detectar as características pode ser considerado mais grave do que ter menor precisão, uma vez que a não identificação pode inviabilizar a identificação de uma determinada seção na topologia. Detectar espúrios também

é um problema, uma vez que pode levar à errada interpretação das curvas.

Uma vez identificadas essas bordas, são aplicados sistemas especialistas que relacionam esses pontos com as características do sinal. O sistema especialista desenvolvido para  $r(t)$  depende de um parâmetro  $\sigma_r$ , que determina um valor de corte que funciona como critério de decisão para identificar desvios de decaimento. Para o conjunto de validação adotado, os resultados foram praticamente insensíveis à variação de  $\sigma_r$ , sugerindo que a variação desse parâmetro terá pouco impacto nos resultados de identificação de topologia.

Foram desenvolvidos sistemas especialistas que interpretam as características extraídas de  $h(t)$  e de  $r(t)$ . Eles são selecionados de acordo com as características de sinal disponíveis. Essa é uma característica importante, pois confere a flexibilidade de utilizar três tipos diferentes de entradas, todas elas comumente disponíveis em DSLAMs e em modems mais modernos, como os VDSL (normalmente  $H(f)$  e  $Z_{in}(f)$ ).

Outras características importantes são a dependência mínima de modelo de linha e a total independência de informação *a priori* sobre a linha. Ou seja, apenas a classificação dos tipos de cabo das seções de linha depende da existência de um modelo de linha. Toda a estrutura (número de seções, tipo e comprimento dessas seções) pode ser estimada a partir de informações que os próprios sinais fornecem. E mais importante, são processos separados. Então, se a classificação do tipo de cabo não é necessária, então ela pode ser simplesmente desabilitada que o método ainda fornecerá as demais informações.

Em relação à avaliação e comparação com métodos da literatura, na maioria dos critérios apresentados, os sistemas propostos apresentaram melhores resultados do que aqueles com os quais foram comparados. Entretanto, no geral, a melhor média na estimação da posição de derivações, quando estimada corretamente, é do SELT-tdr. Por outro lado, SESD não apenas identificou todas as derivações como mantém os resultados abaixo de 10%, com apenas uma exceção, mesmo na estimação da segunda derivação.

A identificação do número de derivações e o comprimento  $L_T$  são parâmetros fundamentais na qualificação física da linha, em especial no que diz respeito à transição para tecnologias como VDSL e G.fast. Isso possibilita aos provedores de serviço, no momento da transição, a oportunidade de melhorar a estrutura da rede sabendo a posição dos elementos de linha e determinar de antemão a melhor posição para colocar os novos equipamentos através do teste sistemático na rede.

A partir dos resultados, além da precisão, outras vantagens dos métodos propostos puderam ser notados, tal como sua simplicidade de implementação e baixo custo computacional, especialmente no que diz respeito ao SESD. Mesmo considerando as

múltiplas soluções obtidas pelo SES, no caso em que se obteve o maior número de soluções possíveis o tempo de processamento esteve em torno de 5 minutos. Isso permite que a metodologia proposta possa ser embarcada em armários de distribuição. Isto pode ser muito útil para VDSL ou G.fast, onde os equipamentos de transmissão DSL não estão na central e não tem a disponibilidade imediata de equipamento dedicado para processamento mais demorado das medições.

Isso também leva a possibilidade de avaliar um grande número de linhas de uma determinada rede em um relativamente curto espaço de tempo, mantendo uma boa precisão, como mencionado anteriormente. Trata-se de uma característica fundamental em diversos aspectos. Primeiramente por acelerar a resposta a uma requisição de um cliente em potencial ou de um usuário com problema, aumentando a satisfação do usuário e possibilitando a aplicação de novos serviços. Outro ponto, é que facilitaria o conhecimento, não apenas das linhas, uma por uma, mas do conteúdo dos cabos, através da estimativa de quais pares estão juntos. Isso possibilitaria, por exemplo, desenvolver métodos para minimizar interferências como FEXT (do inglês, *far-end crosstalk*).

## 6.1 Trabalhos Futuros

Em relação às múltiplas soluções obtidas por SES, o critério de escolha da melhor solução ou solução mais provável é algo que pode ser melhorado. Nesta tese foi utilizado como critério de decisão o mínimo erro médio quadrático na comparação direta com o sinal simulado para topologia possível usando modelo de linha. Entretanto, as múltiplas soluções podem ser entrada, ou informação *a priori*, de outro método que permita a decisão.

Outro trabalho futuro proposto é a avaliação da aplicação dos métodos propostos para determinação da composição de cabos primários e secundários em uma dada rede, ou seja, na identificação de quais linhas compõem um determinado cabo. Com isso se poderia estimar qual o comprimento em que duas ou mais linhas são instaladas juntas e em que ponto se separam. Isso também contribuiria no estudo da interferência que as linhas causam umas nas outras.

Além disso, embora os métodos desenvolvidos neste trabalho tenham sido propostos e testados para pares trançados de cobre usados em linhas telefônicas, sua aplicação pode não estar restrita a esse tipo de linha de transmissão. Isso consistiria em avaliar a aplicação, e possível adaptação, dos métodos em outros tipos de rede, como PLC (do inglês *power line*

*communication*) e linhas de transmissão de energia elétrica.

Algo que também não é explorado neste trabalho é que o tipo de borda (subida ou descida) representando desvios de decaimento poderia ser utilizado para facilitar o processo de identificação de tipos de cabo. Por exemplo, no caso em que uma conexão entre seções seriais seja identificada através de um desvio de decaimento que seja uma borda de descida, já se saberia, que para este tipo de borda, houve a transição de uma maior impedância para uma menor. Isso diminuiria o número de possibilidades a ser testada.

## REFERÊNCIAS

- [1] POINT TOPIC LTD. **World Broadband Statistics Q2 2012**. Londres, Reino Unido, 2012. 16 p.
- [2] FINNIE, G. **DSL Acceleration: Making it work**. Heavy Reading. Cambridge, MA, EUA, 2012. 12 p.
- [3] ODLING, P. et al. The fourth generation broadband concept. **IEEE Communications Magazine**, Piscataway, NJ, EUA, v. 47, n. 1, p. 62-69, jan. 2009. ISSN 0163-6804.
- [4] MELSA, P. J. W.; JACOBSEN, K. S. Single-Ended Loop Testing (SELT) Expectations and Realities: White Paper. **Texas Instruments**, mar. 2003. Disponível em: <[http://focus.ti.com/pdfs/bcg/selt\\_wp.pdf](http://focus.ti.com/pdfs/bcg/selt_wp.pdf)>. Acesso em: 01 de junho de 2011.
- [5] BOSTOEN, T. et al. Estimation of the transfer function of a subscriber loop by means of a one-port scattering parameter measurement at the central office. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Piscataway, NJ, EUA, v. 20, n. 5, p. 936-948, jun. 2002. ISSN 0733-8716.
- [6] GALLI, S.; KERPEZ, K. J. Single-ended loop make-up identification - part I: a method of analyzing TDR measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 55, n. 2, p. 528-537, abr. 2006. ISSN 0018-9456.
- [7] BOETS, P. et al. Preprocessing of Signals for Single-Ended Subscriber Line Testing. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 55, n. 5, p. 1509-1518, out. 2006. ISSN 0018-9456.

- [8] RODRIGUES, R. et al. Transfer Function Estimation of Telephone Lines from Input Impedance Measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 61, n. 1, p. 42-54, jan. 2012. ISSN 0018-9456.
- [9] GALLI, S.; WARING, D. L. Loop Makeup Identification via Single Ended Testing: Beyond Mere Loop Qualification. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Piscataway, NJ, EUA, v. 20, n. 5, p. 923-935, jun. 2002. ISSN 0733-8716.
- [10] GALLI, S.; KERPEZ, K. J. Signal Processing for Single-ended Loop Make-up Identification. In: IEEE WORKSHOP ON SIGNAL PROCESSING ADVANCES IN WIRELESS COMMUNICATIONS, 6., 2005, New York, NY, EUA. **Proceedings...** Piscataway, NJ, EUA: IEEE, 2005. p. 368-374.
- [11] KERPEZ, K. J.; GALLI, S. Single-ended loop make-up identification - part II: improved algorithms and performance results. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 55, n. 2, p. 538-549, abr. 2006. ISSN 0018-9456.
- [12] BOETS, P. et al. Measurement, calibration and pre-processing of signals for single-ended subscriber line identification. In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (IMTC), 20., 2003, Vail, CO, EUA. **Proceedings...** Piscataway, NJ, EUA: IEEE, 2003. p. 338-343.
- [13] BOETS, P. et al. Single-ended line testing – a white box approach. In: INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE WIRELESS AND OPTICAL COMMUNICATIONS, 4., 2004, Banff, Canada. **Proceedings...** Calgary, Alberta, Canada: IASTED, 2004. p. 393-398.
- [14] VERMEIREN, T. et al. Subscriber Loop Topology Classification by means of Time Domain Reflectometry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 2003, Anchorage, AK, EUA. **Proceedings...** Piscataway, NJ, EUA: IEEE, 2003. p. 1998-2002 v.3. Print ISBN: 0-7803-7802-4.
- [15] NEUS, C.; BOETS, P.; VAN BIESEN, L. Feature extraction of one port scattering parameters for single ended line testing. In: IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2006.

- [16] BHARATHI, M.; RAVISHANKAR, S. Single Ended Loop Topology Estimation using FDR and Correlation TDR in a DSL Modem. **Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)**, Ontario, Canada, v. 2, p. 40-48, jun. 2012. ISSN: 1925-2676.
- [17] NEUS, C. **Reflectometric analysis of transmission line networks**. 2011. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Vrije Universiteit Brussel, Brussel.
- [18] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION - ITU. **ADSL2 Standard G.992.3**. Geneva, Switzerland, 2003.
- [19] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION - ITU. **ADSL2+ Standard G.992.5**. Geneva, Switzerland, 2003.
- [20] FANG, J. L.; ZENG, C.; CIOFFI, J. Bridged Tap Location Estimation. **Electrical Engineering Department, Stanford University**, Stanford, 2003.
- [21] SALES, C. et al. Line Topology Identification Using Multiobjective Evolutionary Computation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 59, n. 36, p. 715-729, mar. 2010. ISSN 0018-9456.
- [22] REIS, J. et al. Characterization of subscriber local loop by measures of frequency response and TDR. In: IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2006.
- [23] KERPEZ, K. J. Automated loop identification on DSL lines. **International Journal of Communication Systems**, Hoboken, NJ, EUA, v. 22, n. 12, p. 1479-1493, 2009. ISSN 1099-1131.
- [24] TOLEDO, A. P. **Redes Telefônicas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 126 p.
- [25] BOETS, P. et al. On the identification of cables for metallic access networks. In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (IMTC), 18., 2001, Budapest, Hungria. **Proceedings...** Piscataway, NJ, EUA: IEEE, 2001. p. 1348-1353.
- [26] STARR, T.; CIOFFI, J. M.; SILVERMAN, P. J. **Understanding Digital Subscriber Line Technology**. Upper Saddle River, New Jersey, EUA: Prentice-Hall, 1999.
- [27] GOLDEN, P. (Ed.). **Fundamentals of DSL technology**. Boca Raton: Auerbach, 2006.

- [28] ORFANIDIS, J. S. **Eletromagnetic waves and antennas**. Piscataway: Rutgers University, 2008. Disponível em: [www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa).
- [29] VAN DEN BRINK, R. F. M. **Cable Reference Models for Simulating Metallic Access Networks**. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) STC. Sophia Antipolis CEDEX, França, 1998.
- [30] HEYLEN, L.; MUSSON, J. **Cable Models Predict Physically Impossible Behaviour**. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) STC. Sophia Antipolis CEDEX, França, 1999.
- [31] YOHO, J. **Physically-Based Realizable Modeling and Network Synthesis of Subscriber Loops Utilized in DSL Technology**. 2001. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Virginia Polytechnic Institute, Virginia, EUA.
- [32] BOETS, P.; BIESSEN, L. V. Metallic 2-Wire Parametric Line Models - A Survey. In: IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2006.
- [33] BORGES, G. et al. **Cable Parameters Identification for DSL Systems**. In: IEEE EUROCON - INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AS A TOOL, 2011, Lisboa, Portugal. **Proceedings...** Piscataway, NJ, EUA: IEEE, 2011. p. 1-4.
- [34] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION - ITU. **G.996.1 - Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers**. Geneva, Switzerland, 2001.
- [35] FURSE, C. et al. A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults. **Smart Structures and Systems**, Yuseong, Daejeon, Korea, v. 2, n. 1, p. 25-46, 2006. ISSN 1738-1584.
- [36] HAYKIN, S.; VAN VEEN, B. **Signals and Systems**. 2. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 0471164747.
- [37] AGILENT TECHNOLOGIES. **Time Domain Analysis Using a Network Analyzer**. Santa Clara, Califórnia, EUA, 2007. 48 p.
- [38] OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. Upper Saddle River, New Jersey, EUA: Prentice-Hall, 1989.
- [39] AGILENT TECHNOLOGIES. **Time domain reflectometry theory**. Santa Clara, Califórnia, EUA, 2006. 16 p.

- [40] LIMA, V. **Análise de singularidades para detecção e localização de ecos em reflectogramas de TDR a partir dos máximos do módulo da transformada wavelet analítica**. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, Pará.
- [41] NEUS, C. et al. Fault Detection on Critical Instrumentation Loops of Gas Turbines With Reflectometry. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, NJ, EUA, v. 58, n. 9, p. 2938-2944, set. 2009. ISSN 0018-9456.
- [42] MALLAT, S.; ZHONG, S. Characterization of signals from multiscale edges. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, NJ, EUA, v. 14, p. 710-732, jul. 1992. ISSN 01628828.
- [43] MALLAT, S. **a Wavelet tour of signal processing**. Londres, Reino Unido: Academic Press, 1998.
- [44] DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. **Pattern Classification**. 2nd edition. ed. Hoboken, NJ, EUA: Wiley-Interscience, 2000.
- [45] WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A. **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques**. San Francisco, CA, EUA: Morgan Kaufmann, 2011.