



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

Francisco Marks da Cruz

**SIMULADOR DIDÁTICO DE ONDAS
VIAJANTES PARA DIFERENTES
TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

MOSSORÓ
2017

Francisco Marks da Cruz

**SIMULADOR DIDÁTICO DE ONDAS
VIAJANTES PARA DIFERENTES
TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Mestrado em 2017 do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Área de Concentração: Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador:

Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura

MOSSORÓ

2017

Francisco Marks da Cruz

Simulador Didático de Ondas Viajantes para Diferentes Topologias de Sistemas de Potência

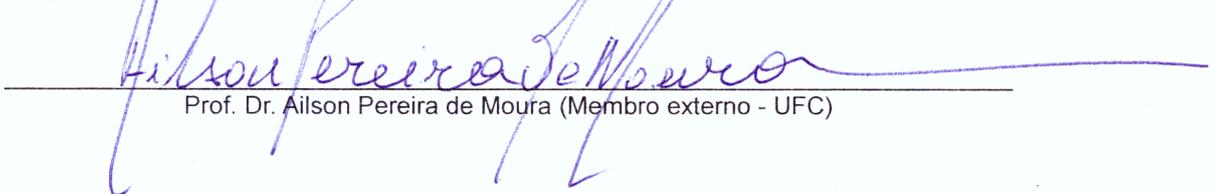
Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação Sistemas de Automação e Controle da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em cumprimento com as exigências legais para obtenção do título de Mestre.

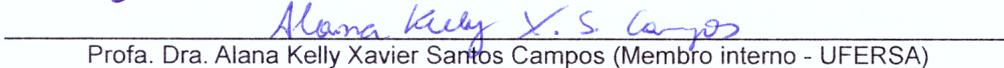
Área de Concentração: Sistemas de Comunicação e Automação

Aprovado em: 10 / 03 / 2017

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (Presidente e Orientador - UFERSA)


Prof. Dr. Ailson Pereira de Moura (Membro externo - UFC)


Profa. Dra. Alana Kelly Xavier Santos Campos (Membro interno - UFERSA)

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C955s Cruz, Francisco Marks da.
Simulador Didático de Ondas Viajantes Para
Diferentes Topologias de Sistemas de Potência /
Francisco Marks da Cruz. - 2017.
97 f. : il.

Orientador: Dr. Adriano Aron Freitas de Moura.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Sistemas de Comunicação e Automação, 2017.

1. Ondas viajantes. 2. GUIDE do MATLAB. 3.
Simulação Computacional. 4. Animação no MATLAB. I.
Freitas de Moura, Dr. Adriano Aron , orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha fiel companheira Amanda Franklin, ao meu pai e à minha mãe, Marquinhos Cruz e Alectsandra Caetano.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido mais do que eu mereço.

Em segundo lugar à minha esposa por estar sempre ao meu lado durante toda a elaboração desta dissertação, sendo o meu braço direito, fazendo tudo que estava ao seu alcance para que eu alcançasse o êxito.

Ao meu pai e minha mãe, por me ensinarem os valores da vida e por todo suporte dado.

À minha vó Creuza Marques por todo o carinho e dedicação que sempre teve por mim.

Ao meu colega de trabalho Magno Costa, por todo apoio.

Ao meu orientador, Adriano Aron, por ter disposição, paciência e pela sua grande compreensão frente a cada desafio alcançado durante a elaboração deste trabalho e pelo grande suporte fornecido sempre que necessário.

Aos colegas de mestrado que participaram de cada etapa.

À UFERSA por me proporcionar esse mestrado na condição de servidor.

Agradeço à coordenação do mestrado, professores, técnicos e todos que de alguma forma contribuíram para que tudo seguisse perfeitamente.

Ao Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior por todos esclarecimentos e orientações prestadas ao longo desse período e pela sua imensa disposição em ajudar sempre que possível.

À professora Dra. Alana Campos por aceitar participar da banca e ajudar com sua visão sobre como melhorar o trabalho.

Ao examinador externo, Prof. Dr. Ailson Pereira de Moura, pela disposição em participar da banca examinadora.

”Tudo quanto te vier à mão para fazer, faze-o conforme as tuas forças, porque na sepultura, para onde tu vais, não há obra nem projeto, nem conhecimento, nem sabedoria alguma.”

Eclesiastes 9:10

Resumo

O modelo de educação nas últimas décadas vem sofrendo alterações consideráveis do ponto de vista didático. Com o avanço da tecnologia, a velocidade da obtenção de informações aumenta e a utilização de ferramentas que possibilitem a visualização dinâmica do conteúdo se faz um forte aliado ao processo ensino-aprendizado. Esse trabalho aborda a criação de uma ferramenta interativa para a visualização da propagação de ondas viajantes em um sistema elétrico de potência, com a possibilidade de inserção de dados por parte do usuário, afim de facilitar a consolidação do conhecimento. O modelo foi criado a partir do GUIDE do Matlab® , que possui uma interface gráfica com a possibilidade de inserção de dados em uma única tela com botões de ação, que ao serem clicados realizam ações como calcular e mostrar o gráfico animado. É importante destacar que a criação do programa além de facilitar a compreensão por parte do aluno, devido à animação, também possibilita uma maior familiarização com *softwares* de simulação computacional, e com os parâmetros utilizados na análise do transitório em linhas de transmissão.

Palavras-chave: Ondas Viajantes. GUIDE do MATLAB®. Simulação computacional. Animação no MATLAB®.

Abstract

The model of education in the last decades has undergone considerable changes from a didactic point of view. With the advancement of technology, the speed of obtaining information increases and the use of tools that allow the dynamic visualization of content becomes a strong ally to the teaching-learning process. This work deals with the creation of an interactive tool to visualize the propagation of traveling waves in an electric power system, with the possibility of insertion of data by the user, in order to facilitate the consolidation of knowledge. The model was created from the GUIDE of Matlab®, which has a graphical interface with the possibility of inserting data into a single screen with action buttons, which when clicked performs actions like calculate and display the animated graphic. It is important to highlight that the creation of the program, besides facilitating the student's understanding, due to the animation, also allow a better familiarization with computer simulation software, and with the parameters used in the transient analysis in transmission lines.

Keywords: Traveling waves. MATLAB GUI. Computer simulation. Animation in MATLAB.

Lista de Figuras

2.1	Modelo de Linha Curta	7
2.2	Modelo de Linha Média - (Circuito π Nominal)	8
2.3	Diagrama Simplificado de Uma Linha Longa	9
3.1	Linha de transmissão monofásica	14
3.2	Método das imagens	14
3.3	Linha semi-infinita	18
3.4	Excitação da linha semi-infinita	19
3.5	Linha semi-infinita orientada no sentido positivo de x	20
3.6	Deslocamento de $f(t)$	21
3.7	Cabo coaxial.	23
3.8	Descontinuidade em linhas de transmissão.	24
3.9	Tensões nos pontos de descontinuidade.	25
3.10	Tensões nos pontos de descontinuidade (antes e depois).	28
3.11	Análise da onda viajante em uma linha com terminal aberto.	29
3.12	Análise da onda viajante em uma linha com terminal em curto-circuito.	30
3.13	Linha excitada com tensão senoidal.	31
3.14	Diagrama do circuito.	32
3.15	Diagrama de Lattice.	33
3.16	Diagrama de Lattice - resolução	35
3.17	Diagrama de Lattice para o estudo de localização de faltas	36
4.1	Configuração 1 - Duas barras e única geração.	40
4.2	Configuração 1 - Modelo para dedução matemática.	40
4.3	Configuração 2 - três barras arranjadas em série com única geração.	41
4.4	Configuração 2: modelo para dedução.	42
4.5	Configuração 3 - três barras com única alimentação.	43
4.6	Configuração 3: três barras com única alimentação - modelo para dedução matemática.	44

4.7	Configuração 4 - Quatro barras em arranjo misto com única geração. . .	45
4.8	Configuração 4: Quatro barras em arranjo misto com única geração - modelo para dedução matemática.	46
4.9	Parte da Tela do Simulador - Configuração Completa	48
5.1	Prototipagem em papel para o programa	52
5.2	Print Screen do <i>Quick Start</i> do GUIDE - Inicialização Rápida	53
5.3	Processo de Criação de uma GUIDE	54
5.4	Tela inicial de uma GUIDE	55
5.5	Ferramentas Básicas de uma GUIDE	56
5.6	Exemplo contendo as principais ferramentas de uma GUIDE.	57
6.1	Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 1.	60
6.2	Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 2.	61
6.3	Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 3.	62
6.4	Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 4.	62
7.1	Modelo final do simulador de ondas viajantes	63
7.2	Dados de entrada	64
7.3	Circuito modelo para $t = 0$	65
7.4	Onda viajante entre barra 1 e 2 - primeira reflexão	67
7.5	Onda viajante entre barra 1 e 2 - segunda reflexão	67
7.6	Onda viajante entre barra 1 e 2 - terceira reflexão	68
7.7	Onda viajante entre barra 1 e 2 - quarta reflexão	68
7.8	Onda viajante entre barra 1 e 2 - quinta reflexão	69
7.9	Inserção de dados no simulador.	72
7.10	Primeira reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	73
7.11	Segunda reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	73
7.12	Terceira reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	74
7.13	Quarta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	74
7.14	Quinta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	75
7.15	Sexta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.	75

Lista de Tabelas

3.1	Deslocamento de $f(t)$ e direção ao ponto $x = l$	20
3.2	Deslocamento de $f(t)$ em direção ao ponto $x = -l$	21
7.1	Nível de tensão da onda viajante para reflexões sucessivas para a configuração 1 do simulador.	66
7.2	Dados de Entrada	69
7.3	Análise comparativa entre ondas viajantes na Configuração 3	72

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problema e Hipótese do Trabalho	2
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Justificativa	4
1.4	Metodologia	4
1.5	Objetivos	5
1.5.1	Gerais	5
1.5.2	Específicos	5
2	MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	6
2.1	Linha curta	6
2.2	Linha Média	7
2.3	Linha Longa	8
3	PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS MONOFÁSICAS	13
3.1	Equacionamento Básico	16
3.1.1	Linhas Com Perdas	16
3.1.2	Linhas Sem Perdas	16
3.2	Propagação de Ondas em Descontinuidades	23
3.2.1	Linhas com Impedâncias Características Diferentes	23
3.2.2	Terminal de Linha em Circuito Aberto	28
3.2.3	Terminal de Linha em Curto-Circuito	29
3.3	Terminal de Linha com Impedância	30
3.3.1	Terminal Puramente Resistivo	30
3.3.2	Terminal Puramente Indutivo	31
3.4	Diagrama de Treliças (Lattice)	32
3.4.1	Aplicação em Sistemas de Potência	36
3.5	Regime Permanente em Linhas de Transmissão	37

4	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR	39
4.1	Recursos Utilizados	39
4.2	Definição dos Modelos	39
4.3	Configurações dos Sistemas	40
4.3.1	Configuração 1	40
4.3.2	Configuração 2	41
4.3.3	Configuração 3	43
4.3.4	Configuração 4	45
4.3.5	Simulador Completo	48
5	INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO	50
5.1	As Três Fases Antes da Criação de uma GUIDE	50
5.1.1	Análise	51
5.1.2	<i>Design</i>	51
5.1.3	Protótipo no Papel	51
5.2	Elementos de Controle da Interface de Usuário	52
5.3	Criação de uma GUIDE	53
6	MATERIAIS E MÉTODOS	58
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
7.1	Configuração 1 - Linha 1-2	64
7.2	Configuração 3 - Linha 1-2	69
8	CONCLUSÕES	76
9	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
A	CÓDIGO PARA ATIVAR PAINEL DE ACORDO COM SELEÇÃO DO BOTÃO DE CONFIGURAÇÃO	81

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O comportamento das faltas ou chaveamentos iniciados no transitório em sistemas de potência é extremamente importante, não apenas do ponto de vista da proteção, controle e qualidade da energia, mas sobretudo do ponto de vista de propostas educacionais.

Os conceitos de ondas viajantes podem ser melhor compreendidos usando técnicas de animação gráfica, que ajudam a explicar o complexo comportamento espaço-tempo de ondas viajantes durante faltas ou outras perturbações.

Embora na maior parte do tempo os sistemas de potência encontrem-se em regime permanente, é necessário que eles suportem a pior situação à qual possa se sujeitar, normalmente encontrada durante situações de transitório.

Segundo Simões (2012) há duas maneiras de estudo dos transitórios em sistemas elétricos de potência:

- Simulação analógica: o sistema é representado por Analisadores de Transitório de Redes (TNA's - *Transient Network Analyzer*), o qual é uma reprodução física em escala reduzida dos componentes do sistema de potência;
- Simulação computacional: os componentes do sistema de potência são representados através de modelos matemáticos implementados computacionalmente.

A utilização dos TNA's requer espaço, componentes físicos e pessoas com treinamento específico, o que do ponto de vista financeiro, é bastante custoso para sistemas de grande porte. Além disso, há uma dificuldade em se representar com um bom nível de fidelidade a dependência da frequência de todos os componentes.

Por outro lado, a simulação computacional requer um espaço físico e equipamentos bem menos custosos. As simulações são mais flexíveis do que dos TNA's, uma vez que componentes novos podem ser adicionados ao sistema sem custos adicionais, tão

somente pela inserção de um modelo matemático adequado. A qualidade da simulação dependerá dos modelos matemáticos utilizados, e sua velocidade de processamento será diretamente ligada à capacidade de processar os dados.

Alguns modelos são inseridos de forma simplificada, a fim de tornar mais rápida as simulações, e o desenvolvimento de métodos matemáticos através de soluções numéricas vem reduzindo consideravelmente o tempo de simulação, mesmo para sistemas de grande porte.

De maneira geral, os simuladores de transitórios eletromagnéticos fornecem soluções numéricas para as tensões nas barras dos sistemas de potência. Os detalhes de tensão durante esse instante pode ser revelado através da representação de cada valor em função do tempo. Segundo Evrenosoglu Ali Abur (2006) a variação de tensão através de uma linha de transmissão, vista como perfil de tensão, não é geralmente calculada. Uma vez que a tensão terminal é conhecida como função do tempo, o comportamento da tensão pode ser obtido através da teoria de ondas viajantes. O cálculo da tensão para cada passo da simulação, permite que o usuário observe a variação ao longo do tempo.

1.1 Problema e Hipótese do Trabalho

O estudo das ondas viajantes em Sistemas Elétricos de Potência é de suma importância na proteção, controle de qualidade de sistemas de energia e localização de faltas em linhas de transmissão. A solução dos problemas relacionados às ondas viajantes normalmente é dada por aproximações numéricas, visto que a obtenção de respostas mais precisas requer uma grande capacidade computacional e envolve cálculos de alta complexidade como sistemas de equações diferenciais.

O problema visa à criação de um modelo educacional que possibilite a visualização da propagação da onda viajante no período transitório através de uma animação gráfica, na qual o usuário poderá entrar com dados diretamente na tela ou através de um arquivo auxiliar para inserção dos dados, haja vista que os principais programas que trabalham com transitórios de sistemas de potência não mostram as ondas viajantes no domínio do tempo.

O trabalho foi realizado no Matlab ®, através do GUIDE (interface gráfica), que mostra em sua tela inicial quatro configurações que variam de duas à quatro barras com uma única geração em diferentes topologias. O programa lê os dados de entrada direta do usuário inseridas nos campos específicos. Então, com os dados gravados no programa, será criado um gráfico animado mostrando o comportamento da onda via-

jante no transitório, a fim de tornar didática a compreensão da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão.

1.2 Revisão Bibliográfica

A animação gráfica das ondas viajantes entre as barras foi inserida dentro da ferramenta GUIDE com a finalidade de tornar a propagação mais visual e compreensível. Para isso foram levadas em consideração as experiências didáticas obtidas com *softwares* similares utilizados em sala de aula, voltados para estudantes de graduação, porém com um sistema alta frequência e foco em transmissão de sinais, embasados nos artigos "*Animating Transmission-Line Transients With BOUNCE*" de 2003; "*Teaching Transmission Line Transients Using Computer Animation*" de 1999, ambos de autoria de Christopher W, Trueman, publicados no IEEE, conforme pode referências Trueman (2003) e Trueman (1999); "*Three Dimensional Visualization and Animation of Traveling Waves in Power Systems*", de Cansin Y. Evrenosoglu, Ali Bur e Ergun Akleman, publicado em 2006 na revista ScienceDirect, Evrenosoglu Ali Abur (2006).

Os dois primeiros artigos supracitados trazem uma perspectiva didática do ensino de linhas de transmissão utilizando software, entretanto no artigo mais antigo (1999), a experiência, do ponto de vista didático, não foi bem absorvida pelos alunos, visto que as animações não possuíam uma interação, ou seja, não era possível alterar os dados de entrada, logo o sistema continuava de difícil compreensão e possuía uma didática desinteressante. No segundo artigo, já em 2003, Trueman muda a estratégia e proporciona um pouco mais de interação, pois os alunos já poderiam selecionar diversas configurações dentro do software e ver as animações. Neste caso o retorno obtido pelo professor em sala de aula foi mais positivo, entretanto ainda não é possível o usuário inserir todos os dados e observar o código fonte.

Além dos artigos, no levantamento bibliográfico será utilizada a Dissertação de Mestrado "*Transmission Line Modeling For Real-Time Simulations*" de SIMÕES, 2012, do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal; e o livro que tratará dos conceitos de propagação de ondas em linhas monofásicas, que será a base para o equacionamento matemático é o "*Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*", de Zanetta Júnior, 2003.

A proposta deste trabalho é permitir que o usuário possa inserir todos os dados referentes às características das linhas de transmissão, para além de ter a intimidade com o problema, ele consiga visualizar o comportamento da propagação das ondas viajantes entre as barras.

1.3 Justificativa

A cada dia percebe-se um aumento na velocidade de aquisição da informação. A internet proporciona a conexão quase instantânea de acontecimentos em todo o globo. Dentro desta perspectiva, os computadores e dispositivos portáteis são responsáveis por grande parcela da disseminação de informações. A interatividade com softwares pode ser aliada ao processo ensino-aprendizado. Dentro desta perspectiva, a criação de uma interface gráfica com a possibilidade de inserção de dados diretamente pelo usuário, com animações mostrando o comportamento das ondas viajantes em um sistema elétrico, se mostra uma alternativa didática e bastante auxiliar tanto na apresentação de um novo conteúdo quanto na consolidação do conhecimento.

Devido ao nível de complexidade do equacionamento das linhas de transmissão, pelo fato de envolver sistemas de equações diferenciais, a possibilidade da criação de uma ferramenta didática no âmbito da engenharia se faz não só útil, mas necessária ao aprendizado.

O conceito de ondas viajantes pode ser melhor entendido se utilizadas técnicas de visualização. A animação é um dos métodos que podem ajudar a explicar o complexo comportamento espaço-tempo de ondas viajantes durante faltas ou distúrbios. Os programas de simulação no domínio do tempo calculam somente o a tensão nos terminais da linha, entretanto uma animação do transitório possibilita a visualização através da linha (EVRENOSOGLU ALI ABUR, 2006).

1.4 Metodologia

A elaboração dessa dissertação iniciou com uma pesquisa bibliográfica a respeito de sistemas de potência em corrente alternada, evidenciando o princípio de funcionamento desse método de transmissão, com foco nas ondas viajantes durante o transitório eletromagnético, bem como em seus conceitos de propagação. Embora o tratamento matemático esteja solidificado nas equações de Maxwell, neste trabalho será abordado um procedimento simplificado desse fenômeno, baseado na representação de linhas de transmissão pelos parâmetros distribuídos.

A representação por este método é baseada na quantidade de energia armazenada no campo magnético de uma indutância por unidade de comprimento e, também, pela energia armazenada na forma de campo elétrico em uma capacitância, de igual modo, por unidade de comprimento (ZANETTA, 2003).

O estudo de linhas monofásicas é interessante do ponto de vista didático, pois in-

introduz os conceitos iniciais para uma posterior compreensão mais aprofundada dos circuitos trifásicos.

Posteriormente será feito um estudo sobre as ferramentas do Matlab[®], especificamente sobre o GUIDE presente neste software, que se utiliza de uma técnica chamada "*Handle Graphics Objects*" (Manipular Objetos Gráficos, numa tradução livre), que por sua vez é similar às técnicas de linguagens orientadas ao objeto.

1.5 Objetivos

1.5.1 Gerais

Estudar, analisar e tornar didática a compreensão do ensino do comportamento de ondas viajantes em linhas de transmissão durante o transitório através da criação de um programa com interface gráfica animada, visto que o problema, do ponto de vista matemático, possui alta complexidade e não há um programa gratuito e didático otimizado para a análise desse efeito em linhas de transmissão.

1.5.2 Específicos

- Modelar configurações discretas de sistemas de potência com única geração;
- Criar uma interface gráfica na qual o usuário possa inserir os dados referentes ao sistema;
- Criar uma animação do comportamento das ondas viajantes entre as barras emisoras e receptoras durante o transitório;
- Tornar didática a compreensão dos conceitos de ondas viajantes em linhas de transmissão através do programa criado.

Capítulo 2

MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ao ser percorrida por corrente alternada, uma linha de transmissão (LT) sofre queda de tensão em seus terminais devido a impedância oferecida pela linha. Desta forma existem três modelos mais difundidos que oferecem aproximações para três situações construtivas, baseadas no comprimento e nível de tensão da LT.

2.1 Linha curta

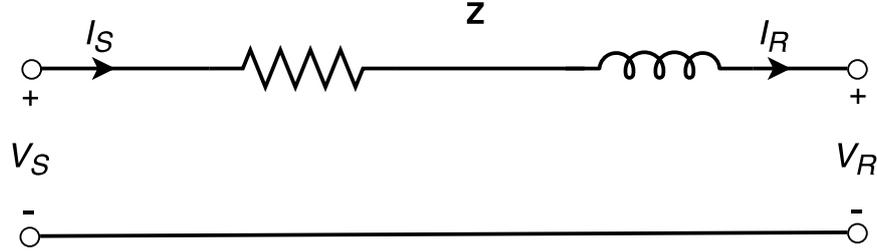
Uma linha de transmissão é considerada curta quando possui comprimento inferior a 80 km, ou se seu nível de tensão máximo é de 69 kV (SAADAT, 1999). Neste modelo a capacitância pode ser desconsiderada sem a incorrência de erros consideráveis. A impedância da linha pode ser obtida multiplicando-se a impedância série por unidade pelo comprimento da linha, conforme (2.1). Normalmente o valor da impedância por unidade de comprimento é tabelado ou fornecido pelo fabricante da LT.

$$Z = (r + j\omega L)l \quad (2.1)$$

$$Z = R + jX \quad (2.2)$$

No qual r e L são a resistência e a indutância por fase por unidade de comprimento, respectivamente, e l o comprimento da linha. O modelo de linha curta é mostrado na Figura 2.1. O subíndice "S" representa os valores enviados (*sending*), ou seja, os valores disponibilizados à linha, seja de corrente, tensão ou potência. Já o subíndice "R" é utilizado devido ao termo em inglês "*receiving*", ou seja, recebido, que é o valor verificado na carga.

Figura 2.1: Modelo de Linha Curta



Fonte: Adaptado de Glover et al. (2012), p. 248.

De acordo com as Leis de Kirchoff, após a análise da malha, pode-se chegar à formulação básica das linhas curtas:

$$V_s - Z \cdot I_R - V_R = 0 \quad (2.3)$$

$$V_S = Z \cdot I_R + V_R \quad (2.4)$$

Através da análise da Figura 2.1 é possível perceber que, para essa aproximação, a corrente disponibilizada é igual à recebida - conforme Equação 2.5, uma vez que a capacitância *shunt* é desprezada. A corrente " I_R " foi conveniente escolhida no lado direito da Equação 2.4 para explicitar os parâmetros no receptor como um resultado do disponibilizado à linha.

$$I_S = I_R \quad (2.5)$$

Se uma carga trifásica com potência aparente $S_{R(3\phi)}$ é conectada ao fim da LT, a corrente recebida no fim da linha pode ser obtida através da Equação 2.6:

$$I_R = \frac{S_{R(3\phi)}^*}{3V_R^*} \quad (2.6)$$

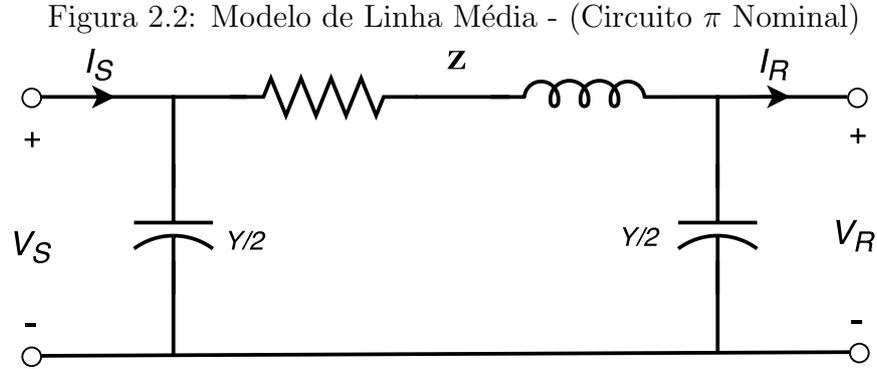
As Equações 2.4 e 2.5 podem ser representadas através do quadripolo ABCD conforme Equação 2.7.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2 Linha Média

Conforme o comprimento da linha aumenta, as mudanças na corrente se tornam consideráveis e a capacitância *shunt* deve ser considerada. Segundo Glover et al. (2012) uma LT é considerada média quando seu comprimento está entre 80 e 250 km à 60 Hz. Neste caso é comum utilizar uma impedância capacitiva dividida nas duas extremidades

da linha. Essas impedâncias são normalmente expressas em termos de admitâncias. O circuito equivalente, chamado de "circuito π nominal", é mostrado na Figura 2.2.



Fonte: Adaptado de Stevenson (1975), p. 98.

A partir das Leis de Kirchoff e analisando a Figura 2.2:

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \quad (2.8)$$

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (2.9)$$

Para deduzir I_S , deve ser levado em consideração que a corrente na capacitância em derivação na barra transmissora é $\frac{V_S Y}{2}$, que somada à corrente no ramo em série resulta em:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.10)$$

Substituindo 2.9 em 2.10 e explicitando a equação em termo de V_R e I_R , tem-se que:

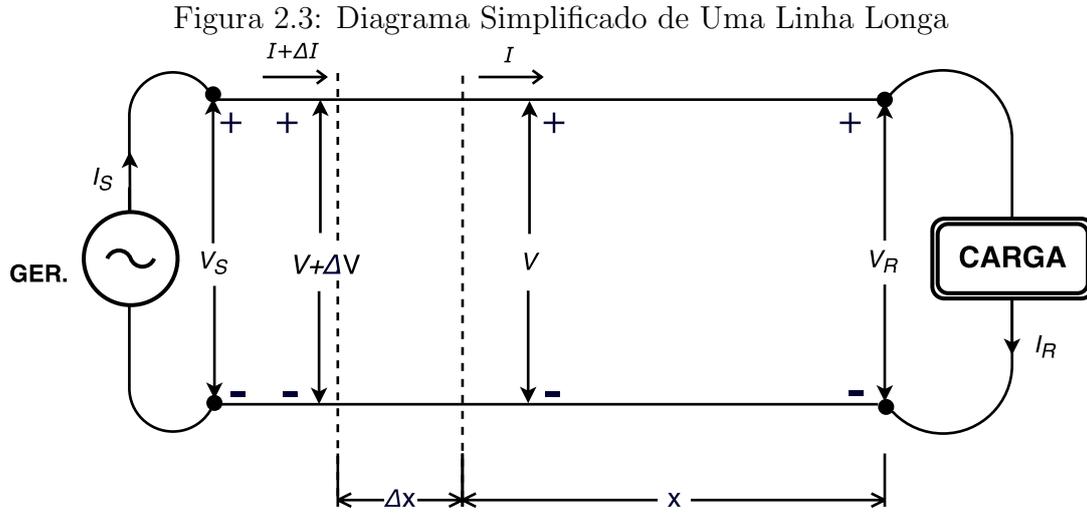
$$I_S = \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) Y V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) I_R \quad (2.11)$$

Representando as equações 2.9 e 2.11 através do quadripolo ABCD, obtém-se 2.12.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ (1 + \frac{ZY}{4})Y & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3 Linha Longa

O modelo de linha longa, ou parâmetros distribuídos, conforme Figura 2.3, considera que as características capacitivas e indutivas não são como no caso das linhas médias, concentrados nas extremidades.



Fonte: Adaptado de Stevenson (1975), p. 100.

Segundo Stevenson (1975) para a solução exata de qualquer linha de transmissão deve-se considerar que os parâmetros estão distribuídos uniformemente e não concentrados, conferindo um alto grau de precisão para linhas de 60 Hz com mais de 250 km de comprimento. Seja considerado um elemento muito pequeno da linha e tomada a diferença de tensão e de corrente entre duas extremidades desse elemento. Seja x a distância medida a partir da barra receptora até o pequeno elemento da linha cujo comprimento é Δx . Então $z\Delta x$ será a impedância em série, e $y\Delta x$ a admitância *shunt* do elemento da linha.

A tensão entre linha e neutro na extremidade do elemento do lado da carga é V , que é a expressão complexa do valor eficaz da tensão, cujas amplitude e fase variam de acordo com a distância ao longo da linha. A tensão na extremidade do lado do gerador é $V + \Delta V$. A elevação de tensão neste elemento da linha no sentido do crescimento de x é ΔV , que é a tensão na extremidade do lado do gerador menos a tensão do lado da carga. Esta elevação de tensão é também o produto da corrente que circula em direção oposta ao crescimento de x pela impedância do elemento, ou $Iz\Delta x$. Então:

$$\Delta V = Iz\Delta x \quad (2.13)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta x} = Iz \quad (2.14)$$

Quando $\Delta x \rightarrow 0$, o limite do quociente 2.14 se torna:

$$\frac{dV}{dx} = Iz \quad (2.15)$$

Da mesma forma, a corrente que flui para fora do elemento no lado da carga é I . A amplitude e a fase da corrente I variam com a distância ao longo da linha, devido à admitância em derivação distribuída pela mesma.

A corrente que flui para dentro do elemento, do lado do gerador, é $I + \Delta I$. A corrente que entra no elemento pelo lado do gerador é maior do que a que sai pelo lado da carga de uma quantidade ΔI . Esta diferença de corrente é a corrente $Vy\Delta x$ que flui pela admitância em derivação do elemento. Portanto:

$$\Delta I = Vy\Delta x \quad (2.16)$$

Através dos passos seguidos em 2.13 e 2.14, obtém-se o seguinte:

$$\frac{dI}{dx} = Vy \quad (2.17)$$

Derivando 2.15 e 2.16 em relação a x :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad (2.18)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad (2.19)$$

Se substituídos os valores de dI/dx e dV/dx das equações 2.15 e 2.16 nas Equações 2.18 e 2.19, respectivamente, chega-se a:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yzI \quad (2.21)$$

Como V e I são função de x , há duas equações diferenciais de segunda ordem, cujas soluções são dadas por:

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.22)$$

onde " γ " é conhecido como "constante de propagação", e é representada através da seguinte expressão complexa:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad (2.23)$$

A parte real α é conhecida como constante de atenuação, e a parte imaginária β por conhecida como constante de fase, sendo dada em radiano por unidade de comprimento.

A partir de 2.17 é determinada a corrente:

$$I(x) = \frac{\gamma}{z} \cdot \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} \cdot (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.24)$$

Substituindo γ por \sqrt{zy} , conforme 2.23, $I(x)$ assume a seguinte forma:

$$I(x) = \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.25)$$

Desta forma, como Z_C , conhecida como impedância característica é dada por:

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (2.26)$$

A corrente pode ser expressa em função da impedância característica, conforme 2.27

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.27)$$

De posse das soluções algébricas das equações diferenciais, surge o problema do valor inicial. Será adotado, então, para $x = 0$ que $V = V_R$ e $I = I_R$. Substituindo esses valores em 2.22 e 2.24 obtém-se o seguinte:

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (2.28)$$

e

$$I_R = \frac{I}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2) \quad (2.29)$$

Após a solução dessas equações nos termos A_1 e A_2 e uma transformação de equação para a forma hiperbólica, as novas equações que representam tensão e corrente ao longo da linha são:

$$V = V_R \cdot \cosh \gamma x + I_R \cdot Z_C \cdot \sinh \gamma x \quad (2.30)$$

$$I = I_R \cdot \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \cdot \sinh \gamma x \quad (2.31)$$

Para $x = l$, obtém-se a tensão e corrente na barra transmissora:

$$V_S = V_R \cdot \cosh \gamma l + I_R \cdot Z_C \cdot \sinh \gamma l \quad (2.32)$$

$$I_S = I_R \cdot \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_C} \cdot \sinh \gamma l \quad (2.33)$$

Examinando as equações 2.32 e 2.33 percebe-se que as constantes generalizadas da linha longa são:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\gamma l & Z_C \cdot \sinh\gamma l \\ \frac{1}{Z_C} \cdot \sinh\gamma l & \cosh\gamma l \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

O modelo de linha longa é aplicável aos modelos mencionados anteriormente (de linha curta e média) quando aplicadas as devidas considerações matemáticas, visto que se trata do modelo mais completo para representação de linhas de transmissão (STEVENSON, 1975).

Capítulo 3

PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS MONOFÁSICAS

Neste capítulo serão abordados os fenômenos transitórios a partir dos conceitos de propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão.

Apesar de o tratamento matemático mais preciso ser definido pelas equações de Maxwell, aqui será abordado um procedimento mais simplificado para a abordagem do fenômeno, visto que, a análise terá um cunho educacional.

A linha de transmissão será aqui representada pelo modelo com parâmetros distribuídos, conforme Capítulo 2, Seção 2.3, a qual possui uma energia armazenada na forma de campo magnético, associada à uma indutância por unidade de comprimento (L') e outra parcela armazenada na forma de campo elétrico, devido à uma capacitância, também dada por unidade de comprimento, representada por (C').

Feita a análise da linha por parâmetros distribuídos (linha longa), obtém-se uma equação de onda. Este trabalho tratará linhas monofásicas, que na verdade são uma abordagem inicial para a posterior compreensão dos fenômenos em linhas trifásica.

Segundo Zanetta (2003), o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão podem ser feitos pelo método das imagens, no qual é considerada a permeabilidade magnética e a permissividade do ar iguais às do vácuo.

A permissividade magnética no vácuo vale:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4} H/km \quad (3.1)$$

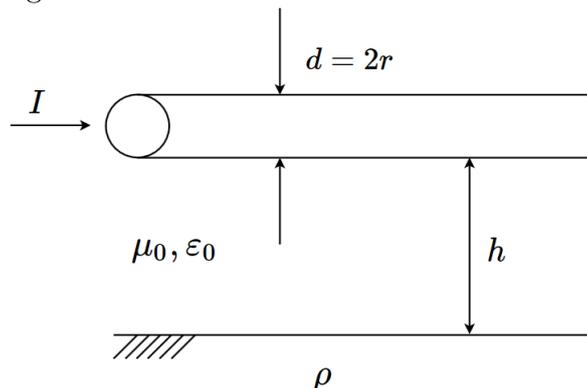
A permissividade no vácuo (constante dielétrica) é obtida a partir da expressão da velocidade da luz:

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} \quad (3.2)$$

Adotando a velocidade da luz como $c = 299792,5 \text{ km/s}$, encontra-se uma permissividade $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-3} \mu\text{F/km}$.

Admitindo-se um condutor uniforme sem perdas, a indutância e a capacitância distribuídas de uma linha de transmissão, conforme Figura 3.1, são calculadas conforme as Equações 3.3 e 3.4.

Figura 3.1: Linha de transmissão monofásica



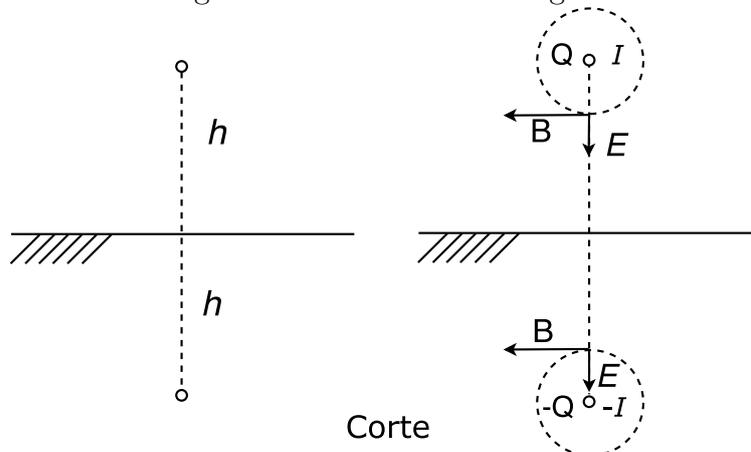
Fonte: Adaptado de Zanetta (2003), p. 148.

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad [\text{H/m}] \quad (3.3)$$

$$C' = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad [\text{F/m}] \quad (3.4)$$

Os campos elétrico e magnético a uma distância x do condutor, correspondentes a um circuito como o da Figura 3.2, são dados pelas Expressões 3.5 e 3.6, obtidas através das aplicações das leis de Gauss e de Ampère.

Figura 3.2: Método das imagens



Fonte: Adaptado de Zanetta (2003), p. 148.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (3.5)$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x} \quad (3.6)$$

Nesta análise foi considerado o método das imagens tendo vista a vantagem de considerar a influência do solo no cálculo do campo elétrico de forma analítica. Nele se considera um solo plano e de potencial nulo. No entanto, muitas vezes, o solo sob a linha de transmissão é irregular e tem obstáculos.

Par obter o fluxo externo ao condutor, concatenado com esta espira, supondo uma unidade de comprimento para o condutor, adota-se o seguinte:

$$\phi = \int_r^{2h} B dx = \int_r^{2h} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}. \quad (3.7)$$

Ao realizar a superposição com o fluxo da imagem do condutor, com corrente $-I$, o fluxo total concatenado obtido, desprezando o fluxo interno dos condutores, tem-se o dado em 3.8.

$$\phi_t = \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln \frac{2h}{r}. \quad (3.8)$$

A partir da substituição da Equação 3.3 na 3.7, a indutância do circuito por unidade de comprimento, pode ser dada por:

$$\phi_t = L' I. \quad (3.9)$$

A diferença de potencial entre os condutores é calculada da seguinte forma:

$$\Delta V_t = \int_r^{2h} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x} dx = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.10)$$

Realizando o mesmo procedimento adotado em 3.10 para a imagem $-Q$, é obtida a diferença de potencial total:

$$\Delta V_t = \frac{Q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}. \quad (3.11)$$

Então é possível realizar uma relação matemática direta com a capacitância, conforme Equação 3.12.

$$\Delta Q = C' \Delta V_t. \quad (3.12)$$

3.1 Equacionamento Básico

O equacionamento básico para ondas viajantes em linhas de transmissão monofásicas será composto nesta seção por duas abordagens: com e sem perdas.

3.1.1 Linhas Com Perdas

Nesta abordagem são considerados os efeitos capacitivos, indutivos e resistivos da linha de transmissão. A seção 2.3 trouxe essa abordagem considerando tais influências na dedução matemática da linha longa. Segundo Stevenson (1975) o estudo de surtos de qualquer natureza sobre linhas de transmissão é muito complexo, portanto é mais interessante fazer uma abordagem simplificada de linhas sem perdas.

3.1.2 Linhas Sem Perdas

Uma linha sem perdas é uma boa representação para linhas de alta frequência, nas quais ωL e ωC são muito maiores quando comparados à R e G , resistência e condutância da linha, respectivamente. Para surtos causados por descargas atmosféricas em um linha de transmissão, o estudo de uma linha sem perdas é uma simplificação que permite compreender alguns fenômenos de forma mais objetiva, apesar de representar uma aproximação.

Ao fazer a análise vista na Equação 2.3 através da Transformada de Laplace, são obtidas as seguintes equações para o perfil de tensão e corrente, respectivamente:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = (R' + sL')sC'V(x, s), \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = (R' + sL')sC'I(x, s). \quad (3.14)$$

Para esta aproximação, será suposto $R' = 0$, portanto ao substituir esse valor nas Equações 3.13 e 3.14, é encontrado o seguinte:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = s^2 L' C' V(x, s), \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = s^2 L' C' I(x, s). \quad (3.16)$$

A solução geral para a equação diferencial 3.15 é dada da seguinte forma:

$$V(x, s) = V^+(0, s)e^{-\gamma(s)x} + V^-(0, s)e^{+\gamma(s)x}, \quad (3.17)$$

sendo:

$$\gamma(s) = \sqrt{s^2 L' C'} = s \sqrt{L' C'}, \quad (3.18)$$

e a velocidade de propagação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}, \quad (3.19)$$

logo, a partir de 3.18 e 3.19, deduz-se que:

$$\gamma(s) = \frac{s}{v}, \quad (3.20)$$

A partir da Equação 3.17, em que $V^+(0, s)$ representa a transformada de Laplace de $V^+(0, s) = F(s)$, conhecida na origem (no ponto $x=0$). A partir dessa condição de contorno, é possível obter a onda em um ponto x qualquer da linha.

Para obter a solução temporal da Equação 3.17, basta aplicar a Transformada Inversa de Laplace, utilizando a propriedade de translação no tempo, como segue:

$$F(s)e^{sa} \leftrightarrow f(t + a), \quad (3.21)$$

fazendo a anti-transformada da equação 3.17, encontra-se a seguinte solução:

$$v(x, t) = v^+ \left(0, t - \frac{x}{v} \right) + v^- \left(0, t + \frac{x}{v} \right) \quad (3.22)$$

em que v^+ é uma onda que se propaga no sentido positivo de x (x crescente, onda progressiva) e v^- é uma onda que se propaga no sentido negativo de x (x decrescente, onda regressiva). A tensão total é obtida pela superposição das duas componentes. Analogamente para corrente:

$$I(x, s) = I^+(0, s)e^{-\gamma(s)x} + I^-(0, s)e^{+\gamma(s)x}, \quad (3.23)$$

resultando na seguinte solução temporal:

$$i(x, t) = i^+ \left(0, t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(0, t + \frac{x}{v} \right). \quad (3.24)$$

No caso em estudo, ou seja, de uma linha de transmissão aérea sem perdas, substituindo as Equações 3.3 e 3.4 em 3.19, tem-se que:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \cong 300000 \text{ km/s}, \quad (3.25)$$

que é aproximadamente a velocidade da luz.

Se analisada a propagação da onda em vários pontos do espaço, percebe-se que, com os argumentos dessas funções constantes:

$$t - \frac{x}{v} = cte. \quad (3.26)$$

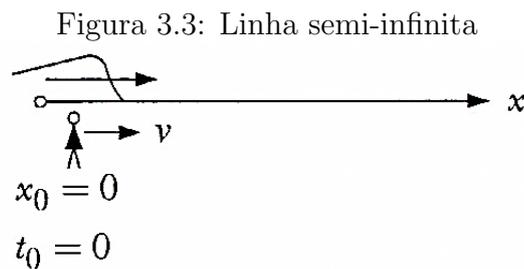
ou seja, serão obtidos os mesmos valores de v^+ , qualquer que seja a função.

Derivando a Equação 3.26 em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (3.27)$$

e conclui-se que a onda v^+ tem uma velocidade de propagação v no sentido positivo de x , pois, para um observador que se desloca a uma velocidade v a longo da linha de transmissão, observará sempre o mesmo valor de tensão, conforme Figura 3.3.

Supondo $t_0 = 0$ e $x_0 = 0$:



Fonte: Zanetta (2003), p. 152.

Para um dado ponto $x = 0$, como pode ser observado através da de uma simples substituição na Equação 3.26:

$$t - \frac{x}{v} = 0, \quad (3.28)$$

portanto o observador registrará $v^+(0, 0)$. Em um instante t qualquer, estando o observador na posição x ($x = vt$) e novamente se obtém 3.28.

Analogamente ao caso em que v é uma onda progressiva, é possível obter v^- , que é uma onda regressiva, ou seja, que se propaga no sentido negativo de x . Neste caso o "x" apresentará sinal oposto, e, ao aplicar na Equação 3.26, obtém-se o seguinte:

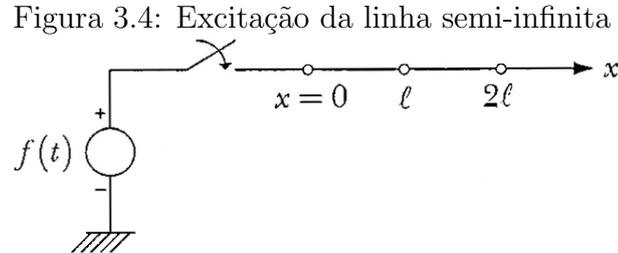
$$t + \frac{x}{v} = cte, \quad (3.29)$$

que, ao ser derivado em relação a t :

$$\frac{dx}{dt} = -v, \quad (3.30)$$

reafirmando que o deslocamento de v^- será no sentido negativo de x .

Se uma onda de tensão for aplicada ao ponto $x = 0$ de uma linha, usando um gerador de tensão com uma função $f(t)$ conhecida, conforme Figura 3.4.



Fonte: Zanetta (2003), p. 153.

A partir de uma análise das tensões em um ponto $x = l$ da linha na origem $x = 0$ sabendo que somente existem componentes progressivas e que o tempo de deslocamento da origem até o ponto dado é determinante por:

$$\tau = \frac{l}{v}, \quad (3.31)$$

Na origem, em $x = 0$, tomando a Equação 3.22, a função assumirá sempre o seguinte:

$$v(l, t) = v^+(0, t) = f(t). \quad (3.32)$$

Em $x = l$, novamente aplicando na Equação 3.22, é encontrado o que segue:

$$v(l, t) = v^+ \left(0, t - \frac{l}{v} \right) = f \left(t - \frac{l}{v} \right), \quad (3.33)$$

que atende aos casos em que t é maior ou igual a l/v , uma vez que o tempo deve ser maior ou igual a zero. A Equação 3.33 descreve uma onda progressiva deslocada no tempo em τ , resultando numa função de $f(t - \tau)$. Ou seja, no ponto inicial da linha, o valor da tensão observado será, tão somente função de t e de τ .

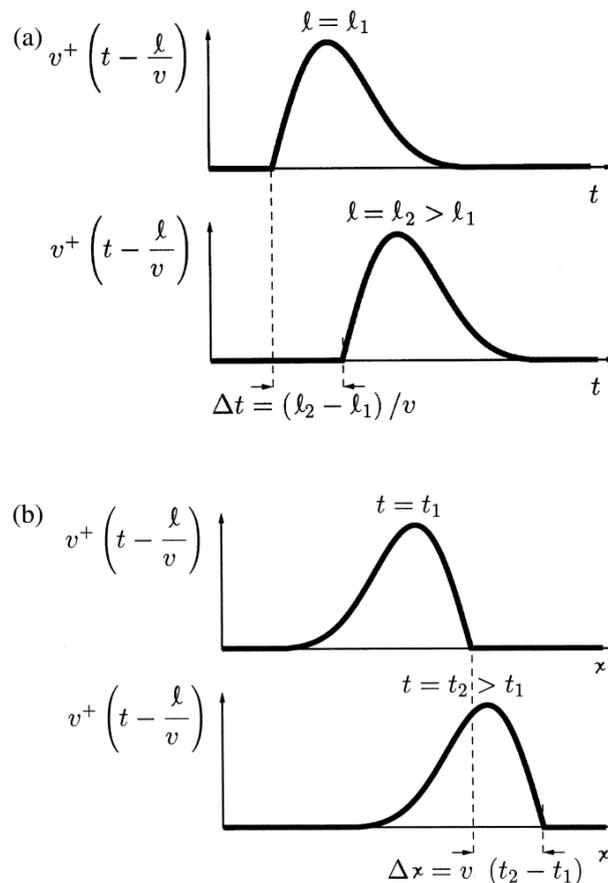
Tomando cinco instantes de tempo, escolhidos para facilitar a compreensão, e fazendo as devidas substituições matemáticas, foi possível construir a Tabela 3.1, que mostra o comportamento da tensão para os dados tempos, no ponto inicial da linha ($x = 0$) e para o fim da linha, em que $x = l$, desta forma, percebe-se claramente que no fim da linha há um deslocamento igual a l/v , ou seja τ .

Tabela 3.1: Deslocamento de $f(t)$ e direção ao ponto $x = l$.

tempo	$x = 0$	$x = l$
t	$v(0, t) = f(t) = v^+(0, t)$	$v^+(0, t - \frac{l}{v})$
0	$v(0, 0) = f(0)$	0
$\frac{l}{v}$	$v^+(0, \frac{l}{v}) = f(\frac{l}{v})$	$f(0) = v^+(0, 0)$
$\frac{2l}{v}$	$v^+(0, \frac{2l}{v}) = f(\frac{2l}{v})$	$f(\frac{l}{v}) = v^+(0, \frac{l}{v})$
$\frac{3l}{v}$	$v^+(0, \frac{3l}{v}) = f(\frac{3l}{v})$	$f(\frac{2l}{v}) = v^+(0, \frac{2l}{v})$
$\frac{4l}{v}$	$v^+(0, \frac{4l}{v}) = f(\frac{4l}{v})$	$f(\frac{3l}{v}) = v^+(0, \frac{3l}{v})$

Fonte: Adaptado de Zanetta (2003).

A Figura 3.5 exibe de forma mais intuitiva o deslocamento ocorrido em função $f(t)$ em direção ao ponto $x = l$ com atrasos múltiplos de τ .

Figura 3.5: Linha semi-infinita orientada no sentido positivo de x .

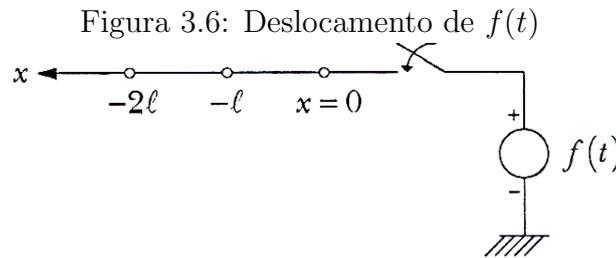
Fonte: Adaptado de Bansal (2006), p. 189.

Na Figura 3.5 é mostrada variação temporal e espacial para uma onda de tensão genérica $v^+(t - l/v)$, sendo em (a) dado enfoque ao deslocamento temporal e em (b) o espacial.

Se tomada uma linha semi-infinita orientada no sentido negativo, conforme Figura 3.6, em que o perfil de tensão é dado pela Equação 3.34,

$$v(x, t) = v^- \left(0, t + \frac{x}{v} \right), \quad (3.34)$$

percebe-se um comportamento análogo ao caso anterior, porém no sentido contrário.



Fonte: Zanetta (2003), p. 154.

A Tabela 3.2 exhibe o comportamento do deslocamento de $f(t)$ no sentido negativo de x , que apresenta um comportamento bastante similar ao do sentido positivo, observado na Tabela 3.1, apenas com o diferencial do sentido. Segundo Bansal (2006), uma solução

Tabela 3.2: Deslocamento de $f(t)$ em direção ao ponto $x = -l$.

tempo	$x = 0$	$x = -l$
t	$v(0, t) = f(t) = v^-(0, t)$	$v(-l, t) = v^-(0, t - \frac{l}{v})$
0	$f(0)$	0
$\frac{l}{v}$	$f(\frac{l}{v})$	$f(0)$
$\frac{2l}{v}$	$f(\frac{2l}{v})$	$f(\frac{l}{v})$
$\frac{3l}{v}$	$f(\frac{3l}{v})$	$f(\frac{2l}{v})$
$\frac{4l}{v}$	$f(\frac{4l}{v})$	$f(\frac{3l}{v})$

Fonte: Adaptado de Zanetta (2003).

correspondente para uma onda viajante senoidal é:

$$v(x, t) = v^+ \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \phi^+ \right] + v^- \cos \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) + \phi^- \right], \quad (3.35)$$

que pode ser dada simplificadamente da seguinte forma:

$$v(x, t) = v^+ \cos(\omega t - \beta x + \phi^-) + v^- \cos(\omega t + \beta x + \phi^+), \quad (3.36)$$

onde β é a constante de fase e é dada por:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.37)$$

e λ o comprimento de onda, dado em função da frequência f , dado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (3.38)$$

Uma vez que βx depende tanto do comprimento de onda quanto do da linha, ele é comumente expresso como "distância elétrica" ou "comprimento elétrico" θ , em que:

$$\theta = \beta x = 2\pi \frac{x}{\lambda}, \quad (3.39)$$

A correspondente solução para a equação da onda para a corrente com uma tensão $v(x, t)$, a partir da Equação 3.33 é dada da como segue:

$$i(x, t) = \frac{v^+(t - x/v)}{Z_0} - \frac{v^-(t + x/v)}{Z_0}, \quad (3.40)$$

em que o parâmetro Z_0 é definido como "impedância característica" da linha de transmissão e é dado em função da indutância e da capacitância da linha, conforme equação a seguir:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.41)$$

Segundo Bansal (2006), a impedância característica especifica a razão entre tensão e corrente para uma onda viajante, em geral, é função das propriedades físicas do condutor, ou seja, de suas dimensões, e também das propriedades magnéticas do material que o circunda.

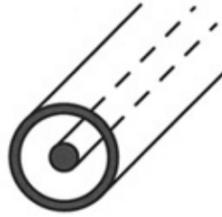
Como exemplo, para um cabo coaxial, considerando o diâmetro interno do condutor como d e o externo como D , conforme Figura 3.7, e um meio cuja constante dielétrica relativa seja ε_r . A indutância e capacitância distribuídas são dadas, respectivamente, por:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{d} \right), \quad (3.42)$$

e

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)}, \quad (3.43)$$

Figura 3.7: Cabo coaxial.



Fonte: Bansal (2006), p. 186.

Fazendo as devidas substituições das constantes e das Equações 3.42 e 3.43 em 3.41, é obtida a expressão para Z_0 , conforme equação a seguir:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad [\Omega] \quad (3.44)$$

3.2 Propagação de Ondas em Descontinuidades

Segundo Sluis (2001), quando uma onda eletromagnética se propaga através de uma linha de transmissão com determinada impedância característica, há uma relação fixa entre as ondas de tensão e corrente. Entretanto caso a onda se depare com uma descontinuidade, tais como um circuito aberto ou um curto-circuito, ou mesmo um ponto específico da linha em que sua impedância característica mude, ocorre um fenômeno diferenciado. Na descontinuidade, uma parte da energia segue através do outro meio e outra parte reflete e viaja de volta.

Ao verificar o comportamento de ondas de tensão e corrente ao encontrarem uma descontinuidade em um meio de propagação, dando ênfase às ondas de tensão, uma vez que elas são responsáveis pelas sobretensões em sistemas de potência, percebe-se que essas descontinuidades podem existir em circuitos com parâmetros concentrados, como resistores, indutores, capacitares, ou mesmo na forma de parâmetros distribuídos, como em linhas de transmissão com características diferentes (ZANETTA, 2003).

Na descontinuidade, as ondas de tensão e corrente são contínuas, além disso, a quantidade total de energia da onda eletromagnética permanece constante, se considerada uma linha sem perdas.

3.2.1 Linhas com Impedâncias Características Diferentes

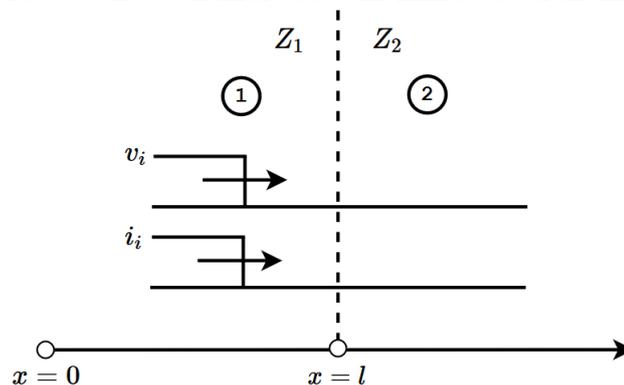
Supondo uma situação em que há mais de uma linha de transmissão, em que a onda precise passar de um meio para outro, além da reflexão, haverá a refração, cujo coefici-

ente será chamado *coeficiente de transmissão*. Ao atravessar o meio, saindo da linha 1 para a 2, cujas impedâncias características são Z_1 e Z_2 respectivamente, ocorrerá um comportamento diferenciado ao atravessar este meio.

A linha 1 possui um fator de proporção entre a tensão e a corrente igual a Z_1 , e na linha 2 igual a Z_2 . Ao atravessar o ponto de descontinuidade, serão formadas duas ondas, uma que é refratada para a linha 2 e outra refletida para a linha 1. Assumindo que neste ponto específico há o mesmo nível de tensão nos lados 1 e 2 e que a corrente também é a mesma, o que pode ser validado pelas leis de Kirchhoff.

Conforme observado nas Equações 3.17 e 3.23, em qualquer ponto da linha de transmissão, o resultado é a composição entre as ondas progressivas e regressivas. Analisando um caso em que existe uma descontinuidade da impedância característica no ponto de junção entre duas linhas de transmissão, conforme Figura 3.8.

Figura 3.8: Descontinuidade em linhas de transmissão.



Fonte: Adaptado de Zanetta (2003), p. 156.

Onde,

- Z_1 é a impedância característica da linha 1;
- Z_2 é a impedância característica da linha 2;
- i_i é a onda de corrente incidente no ponto de junção;
- v_i é a onda de tensão incidente no ponto de junção.

Inicialmente uma onda incidente (v_i) se propaga na linha 1 e, ao atingir o ponto de descontinuidade ($x = l$), deseja-se descobrir as características das ondas refletida e transmitida.

Antes de atingir a descontinuidade as ondas progressivas são numericamente iguais às ondas incidentes, portanto:

$$v_i = v^+, \quad (3.45)$$

e

$$i_i = i^+, \quad (3.46)$$

Na linha 1, as correntes e tensões têm a mesma forma de onda e estão relacionadas matematicamente da seguinte forma para as ondas incidentes:

$$i_i = i^+ = \frac{v_i}{Z_1} = \frac{v^+}{Z_1}, \quad (3.47)$$

Para as ondas refletidas propagando-se no sentido negativo de x , segue que:

$$i_r = i_1^-, \quad (3.48)$$

$$v_r = v_1^-, \quad (3.49)$$

$$i_1^- = -\frac{v_1^-}{Z_1} \quad (3.50)$$

Já para a onda transmitida, ou seja, refratada na linha 2 no sentido positivo de x , apresentam-se as seguintes relações:

$$i_t = i_2^+, \quad (3.51)$$

$$v_t = v_2^+, \quad (3.52)$$

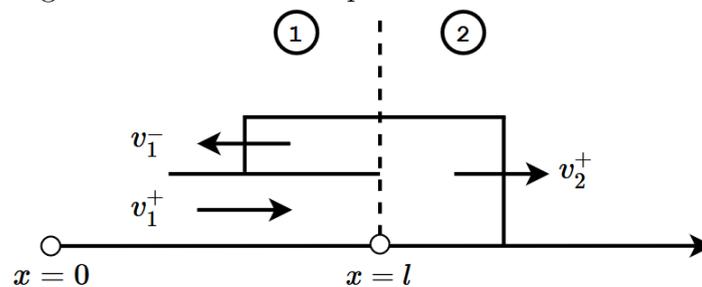
$$i_t = i_2^+ = \frac{v_t}{Z_2} = \frac{v_2^+}{Z_2}. \quad (3.53)$$

No ponto de conexão das linhas ($x = l$), a tensão no lado 1 é igual a tensão no lado 2, então:

$$v_1^+ + v_1^- = v_2^+, \quad (3.54)$$

conforme Figura 3.9.

Figura 3.9: Tensões nos pontos de descontinuidade.



Fonte: Adaptado de Zanetta (2003), p. 157.

Analogamente, para a corrente:

$$i_1^+ + i_1^- = i_2^+, \quad (3.55)$$

Substituindo as Equações (3.47), (3.50), (3.53) e (3.54) na Equação (3.55), obtém-se o que segue:

$$\frac{v_1^+}{Z_1} - \frac{v_1^-}{Z_1} = \frac{v_2^+}{Z_2} = \frac{v_1^+ + v_1^-}{Z_2}, \quad (3.56)$$

Isolando v_1^- em (3.56), obtém-se que:

$$v_1^- = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} v_1^+, \quad (3.57)$$

sendo a parcela que multiplica o v_1^+ em (3.57) denominado *coeficiente de reflexão da onda de tensão*, conforme segue:

$$\rho_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.58)$$

relacionando a onda incidente com a refletida.

Logo a Equação 3.57 pode ser reescrita como:

$$v_1^- = \rho_r v_1^+, \quad (3.59)$$

Substituindo (3.59) em (3.54) e isolando v_2^+ , chega-se a seguinte expressão:

$$v_2^+ = (1 + \rho_r) v_1^+, \quad (3.60)$$

ou seja:

$$v_2^+ = \rho_t v_1^+, \quad (3.61)$$

onde:

$$\rho_t = 1 + \rho_r = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.62)$$

A partir de (3.60) observa-se que a onda refletida é a soma da onda incidente com a transmitida.

Analogamente ao visto até aqui sobre as ondas de tensão, aplicando (3.59) em (3.50):

$$i_1^- = -\frac{v_1^-}{Z_1} = -\frac{\rho_r v_1^+}{Z_1}, \quad (3.63)$$

e aproveitando a relação dada em (3.47), chega-se a:

$$i_1^- = -\rho_r i_1^+ \quad (3.64)$$

Logo o coeficiente de reflexão para a corrente, definido como $\rho_{(i)r}$ será dado por:

$$\rho_{(i)r} = -\rho_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.65)$$

ou seja, o coeficiente de reflexão da corrente é igual ao da tensão em módulo, porém com o sinal invertido.

Para a onda de corrente transmitida:

$$i_2^+ = i_1^- + i_1^+ = (1 + \rho_{(i)r})i_1^+, \quad (3.66)$$

$$\rho_{(i)t} = 1 + \rho_{(i)r} = (1 - \rho_r)i_1^+. \quad (3.67)$$

Logo o coeficiente de transmissão da onda de corrente é:

$$\rho_{(i)t} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.68)$$

Exemplo:

Representar as ondas refletidas e refratadas para um degrau de 100 V, propagando-se em uma linha com impedância característica de 200Ω e encontrando uma linha com impedância característica de 300Ω .

Solução:

Calculando inicialmente os coeficientes de reflexão e de transmissão:

A partir de 3.58:

$$\rho_r = \frac{300 - 200}{300 + 200} = 0,2$$

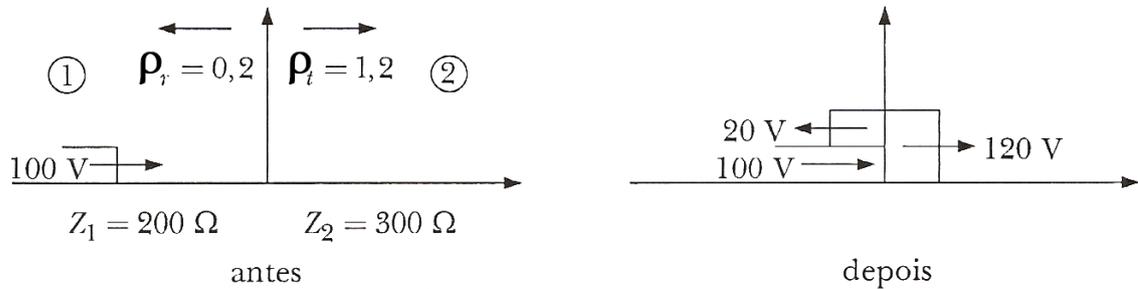
Substituindo o valor encontrado na Equação (3.62):

$$\rho_t = 1 + 0,2 = 1,2$$

Conforme a Figura 3.10, percebe-se que há duas situações: 1 e 2. Na primeira (antes) é mostrada uma onda progressiva que se movimenta em direção ao meio 2. Já na segunda parte da figura é mostrado a onda inicial de 100 V no sentido positivo de x, uma de 20 V no sentido inverso, ou seja, apenas o produto do coeficiente de reflexão pela onda incidente ($100 \times 0,2 = 20V$) e após a descontinuidade, uma onda progressiva, obtida

através da transmissão do meio 1 para o meio 2., possui uma tensão obtida através de $100 \times 1,2 = 120V$, conforme representado na figura (depois).

Figura 3.10: Tensões nos pontos de descontinuidade (antes e depois).



Fonte: Zanetta (2003), p. 159.

3.2.2 Terminal de Linha em Circuito Aberto

A linha com terminal em vazio pode ser analisada como um caso particular da descrição anterior, em que, por se tratar de uma linha aberta, sua impedância característica tende ao infinito. Substituindo nas Equações (3.62) e (3.58):

$$\rho_t = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 2, \quad (3.69)$$

$$\rho_r = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1. \quad (3.70)$$

Analisando em termos de corrente:

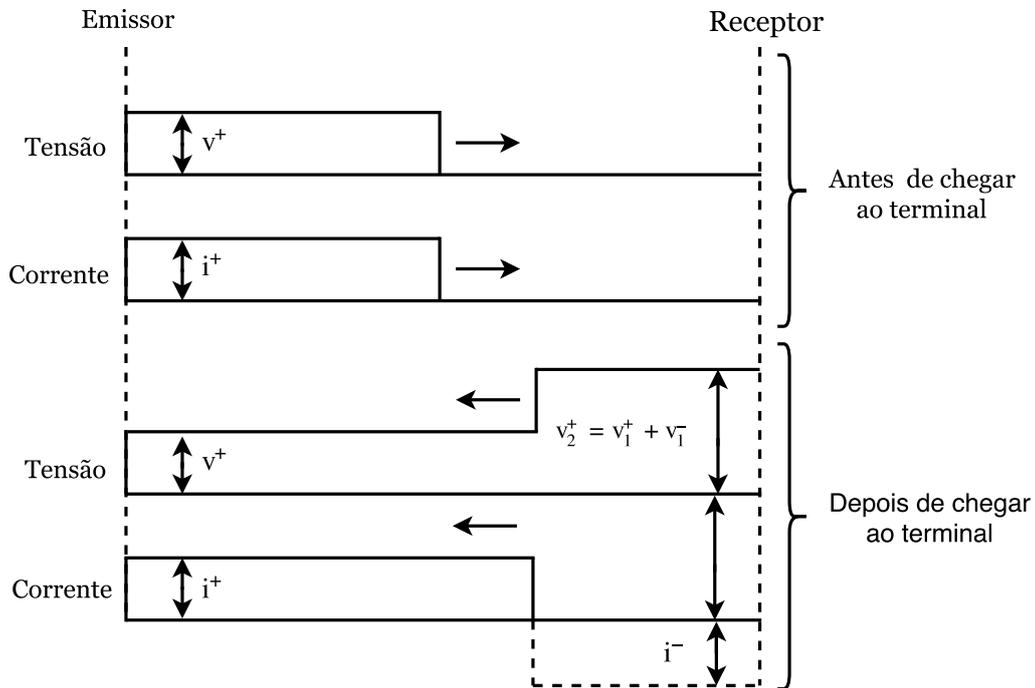
$$i_1^+ + i_1^- = 0. \quad (3.71)$$

Ou seja, $i_1^+ = -i_1^-$, e usando 3.47 e 3.50 é possível chegar a:

$$\frac{v_1^+}{Z_1} = \frac{v_1^-}{Z_1}, \quad (3.72)$$

ou seja, a onda refletida é igual à incidente, entretanto com o dobro da tensão, conforme observa-se na Figura 3.11.

Figura 3.11: Análise da onda viajante em uma linha com terminal aberto.



Fonte: Adaptado de Gönen (2014), p. 491.

3.2.3 Terminal de Linha em Curto-Circuito

Se a linha está em curto-circuito, basta considerar que $Z_2 = 0$ e fazer as devidas substituições nas Equações (3.62) e (3.58), resultando em:

$$\rho_t = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 0, \quad (3.73)$$

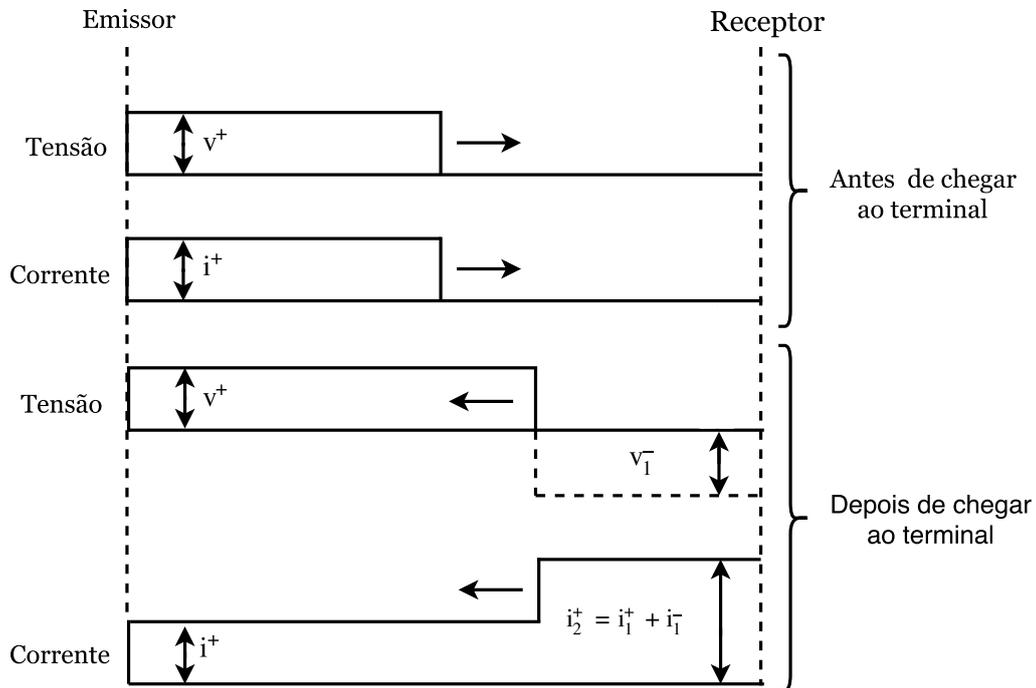
$$\rho_r = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = -1. \quad (3.74)$$

Neste caso, uma vez que nenhuma parcela da onda é transmitida, a onda é refletida integralmente, possuindo o mesmo valor, porém com sinal invertido. Fazendo uma análise similar à anterior (terminal em aberto), logo a corrente total no fim da linha é dado por:

$$i_2^+ = 2i_1^+ \quad (3.75)$$

Observando a Figura 3.12 que o nível da tensão antes e depois da reflexão são os mesmos, já a corrente teve seu valor duplicado ao retornar do fim da linha.

Figura 3.12: Análise da onda viajante em uma linha com terminal em curto-circuito.



Fonte: Adaptado de Gönen (2014), p. 491.

3.3 Terminal de Linha com Impedância

Nesta seção serão analisados os efeitos da descontinuidade no fim de uma linha de transmissão, na forma de parâmetros concentrados, com resistores, indutores e capacitores.

Um caso genérico para um linha de transmissão com impedância característica Z_1 terminada com uma impedância Z_2 ,

3.3.1 Terminal Puramente Resistivo

O comportamento da resistência R é idêntico ao de uma linha com impedância característica $Z_2 = R$. Os coeficientes de reflexão e de transmissão podem ser encontrados seguindo as Equações 3.68 e 3.62, resultando em:

$$\rho_r = \frac{R - Z_1}{Z_1 + R}, \quad (3.76)$$

$$\rho_t = \frac{2R}{Z_1 + R}. \quad (3.77)$$

3.3.2 Terminal Puramente Indutivo

Segundo Zanetta (2003), as hipóteses adotadas no estudo das reflexões e refrações no domínio do tempo permanecem válidas quando aplicada a transformada de Laplace. Nesse caso, os coeficientes de refração e reflexão em termos das impedâncias operacionais são dados por:

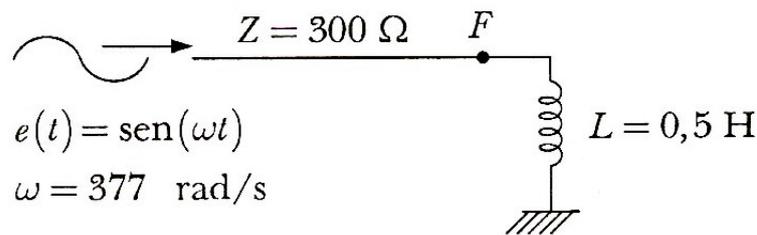
$$\rho_r(s) = \frac{Z_2(s) - Z_1}{Z_2(s) + Z_1}, \quad (3.78)$$

$$\rho_t(s) = \frac{2Z_2(s)}{Z_1 + Z_2(s)}. \quad (3.79)$$

Exemplo:

Uma tensão senoidal atinge o final de uma linha de transmissão com um reator conectado. Determinar a expressão da tensão no fim de linha considerando-a suficientemente longa para ignorar as reflexões do início de linha. **Solução:**

Figura 3.13: Linha excitada com tensão senoidal.



Fonte: Zanetta (2003), p. 163.

Tensão no fim da linha:

$$V_f(s) = \rho_t(s)E(s),$$

$$\rho_t(s) = \frac{2sL}{Z + sL},$$

$$E(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2},$$

$$V_f(s) = \frac{2\omega s}{(s^2 + \omega^2) \left(s + \frac{Z}{L}\right)}.$$

Com a expansão em frações parciais, temos:

$$V_f(s) = \frac{k_0}{s + 600} + \frac{k_1}{s - j377} + \frac{k_1^*}{s + j377},$$

$$k_0 = \left. \frac{2\omega s}{s^2 + \omega^2} \right|_{s=-600} = -0,901,$$

$$k_1 = \frac{2\omega s}{(s^2 + \omega^2)(s + 600)} \Big|_{s=j377} = 0,5320 \angle -32,14^\circ.$$

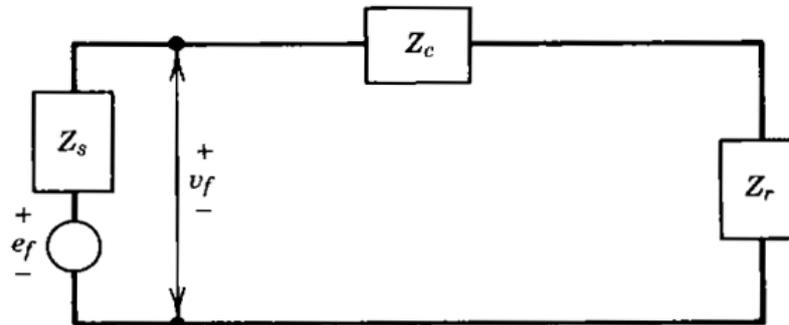
Adotando o instante inicial $t = 0$ Quando a onda atinge o final da linha, obtemos:

$$v_f(t) = -0,901e^{-600t} + 1,064\cos(377t - 32,14^\circ).$$

3.4 Diagrama de Treliças (Lattice)

O Diagrama de Lattice é uma representação gráfica que determina a tensão em um dado ponto e tempo para sistemas de transmissão. Segundo Gönen (2014), o Diagrama de Lattice é uma ferramenta visual que possibilita a visualização das ondas viajantes que refletem e voltam em uma linha de transmissão. A Figura 3.14 mostra um diagrama de circuito, no qual Z_S e Z_r representam a impedância interna da fonte e a conectada ao fim da linha, respectivamente.

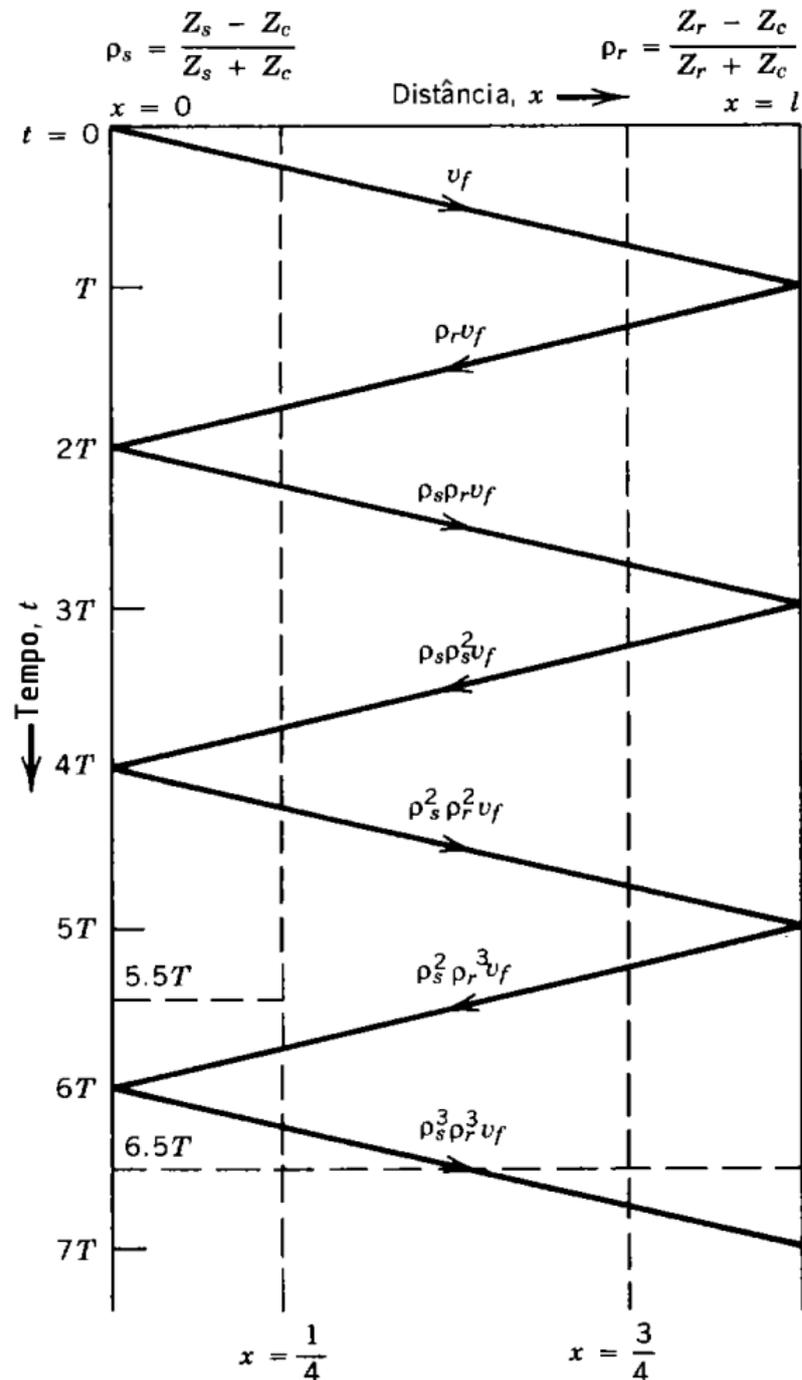
Figura 3.14: Diagrama do circuito.



Fonte: Gönen (2014), p. 491.

No diagrama de Lattice, a distância entre o emissor e receptor é representada por uma linha horizontal, já o tempo é representado por duas linhas verticais, uma no início e outra no fim da linha. T ou τ é o tempo para onda viajar através de todo o comprimento da linha. As linhas diagonais representam que a onda vai e volta. As inclinações dão o tempo correspondente para cada distância viajada, conforme mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15: Diagrama de Lattice.



Fonte: Adaptado de Gönen (2014), p. 500.

As reflexões são determinadas através da multiplicação da onda incidente pelo respectivo coeficiente de reflexão. A tensão num dado ponto do tempo e espaço pode ser encontrada através da adição de todos os termos que estão exatamente acima deste

ponto. Por exemplo, a tensão em $t = 5,5T$ e $x = 1/4l$ é:

$$v\left(\frac{1}{4}l, 5,5T\right) = v_f (1 + \rho_r + \rho_s \rho_r + \rho_s \rho_r^2 + \rho_s^2 \rho_r^2) \quad (3.80)$$

ao passo que a tensão em $t = 6,5T$ e $x = \frac{1}{4}l$ é:

$$v\left(\frac{3}{4}l, 6,5T\right) = v_f (1 + \rho_r + \rho_s \rho_r^2 + \rho_s^2 \rho_r^2 + \rho_s^2 \rho_r^3) \quad (3.81)$$

De fato, o diagrama de Lattice também pode ser desenhado para correntes, entretanto o coeficiente de reflexão para corrente é sempre o negativo da tensão, sendo seguido para sua construção o mesmo procedimento adotado.

Exemplo:

Considere o circuito da Figura 3.9, e assuma que uma fonte de tensão contínua ideal de $1000V$, portanto sua impedância interna Z_s é nula, é conectada a um condutor cuja impedância característica é 40Ω . Considere que ao fim da linha há um resistor de 60Ω .

- Determine o coeficiente de reflexão do início da linha.
- Determine o coeficiente de reflexão do fim da linha.
- Desenhe o diagram de Lattice para cada reflexão.
- Determine o valor da tensão em $t = 6,5T$ e $x = \frac{3}{4}l$.
- Plote o perfil de tensão emissor-receptor versus o tempo.

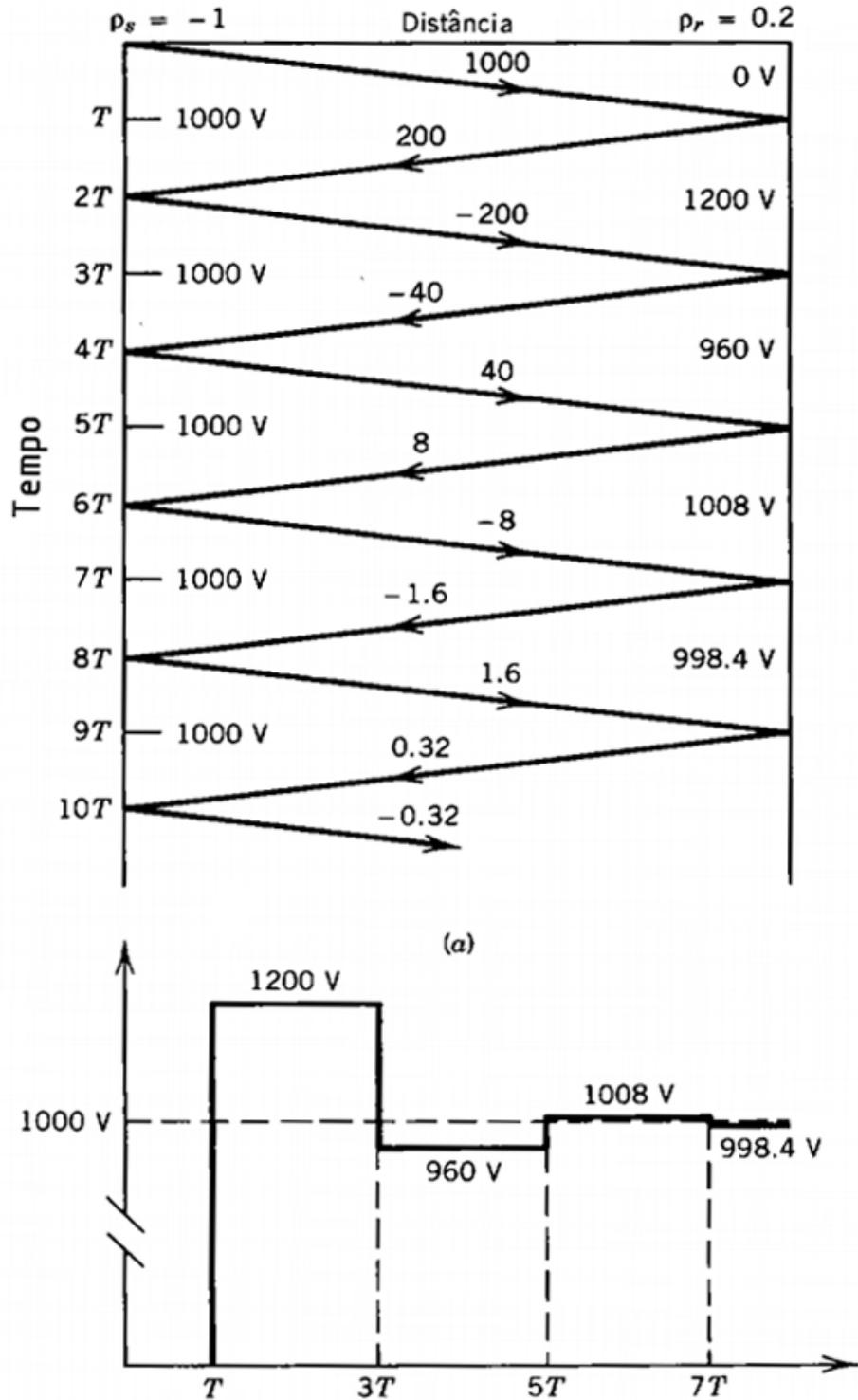
Resolução:

$$(a) \rho_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} = \frac{0 - 40}{0 + 40} = -1$$

$$(b) \rho_r = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} = \frac{60 - 40}{60 + 40} = 0,2$$

- O diagrama de Lattice está representado na Figura 3.12 (a).
- A partir da Figura 3.12 (a), a tensão é $1008 V$.
- O perfil da tensão emissor-receptor versus o tempo está representado na Figura 3.12 (b).

Figura 3.16: Diagrama de Lattice - resolução



Fonte: Adaptado de Gönen (2014), p. 502.

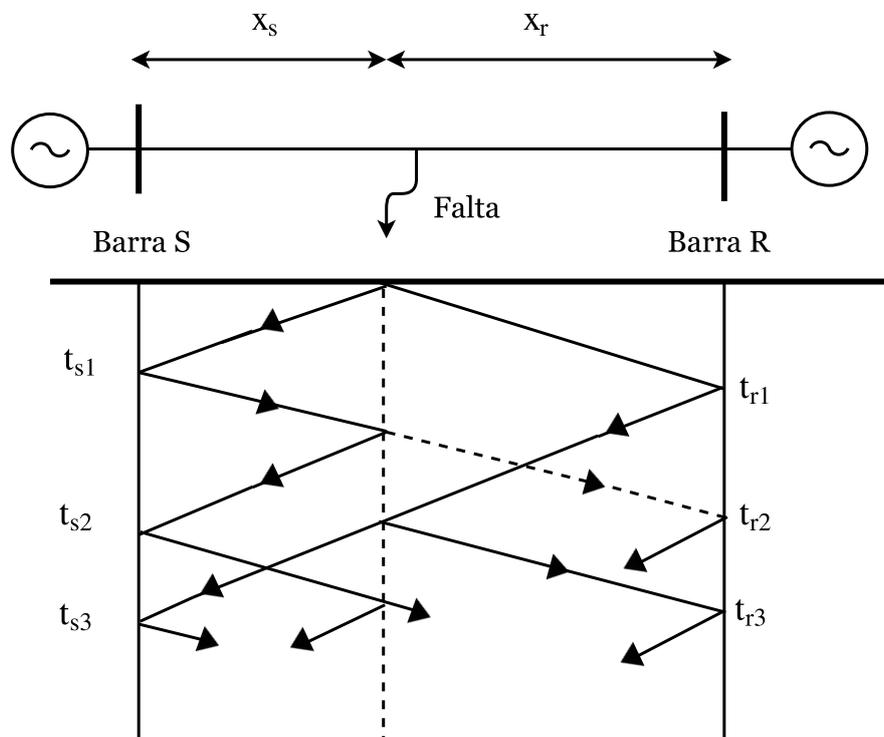
3.4.1 Aplicação em Sistemas de Potência

Este método de análise é bem explorado na área de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência e localização de faltas, pois baseado no tempo de deslocamento de uma onda viajante, é possível descobrir o ponto de uma falta com alto grau de precisão.

Segundo Datta e Chatterjee (2012), com o auxílio do Diagrama de Lattice, que determina o nível de tensão em pontos específicos de uma linha numa dada distância, o ponto de falta torna-se facilmente dedutível. Ele afirma ainda que qualquer perturbação numa linha de transmissão gera ondas de sinal se propagando no sentido progressivo e regressivo simultaneamente. Desta forma, os valores iniciais para essas ondas dependem de vários fatores, tais como posição, resistência do trecho da falta etc. Além disso, estes sinais refletem e refratam nos pontos de descontinuidade, até que sejam atenuados a valores desprezíveis. Sendo o princípio básico da localização feito a partir da análise do Diagrama de Lattice (conforme visto na Seção 3.4).

De acordo com a Figura 3.17, pode-se determinar os pontos de uma falta através de duas equações, dependentes das medições obtidas pelas duas barras.

Figura 3.17: Diagrama de Lattice para o estudo de localização de faltas



Fonte: Adaptado de Datta e Chatterjee (2012).

Assim, de acordo com as equações:

$$X_s = \frac{t_{s2} - t_{s1}}{2}v, \quad (3.82)$$

$$X_r = \frac{t_{r2} - t_{r1}}{2}v, \quad (3.83)$$

onde t_{s1} e t_{r1} são os tempos para as ondas incidentes alcançarem a barra S e R, respectivamente, t_{s2} e t_{r2} são os instantes em que as ondas refletidas chegam ao ponto de falta, respectivamente. X_S e X_r , são as distâncias até o ponto de falta e v a velocidade de propagação da onda no meio.

3.5 Regime Permanente em Linhas de Transmissão

As equações de propagação de ondas no domínio das frequências são formalmente as mesmas no domínio do tempo, bastando calcular as expressões com a transformada de Laplace no ponto $s = j\omega$ para obtermos o regime permanente, (ZANETTA, 2003).

A partir da Equação 3.13, observa-se que para o ponto x , adotando $s = j\omega$:

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial X^2} = (R' + j\omega L')(j\omega C')V(x), \quad (3.84)$$

sendo:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(j\omega C')}, \quad (3.85)$$

$$V^+(x) = V^+(0)e^{-\gamma x}, \quad (3.86)$$

$$V^-(x) = V^-(0)e^{+\gamma x}, \quad (3.87)$$

No regime permanente senoidal, tem-se que:

$$v(x, t) = Re \left[\sqrt{2}V(x)e^{+j\omega t} \right], \quad (3.88)$$

em que $V(x)$ é o fasor no ponto x .

Para o cálculo no ponto em que $s = j\omega$, considera-se que:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (3.89)$$

em que:

α = fator de atenuação;

β =fator de fase.

Tomemos uma componente da solução da equação de onda, por exemplo:

$$V^+(x) = V_0 e^{-\gamma x}. \quad (3.90)$$

Se escolhido um ponto $x = 0$ e uma tensão neste mesmo ponto como $V(0)$, ou seja, uma tensão fasorial nula.

$$v(x, t) = \operatorname{Re} \left[\sqrt{2} V_0 e^{-(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t} \right], \quad (3.91)$$

$$v(x, t) = \sqrt{2} V_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x), \quad (3.92)$$

Para um observador que se desloca com uma velocidade $v_1 = \omega/\beta$, o argumento do cosseno se mantém inalterado e v_f é chamada de velocidade de fase.

No caso de uma linha sem perdas tem-se que:

$$\alpha = 0, \quad (3.93)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v}, \quad (3.94)$$

Capítulo 4

PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR

A elaboração do simulador foi desenvolvida seguindo etapas, da mais básica, relacionada à concepção do nível da abordagem, visto que há o enfoque educacional, à mais complexa, do ponto de vista do desenvolvimento matemático e implementação das ondas viajantes em quatro configurações.

4.1 Recursos Utilizados

A ferramenta GUI do Matlab® chamada GUIDE¹ foi utilizada para a programação e criação gráfica, auxiliando na construção das interfaces gráficas para interação com o utilizador. Para isso foram criadas as imagens em *software* de edição de imagem para cada uma das configurações (1, 2, 3 e 4) e inserido no GUIDE a imagem já processada.

4.2 Definição dos Modelos

Os modelos foram criados em ordem de complexidade crescente, observando-se a possibilidade de continuar didático, ou seja, limitou-se o número de barras em até quatro e a geração em apenas uma, para que seja viável e compreensível, do ponto de vista de um estudante de graduação, o comportamento das ondas.

¹O GUIDE será abordado no Capítulo 5.

4.3 Configurações dos Sistemas

O simulador será composto pelas quatro configurações abaixo com caixas para entrada dos dados, botões de seleção e de execução. Os dados de entrada serão inseridos via teclado numérico e suas ações feitas através de cliques nos botões específicos de ação.

4.3.1 Configuração 1

A Configuração 1, conforme Figura 4.1, possui o modelo mais simples para estudo do perfil de ondas viajantes numa linha de transmissão. Pois se trata de uma única geração, alimentando a barra 1, que percorrerá o caminho 1-2, realizando as transmissões e reflexões sucessivas.

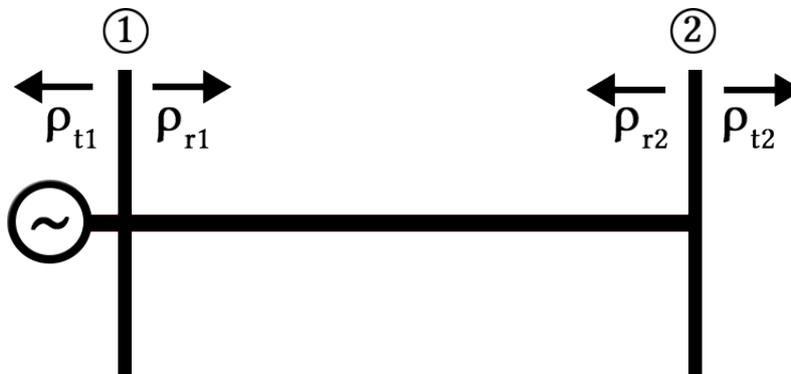
Figura 4.1: Configuração 1 - Duas barras e única geração.



Fonte: Autoria própria.

A dedução matemática da Configuração 1 seguiu conforme os coeficientes especificados na Figura 4.2.

Figura 4.2: Configuração 1 - Modelo para dedução matemática.



Fonte: Autoria própria.

O equacionamento é dividido em duas partes, barra 1 e barra 2. Assim,

$$v_1(t) = v(t) + \rho_{t1}\rho_{r2}v(t - 2\tau) + \rho_{t1}\rho_{r1}\rho_{r2}^2v(t - 4\tau) + \rho_{t1}\rho_{r1}^2\rho_{r2}^3v(t - 6\tau) + \dots \quad (4.1)$$

Depois de percebida a sequência lógica da expressão de v_1 , foi escrita sua equação geral na forma de somatório, conforme:

$$v_1(t) = v(t) + \rho_{t1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} \rho_{r1}^{\alpha} \rho_{r2}^{\alpha+1} v(t - 2(\alpha + 1)\tau), \quad (4.2)$$

que define o perfil de tensão na barra 1 para sucessivas repetições.

Na barra 2 a tensão é dada da seguinte forma:

$$v_2(t) = \rho_{t2}v(t - \tau) + \rho_{t2}\rho_{r1}\rho_{r2}v(t - 3\tau) + \rho_{t2}\rho_{r1}^2\rho_{r2}^2v(t - 5\tau) + \dots \quad (4.3)$$

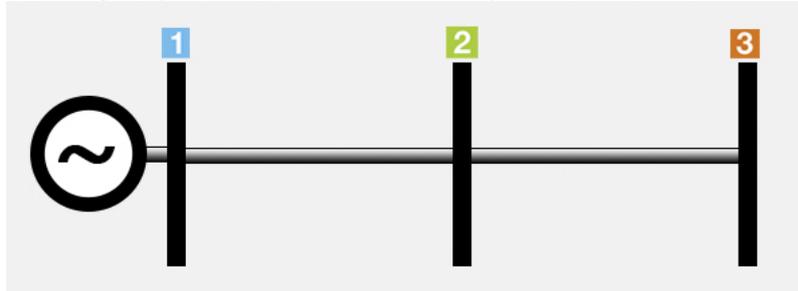
O que pode ser escrito de forma genérica como segue:

$$v_2(t) = \rho_{t2} \sum_{\alpha=0}^{\infty} (\rho_{r1}\rho_{r2})^{\alpha} v(t - (2\alpha + 1)\tau). \quad (4.4)$$

4.3.2 Configuração 2

A configuração 2, conforme Figura 4.3, possui dois trechos diferentes. O usuário terá a possibilidade de seleção na interface de escolher entre observar o comportamento entre as barras 1-2 ou 2-3, além de inserir os dados de entrada para simulação.

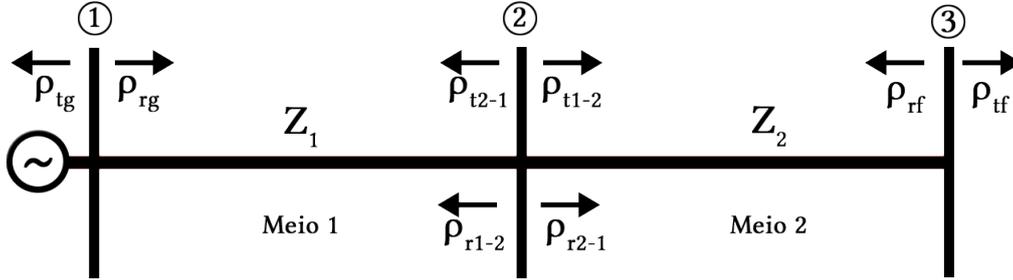
Figura 4.3: Configuração 2 - três barras arranjadas em série com única geração.



Fonte: Autoria própria.

Para sua dedução matemática foi utilizado o mesmo procedimento adotado no item anterior, considerando a simbologia adotada na Figura 4.4 a seguir:

Figura 4.4: Configuração 2: modelo para dedução.



Fonte: Autoria própria.

Para a barra 1, temos que foram consideradas as reflexões sucessivas entre as barras 1 e 2, sobrepostas à transmitida do meio 2 para o 1 e suas sucessivas reflexões no meio 2. Desta forma, temos que:

$$\begin{aligned}
 v_1(t) = & v_0(t) + \rho_{tg}\rho_{r1-2}v(t - 2\tau_1) + \rho_{tg}\rho_{rg}\rho_{r1-2}^2v(t - 4\tau_1) + \dots \\
 & + \rho_{tg}\rho_{t1-2}\rho_{t2-1}v(t - 2(\tau_1 + \tau_2)) + \rho_{tg}(\rho_{t1-2}\rho_{t2-1})^2v(t - 4(\tau_1 + \tau_2)) + \dots \\
 & + \rho_{tg}\rho_{rg}\rho_{r1-2}\rho_{t1-2}\rho_{t2-1}\rho_{rf}v(t - 2(2\tau_1 + \tau_2)) + \\
 & + \rho_{tg}(\rho_{rg}\rho_{r1-2})^2\rho_{t1-2}\rho_{t2-1}\rho_{rf}v(t - 4(2\tau_1 + \tau_2)) + \dots
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

O que pode ser expresso de maneira genérica da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 v_1(t) = & v_0 + \rho_{tg} \sum_{\alpha=0}^{\infty} [\rho_{r1-2}^{\alpha}\rho_{rg}^{\alpha+1}v(t - 2(\alpha + 1)\tau_1) + (\rho_{t1-2}\rho_{t2-1}\rho_{rf})^{\alpha}v(t - 2\alpha(\tau_1 + \tau_2)) + \\
 & + (\rho_{rg}\rho_{r1-2})^{\alpha}\rho_{t1-2}\rho_{t2-1}\rho_{rf}v(t - 2(\alpha\tau_1 + \tau_2))]
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Para a barra 2, as seguintes expressões foram definidas:

$$\begin{aligned}
 v_2(t) = & \rho_{t1-2}\rho_{r1-2}v(t - \tau_1) + \\
 & + \rho_{t1-2}\rho_{rg}\rho_{r1-2}^2v(t - 3\tau_1) + \\
 & + \rho_{t1-2}\rho_{rg}^2\rho_{r1-2}^2v(t - 5\tau_1) + \\
 & + \rho_{t1-2}\rho_{rg}^2\rho_{r1-2}^3v(t - 7\tau_1) + \\
 & \vdots \\
 & + \rho_{t2-1}\rho_{t1-2}\rho_{r2-1}\rho_{rf}^2v(t - (\tau_1 + 2\tau_2)) + \\
 & + \rho_{t2-1}\rho_{t1-2}(\rho_{r2-1}\rho_{rf})^2v(t - (\tau_1 + 4\tau_2)) + \\
 & + \rho_{t2-1}\rho_{t1-2}(\rho_{r2-1}\rho_{rf})^3v(t - (\tau_1 + 6\tau_2)) + \\
 & \vdots
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

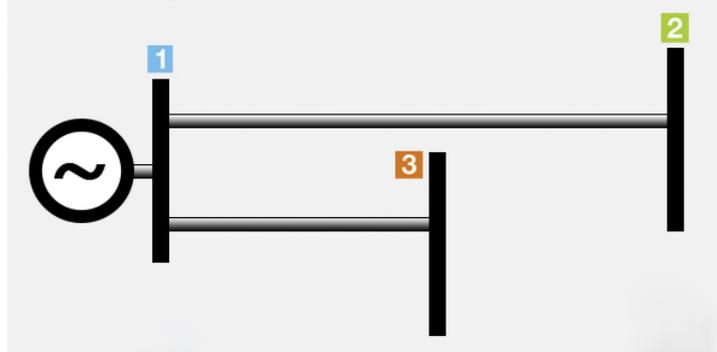
Para a barra 3, temos que:

$$v_3(t) = v_0[\rho_{t1-2}v(t - (\tau_1 + \tau_2)) + \rho_{t1-2}\rho_{rf}\rho_{r2-1}v(t - (\tau_1 + 3\tau_2)) + \rho_{tg}\rho_{r1-2}\rho_{t1-2}v(t - (3\tau_1 + \tau_2)) + \dots] \quad (4.8)$$

4.3.3 Configuração 3

O arranjo da Figura 4.5 possui uma configuração na qual a alimentação parte da Barra 1 e alimenta as Barras 2 e 3. Os efeitos da linha 1-2 são sentidos pela linha 1-3, por isso o seu comportamento se torna mais complexo em relação aos casos anteriores.

Figura 4.5: Configuração 3 - três barras com única alimentação.



Fonte: Autoria própria.

Para esta dedução matemática foi utilizado o modelo presente na Figura 4.6, na qual estão indicados os coeficientes de reflexão e transmissão para cada barra.

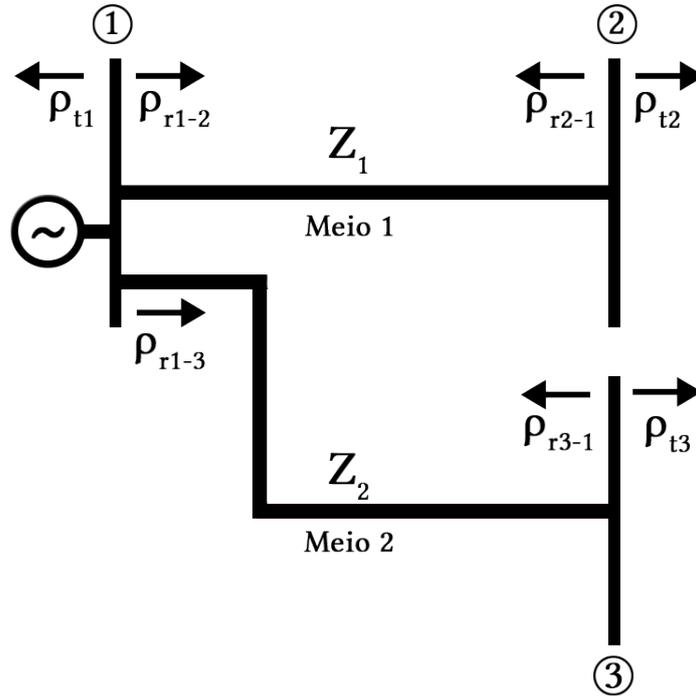
Desta forma, foram obtidas as equações para cada barra, começando da intitulada *barra 1*:

$$\begin{aligned} v_1(t) = & v_0(t) + \rho_{t1}\rho_{r2-1}v(t - 2\tau_1) + \\ & + \rho_{t1}\rho_{r1-2}\rho_{r2-1}^2v(t - 6\tau_1) + \\ & + \rho_{t1}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^3v(t - 4\tau_1) + \\ & \vdots \\ & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}v(t - 2\tau_2) + \\ & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}^2v(t - 4\tau_2) + \\ & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}^2\rho_{r3-1}^3v(t - 6\tau_2) + \\ & \vdots \end{aligned} \quad (4.9)$$

Que pode ser descrito de forma genérica conforme equação a seguir:

$$v_1(t) = v_0(t) + \rho_{t1} \sum_{\substack{\alpha=0, \\ \beta=1,1,2,2,\dots}}^{\infty} \left(\rho_{r1-2}^{\alpha} \rho_{r2-1}^{\alpha+1} v(t - 2\alpha\tau_1) + \rho_{r1-3}^{\beta} \rho_{r3-1}^{\alpha} v(t - 2\alpha\tau_2) \right) \quad (4.10)$$

Figura 4.6: Configuração 3: três barras com única alimentação - modelo para dedução matemática.



Fonte: Autoria própria.

Para a barra 2:

$$\begin{aligned} v_2(t) = & \rho_{t2} v(t - \tau_1) + \rho_{t2} \rho_{r1-2} \rho_{r2-1} v(t - 3\tau_1) + \\ & + \rho_{t2} \rho_{r1-2}^2 \rho_{r2-1} v(t - 5\tau_1) + \rho_{t2} \rho_{r1-2}^2 \rho_{r2-1}^2 v(t - 7\tau_1) + \\ & \vdots \\ & + \rho_{t2} \rho_{r1-2} \rho_{r3-1} v(t - (\tau_1 + \tau_2)) + \\ & + \rho_{t2} \rho_{r1-2}^2 \rho_{r2-1}^2 \rho_{r3-1} v(t - 2(\tau_1 + \tau_2)) + \\ & + \rho_{t2} \rho_{r1-2}^3 \rho_{r2-1}^4 \rho_{r3-1}^2 v(t - 3(\tau_1 + \tau_2)) + \\ & \vdots \end{aligned} \quad (4.11)$$

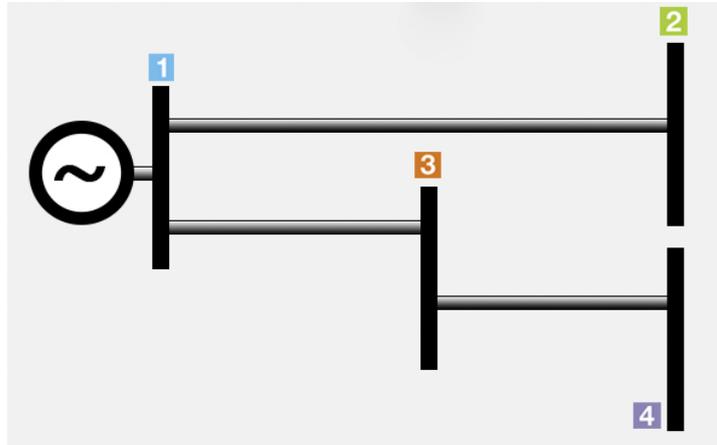
Já na barra 3, foi adotado um processo análogo ao da barra 2, conforme a seguir:

$$\begin{aligned}
 v_3(t) = & \rho_{t3}v(t - \tau_2) + \rho_{t3}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}v(t - 3\tau_2) + \\
 & + \rho_{t3}\rho_{r1-3}^2\rho_{r3-1}v(t - 5\tau_2) + \rho_{t3}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^2v(t - 7\tau_2) + \dots \\
 & \vdots \\
 & + \rho_{t2}\rho_{r1-2}\rho_{r3-1}v(t - (\tau_1 + \tau_2)) + \\
 & + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^2\rho_{r3-1}v(t - 2(\tau_1 + \tau_2)) + \\
 & + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^3\rho_{r2-1}^4\rho_{r3-1}^2v(t - 3(\tau_1 + \tau_2)) + \\
 & \vdots
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

4.3.4 Configuração 4

A Configuração 4, conforme Figura 4.7, é uma composição entre as configurações 1 e 2. A análise do seu comportamento é mais complexa, visto que o seu arranjo é misto e possui um número mais elevado de barras.

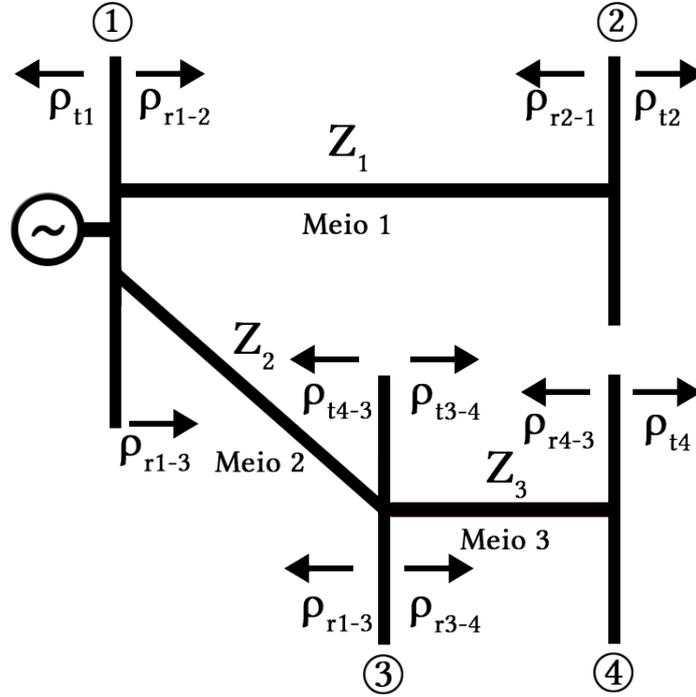
Figura 4.7: Configuração 4 - Quatro barras em arranjo misto com única geração.



Fonte: Autoria própria.

A dedução matemática seguirá o mesmo processo dos casos anteriores. Através da figura a seguir é possível identificar cada coeficiente de reflexão e transmissão envolvidos no processo de viagem das ondas.

Figura 4.8: Configuração 4: Quatro barras em arranjo misto com única geração - modelo para dedução matemática.



Fonte: Autoria própria.

Para a barra 1, o perfil de tensão é definido da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 v_1(t) = & v_0(t) + \rho_{t1}\rho_{r2-1}v(t - 2\tau_1) + \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r1-2}\rho_{r2-1}^2v(t - 4\tau_1) + \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^3v(t - 6\tau_1) + \\
 & \vdots \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}v(t - 2\tau_2) + \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}^2v(t - 4\tau_2) + \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r1-3}^2\rho_{r3-1}^3v(t - 6\tau_2) + \\
 & \vdots \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r2-1}(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})v(t - 2(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)) \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r2-1}(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})^2v(t - 4(\tau_2 + \tau_3) - 2\tau_1) \\
 & + \rho_{t1}\rho_{r2-1}^2(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})^2v(t - 6(\tau_2 + \tau_3) - 2\tau_1) \\
 & \vdots
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Para a barra 2, a tensão é definida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
v_2(t) = & \rho_{t2}v(t - \tau_1) + \rho_{t2}\rho_{r1-2}\rho_{r2-1}v(t - 3\tau_1) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}v(t - 5\tau_1) + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^2v(t - 7\tau_1) + \dots \\
& \vdots \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}\rho_{r3-1}v(t - (\tau_1 + \tau_2)) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^2\rho_{r3-1}v(t - 2(\tau_1 + \tau_2)) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^3\rho_{r2-1}^4\rho_{r3-1}^2v(t - 3(\tau_1 + \tau_2)) + \\
& \vdots \\
& + \rho_{t2}(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})\rho_{r1-2}v(t - 2(\tau_2 + \tau_3) - \tau_1) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r2-1}(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})^2\rho_{r1-2}^3v(t - 4(\tau_2 + \tau_3) - 2\tau_1) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r2-1}^2(\rho_{t3-4}\rho_{r4-3}\rho_{t4-3})^3\rho_{r1-2}^5v(t - 6(\tau_2 + \tau_3) - 3\tau_1) + \\
& \vdots
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Para a barra 3, foi adotado o procedimento análogo ao anterior:

$$\begin{aligned}
v_3(t) = & \rho_{t3}v(t - \tau_2) + \rho_{t3}\rho_{r1-3}\rho_{r3-1}v(t - 3\tau_2) + \\
& + \rho_{t3}\rho_{r1-3}^2\rho_{r3-1}v(t - 5\tau_2) + \rho_{t3}\rho_{r1-3}^2\rho_{r2-1}^2v(t - 7\tau_2) + \dots \\
& \vdots \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}\rho_{r3-1}v(t - (\tau_1 + \tau_2)) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^2\rho_{r2-1}^2\rho_{r3-1}v(t - 2(\tau_1 + \tau_2)) + \\
& + \rho_{t2}\rho_{r1-2}^3\rho_{r2-1}^4\rho_{r3-1}^2v(t - 3(\tau_1 + \tau_2)) + \\
& \vdots \\
& + \rho_{t3-4}\rho_{t4-3}\rho_{r4-3}v(t - \tau_2 - 2\tau_3) + \\
& + \rho_{t3-4}\rho_{t4-3}\rho_{r4-3}^2\rho_{r3-4}v(t - \tau_2 - 4\tau_3) + \\
& + \rho_{t3-4}\rho_{t4-3}\rho_{r4-3}^3\rho_{r3-4}^2v(t - \tau_2 - 6\tau_3) + \\
& \vdots
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Na barra 4, o equacionamento se da seguinte forma:

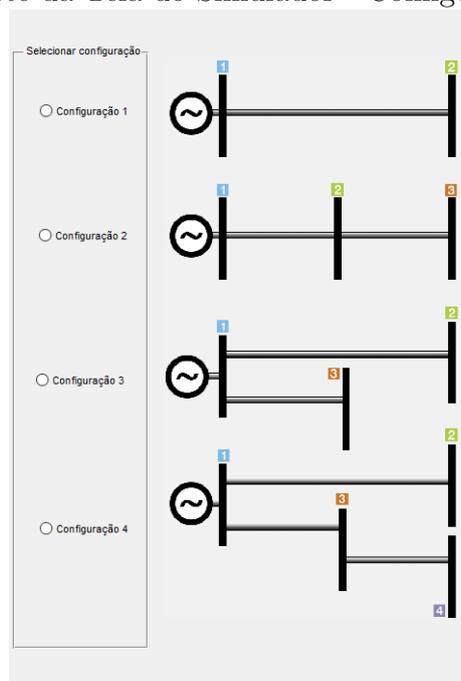
$$\begin{aligned}
 v_4(t) = & \rho_{t4}\rho_{r2-1}\rho_{r1-2}\rho_{t3-4}v(t - 2\tau_1 - \tau_2 - \tau_3) + \\
 & + \rho_{t4}\rho_{t3-1}\rho_{t1-3}(\rho_{r2-1}\rho_{r1-2}\rho_{t3-4})^2v(t - 4\tau_1 - 3\tau_2 - 3\tau_3) + \\
 & + \rho_{t4}\rho_{t3-1}\rho_{t1-3}\rho_{t4-3}(\rho_{r2-1}\rho_{r1-2}\rho_{t3-4})^3v(t - 6\tau_1 - 5\tau_2 - 5\tau_3) + \\
 & \vdots \\
 & + \rho_{t4}\rho_{t3-4}v(t - \tau_2 - \tau_3) + \\
 & + \rho_{t4}\rho_{r4-3}\rho_{r1-3}\rho_{t3-4}^2v(t - 2\tau_2 - 2\tau_3) + \\
 & + \rho_{t4}(\rho_{r4-3}\rho_{r1-3}\rho_{t4-3})^2\rho_{t3-4}^2v(t - 4\tau_2 - 4\tau_3) + \\
 & \vdots
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Os cálculos aqui deduzidos foram utilizados na programação da GUIDE.

4.3.5 Simulador Completo

O simulador foi composto pelas quatro configurações supracitadas, sendo inseridos os elementos responsáveis pela comunicação, ou seja, os campos para preenchimento dos dados de entrada e os botões de ação para efetuar as tarefas solicitadas. A Figura 4.9 mostra a tela do programa criado.

Figura 4.9: Parte da Tela do Simulador - Configuração Completa



Fonte: Autoria própria.

Dentro do simulador, o usuário deve selecionar qual a configuração desejada, feito isso devem ser inseridos os dados no campo "Dados de Entrada", depois deverá ser marcado qual o trecho que terá suas ondas viajantes plotadas, se ele for composto pelas barras 1 e 2 (linha 1-2), entre 2 e 3 (linha 2-3), linha 1-3 ou 3-4. Além disso, deverá ser selecionada a opção tensão na barra emissora ou receptora. Por exemplo, se a linha escolhida for a 2-3, a emissora será a "2" e receptora a "3".

Capítulo 5

INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO

Uma interface gráfica de usuário (GUI - do inglês *Graphical User Interface*) é uma interface que se utiliza de imagens com um programa. Segundo Chapman (2003), uma GUI tem o poder de tornar os programas mais fáceis de usar, devido à sua forma visual e aos controles intuitivos tais como botões, caixas de listagem, régua e menus.

Vale ressaltar que a GUI deve ser criada de forma previsível, a fim de que o usuário possa saber o que esperar ao realizar uma ação específica, o que, por sua vez, a torna mais complexa de programar, entretanto mais fácil de operar.

Segundo Marchand e Holland (2003), este tipo de ferramenta pode ser utilizada para aumentar a produtividade de um usuário ou simplesmente elevar a sofisticação de aplicações para pessoas com pouca ou nenhuma afinidade com programação.

O MATLAB possui uma ferramenta GUI chamada GUIDE, permitindo a criação de interfaces gráficas em conjunto com a programação e a linguagem utilizadas por este. É importante, antes de dar início à criação de uma GUIDE, seguir uma sequência lógica, a fim de atestar se de fato ela será facilitadora ou não.

5.1 As Três Fases Antes da Criação de uma GUIDE

O processo de criação de uma interface de usuário segue alguns passos lógicos, que se tomados podem facilitar potencialmente a elaboração da GUIDE, são elas: a análise, o *design* e a criação de um protótipo no papel, ou seja, a elaboração de um rascunho prévio para facilitar a associação das ideias.

5.1.1 Análise

Antes de se iniciar o processo deve-se pensar em qual o público alvo da aplicação e como ela será utilizada. Se uma interface for criada para utilização de aprendizado para crianças, não seria interessante inserir o uso de muito texto, ou sequências de operações muito longas, mas figuras grandes, clicáveis, coloridas e que chamem a atenção para a operação desejada. Todavia, esta mesma técnica de aproximação não funcionaria no caso de usuários de ensino superior para aplicações em engenharia.

Segundo Marchand e Holland (2003), o processo de análise pode exigir bastante dedicação, dependendo do propósito do programa, e devem ser inseridos nele, elementos que prezem pela intuitividade para o usuário que não entende como foi o processo de criação.

5.1.2 Design

Uma vez sabida as informações que a interface deve passar ao usuário, deve-se pensar na disposição dos elementos do GUIDE, para isso devem ser tomadas como referência:

- As considerações dos usuários, ou seja, conhecer o público alvo, o seu grau de instrução e sua afinidade com programas similares;
- As razões da elaboração da GUIDE, se possui o objetivo de reduzir demandas de usuário, facilitar o fluxo de trabalho ou mesmo a padronização de atividades;

5.1.3 Protótipo no Papel

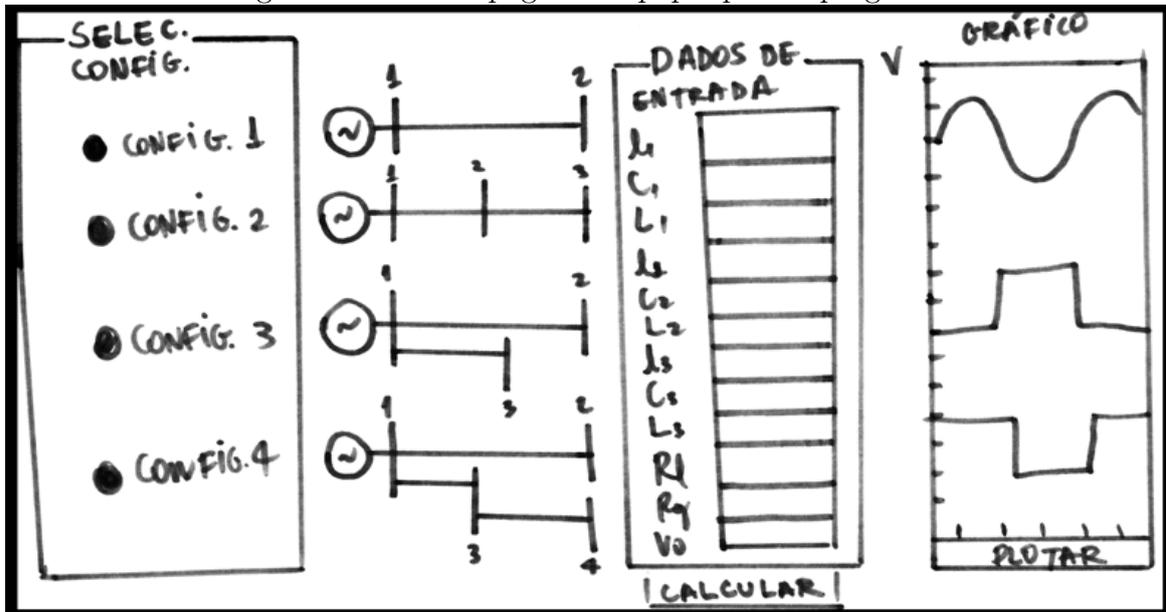
Talvez um dos mais importantes passos no processo criativo, o desenvolvimento do rascunho, facilita a visualização de como será o produto final. Ele auxiliar na escolha correta da disposição de cada elemento gráfico que será inserido na GUIDE, permitindo uma prévia de como será o produto final.

Aparência

A prototipagem em papel fornece uma introdução de como será a aparência da GUIDE. Como percebe-se na Figura 5.1, no protótipo são inseridos os principais elementos que farão parte da GUIDE, e dão uma ideia geral de como será o produto final, pois é mostrada a disposição de cada elemento. No caso já foram definidas as configurações dos barramentos, quem será chamado de configuração 1, 2, 3 e 4, quem serão os

dados de entrada, o posicionamento do botão calcular, bem como do plotar, a localização do gráfico que conterá as ondas viajantes. Ou seja, essa etapa é de fundamental importância para o processo criativo.

Figura 5.1: Prototipagem em papel para o programa



Fonte: Autoria própria.

5.2 Elementos de Controle da Interface de Usuário

A interface do GUIDE possui alguns elementos de controle que são inseridos para compor o programa bem como suas respectivas ações. Dentro do MATLAB são conhecidos como *uicontrol*, derivação da expressão em inglês "user interface control". Segundo Marchand e Holland (2003), há diferentes métodos de selecionar os vários elementos de controle da interface de usuário, entretanto o ato de selecionar, geralmente consiste em mover o cursor diretamente sobre o objeto e clicar com o botão do mouse.

Segundo Chapman (2003), os três principais elementos requeridos para criar uma GUIDE no MATLAB são:

1. **Componentes:** Cada item em uma GUI MATLAB (botões, rótulos, caixas de edição etc.) é um componente gráfico. Dentre os tipos de componentes temos controles gráficos (botões, caixas de edição, listas, régua etc.), elementos estáticos (quadros e cadeias de caracteres de texto), menus e eixos. Controles gráficos e elementos estáticos são criados pela função *uicontrol*, e os menus são criados pelas

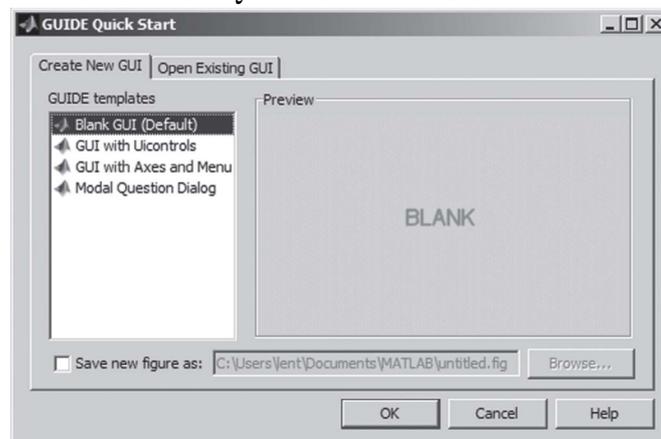
funções *uimenu* e *uicontextrnenu*. Eixos, utilizados para exibir dados gráficos, são criados pela função *axes*.

2. **Figuras:** Os componentes de uma GUI precisam ser arranjados dentro de uma figura, que é uma janela na tela do computador. Até aqui, as figuras foram criadas automaticamente quando desenhados os dados. Entretanto, figuras vazias podem ser criadas com a função *figure* e utilizadas com qualquer combinação de componentes.
3. **Chamadas de Retorno:** Finalmente, é preciso existir alguma maneira de executar uma ação caso um usuário pressione o botão de um mouse ou digite informação pelo teclado. Um pressionar de botão do mouse ou de tecla é um evento, e o programa MATLAB precisa responder a cada evento para desempenhar sua função. Por exemplo, se um usuário pressiona um botão, esse evento precisa levar o código MATLAB que implementa a função do botão a ser executado. O código executado em resposta a um evento é conhecido como chamada de retorno. Deve existir uma chamada de retorno para implementar a função de cada componente gráfico da GUI.

5.3 Criação de uma GUIDE

A ferramenta GUIDE pode ser acessada através de um clique no ícone específico na barra de ferramentas ou por meio da entrada do comando *guide* no espaço de trabalho do MATLAB (ou *workspace*, do inglês), aparecendo as opções presentes na Figura 5.2.

Figura 5.2: Print Screen do *Quick Start* do GUIDE - Inicialização Rápida



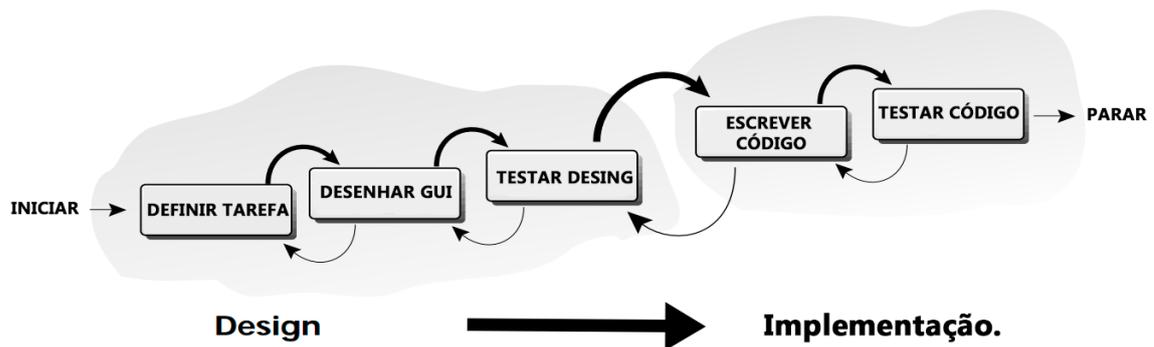
Fonte: Lent (2013), p. 148.

Por padrão, a opção GUI em branco é selecionada. Caso o usuário deseje optar por uma das outras três opções, basta selecionar e clicar em OK. Se escolhida a primeira opção, o programa abrirá uma tela em branco.

Juntamente com a tela inicial, o MATLAB cria um arquivo .m com o código fonte da GUI criada. Qualquer alteração feita na parte gráfica deve ser atualizada no arquivo criado, sendo que o MATLAB já cria automaticamente, no código, as funções que deverão ser programadas posteriormente.

O processo de criação de uma GUIDE, como já falado anteriormente, segue uma linha lógica, que se adotada levará mais facilmente ao objetivo almejado. A Figura 5.3 mostra de forma simplificada este processo, desde o início até o fim, através da série de processos, tais como iniciar a tarefa, desenhar a GUI, testá-la, escrever o código e validá-lo.

Figura 5.3: Processo de Criação de uma GUIDE



Fonte: Adaptado de MathWorks (2005), p. 2-12.

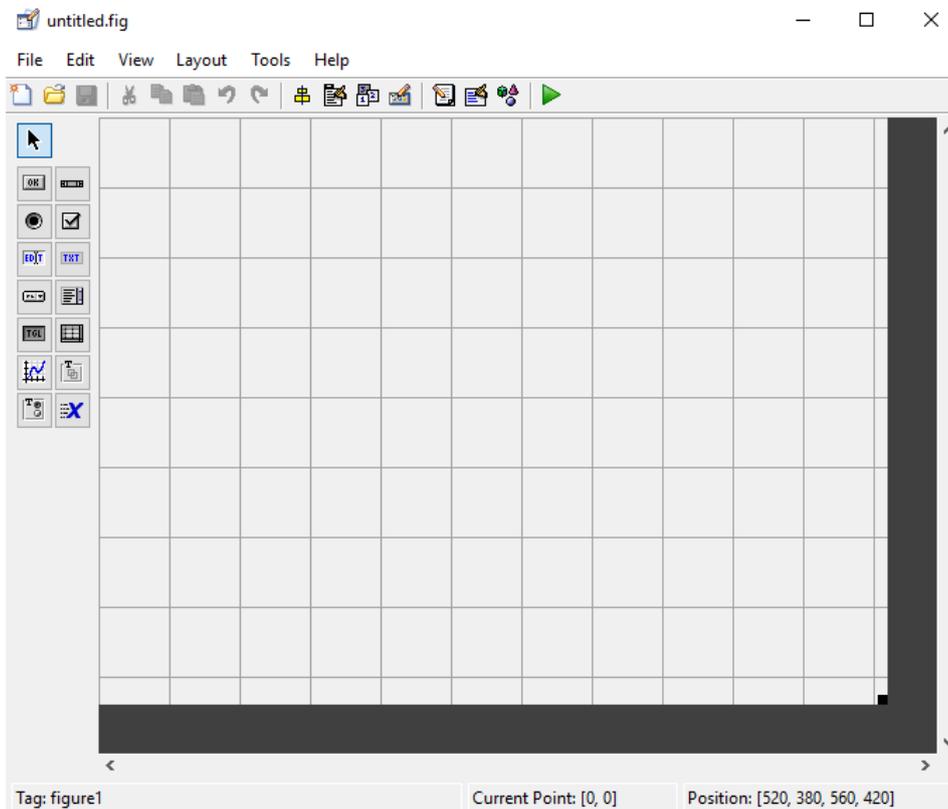
Após aberta a tela inicial, há algumas opções que ficam disponíveis ao usuário. A Figura 5.4 exibe a tela após selecionada a opção *Blank GUI (Default)*.

Esta tela pode ter seu tamanho ajustado de acordo com a necessidade. Para isso, basta clicar no canto inferior direito da tela e arrastar para a posição desejada. Em sua barra de ferramentas, há as opções padrão dos programas WINDOWS, que são:

- *File* (arquivo);
- *Edit* (editar);
- *View* (visualizar);
- *Layout* (disposição);
- *Tools* (ferramentas);

- *Help* (ajuda).

Figura 5.4: Tela inicial de uma GUIDE



Fonte: MathWorks (2005), p. 2-12.

Além disso, há opções disponíveis na barra de ferramentas inferior, tais como: criar um novo arquivo, abrir, salvar, recortar, colar, desfazer, refazer, alinhar, editor de menu, Tab Order Editor, Toolbar Editor, Editor, Property Inspector, Object Browser e Run.

Na vertical, há um conjunto de ferramentas básicas, que são as principais para elaboração das GUIDEs, conforme Figura 5.5.

- a) *Push Button* - Com essa ferramenta é possível criar um botão que volta ao estado original após ser ativado. Ao se clicar no ícone *Push Button* da GUI, aparecerá na tela quadriculada uma pequena cruz preta que permite definir o tamanho do botão retangular, sua função é acionar uma chamada de retorno quando ativado pelo mouse.
- b) *Radio Button* - é um tipo de chave que aparece como um pequeno círculo com um ponto no meio quando está "ligado". Grupos de marcadores são utilizados para implementar escolhas mutuamente exclusivas. Cada ativação do mouse no marcador ativa uma chamada de retorno.

Figura 5.5: Ferramentas Básicas de uma GUIDE



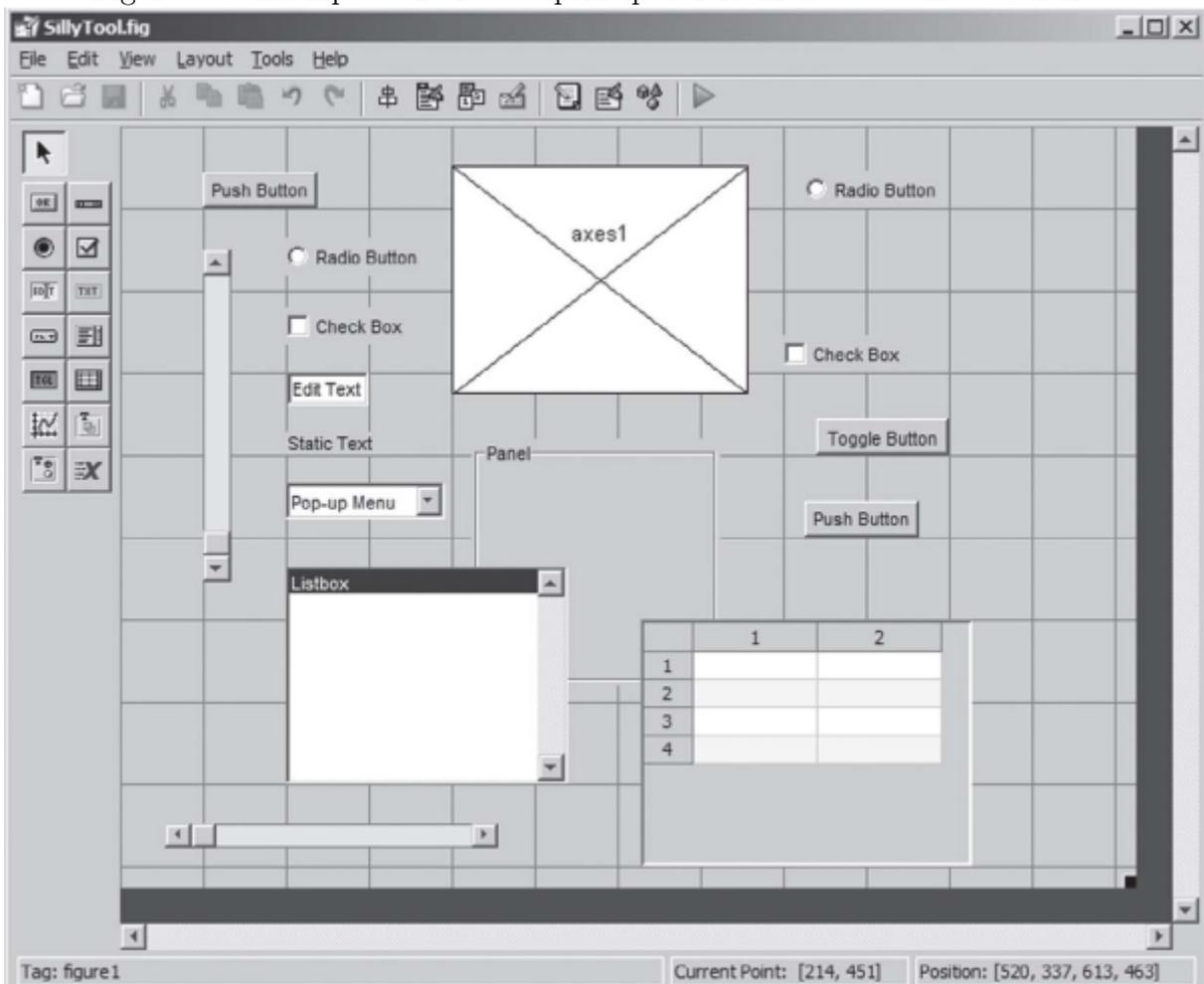
Fonte: Lent (2013), p. 149.

- c) *Edit Textbox* - exibe uma cadeia de caracteres de texto e permite que o usuário modifique as informações exibidas. Uma chamada de retorno é ativada quando o usuário pressiona a tecla *Enter*.
- d) *Pop-up Menu* - Campo que, ao ser clicado, disponibilizada diversas opções criadas pelo programador. Um usuário pode selecionar uma das cadeias de caracteres pelo acionamento duplo ou simples sobre ela.
- e) *Toggle Button* - Semelhante à ferramenta *Push Button*, a *Toggle Button* tem como função exibir um botão a ser ativado. Sua diferença quando comparado ao *Toggle Button* é que ele permanece pressionado depois que o usuário o ativa.
- f) *Axes* - superfície na qual é mostrada uma imagem bi ou tridimensional, permitindo a entrada de imagens, tais como figuras externas, ou gráficos criados pelo próprio MATLAB.
- g) *Button Group* - Campo no qual são agrupados *Toggle Button* e *Radio Buttons*.
- h) *Slider* - é um controle gráfico para ajustar um valor de forma gradual e contínua, arrastando o controle com um mouse. Cada mudança no *slider* ativa uma chamada de retorno com um valor específico.
- i) *Checkbox* - também chamada de "caixa de verificação" é um tipo de chave que aparece como um pequeno quadrado com uma marca de verificação quando está "ligada". Cada ativação do mouse na caixa de verificação ativa uma chamada de retorno.

- j) *Static Textbox* - Exibe um texto fixo na tela, que não pode ser alterado pelo usuário.
- k) *Table* - Exibe dados em forma tabular.
- l) *Panel* - Espaço que possibilita o agrupamento de ferramentas quaisquer, cuja utilidade é organizar as ferramentas.
- m) *ActiveX Control* - Permite que os controles da ActiveX sejam exibidos na GUI. Uma vez criados os campos o usuário poderá configurar suas propriedades. Para fazê-lo bastar dar um duplo clique em qualquer uma das ferramentas anteriormente apresentadas.

A Figura 5.6 mostra um exemplo contendo vários objetos em uma única tela.

Figura 5.6: Exemplo contendo as principais ferramentas de uma GUIDE.



Fonte: Lent (2013), p. 150.

Capítulo 6

MATERIAIS E MÉTODOS

A dissertação foi elaborada primeiramente a partir de uma revisão bibliográfica, com leituras de artigos e livros, para averiguar a relevância do tema. Após esse passo, foi constatado o nível de relevância, haja vista a grande quantidade de artigos publicados com o tema relativo aos simuladores didáticos para ondas viajantes.

Feito isso, foram selecionados os modelos a serem simulados, no caso especificamente, foram quatro modelos, chamados de "configuração 1", "configuração 2", "configuração 3" e "configuração 4". Tais modelos foram escolhidos e pensados em ordem crescente de complexidade, a fim de tornar o mais didático possível a compreensão do tema abordado.

Como principal material foi utilizado o computador com o programa para elaboração do simulador, além de *softwares* auxiliares de edição imagens e de validação dos dados.

Definidas configurações, foi então passado para a parte de elaboração gráfica dos modelos no *software* de edição de imagem. Após isso foram feitos os passos especificados no Capítulo 5 para a criação da interface gráfica, passando por cada uma das etapas mencionadas.

Além do que foi visto nos passos para criação de uma GUIDE no MATLAB, há a parte mais onerosa no processo que foi o desenvolvimento da modelagem matemática para cada uma das configurações, conforme visto no Capítulo 4.

Depois de definidas as equações de cada configuração, para cada trecho especificamente, há o processo de implementação no MATLAB. O modelo desenvolvido segue uma série de regras de programação a fim de facilitar e tornar o mais didático possível, não só a sua utilização, mas a sua compreensão.

No GUIDE cada *radio button*, *static text*, *list box*, *edit text*, deve ser referenciado no arquivo que contém os códigos, cada entrada deve ser convertida de *strig* para número,

a partir do comando *str2num*, para então ser interpretado e utilizado nos algoritmos.

Por exemplo, o dado de entrada l_1 deve ser introduzido na GUIDE, sua *TAG* deve ser alterada para "l1", e então pode-se criar uma ação com este dado. O *push button* é o responsável por realizar a ação, logo para efetuar a leitura, converter a entrada de texto para um número e pode utilizá-lo nos cálculos é necessário que a ação do botão seja configurada da seguinte forma:

$$l1 = str2num(get(handles.l1,'String'))$$

Agora que o dado foi inserido na caixa de texto, ele pode ser utilizado para realizar as operações com a mesma linguagem utilizada pelo MATLAB.

Quando inserido o *push button*, automaticamente o MATLAB cria uma função específica para ele. Desta forma, para transforma a conversão de *string* para número, associada ao botão, que será chamado de "calcular", é criada a função como segue:

```
function calcular_callback(hObject,eventdata,handles)
l1 = str2num(get(handles.l1,'String'));
```

Depois de feitas todas as associações dos dados de entrada, transformando-os de *strings* para número, e feitas as etapas de preparação dos cálculos com os algoritmos apropriados, falta a etapa de criação dos gráficos animados.

No MATLAB a criação de gráficos é uma tarefa bastante simples, há várias funções que possibilitam tal criação, entretanto o desafio se encontra em fazê-los animados. A função mais conhecida para criação de gráficos 2D (em duas dimensões) no MATLAB é a *plot()*.

A criação da animação se dá a partir um laço, fazendo a figura ser plotada sequenciais vezes, dando uma percepção visual de animação, funcionando como construção quadro-a-quadro.

Os comandos adicionais para a visualização da animação são: *drawnow* e para mudar o tempo da anima o *pause(1/T)*, onde "1/T" é a fração de tempo que a animação durará em cada quadro, ou seja, quanto menor o "T", mais lenta será a animação.

Para inserir uma imagem fixa deve ser inserido um campo tipo *axes*. Logo após isso o MATLAB cria uma função, direcionada exclusivamente ao campo inserido. No caso específico, foi criado o seguinte:

```
function imagem_fixa_CreateFcn(hObject,eventdata,handles)
```

Para alterar o campo em branco padrão do *axes* para uma imagem específica da biblioteca, deve ser inserida uma imagem na mesma pasta onde o arquivo da GUIDE

está salvo e então usado o comando específico para alterar de branco para a imagem desejada. No caso, o *axes* possui uma *tag*, ou seja, foi nominada de "imagemfixa". Para substituir o padrão por uma imagem no formato *.png* foi utilizado o comando *imshow()*, cuja função é fazer mostrar uma imagem. Desta forma, para inserir a figura, foi feito o que está expresso em seguida:

```
function pushbutton1_Callback(hObject,eventdata,handles)
axes(handles.imagemfixa);
imshow('modelo1.png');
```

Quanto à inserção dos *radio buttons* houve uma sequência lógica de ativação-desativação para quando estes fossem selecionados. Ao selecionar a configuração, nos dados de entrada, bem como o trecho da linha correspondente devem ser ativados de acordo com a necessidade. Portanto, se selecionada a Configuração 1:

Figura 6.1: Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 1.

Dados de Entrada	
l_1 [km]	Comprimento da linha
C1 [uF/km]	Capacitância por km
L1 [mH/km]	Indutância por km
l_2 [km]	Comprimento da linha
C2 [uF/km]	Capacitância por km
L2 [mH/km]	Indutância por km
l_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	Resistência da Carga
Rg [Ohm]	Resistência da Fonte
Vo [Volts]	Tensão Inicial

Trecho do sistema	Tensão na Barra
<input checked="" type="radio"/> Linha 1-2 <input type="radio"/> Linha 2-3 <input type="radio"/> Linha 1-3 <input type="radio"/> Linha 3-4	<input checked="" type="radio"/> Emissora <input type="radio"/> Receptora

Fonte: Autoria própria.

As informações para os dados de entrada para as linhas 2 e 3 ficaram indisponíveis, o mesmo aconteceu para a opção de seleção do trecho do sistema, sendo liberada apenas a opção "Linha 1-2".

O mesmo procedimento foi adotado para as outras configurações.

A Figura 6.2 mostra o resultado para a seleção do *radio button 2*, no qual pode-se observar que as opções de entrada para a linha 3 foram desativadas, bem como as alternativas "Linha 1-3" e "Linha 3-4", no menu "Trecho do sistema":

Figura 6.2: Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 2.

Dados de Entrada	
ℓ_1 [km]	Comprimento da linha
C1 [uF/km]	Capacitância por km
L1 [mH/km]	Indutância por km
ℓ_2 [km]	Comprimento da linha
C2 [uF/km]	Capacitância por km
L2 [mH/km]	Indutância por km
ℓ_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	Resistência da Carga
Rg [Ohm]	Resistência da Fonte
Vo [Volts]	Tensão Inicial

Trecho do sistema	Tensão na Barra
<input checked="" type="radio"/> Linha 1-2 <input type="radio"/> Linha 2-3 <input type="radio"/> Linha 1-3 <input type="radio"/> Linha 3-4	<input checked="" type="radio"/> Emissora <input type="radio"/> Receptora

Fonte: Autoria própria.

Seguindo a mesma linha, foi acionado o *radio button 3*, resultando em: a opções para dados de entrada para a linha 3 foram desativadas, uma vez que só há duas linhas, e estas foram nominadas "linha 1" e "linha 2". Logo os trechos possíveis do sistema são: Linha 1-2 e Linha 1-3. A Figura 6.3 mostra como é exibido na tela do programa ao ser selecionada a opção 3.

Acionar o *radio button 4*, gera como saída de praticamente todas as opções ativadas, exceto para a opção "Trecho do sistema", que inativa a opção "Linha 2-3", uma vez que esta não existe para a configuração 4. A Figura 6.4 mostra como é exibido na tela do programa ao ser selecionada a opção 4.

Percebe-se que para uma das seleções foi determinado quais as possibilidade de entrada e de seleção, a fim de facilitar a operação do utilizador. O código completo para esta funcionalidade está presente no Apêndice A.

Os demais processos de criação do programa, são baseados em procedimentos já explicados neste capítulo, como a implementação das equações a partir dos dados de entrada e como criar os gráficos e mudar a opção de *axes* para um gráfico ou imagem.

Figura 6.3: Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 3.

Dados de Entrada	
l_1 [km]	Comprimento da linha
C1 [uF/km]	Capacitância por km
L1 [mH/km]	Indutância por km
l_2 [km]	Comprimento da linha
C2 [uF/km]	Capacitância por km
L2 [mH/km]	Indutância por km
l_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	Resistência da Carga
Rg [Ohm]	Resistência da Fonte
Vo [Volts]	Tensão Inicial

Trecho do sistema		Tensão na Barra	
<input checked="" type="radio"/> Linha 1-2	<input type="radio"/> Linha 2-3	<input checked="" type="radio"/> Emissora	<input type="radio"/> Receptora
<input type="radio"/> Linha 1-3	<input type="radio"/> Linha 3-4		

Fonte: Autoria própria.

Figura 6.4: Ativação dos botões e caixas de seleção para a Configuração 4.

Dados de Entrada	
l_1 [km]	Comprimento da linha
C1 [uF/km]	Capacitância por km
L1 [mH/km]	Indutância por km
l_2 [km]	Comprimento da linha
C2 [uF/km]	Capacitância por km
L2 [mH/km]	Indutância por km
l_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	Resistência da Carga
Rg [Ohm]	Resistência da Fonte
Vo [Volts]	Tensão Inicial

Trecho do sistema		Tensão na Barra	
<input checked="" type="radio"/> Linha 1-2	<input type="radio"/> Linha 2-3	<input checked="" type="radio"/> Emissora	<input type="radio"/> Receptora
<input type="radio"/> Linha 1-3	<input type="radio"/> Linha 3-4		

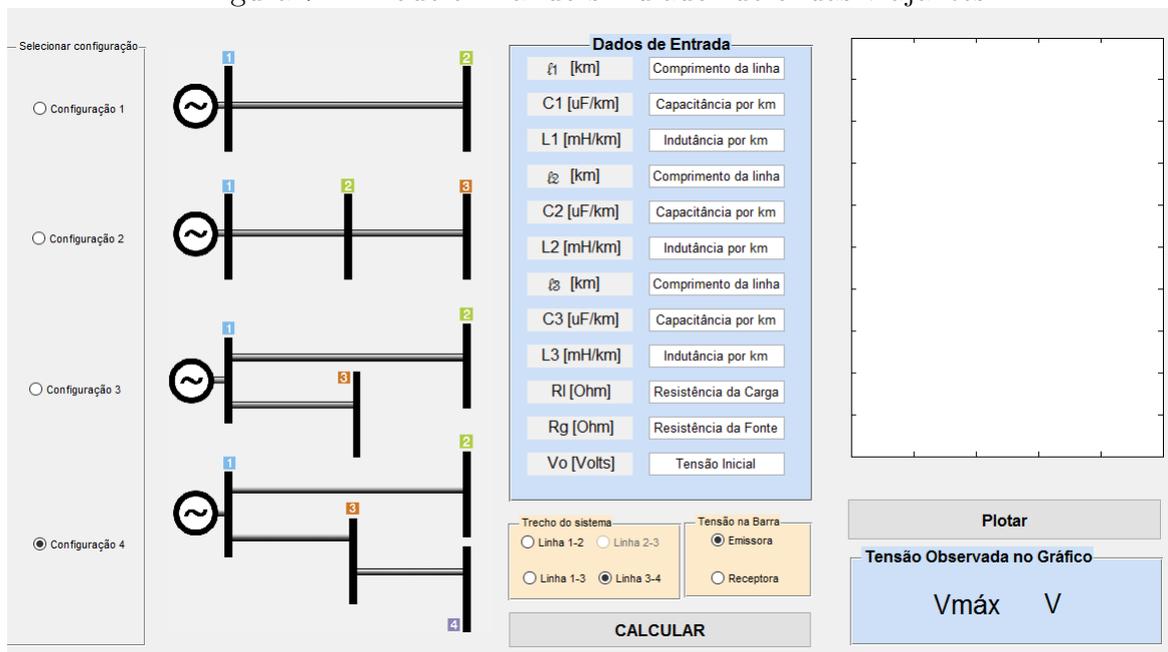
Fonte: Autoria própria.

Capítulo 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado foi criado um programa que calcula os coeficientes de reflexão e de transmissão para todas as linhas, considerando o modelo de linhas longa (parâmetros distribuídos) bem como sua impedância característica, que exibe uma onda viajante entre duas barras em um sistema de potência. A figura a seguir mostra a tela final do modelo:

Figura 7.1: Modelo final do simulador de ondas viajantes



Fonte: Autoria própria.

É interessante ressaltar que o MATLAB possibilita a criação de arquivos executáveis (.exe), o que facilita a difusão do programa, visto que não é preciso possuir o MATLAB instalado na máquina para poder acessar todas as funcionalidades do simulador.

7.1 Configuração 1 - Linha 1-2

Aqui será mostrado o resultado obtido para a configuração 1, com a linha 1-2 selecionada, considerando uma fonte de tensão de 1000 V que fornece um pulso, cuja resistência interna é de 25Ω , comprimento de 15 km, capacitância por unidade de comprimento de $6,25\mu F$, indutância de $62,5mH$, também por unidade de comprimento. Tudo isso foi conectado à uma carga puramente resistiva de 900Ω . Ao lançar os dados no simulador, conforme Figura 7.2, e pressionar o botão "PLOTAR", iniciam-se as reflexões sucessivas entre as barras 1 e 2. A cor vermelha representa a onda progressiva e a azul no sentido contrário.

No tempo $t = 0$, a fonte energiza o sistema com um pulso unitário, com amplitude de 1000 V e então começam as reflexões. Neste momento, a fonte enxerga somente a impedância da linha. Os efeitos da carga não serão sentidos até que se passe um período igual a $2\tau_1$, que representa o tempo de deslocamento de ida e volta para onda viajar da linha 1 para a 2 e voltar.

Figura 7.2: Dados de entrada

Dados de Entrada	
ℓ_1 [km]	15
C1 [uF/km]	6.25
L1 [mH/km]	62.5
ℓ_2 [km]	Comprimento da linha
C2 [uF/km]	Capacitância por km
L2 [mH/km]	Indutância por km
ℓ_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	900
Rg [Ohm]	25
Vo [Volts]	1000

Fonte: Autoria própria.

Logo, definindo inicialmente o Z_0 , a partir da Equação 3.41, temos que:

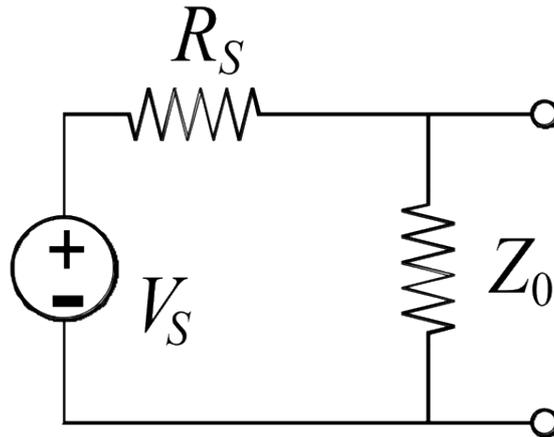
$$Z_0 = \sqrt{\frac{62,5mH}{6,25\mu F}} = 100\Omega \quad (7.1)$$

A tensão V_{1+} pode ser encontrada através do divisor de tensão para o circuito do modelo mostrado na Figura 7.3.

$$V_{1+} = V_S \frac{Z_0}{Z_0 + R_S} = 1000 \frac{100}{100 + 25} = 800V, \quad (7.2)$$

conforme pode ser observado na Figura 7.4 para a onda progressiva, o valor da tensão

Figura 7.3: Circuito modelo para $t = 0$.



Fonte: Autoria própria.

é 800 V.

O coeficiente de reflexão é determinado conforme equação a seguir:

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{900 - 100}{900 + 100} = 0,8, \quad (7.3)$$

Já o coeficiente de reflexão na barra dois, aqui chamado de ρ_S é dado da seguinte forma:

$$\rho_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} = \frac{25 - 100}{25 + 100} = -0,6, \quad (7.4)$$

De posse dos coeficientes é possível validar manualmente os resultados obtidos pelo simulador.

$$V_{1-} = V_{1+}(\rho_L) = 800 \times 0.8 = 640V, \quad (7.5)$$

ou seja, na primeira reflexão tem-se 800 V progressivos e 640 V regressivos, conforme Figura 7.5.

Para a segunda reflexão:

$$V_{2+} = V_{1-}(\rho_S) = 640 \times (-0.6) = -384V, \quad (7.6)$$

$$V_{2-} = V_{2+}(\rho_L) = -384 \times (0.8) = -307,2V, \quad (7.7)$$

Para a terceira reflexão:

$$V_{3+} = V_{2-}(\rho_S) = -307,2 \times (-0.6) = 184,32V, \quad (7.8)$$

$$V_{3-} = V_{3+}(\rho_L) = 184,32 \times (0.8) = 147,456V, \quad (7.9)$$

Para a quarta reflexão:

$$V_{4+} = V_{3-}(\rho_S) = 147,456 \times (-0.6) = -88,47836V, \quad (7.10)$$

$$V_{3-} = V_{3+}(\rho_L) = (-88,47836) \times (0.8) = -70,7789V, \quad (7.11)$$

A tabela a seguir mostra o comportamento das quatro primeiras reflexões com os dados de linha inseridos.

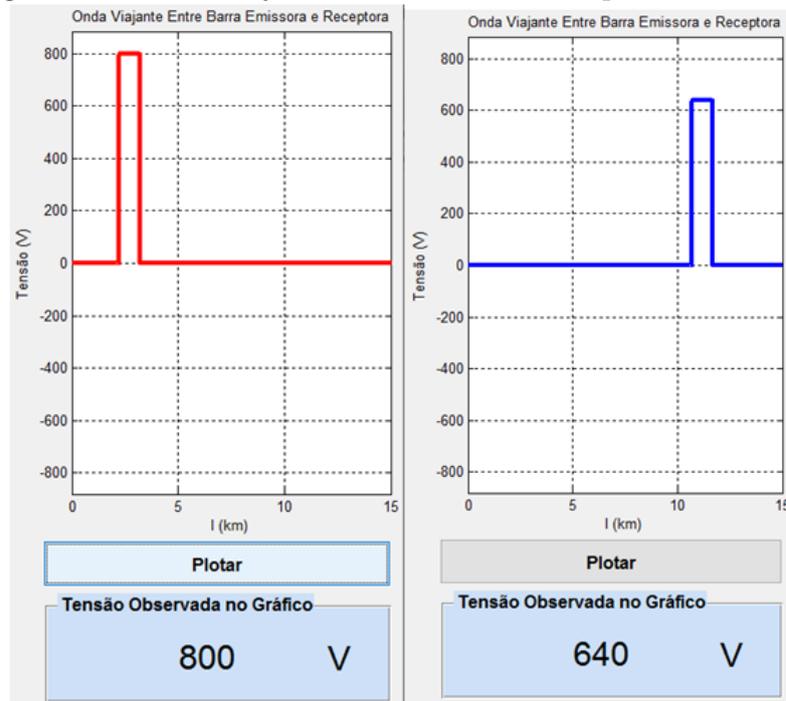
Tabela 7.1: Nível de tensão da onda viajante para reflexões sucessivas para a configuração 1 do simulador.

Reflexão	Onda Progressiva	Onda Regressiva
primeira	800 V	640 V
segunda	-384 V	-307,2 V
terceira	184,32 V	147,46 V
quarta	-88,47	-70,78 V

Fonte: Autoria própria.

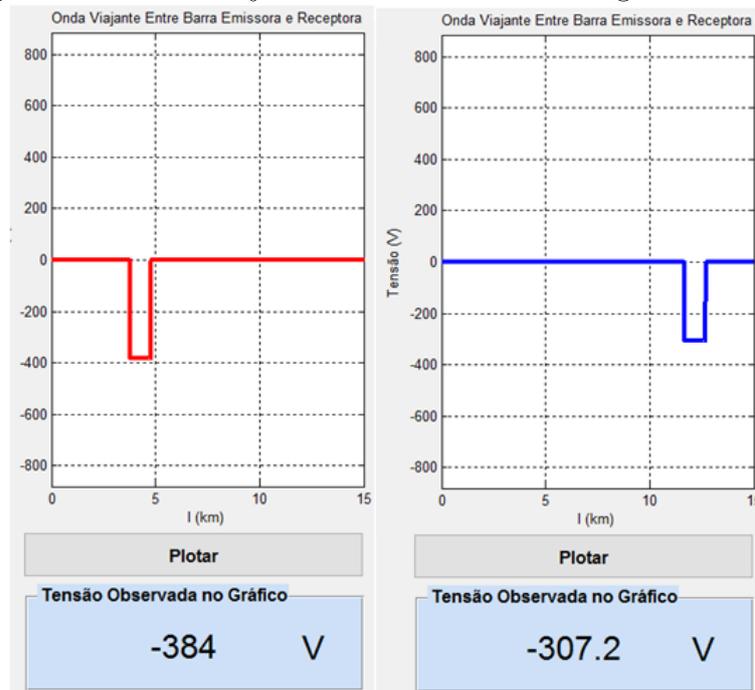
As Figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 exibem o comportamento dos gráficos gerados pelo simulador com os dados inseridos e a configuração selecionada. De forma interativa, ou seja, com a inserção de dados por parte do usuário, e através da visualização da animação, percebe-se que fica mais didática a compreensão do fenômeno das ondas viajantes no trecho selecionado. Desta forma o trabalho atinge o objetivo esperado de tornar mais dinâmico esse estudo.

Figura 7.4: Onda viajante entre barra 1 e 2 - primeira reflexão



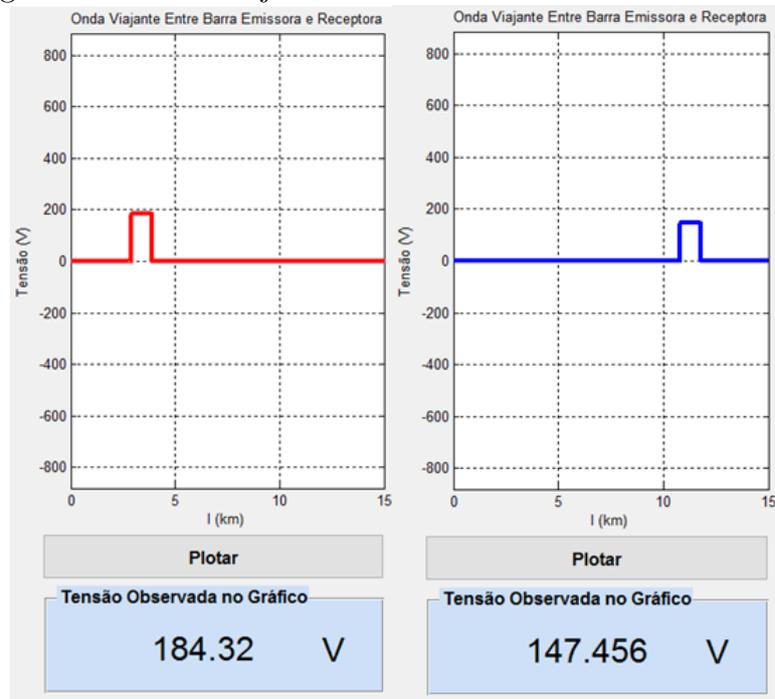
Fonte: Autoria própria.

Figura 7.5: Onda viajante entre barra 1 e 2 - segunda reflexão



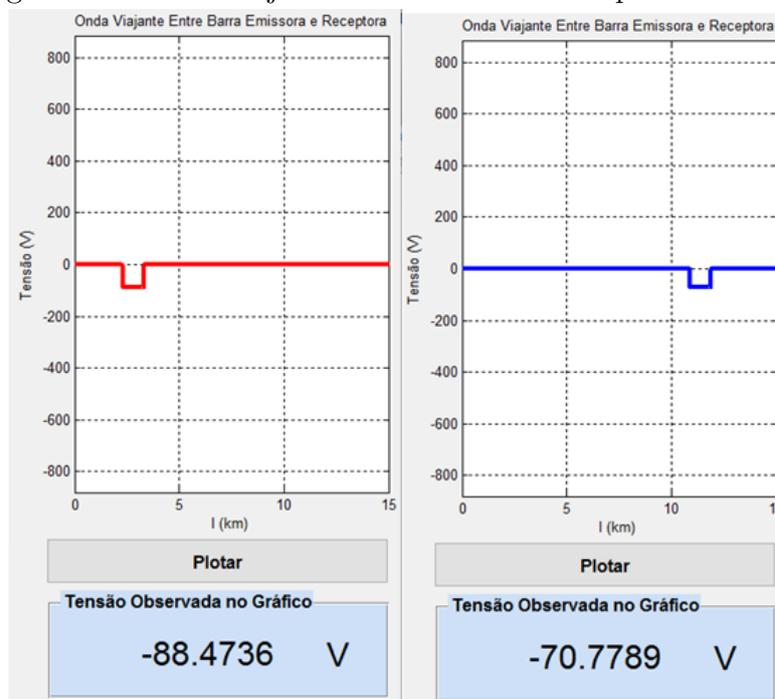
Fonte: Autoria própria.

Figura 7.6: Onda viajante entre barra 1 e 2 - terceira reflexão



Fonte: Autoria própria.

Figura 7.7: Onda viajante entre barra 1 e 2 - quarta reflexão



Fonte: Autoria própria.

Figura 7.8: Onda viajante entre barra 1 e 2 - quinta reflexão



Fonte: Autoria própria.

7.2 Configuração 3 - Linha 1-2

O mesmo procedimento adotado para o exemplo anterior foi tomado para a configuração 3, linha 1-2, barra emissora. Os valores adotados para tal configuração foram os especificados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Dados de Entrada

l_1	$15km$
C_1	$10\mu F$
L_1	$6,25mH$
l_2	$30km$
C_2	$5\mu F$
L_2	$3,125mH$
R_L	100Ω
R_g	25Ω
V_0	$1000V$

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, diferentemente da Configuração 1, há influência das ondas que foram

até a barra 3 e voltaram pela barra 1 até a 2. Desta forma, devem ser calculados os parâmetros para ambas as linhas (Linha 1-2 e Linha 1-3).

Linha 1-2

Para este trecho tem-se que:

$$\tau_1 = \frac{l_1}{v} = \frac{15km}{3 \cdot 10^5 km/s} = 50\mu s \quad (7.12)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{6.25mH}{10\mu F}} = 25\Omega \quad (7.13)$$

$$\rho_{r1-2} = \frac{Z_{L1} - Z_1}{Z_{L1} + Z_1} = \frac{100 - 25}{100 + 25} = 0,6 \quad (7.14)$$

$$\rho_{t1-2} = \rho_{r1-2} + 1 = 1,6 \quad (7.15)$$

$$\rho_{r2-1} = -\rho_{r1-2} = -0,6 \quad (7.16)$$

$$\rho_{t2-1} = \rho_{r2-1} + 1 = 0,4 \quad (7.17)$$

Linha 1-3

Para este trecho, tem-se que:

$$\tau_2 = \frac{l_2}{v} = \frac{30km}{3 \cdot 10^5 km/s} = 100\mu s \quad (7.18)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = \sqrt{\frac{3.125mH}{5\mu F}} = 25\Omega \quad (7.19)$$

$$\rho_{r1-3} = \frac{Z_{L2} - Z_2}{Z_{L2} + Z_2} = \frac{0 - 25}{0 + 25} = -1 \quad (7.20)$$

$$\rho_{t1-3} = \rho_{r1-3} + 1 = 0 \quad (7.21)$$

$$\rho_{r3-1} = -\rho_{r1-3} = 1 \quad (7.22)$$

$$\rho_{t3-1} = \rho_{r3-1} + 1 = 2 \quad (7.23)$$

Determinação da amplitude da onda viajante

Para esta simulação, foi considerado que a fonte de tensão, cuja amplitude é de 1000 V, forneceu um pulso e que há uma carga conectada à barra 2, estando a barra 3 ligada ao terra.

A análise deste fenômeno se torna simplificada se considerado que as ondas trafegam individualmente e depois feita a sobreposição das ondas.

Sabendo-se que $\tau_2 = 2\tau_1$, conforme Figura 4.5, percebe-se que, para a onda viajante no trecho 1-3 ir e voltar são necessário $200\mu s$, ao passo que a no trecho 1-2 será a metade deste tempo, ou seja, a primeira sobreposição da onda ocorrerá na quarta reflexão da onda no trecho 1-2.

$$V_{1+} = V_0 = 1000V, \quad (7.24)$$

$$V_{1-} = V_{1+}(\rho_{r2-1}) = 1000 \cdot (-0,6) = -600V, \quad (7.25)$$

$$V_{2+} = V_{1-}(\rho_{r1-2}) = -600 \cdot 0,6 = -360V, \quad (7.26)$$

$$V_{2-} = V_{2+}(\rho_{r2-1}) = -360 \cdot (-0,6) = 216V, \quad (7.27)$$

Neste ponto ocorre a sobreposição da onda, uma vez que, se passaram $200\mu s$. Assim, temos que:

$$V_{3+} = (V_{2-} + 1000)(\rho_{r1-2}) = (216 + 1000) \cdot 0,6 = 729,6V, \quad (7.28)$$

então as reflexões continuam por mais intervalos de $200\mu s$ sofrendo uma nova sobreposição.

$$V_{3-} = V_{3+}(\rho_{r2-1}) = 729,6 \cdot (-0,6) = -437,76V, \quad (7.29)$$

$$V_{4+} = V_{3-}(\rho_{r1-2}) = -437,76 \cdot (0,6) = -262,66V, \quad (7.30)$$

$$V_{4-} = V_{4+}(\rho_{r2-1}) = -262,66 \cdot (-0,6) = 157,59V, \quad (7.31)$$

$$V_{5+} = (V_{4-} - \rho_{r2-1} + 1000)(\rho_{r1-2}) = (157,59 \cdot (-0,6) + 1000) \cdot (0,6) = 656,73V, \quad (7.32)$$

$$V_{5-} = V_{5+}(\rho_{r2-1}) = 656,73 \cdot (-0,6) = -394,04V, \quad (7.33)$$

$$V_{6+} = V_{5-}(\rho_{r1-2}) = -394,04 \cdot (0,6) = -236,42V, \quad (7.34)$$

$$V_{6-} = V_{6+}(\rho_{r2-1}) = -236,42 \cdot (-0,6) = 141,85V, \quad (7.35)$$

A Tabela 7.3 a seguir evidencia os efeitos o comportamento das linhas se tomadas individualmente ou em conjunto, sendo destacado em **negrito** o momento em que a primeira coluna diferencia-se de da segunda. No caso, percebe-se que a partir da quinta reflexão a onda da linha 1-3 agiu sobre a 1-2, sendo sua próxima influência no instante em que passar dos $400\mu s$, conforme Equação 7.32.

Tabela 7.3: Análise comparativa entre ondas viajantes na Configuração 3

L1-2 Isoladamente	L1-3 Isoladamente	L1-2 e L1-3
1000 V	1000 V	1000 V
-600 V	1000 V	-600 V
-360 V	1000 V	-360 V
216 V	1000 V	216 V
129,6 V	-1000 V	729,6 V
-77,76	-1000 V	-437,76 V
-46,66 V	-1000 V	-262,66 V
27,99 V	-1000 V	157,59 V
16,80 V	1000 V	656,73 V
-10,07 V	1000 V	-394,04 V
-6,05 V	1000 V	-236,42 V
-3,63 V	1000 V	141,854 V

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7.9 exibe o campo de preenchimento dos dados no programa com os valores informados na Tabela 7.2.

Figura 7.9: Inserção de dados no simulador.

Dados de Entrada	
ℓ_1 [km]	15
C1 [uF/km]	10
L1 [mH/km]	6.25
ℓ_2 [km]	30
C2 [uF/km]	5
L2 [mH/km]	3.125
ℓ_3 [km]	Comprimento da linha
C3 [uF/km]	Capacitância por km
L3 [mH/km]	Indutância por km
RI [Ohm]	100
Rg [Ohm]	25
Vo [Volts]	1000

Fonte: Fonte: Autoria própria.

As figuras a seguir mostram a tela do simulador para as diversas reflexões:

Figura 7.10: Primeira reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.

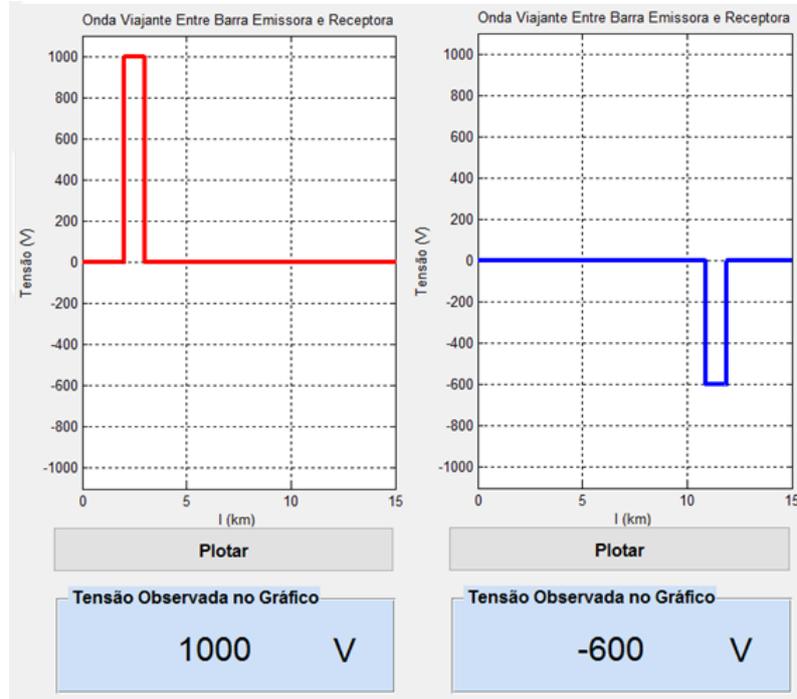


Figura 7.11: Segunda reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.

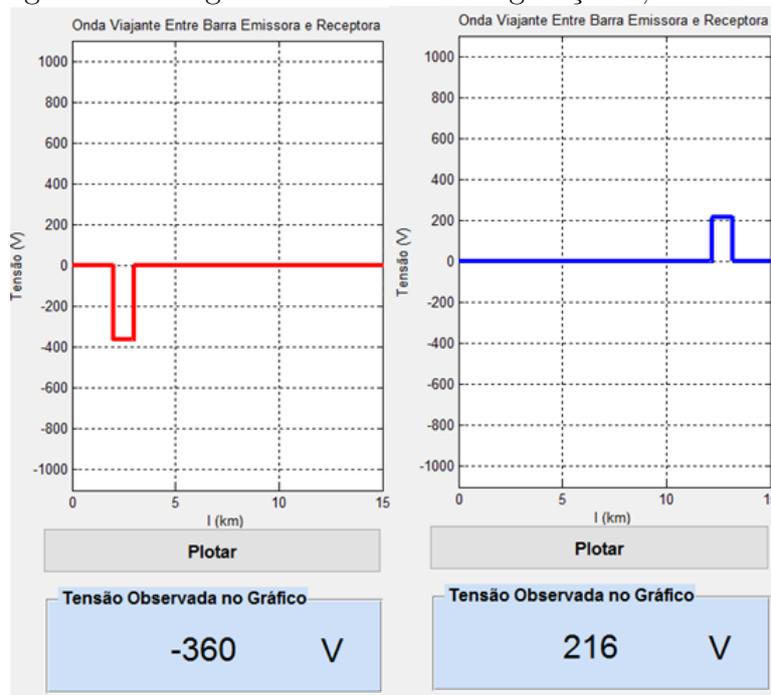
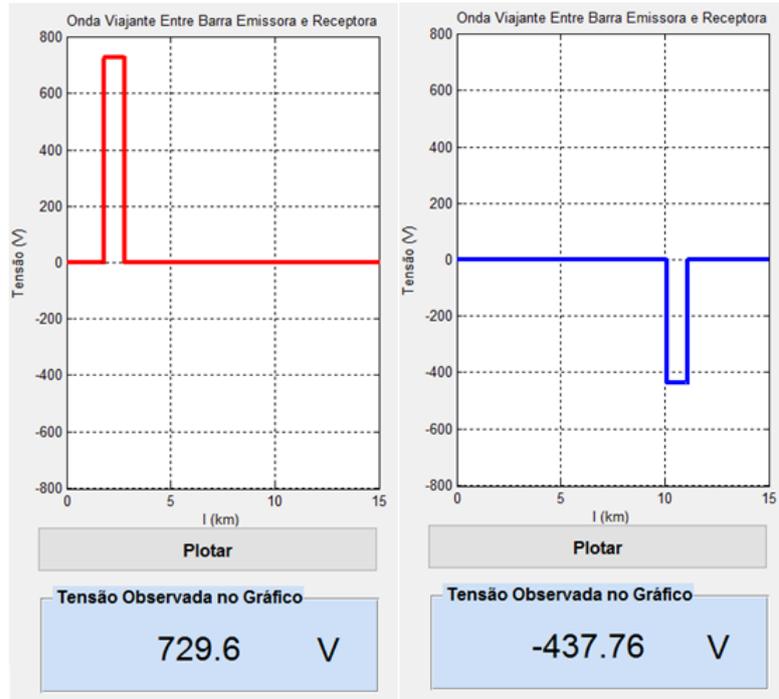
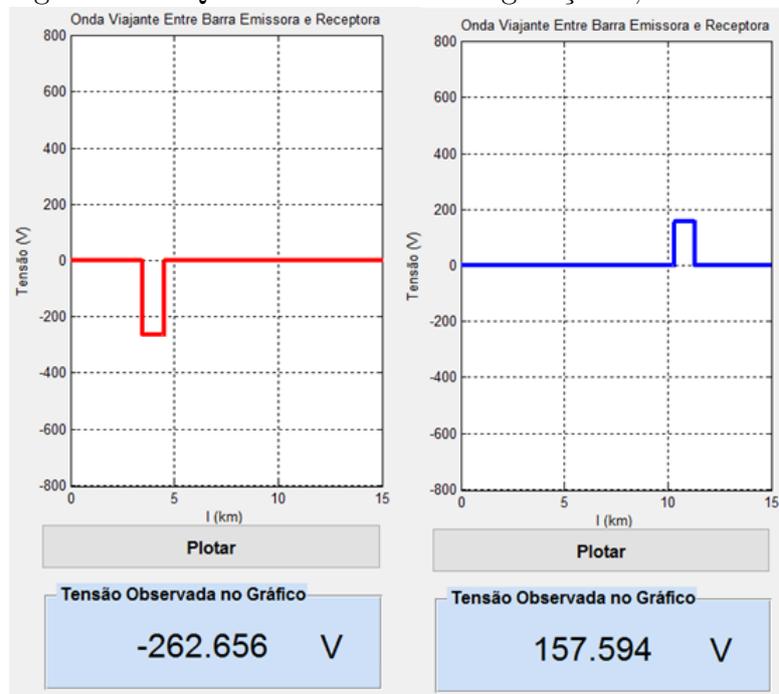


Figura 7.12: Terceira reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.



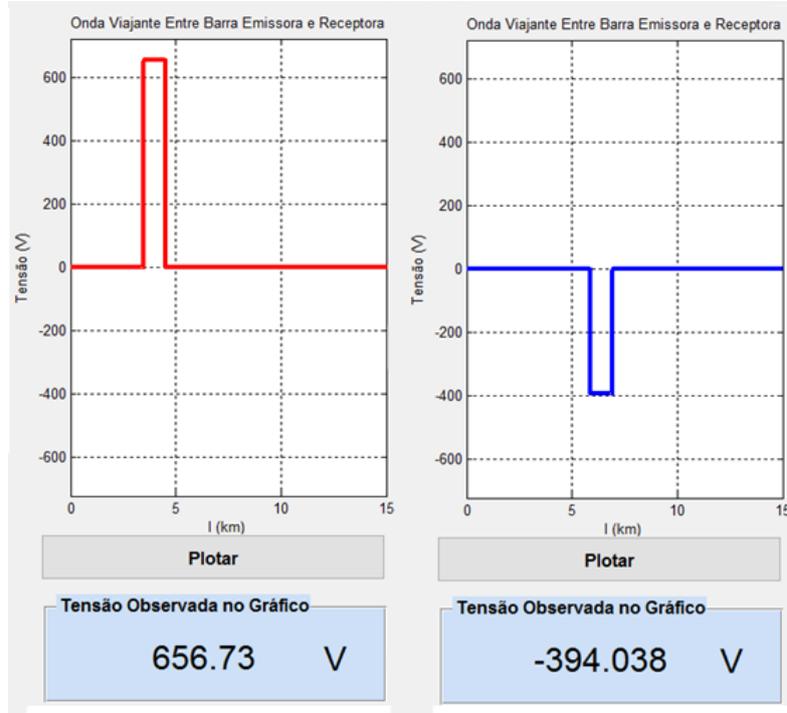
Fonte: Fonte: Autoria própria.

Figura 7.13: Quarta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.



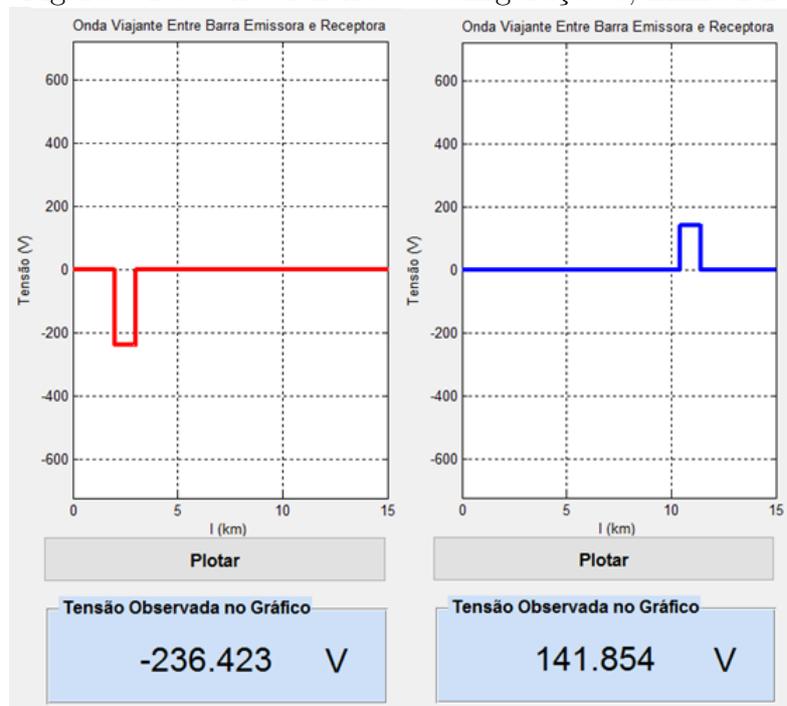
Fonte: Fonte: Autoria própria.

Figura 7.14: Quinta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

Figura 7.15: Sexta reflexão - Configuração 3, Linha 1-2.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram estudados diferentes configurações de sistemas de potência, com enfoque na criação de um simulador de ondas viajantes em linhas de transmissão, através de animações feitas por meio de uma interface gráfica, com a finalidade de tornar didático o processo de ensino-aprendizagem do estudo das ondas viajantes em sistemas de potência.

As ferramentas computacionais são poderosos meios de facilitação da difusão do conhecimento, especialmente os *softwares* de simulação computacional, uma vez que ele permite que o conhecimento que muitas vezes é tomado de forma puramente abstrata seja posta de uma forma diferenciada e torne-se, pelo menos, em determinados casos, mais visual.

A animação tem esse papel importante. O programa, além de possibilitar a visualização dos resultados das ondas no domínio do tempo, permite a interação com o problema estudado, uma vez que o usuário pode inserir os dados para conferência com cálculos manuais. Logo, essa ferramenta pode acompanhar os professores quando o tema tratado neste trabalho for abordado.

O programa criado fornece uma inicialização para a consolidação dos conhecimentos acerca das ondas viajantes, o que pode ser conferido através de cálculos, entretanto a animação das ondas entre as barras não é possível com a maioria dos simuladores de sistemas de potência, que apesar de mostrarem o comportamento nos períodos de transitório, no geral não fornecem uma animação temporal, em especial para as ondas que viajam pelo sistema de potência.

O simulador além de importante como apoio didático, pode funcionar como uma ferramenta de inclusão, uma vez que o MATLAB não é um *software* livre, todavia foi criado um executável com todas as funcionalidades já mencionadas, que pode ser instalado em máquinas que se utilizam do Windows como sistema operacional, sem a

necessidade do MATLAB instalado.

Para isso, no ato da instalação, o programa faz o *download* automático de pacotes específicos do MATLAB, para isso é necessário estar conectado à internet no ato da instalação e então todas as funcionalidades ficam ativas. No caso de máquinas que não possuem conexão com a internet, é possível instalar os pacotes através de um dispositivo móvel de armazenamento, sendo este arquivo gerado no ato da compilação do programa no próprio MATLAB.

Capítulo 9

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que o presente trabalho não atingiu a aplicação integral do estudos das ondas viajantes, visto que o tema é bastante amplo para ser abordado em sua totalidade no prazo de um mestrado, é necessário prever trabalhos futuros com o objetivo de validar a utilização do modelo como ferramenta.

Desta forma fica como sugestão para trabalhos futuros:

- Criação de modelos para sistemas HVDC (*High-Voltage, Direct Current* - Alta Tensão em Corrente Contínua, numa tradução livre);
- Fazer uma abordagem com sistemas trifásicos;
- Criar uma ferramenta gráfica animada que crie, além do modelos das ondas viajantes, o Diagrama de Lattice;
- Criação de aplicações para dispositivos móveis com todas as funcionalidades do programa;
- Abranger o programa para o estudo de localização de faltas em linhas de transmissão.

Referências Bibliográficas

- BANSAL, R. *Fundamentals of engineering electromagnetics*. [S.l.]: CRC press, 2006.
- CHAPMAN, S. J. *Programação em MATLAB para engenheiros*. [S.l.: s.n.], 2003.
- DATTA, B.; CHATTERJEE, S. A literature review on use of bewley's lattice diagram. In: IEEE. *Power and Energy in NERIST (ICPEN), 2012 1st International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 1–4.
- EVRENOSOGLU ALI ABUR, E. A. C. Y. Three dimensional visualization and animation of travelling waves in power systems. *Electric Power Systems Research*, ScienceDirect, 2006.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power System Analysis & Design, SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.
- GÖNEN, T. *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*. [S.l.]: CRC Press, 2014.
- LENT, C. S. *Learning to program with MATLAB*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- MARCHAND, P.; HOLLAND, O. T. *Graphics and guis with matlab*. Chapman and Hall, 2003.
- MATHWORKS, I. *MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7*. [S.l.]: MathWorks, 2005. v. 9.
- SAADAT, H. *Power System Analysis*. [S.l.]: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- SIMÕES, M. I. S. L. *Transmission Line Modeling For Real-Time Simulations*. Tese (Doutorado) — École Polytechnique de Montréal, 2012.
- SLUIS, L. V. D. *Transients in Power Systems*. [S.l.]: Wiley New York, 2001. v. 2001.
- STEVENSON, W. D. *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill, 1975.
- TRUEMAN, C. W. Teaching transmission-line transients using computer animation. In: IEEE. *Frontiers in Education Conference, 1999. FIE'99. 29th Annual*. [S.l.], 1999. v. 1, p. 12A9–11.
- TRUEMAN, C. W. Animating transmission-line transients with bounce. *Transactions On Education*, IEEE, 2003.

ZANETTA, L. C. J. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003.

Apêndice A

CÓDIGO PARA ATIVAR PAINEL DE ACORDO COM SELEÇÃO DO BOTÃO DE CONFIGURAÇÃO

```
function uipanel1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
auxiliar = get(handles.uipanel1,'SelectedObject');
linhaescolhida = get(auxiliar,'String');
switch linhaescolhida
case 'Configuração 1'
set(handles.L12,'Enable','On')
set(handles.L13,'Enable','Off')
set(handles.L23,'Enable','Off')
set(handles.L34,'Enable','Off')
set(handles.l1,'Enable','On')
set(handles.c1,'Enable','On')
set(handles.L1,'Enable','On')
set(handles.l2,'Enable','Off')
set(handles.c2,'Enable','Off')
set(handles.L2,'Enable','Off')
set(handles.l3,'Enable','Off')
set(handles.c3,'Enable','Off')
set(handles.L3,'Enable','Off')
case 'Configuração 2'
set(handles.L12,'Enable','On')
set(handles.L13,'Enable','Off')
```

```
set(handles.L23,'Enable','On')
set(handles.L34,'Enable','Off')
set(handles.l1,'Enable','On')
set(handles.c1,'Enable','On')
set(handles.L1,'Enable','On')
set(handles.l2,'Enable','On')
set(handles.c2,'Enable','On')
set(handles.L2,'Enable','On')
set(handles.l3,'Enable','Off')
set(handles.c3,'Enable','Off')
set(handles.L3,'Enable','Off')
case 'Configuração 3'
set(handles.L12,'Enable','On')
set(handles.L13,'Enable','On')
set(handles.L23,'Enable','Off')
set(handles.L34,'Enable','Off')
set(handles.l1,'Enable','On')
set(handles.c1,'Enable','On')
set(handles.L1,'Enable','On')
set(handles.l2,'Enable','On')
set(handles.c2,'Enable','On')
set(handles.L2,'Enable','On')
set(handles.l3,'Enable','Off')
set(handles.c3,'Enable','Off')
set(handles.L3,'Enable','Off')
case 'Configuração 4'
set(handles.L12,'Enable','On')
set(handles.L13,'Enable','On')
set(handles.L23,'Enable','Off')
set(handles.L34,'Enable','On')
set(handles.l1,'Enable','On')
set(handles.c1,'Enable','On')
set(handles.L1,'Enable','On')
set(handles.l2,'Enable','On')
set(handles.c2,'Enable','On')
set(handles.L2,'Enable','On')
```

```
set(handles.l3,'Enable','On')  
set(handles.c3,'Enable','On')  
set(handles.L3,'Enable','On')  
end
```