



**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CONSTRUÇÃO
AUTOMÁTICA DE DIAGRAMAS DE REFLEXÕES DE ONDAS
VIAJANTES**

**LEONARDO RODRIGO SILVA DE MENESES
MARIANA NUNES DE OLIVEIRA**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CONSTRUÇÃO
AUTOMÁTICA DE DIAGRAMAS DE REFLEXÕES DE ONDAS
VIAJANTES

LEONARDO RODRIGO SILVA DE MENESES
MARIANA NUNES DE OLIVEIRA

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Francisco Damasceno Freitas, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, 29 de maio de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE MENESES, LEONARDO RODRIGO SILVA; DE OLIVEIRA, MARIANA NUNES
Desenvolvimento de Aplicativo para Construção Automática de Diagramas de Reflexões de Ondas Viajantes. [Distrito Federal] 2017.

xiii, 64p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2017).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Ondas Viajantes

3. Diagrama de Reflexões

5. Transitórios

I. ENE/FT/UnB

2. Diagnóstico de Distúrbios

4. Linhas de Transmissão

6. Sistemas de Potência

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENESES, L. R. S.; OLIVEIRA, M. N. (2017). Desenvolvimento de Aplicativo para Construção Automática de Diagramas de Reflexões de Ondas Viajantes, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Leonardo Rodrigo Silva de Meneses, Mariana Nunes de Oliveira.

TÍTULO: Desenvolvimento de Aplicativo para Construção Automática de Diagramas de Reflexões de Ondas Viajantes.

GRAU: Engenheiro Eletricista. ANO: 2017.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Leonardo Rodrigo Silva de Meneses
Departamento de Eng. Elétrica
Universidade de Brasília
Campus Darcy Ribeiro

Mariana Nunes de Oliveira
Departamento de Eng. Elétrica
Universidade de Brasília
Campus Darcy Ribeiro

AGRADECIMENTOS

LEONARDO RODRIGO SILVA DE MENESES

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me manter no caminho em minha formação pessoal e profissional. E também, à minha família, meus pais e minha irmã, pelo apoio em minhas decisões durante toda a graduação, nos momentos difíceis e nas alegrias das conquistas alcançadas.

Um agradecimento especial à minha namorada Viviane, minha parceira de vida, que tem acompanhado todos os meus passos, sempre me dando forças e motivos para seguir firme nos meus objetivos.

À minha dupla Mariana, que me ajudou nessa fase final do curso, não somente nesse trabalho de conclusão, mas também nas outras matérias do curso de engenharia. E a todos os outros colegas, com os quais constitui amizade dentro da UnB.

Sou grato também ao professor Felipe Lopes, que me deu a oportunidade de desenvolver um trabalho com importância significativa, e também por todo aprendizado que carregarei comigo para minha vida profissional.

Aos professores da UnB, os quais me proporcionaram um conhecimento acadêmico de qualidade.

A todas as demais pessoas que contribuíram durante minha formação em todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

MARIANA NUNES DE OLIVEIRA

Agradeço ao meu pai e à minha mãe, Wellington e Verônica, por sempre me darem suporte e apoio nas minhas decisões, por terem me criado num lar com muito amor e compreensão e por terem me proporcionado o privilégio de poder ter me dedicado exclusivamente aos estudos até a conclusão do meu curso.

Ao meu irmão Saulo e à minha amiga Bruna, pelo incentivo, pela paciência e ajuda nos momentos em que eu precisei.

Ao Leonardo, com quem fiz dupla para a execução deste trabalho e de tantos outros durante a graduação, pela contribuição e ajuda mútua.

Ao professor Felipe Lopes, pelos ensinamentos e por sempre estar disposto e motivado a orientar nosso trabalho ao longo de cada etapa pelas quais passamos.

Aos meus colegas do LAPSE por todas as contribuições e por propiciarem um ambiente produtivo e ao mesmo tempo descontraído.

Aos meus colegas da CEB, Ricardo, Pedro, Fred e Clarissa, por terem tido papel fundamental no meu crescente interesse pela área de potência.

Aos demais professores do ENE, CIC e MAT que participaram e contribuíram positivamente para minha formação acadêmica.

A todas as amigas que fiz no ENE, que, sem dúvida, me ajudaram a concluir o curso com mais calma e tranquilidade.

E a todos os meus amigos que sempre me apoiaram e me acompanharam ao longo desses anos na UnB.

RESUMO

Nos últimos anos, algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes (OVs) vêm ganhando importância em diversas aplicações relacionadas ao diagnóstico de distúrbios em linhas de transmissão (LTs), a exemplo de algoritmos de proteção e localização de faltas, os quais frequentemente requerem a análise de diagramas de reflexões. Como consequência, metodologias capazes de viabilizar um melhor entendimento dos transitórios decorrentes da propagação de OVs em sistemas de transmissão têm despertado o interesse de concessionárias e pesquisadores. Nesse sentido, apresenta-se neste trabalho um aplicativo capaz de construir diagramas de reflexões de OVs em LTs com circuito simples, duplo ou com linhas adjacentes de forma automática e intuitiva por meio de arquivos de simulação obtidos no *software Alternative Transients Program* (ATP). Para tanto, a metodologia apresentada faz uso de conceitos e técnicas de filtragem consolidadas na análise de OVs em LTs, a exemplo da Transformada de Clarke e do filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS). Os resultados revelam simplicidade e versatilidade do aplicativo proposto, denominado LAPPICE, o qual demonstra ser uma ferramenta útil durante a análise de transitórios em LTs.

Palavras-chave: Ondas viajantes, diagnóstico de distúrbios, diagrama de reflexões, linhas de transmissão, transitórios, sistemas de potência.

ABSTRACT

In recent decades, algorithms based on traveling waves theory have gained importance in transmission line disturbance diagnosis applications, such as protection and fault location algorithms. These applications often require the analysis of reflection diagrams of traveling waves (TWs). Consequently, methodologies that provide a better understanding of transients caused by TWs propagation in transmission systems have aroused the interest of utilities and researchers. Therefore, this work presents an app which is able to automatically build reflection diagrams of TWs in transmission lines (TLs) considering single circuit lines, double circuit lines or circuits with adjacent lines in a very intuitive manner through simulation files provided by the software Alternative Transients Program (ATP). The proposed methodology is based on consolidated concepts and filtering techniques widely used in the analysis of TWs, such as the Clarke's Transformation and the Differentiator-Smoother filter (DS filter). The results reveal simplicity and versatility of the proposed app, called LAPPICE, which has shown to be a useful tool for transients analysis in TLs.

Keywords: Traveling waves, disturbance diagnosis, reflection diagram, transmission lines, transients, power systems.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Glossário	xi
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Definição do problema	3
1.3 Objetivos do projeto	4
1.4 Estrutura do trabalho	5
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	6
2.1 Parâmetros Distribuídos de LTs	6
2.2 Impedância Característica e Velocidade de Propagação	8
2.3 Reflexão e Transmissão de OV's em Descontinuidades do SEE	10
2.3.1 Expressões Gerais dos Coeficientes de Reflexão e Transmissão	10
2.3.2 Propagação de OV's em Linhas com Derivações	12
2.4 Comportamento de OV's em Terminações de LTs	13
2.4.1 Terminação com Curto-Circuito	14
2.4.2 Terminação com Circuito Aberto	14
2.5 Diagrama de Lattice	15
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	18
3.1 O Uso do Diagrama de Lattice na Literatura	18
3.2 Ferramentas para a Construção do Diagrama de Lattice	21

Capítulo 4 – O LAPPICE	23
4.1 Visão Geral	23
4.2 Aquisição de Dados	26
4.2.1 Seleção do Tipo de Distúrbio, Número de Terminais e Carregamento dos Registros Oscilográficos	26
4.2.2 Seleção do Tipo de Sistema e Caracterização do SEE	27
4.2.3 Demais Seleções a Critério do Usuário	28
4.3 Modelagem e Processamento dos Sinais em Análise	30
4.3.1 Leitura dos Registros Simulados no ATP e dos Parâmetros do SEE	30
4.3.2 Desacoplamento dos Sinais Usando a Transformada de Clarke	30
4.3.3 Aplicação dos Filtros	31
4.3.3.1 Filtro Passa-Altas	31
4.3.3.2 Filtro DS	32
4.3.4 Método de Localização do Distúrbio	33
4.3.4.1 Método de Um Terminal: Takagi Modificado	33
4.3.4.2 Método de Dois Terminais Baseado na Teoria de OV's	35
4.3.5 Estimação dos Tempos de Propagação das OV's	35
4.3.6 Construção e Interpretação do Diagrama de Lattice	35
Capítulo 5 – Avaliação do LAPPICE	39
5.1 Análise de Casos de Faltas em LTs	39
5.1.1 LT com Circuitos Adjacentes: Variação das Indutâncias das LTs Adjacentes	39
5.1.1.1 Análise de Sinais de Corrente	43
5.1.1.2 Análise de Sinais de Tensão	47
5.1.2 LT com Circuito Duplo: Variação das Indutâncias	50
5.1.3 Variação da Impedância de Surto por meio da Variação da Quantidade de LTs Adjacentes	54
5.2 Análise de Casos de Energização de LTs	56
5.3 Recursos Adicionais do LAPPICE	58
5.4 Síntese do Capítulo	60
Capítulo 6 – Conclusões e Propostas Futuras	61
Referências Bibliográficas	63

LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema de transmissão brasileiro - Horizonte 2015 (Fonte: ONS, 2017).	2
1.2	Estratificação dos desligamentos forçados (Fonte: ANEEL, 2016).	2
2.1	Circuito monofásico equivalente de um segmento incremental de uma linha de transmissão com dois condutores.	6
2.2	Determinação dos coeficientes de reflexão e transmissão, dada a propagação de OV's.	11
2.3	Corrente fluindo por uma linha com derivação.	13
2.4	Exemplo de diagrama de Lattice.	17
4.1	Interface gráfica do LAPPICE.	24
4.2	Fluxograma da aquisição de dados no LAPPICE.	25
4.3	Fluxograma da modelagem e processamento dos sinais no LAPPICE.	25
4.4	Princípio de funcionamento do filtro DS: (a) janela de dados; (b) operação do filtro.	32
4.5	Deteção de picos das ondas incidentes nos terminais de monitoramento.	36
4.6	Construção do diagrama de Lattice.	36
4.7	Exemplo de resultado obtido com o LAPPICE.	37
5.1	Diagrama de Lattice para análise das expressões de ondas viajantes.	41
5.2	Configuração do sistema simulado no ATP com linhas adjacentes.	43
5.3	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$	45

5.4	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$, com fonte mais forte.	45
5.5	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}$	46
5.6	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$	47
5.7	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$, com falta a 0,1 p.u. da barra local.	47
5.8	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$	48
5.9	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl}$	49
5.10	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$	50
5.11	Configuração do sistema simulado no ATP com circuito duplo.	50
5.12	Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD} \cdot \sqrt{5}$ com impedância da fonte pequena.	52
5.13	Análise das OV's transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD} \cdot \sqrt{5}$	53
5.14	Análise das OV's transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD}/\sqrt{5}$	53
5.15	Análise das OV's transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: (a) $Z_s = Z_{CD}$	53
5.16	Simulação ATP considerando diversas LTs adjacentes com mesmos parâmetros.	54
5.17	Sistema com duas linhas adjacentes.	55
5.18	Impedância de surto da linha adjacente duas vezes menor.	55
5.19	Sistema com quatro linhas adjacentes.	55

5.20	Impedância de surto da linha adjacente quatro vezes menor.	56
5.21	Terminal remoto energizado e terminal local aberto com $SIR = 0,001$	57
5.22	Terminal remoto energizado e terminal local aberto com $SIR = 0,1$	57
5.23	Terminal remoto energizado e terminal local energizado após 0,14 segundos com $SIR = 0,001$	58
5.24	Terminal remoto energizado e terminal local energizado após 0,14 segundos com $SIR = 0,1$	58
5.25	Exemplo de resultado gráfico com o torque.	59
5.26	Exemplo de resultado gráfico dos sinais filtrados e desacoplados de modo zero. .	60

LISTA DE TABELAS

3.1	Comparativo dos aplicativos existentes: configurações de sistemas.	22
3.2	Comparativo dos aplicativos existentes: recursos de visualização de gráficos. . .	22
3.3	Comparativo dos aplicativos existentes: método de localização de falta envolvi- dos no processo.	22
4.1	\hat{V}_G , \hat{I}_G e $\Delta\hat{I}_G$ para diferentes tipos de falta.	34
5.1	Coefficientes de reflexão e transmissão para sinais de corrente.	43
5.2	Coefficientes de reflexão e transmissão para sinais de tensão.	43
5.3	Parâmetros do sistema de linhas adjacentes simulados no ATP.	43
5.4	Configuração do sistema com circuito duplo simulados no ATP.	51

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Função de OV incidente.
A_2	Função de OV refletida.
C	Capacitância em derivação.
d	Local da falta.
dL	Estimação da distância da falta até o terminal local.
dR	Estimação da distância da falta até o terminal remoto.
d_s	Fator de distribuição da corrente no método de Takagi.
G	Condutância em derivação.
I	Sinal de corrente no domínio de Laplace.
i	Sinal de corrente instantânea.
I_0	Corrente modal de modo zero.
i_1^r	Corrente refletida no segmento 1.
i_1^t	Corrente transmitida no segmento 1.
i_2^t	Corrente transmitida no segmento 2.
i_3^t	Corrente transmitida no segmento 3.
I_A	Corrente da fase A.
I_B	Corrente da fase B.
I_C	Corrente da fase C.
I_F	Corrente de falta.

\hat{I}_G	Corrente no terminal G.
\hat{I}_{G1}	Corrente da sequência positiva no terminal G.
\hat{I}_{G0}	Corrente da sequência zero no terminal G.
i_i	Sinal de corrente incidente no terminal de registro.
i_L	Corrente do terminal local.
I_{pro}	OV de corrente progressiva.
i_R	Corrente do terminal remoto.
i_r	Sinal de corrente refletida no terminal de registro.
I_{reg}	OV de corrente regressiva.
I_α	Corrente modal de modo alpha.
I_β	Corrente modal de modo beta.
L_{LT}	Comprimento da linha principal.
L	Indutância série.
N_{DS}	Números de amostras da janela do filtro DS.
OV_{LA}	Equação do comportamento de direcionalidade, polaridade e magnitude de ondas viajantes na linha adjacente.
OV_{LP}	Equação do comportamento de direcionalidade, polaridade e magnitude de ondas viajantes na linha principal.
R	Resistência série.
R_F	Unidade de resistência de falta.
t_0	Instante da ocorrência da falta.
T_{CLARKE}	Matriz de transformação modal de Clarke.
T_i	Coefficiente de transmissão para sinais de corrente.
t_{OVLn}	Instantes da n-ésima frente de onda.
T_v	Coefficiente de transmissão para sinais de tensão.

$tL_{transm1}$	Tempo de chegada da primeira frente de onda transmitida no ponto de falta e incidente no terminal remoto.
$tR_{transm1}$	Tempo de chegada da primeira frente de onda transmitida no ponto de falta e incidente no terminal local.
$tL1$	Tempo de chegada da primeira frente de onda no terminal local.
$tR1$	Tempo de chegada da primeira frente de onda no terminal remoto.
V	Sinal de tensão no domínio de Laplace.
v	Sinal de tensão instantânea.
V_G	Tensão no terminal local.
v_i	Sinal de tensão incidente no terminal de registro.
v_p	Velocidade de propagação.
V_{pro}	OV de tensão progressiva.
v_r	Sinal de tensão refletida no terminal de registro.
V_{reg}	OV de tensão regressiva.
Z_0	Impedância de surto.
Z_1	Impedância do segmento 1.
Z_2	Impedância do segmento 2.
Z_3	Impedância do segmento 3.
Z_c	Unidade de impedância característica.
Z_{CD}	Impedância do circuito paralelo.
Z_{G0}	Impedância de sequência zero da fonte no terminal G.
Z_{H0}	Impedância de sequência zero da fonte no terminal H.
Z_{L0}	Impedância de sequência zero da linha de transmissão.
Z_{L1}	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
Z_P	Impedância equivalente paralela dos segmentos 2 e 3.
Z_s	Impedância da linha principal.

Z_{sl}	Impedância da linha adjacente.
Z_{Sv}	Impedância da fonte de tensão.
α	Constante de perdas.
β	Constante de fase.
γ	Constante de propagação.
Γ_F	Coefficiente de reflexão no ponto de falta.
Γ_i	Coefficiente de reflexão para sinais de corrente.
Γ_v	Coefficiente de reflexão para sinais de tensão.
Γ_S	Coefficiente de reflexão na fonte de tensão.
$\Delta\hat{I}_G$	Corrente incremental relacionada ao loop de falta.
ΔT_1	Incremento de tempo para uma onda que parte do terminal e retorna ao mesmo ponto após refletir no ponto de falta.
Δx	Comprimento incremental da linha de transmissão.
τ	Tempo de propagação.
ω	Velocidade angular.

GLOSSÁRIO

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OV	Onda Viajante
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>System Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de corrente
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília
PVI	Parcela Variável de Indisponibilidade
RDP	Registradores Digitais de Perturbações

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O sistema elétrico de energia (SEE) brasileiro, integrado por componentes de geração, distribuição e transmissão, é reconhecido pela sua robustez e confiabilidade. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o SEE brasileiro atendeu, em 2014, a um consumo anual de 473,393 GWh¹, o que coloca o país em destaque no cenário das redes elétricas em âmbito mundial. Com isso, uma operação eficiente dos componentes do sistema se faz necessária para diminuir os custos de manutenção da rede, além de garantir sua disponibilidade de forma contínua.

Entre os componentes dos SEEs, as linhas de transmissão (LTs) têm uma importância considerável devido às grandes dimensões e características do território brasileiro, como ilustrado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) na Figura 1.1. Uma vez que no Brasil a geração é predominantemente hidrelétrica, as unidades geradoras se encontram distantes entre si, de forma que é requerido o transporte de energia elétrica desde a sua geração até os centros de consumo por longas distâncias. Segundo dados registrados em 2016 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)², o sistema de transmissão nacional conta com mais de 800 LTs operando em diferentes níveis de tensão, resultando em uma extensão da ordem de 129.258 km, distância esta suficiente para dar mais de três voltas ao planeta Terra. Assim, diante da grande extensão do SIN, as LTs se tornam mais suscetíveis a distúrbios e perturbações provenientes de causas naturais.

Um estudo feito pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostra que cerca de 73,3% dos desligamentos forçados no SIN ocorreram em LTs. Esses distúrbios eletromagnéticos,

¹<<http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiael%C3%A9tricaporclasse%E2%80%932009.aspx>>. Acesso em 11/04/2017.

²<http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em 31/03/2017.

em geral, são provocados por descargas atmosféricas, falhas humanas, queimadas, quedas de árvores, sobretensões temporárias de processos de energização, etc., como ilustrado no gráfico da Figura 1.2. Por isso, o desenvolvimento e estudo de técnicas para proteção e diagnóstico de distúrbios em LTs tem ganhado cada vez mais importância no mercado, contexto este no qual se inserem os algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes (OVs).

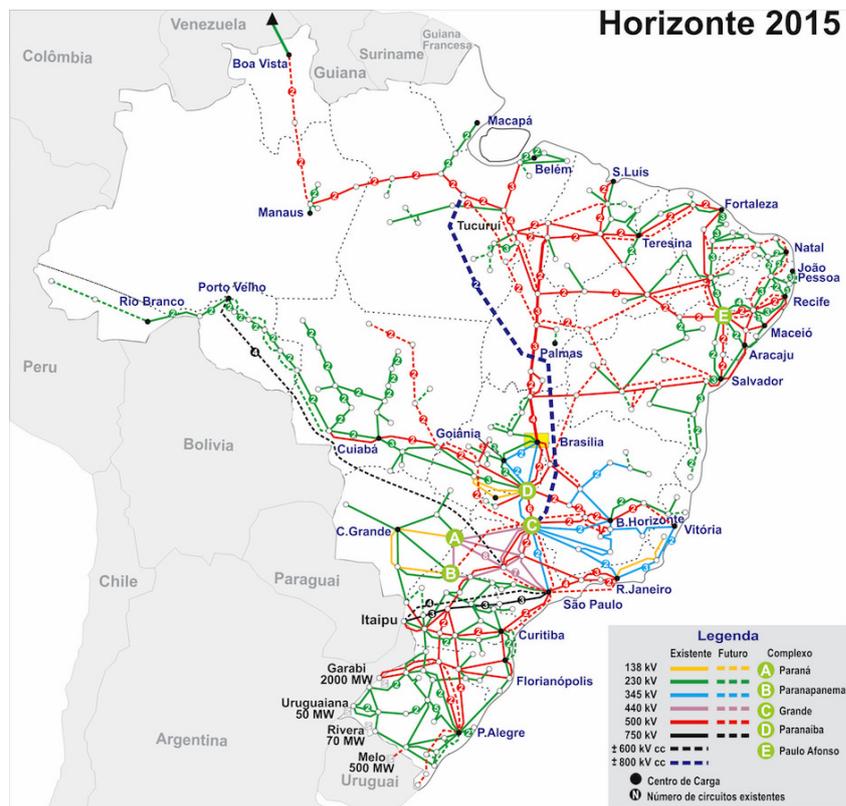


Figura 1.1. Sistema de transmissão brasileiro - Horizonte 2015 (Fonte: ONS, 2017).

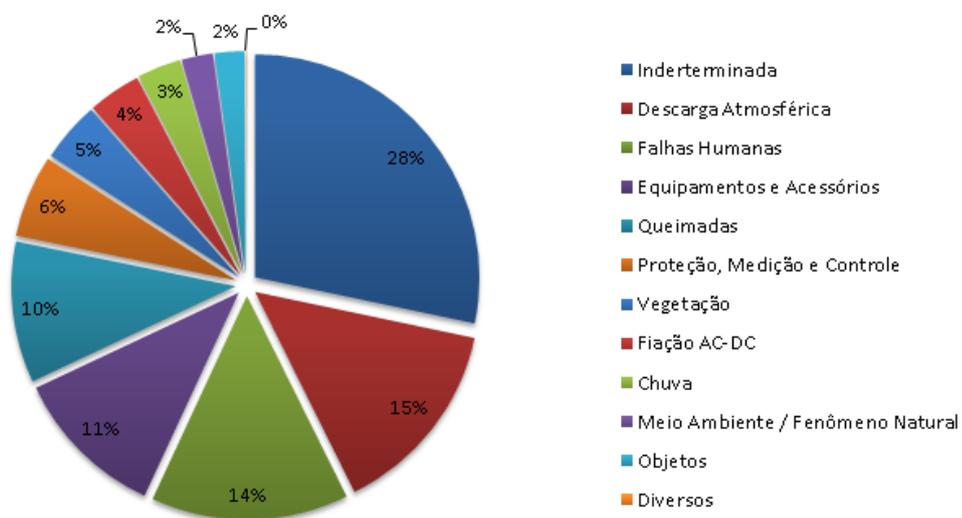


Figura 1.2. Estratificação dos desligamentos forçados (Fonte: ANEEL, 2016).

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A proteção dos sistemas de transmissão deve atuar para que eventuais falhas sejam evitadas ou limitadas apenas a um problema de abrangência reduzida, evitando blecautes de grandes proporções. Nesse sentido, a confiabilidade da rede elétrica está em parte associada à sua capacidade de se recuperar dos problemas gerados pelos distúrbios na rede, mantendo-se estável após o desligamento forçado de LTs.

Para ter uma visão geral do problema supracitado, consideram-se dados coletados pela ANEEL para auxílio da quantificação desses distúrbios. Segundo os referidos dados, entre agosto de 2014 e julho de 2015, ocorreram 3.386 desligamentos forçados em LTs no Brasil³. Essas interrupções não programadas na rede diminuem a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia. Com isso, os indicadores de desempenho são prejudicados, podendo ficar abaixo dos valores exigidos pelas normas brasileiras. Em decorrência desse fato, a ANEEL é incentivada a adotar indicadores de desempenho do sistema mais rígidos, com o intuito de manter o controle da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias do país.

Um dos referidos indicadores de desempenho diz respeito ao impacto provocado pela indisponibilidade da energia elétrica, conhecido por Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), a qual é descontada mensalmente do pagamento-base, em virtude da falta do fornecimento de energia elétrica. Tal indicador, em níveis altos, aponta para a ineficiência das concessionárias de transmissão de energia, acarretando uma série de prejuízos econômicos, os quais, em geral, aumentam sobremaneira os custos de operação do sistema e as faturas do consumidor final. Desse modo, um elevado padrão de qualidade do sistema torna-se imprescindível para assegurar um fornecimento contínuo da energia elétrica transmitida. Com isso, ocorre o aumento das receitas das empresas transmissoras e propicia um barateamento nos valores faturados.

Para reduzir o tempo de indisponibilidade de LTs devido aos desligamentos forçados, seja por uma situação de curto-circuito ou por quaisquer outros motivos, os algoritmos de localização de faltas têm sido largamente aplicados por concessionárias. De fato, em posse de uma estimativa do ponto do defeito, o tempo de busca do local da LT a ser reparado é reduzido, minimizando o tempo de indisponibilidade do SEE. Neste contexto, técnicas baseadas na teoria das OV's

³ <<http://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-da-transmissao>>. Acesso em 07/03/2017.

têm se consolidado no mercado (SAHA *et al.*, 2010), atraindo o interesse de desenvolvimentos e estudos nesta área de conhecimento por parte das empresas do setor elétrico. Além disso, adicionalmente aos métodos de localização de faltas, algoritmos de proteção rápidos baseados na análise de OV's também têm sido propostos. Estes algoritmos visam a redução dos tempos de atuação dos esquemas de proteções (SCHWEITZER *et al.*, 2015), o que, conseqüentemente, melhora as margens de estabilidade das redes elétricas. Cabe ressaltar que o princípio da propagação de OV's em LTs é conhecido de longa data (BEWLEY, 1931), mas, somente nos últimos anos, com o avanço da tecnologia dos conversores analógico-digital, registradores digitais de perturbações (RDPs) e relés de proteção no domínio do tempo passaram a ter taxas de amostragem suficientes para este tipo de aplicação (SAHA *et al.*, 2010), o que promoveu a popularização de tais técnicas.

Devido ao domínio dos algoritmos baseados na teoria das OV's, tem-se verificado um crescente interesse do setor elétrico por ferramentas computacionais capazes de auxiliar no entendimento da propagação de OV's em LTs, a exemplo de aplicativos para construção de diagramas de reflexões, os quais são largamente conhecidos como diagramas de Lattice (BEWLEY, 1931). Embora seja uma teoria já consolidada, ainda são poucas as soluções existentes para auxílio da análise da propagação de OV's em LTs, fato este motivador deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS DO PROJETO

Sabendo que o desenvolvimento de aplicações baseadas na teoria das OV's requer a identificação e o entendimento de transitórios provenientes da propagação de OV's na rede de transmissão monitorada, apresenta-se neste trabalho um aplicativo denominado LAPPICE, cuja finalidade é auxiliar na compreensão e visualização do trajeto, módulo e polaridade de OV's em LTs por meio da construção automática do diagrama de Lattice. O aplicativo é executado de forma *offline* e possui interface simples e intuitiva. Para avaliar o desempenho do LAPPICE, diferentes cenários de faltas e energização de LTs foram simulados no *Alternative Transients Program* (ATP), considerando sistemas com diferentes topologias e parâmetros. A partir dos resultados obtidos, constata-se que o LAPPICE é simples, fácil de utilizar e eficiente na representação da propagação de OV's em LTs.

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

- Estudar a teoria das OV's;
- Avaliar o estado da arte relacionado ao tema, identificando soluções que requeiram o uso do diagrama de Lattice para análise de transitórios;
- Propor um algoritmo de construção automática de diagramas de reflexões, com fundamentação em metodologias bem consolidadas na literatura.
- Desenvolver o código e interface gráfica do aplicativo LAPPICE;
- Simular faltas no ATP e obter dados representativos que sejam adequados para a validação do LAPPICE;
- Avaliar o algoritmo proposto por meio da análise de casos que corroborem com estudos consolidados na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2, apresenta-se um resumo da teoria necessária para o entendimento da propagação e modelagem de OV's, tais como parâmetros distribuídos, velocidade de propagação de OV's, coeficientes de reflexão e transmissão, bem como os conceitos relacionados aos diagramas de Lattice.
- No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão de diversos trabalhos que utilizam ou geram diagramas de Lattice para estudo da propagação de OV's.
- No Capítulo 4, descreve-se o funcionamento do aplicativo desenvolvido neste trabalho, o LAPPICE, para diferentes topologias de LTs, a saber: LTs com circuito simples; LTs com circuito simples considerando LTs adjacentes; e LTs com circuito duplo.
- No Capítulo 5, apresentam-se resultados obtidos para alguns estudos de casos realizados com o suporte gráfico do LAPPICE, que ratificam constatações encontradas na literatura.
- No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros a serem agregados ao LAPPICE.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS DE LTS

No estudo de transitórios em LTS, destaca-se a importância do modelo baseado em parâmetros distribuídos, o qual possibilita a análise do fenômeno de propagação de OV de tensão e de corrente em sistemas de transmissão (SADIKU, 2014; SCHWEITZER *et al.*, 2014). Neste modelo, são contempladas: a resistência série R , a indutância série L , a condutância em derivação G e a capacitância em derivação C , todas essas expressas por unidade de comprimento, ou seja, na forma de parâmetros distribuídos uniformemente ao longo da LT (GLOVER *et al.*, 2012). A demonstração do referido modelo parte da análise do circuito equivalente representado na Figura 2.1, no qual se considera um segmento de linha incremental com comprimento Δx e os parâmetros R , L , G e C por unidade de comprimento, conforme explicado anteriormente.

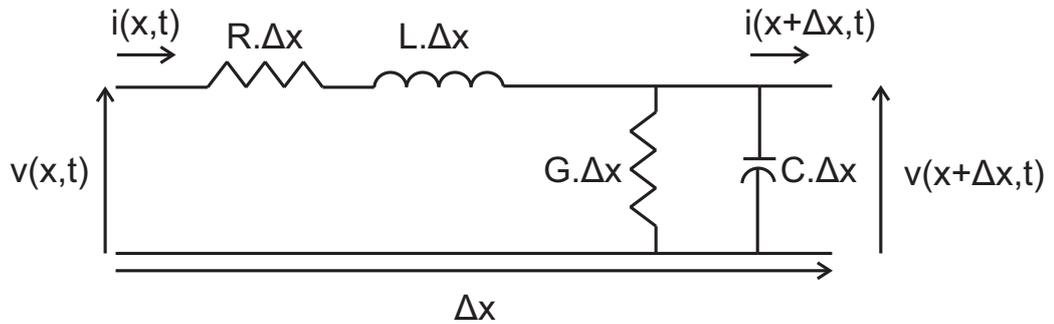


Figura 2.1. Circuito monofásico equivalente de um segmento incremental de uma linha de transmissão com dois condutores.

Aplicando a lei de Kirchhoff de tensão na malha externa do circuito, tem-se

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Reorganizando os termos de (2.1), obtém-se:

$$-\frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = R \cdot i(x, t) + L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Tomando o limite em (2.2), quando $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se que:

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = R \cdot i(x,t) + L \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} . \quad (2.3)$$

De maneira análoga, para as correntes, obtém-se que:

$$i(x,t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} , \quad (2.4)$$

expressão esta que pode ser reorganizada na forma:

$$-\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = G \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} . \quad (2.5)$$

Portanto, considerando o limite $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se:

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G \cdot v(x,t) + C \cdot \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} . \quad (2.6)$$

Ademais, considerando a dependência temporal harmônica e o operador de Heaviside $s = d/dt$, observa-se que $Z = R + sL$ e $Y = G + sC$, sendo Z e Y a impedância série e admitância em derivação da LT, por unidade de comprimento. Assim, procedendo com as devidas substituições, agora no domínio de Laplace, as seguintes expressões são obtidas (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = -Z \cdot I(x,s) , \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial I(x,s)}{\partial x} = -Y \cdot V(x,s) . \quad (2.8)$$

Nota-se que as expressões (2.7) e (2.8) dependem das correntes e tensões, simultaneamente. Assim, para obter funções que envolvam apenas tensões e apenas correntes, separadamente, considera-se a segunda derivada de $V(x,s)$ e $I(x,s)$ com relação a x , resultando em:

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{\partial I(x,s)}{\partial x} , \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 I(x,s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{\partial V(x,s)}{\partial x} . \quad (2.10)$$

Substituindo (2.7) e (2.8) em (2.9) e (2.10), é possível obter as equações de onda de tensão e de corrente (2.11) e (2.12):

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = Z \cdot Y \cdot V(x,s) , \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = Y \cdot Z \cdot I(x, s) . \quad (2.12)$$

Sabendo que a constante de propagação da LT é dada por $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + j \cdot \beta$, onde α é a constante de perdas e β é a constante de fase (SAHA *et al.*, 2010). Considerando também γ_v e γ_i as constantes de propagação de sinais de tensão e corrente respectivamente, obtêm-se:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} - \gamma_v^2 \cdot V(x, s) = 0 , \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} - \gamma_i^2 \cdot I(x, s) = 0 , \quad (2.14)$$

cujas soluções gerais são representadas pelas equações (GLOVER *et al.*, 2012):

$$V(x, s) = V_{pro} \cdot e^{-\gamma_v \cdot x} + V_{reg} \cdot e^{\gamma_v \cdot x} , \quad (2.15)$$

$$I(x, s) = I_{pro} \cdot e^{-\gamma_i \cdot x} + I_{reg} \cdot e^{\gamma_i \cdot x} . \quad (2.16)$$

As equações (2.15) e (2.16) representam a propagação de OV's regressivas e progressivas em LTs após uma variação brusca de tensão na forma de degrau. Nessas expressões, a tensão e a corrente são expressas pela soma de duas componentes: OV's progressivas ($V_{pro} \cdot e^{-\gamma_v \cdot x}$, $I_{pro} \cdot e^{-\gamma_i \cdot x}$), as quais se propagam no sentido positivo de x ; e OV's refletidas ($V_{reg} \cdot e^{\gamma_v \cdot x}$ e $I_{reg} \cdot e^{\gamma_i \cdot x}$), as quais se propagam no sentido negativo de x .

O fenômeno representado em (2.15) e (2.16) é o mesmo verificado durante faltas ou manobras de chaveamento, quando OV's são lançadas na direção de ambos os terminais da linha com velocidade de propagação definida a partir dos parâmetros da LT. Com base nesse conceito, nota-se que as OV's possuem uma variação simultânea no espaço e no tempo, fato motivador do uso dos diagramas de Lattice no estudo da propagação de OV's em LTs. De fato, esse tipo de diagrama é bidimensional, de modo que faz uso de dois eixos ortogonais que representam o tempo e o espaço. Dessa forma, torna-se possível avaliar em detalhes a propagação de OV's em LTs, facilitando o entendimento de transitórios tipicamente verificados em sistemas de transmissão.

2.2 IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

A impedância característica Z_c é outro parâmetro importante durante a análise da propagação de OV's em LTs. De fato, Z_c é proporcional à relação dos sinais de tensão e corrente

que incidem e refletem em um dado terminal, os quais são representados por V_i e I_i , e V_r e I_r , respectivamente. Assim, define-se:

$$Z_c = \frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} . \quad (2.17)$$

Deve-se notar que, para sinais em fase, a impedância característica assume um valor real. Contudo, de forma geral, o valor de Z_c é definido por um número complexo. Ele pode ser obtido por meio de (2.15) e (2.16) inseridas em (2.7), para um dado terminal de LT, considerando OV's progressivas e regressivas como sendo as OV's que incidem e refletem no referido terminal, respectivamente. Dessa maneira, pode-se obter:

$$\frac{\partial (V_i \cdot e^{-\gamma_v x} + V_r \cdot e^{\gamma_v x})}{\partial x} = -(R + j\omega L) (I_i \cdot e^{-\gamma_i x} + I_r \cdot e^{\gamma_i x}) . \quad (2.18)$$

Derivando (2.18) e igualando os valores para cada termo exponencial, obtêm-se:

$$-\gamma_v \cdot V_i \cdot e^{-\gamma_v x} + \gamma_v \cdot V_r \cdot e^{\gamma_v x} = -(R + j\omega L) \cdot (I_i \cdot e^{-\gamma_i x} + I_r \cdot e^{\gamma_i x}) , \quad (2.19)$$

e portanto:

$$\frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} = \frac{R + j\omega L}{\gamma_i} = \frac{Z}{\gamma_i} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} . \quad (2.20)$$

É importante perceber que, durante a análise de fenômenos transitórios de alta frequência, as parcelas imaginárias de Z e Y são muito maiores do que as parcelas reais relacionadas às perdas (GLOVER *et al.*, 2012). Nesses casos, a impedância resultante é denominada impedância de surto Z_0 , a qual é fundamental durante a análise da propagação de OV's em LTs, sendo calculada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (2.21)$$

Ademais, ainda considerando situações nas quais as perdas do sistema são desprezíveis em relação ao efeito indutivo e capacitivo da LT, pode-se definir a velocidade de propagação das OV's. Basicamente, sabe-se que $v_p = \lambda \cdot f$ (GLOVER *et al.*, 2012), em que λ é o comprimento de onda do sinal avaliado e f é a frequência do mesmo sinal. Assim, dado que $\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\text{Im}\{\gamma\}} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$, a velocidade de propagação das OV's pode ser definida por meio dos parâmetros da LT onde se propagam ou mesmo como um fator da velocidade da luz, o qual depende da permeabilidade magnética relativa μ_r e da permissividade elétrica relativa ϵ_r do meio onde as OV's se encontram

propagando. Assim, sendo $\beta = \omega\sqrt{LC}$ para LTs sem perdas, tem-se que:

$$v_p = \frac{2 \cdot \pi}{\beta} \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{\omega\sqrt{LC}} \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot f\sqrt{LC}} \cdot f = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}. \quad (2.22)$$

Vale destacar que, como a velocidade de propagação de OV's é próxima da velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8 m/s$ (SCHWEITZER *et al.*, 2014)), muitos algoritmos baseados na teoria das OV's, a exemplo dos voltados para localização de faltas Schweitzer *et al.* (2016), utilizam velocidades aproximadas para a análise da propagação de OV's no sistema. Essas aproximações são realizadas especialmente em casos nos quais os parâmetros da LT não são conhecidos ou quando se assume que os parâmetros estão sujeitos a variações quando se opera em condições reais (GLOVER *et al.*, 2012). Neste trabalho, considerar-se-ão velocidades de propagação definidas a partir dos parâmetros das LTs considerando parâmetros distribuídos constantes na frequência.

Por fim, uma vez definida a velocidade de propagação das OV's, as equações (2.15) e (2.16) podem ser reescritas no domínio do tempo da seguinte forma (GLOVER *et al.*, 2012):

$$v(x, t) = v_i \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + v_r \left(t + \frac{x}{v_p} \right), \quad (2.23)$$

$$i(x, t) = i_i \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + i_r \left(t + \frac{x}{v_p} \right), \quad (2.24)$$

o que corrobora com os conceitos de OV's progressivas e regressivas apresentados anteriormente.

2.3 REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DE OV'S EM DESCONTINUIDADES DO SEE

2.3.1 Expressões Gerais dos Coeficientes de Reflexão e Transmissão

A impedância característica da linha Z_c pode ser aferida como uma proporcionalidade entre OV's de tensão e corrente em uma LT. Quando esses sinais se propagam em direção a uma descontinuidade, como uma derivação na LT, a impedância característica é alterada, fazendo-se necessários alguns ajustes matemáticos para o cálculo das OV's nos terminais monitorados. Nesse sentido, quando uma OV atinge um ponto de descontinuidade, parte dela é refletida, proporcionalmente a um coeficiente de reflexão, sobrepondo-se à onda incidente, enquanto que a outra parte é transmitida para além desse ponto, também proporcionalmente a um coeficiente

de transmissão. Neste contexto, resalta-se a importância de considerar a conservação de energia e a preservação da proporcionalidade entre os sinais de corrente e de tensão na LT durante a construção de um diagrama de reflexão, visto que esses coeficientes ditarão o comportamento das múltiplas reflexões em uma LT (GREENWOOD, 1991).

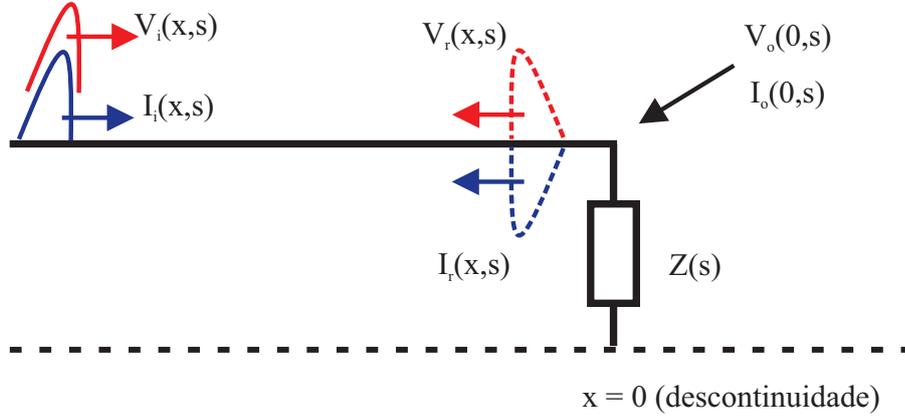


Figura 2.2. Determinação dos coeficientes de reflexão e transmissão, dada a propagação de OV's.

Considerando o sistema simplificado ilustrado na Figura 2.2, no qual se considera uma LT com impedância terminal $Z(s)$, é possível desenvolver as expressões dos coeficientes de reflexão e transmissão de interesse. Para tanto, inicialmente, de (2.23) e (2.24), e considerando $x = 0$:

$$V_0(0, s) = V_i(0, s) + V_r(0, s) , \quad (2.25)$$

$$I_0(0, s) = I_i(0, s) + I_r(0, s) . \quad (2.26)$$

Conforme reportado em Greenwood (1991), o princípio da superposição também se aplica às OV's, de modo que, em um dado terminal de medição, a OV medida é proporcional à soma das OV's incidentes e refletidas, as quais se sobrepõem no ponto de descontinuidade. Assim, no ponto $x = 0$ da Figura 2.2, define-se que:

$$V_0(0, s) = A_1(s) + A_2(s) , \quad (2.27)$$

$$I_0(0, s) = \frac{A_1(s) + A_2(s)}{Z_c} , \quad (2.28)$$

em que $A_1(s)$ e $A_2(s)$ são, respectivamente, a função de OV incidente e a função de OV refletida. Assim, a partir dessas equações e assumindo que a condição de contorno é $V_0(0, s) = Z(s) \cdot I_0(0, s)$, substituem-se (2.27) e (2.28) nessa condição, resultando em:

$$A_1(s) + A_2(s) = Z(s) \cdot \frac{A_1(s) + A_2(s)}{Z_c} . \quad (2.29)$$

A função de OV refletida $A_2(s)$ pode ser ainda dada na forma:

$$A_2(s) = \frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c} \cdot A_1(s) . \quad (2.30)$$

Assim, a função $V_0(0, s)$ pode ser definida como:

$$V_0(0, s) = \left(1 + \frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c} \right) \cdot A_1(s) , \quad (2.31)$$

resultando em:

$$V_0(0, s) = \frac{2 \cdot Z(s)}{Z(s) + Z_c} \cdot A_1(s), \quad (2.32)$$

em que $\frac{2 \cdot Z(s)}{Z(s) + Z_c}$ é a relação de entrada-saída de OV's incidentes e transmitidas, e o termo $\frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c}$ é a relação entrada-saída de OV's incidentes e refletidas.

Com base na análise apresentada, os coeficientes de reflexão para sinais de corrente e tensão, Γ_i e Γ_v , e transmissão, T_i e T_v , são obtidos nas seguintes formas:

$$\Gamma_i = -\frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c} , \quad (2.33)$$

$$T_i = \frac{2Z_c}{Z(s) + Z_c} , \quad (2.34)$$

$$\Gamma_v = \frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c} , \quad (2.35)$$

$$T_v = \frac{2Z(s)}{Z(s) + Z_c} . \quad (2.36)$$

2.3.2 Propagação de OV's em Linhas com Derivações

Para a explicação da reflexão e transmissão de OV's em uma LT com ramificações, considere a LT com derivação ilustrada na Figura 2.3, em que a impedância característica do segmento 1 é Z_1 e a impedância do equivalente em paralelo dos segmentos 2 e 3, composto pelas impedâncias Z_2 e Z_3 , é Z_P .

As OV's de corrente incidentes são refletidas ou transmitidas de acordo com as impedâncias características dos segmentos de linha conectados, relacionando-se aos coeficientes de reflexão e transmissão Γ_1 e T_1 respectivamente. Dessa maneira, conhecendo-se apropriadamente os referidos coeficientes, é possível calcular a polaridade e amplitude das OV's medidas nos terminais monitorados da LT, as quais são regidas por expressões matemáticas que representam a soma das

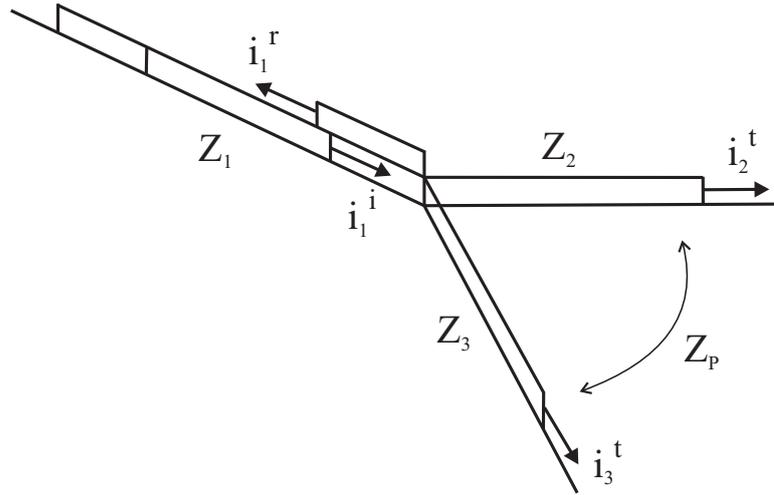


Figura 2.3. Corrente fluindo por uma linha com derivação.

OVs incidentes e refletidas, conforme disposto no princípio da superposição (GREENWOOD, 1991). Cabe ressaltar que, uma vez que essas OVs incidentes podem ser provenientes já de um processo de transmissão de OVs em um dado ponto do SEE, o entendimento dos coeficientes de transmissão também é importante. Assim, analisando a Figura 2.3, a corrente refletida no segmento 1 i_1^r e as correntes transmitidas para os segmentos 2 e 3, representadas por i_2^t e i_3^t , respectivamente, são calculadas usando (SCHWEITZER *et al.*, 2016):

$$i_1^r = \Gamma_1 \cdot i_1^i, \quad (2.37)$$

$$i_2^t = \frac{Z_P}{Z_2} \cdot T_1 \cdot i_1^i, \quad (2.38)$$

$$i_3^t = \frac{Z_P}{Z_3} \cdot T_1 \cdot i_1^i. \quad (2.39)$$

As expressões (2.37), (2.38) e (2.39) serão de grande utilidade para entender as características das OVs verificadas nos casos avaliados neste trabalho, especialmente os relacionados com faltas em LTS, nos quais o ramo de falta é enxergado pelas OVs como uma ramificação de impedância diferente à impedância característica da LT.

2.4 COMPORTAMENTO DE OV'S EM TERMINAÇÕES DE LTS

Partindo da análise de coeficientes de reflexão e transmissão apresentada na seção anterior, também é válido e útil compreender o comportamento de OVs em terminações típicas de LTS, a exemplo de terminações em curto-circuito e na forma de circuito aberto.

2.4.1 Terminação com Curto-Circuito

Quando uma OV de tensão incide em uma terminação em curto-circuito, a OV incidente se cancela com a OV refletida no ponto de medição, conduzindo à conclusão de que a OV de tensão transmitida é nula. Isso é justificado pela própria definição de curto-circuito, em que a tensão na terminação tende a zero para curtos-circuitos francos. Ademais, no caso de uma OV de corrente, sua reflexão possui a mesma polaridade da OV incidente, de modo que se verifica no ponto de medição uma OV de amplitude maior, acarretando uma OV de corrente transmitida com módulo duplicado.

Em termos matemáticos, é possível avaliar as situações supracitadas, considerando a aplicação dos coeficientes de reflexão e transmissão apresentados anteriormente. Sendo Z_c a impedância característica da linha e $Z_P = 0$ a impedância do curto-circuito franco em análise, para sinais de corrente e tensão, tem-se:

$$\Gamma_i = \frac{Z_c - Z_P}{Z_c + Z_P} = \frac{Z_c - 0}{Z_c + 0} \approx 1, \quad (2.40)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot Z_c}{Z_c + Z_P} = \frac{2 \cdot Z_c}{Z_c + 0} \approx 2, \quad (2.41)$$

$$\Gamma_v = \frac{Z_P - Z_c}{Z_c + Z_P} = \frac{0 - Z_c}{Z_c + 0} \approx -1, \quad (2.42)$$

$$T_v = \frac{2 \cdot Z_P}{Z_c + Z_P} = \frac{2 \cdot 0}{Z_c + 0} \approx 0. \quad (2.43)$$

2.4.2 Terminação com Circuito Aberto

Um circuito aberto no final de uma LT com efeito capacitivo desprezível significa que a corrente naquele ponto será idealmente nula. Dessa maneira, quando uma OV de corrente incide em uma terminação com circuito aberto, uma OV de corrente com polaridade oposta será refletida, resultando em uma OV medida nula no ponto de medição e, conseqüentemente, em uma OV transmitida também nula. Por outro lado, no caso da OV de tensão, a OV refletida terá a mesma polaridade da OV incidente no ponto de descontinuidade, resultando em uma OV medida e uma OV transmitida com amplitude dobrada.

Em termos matemáticos, assim como no caso anterior são obtidos os seguintes coeficientes:

$$\Gamma_i = \frac{Z_c - Z_P}{Z_c + Z_P} = \lim_{Z_P \rightarrow \infty} \frac{Z_c - Z_P}{Z_c + Z_P} = \frac{-Z_P}{Z_P} \approx -1, \quad (2.44)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot Z_c}{Z_c + Z_P} = \lim_{Z_P \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot Z_c}{Z_c + Z_P} \approx 0, \quad (2.45)$$

$$\Gamma_v = \lim_{Z_P \rightarrow \infty} \frac{Z_P - Z_c}{Z_c + Z_P} = \frac{Z_P}{Z_P} \approx 1, \quad (2.46)$$

$$T_v = \frac{2 \cdot Z_P}{Z_c + Z_P} = \lim_{Z_P \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot Z_P}{Z_P} \approx 2. \quad (2.47)$$

2.5 DIAGRAMA DE LATTICE

Conforme apresentado anteriormente, de acordo com a teoria de OV's, qualquer distúrbio causado em uma LT gerará frentes de ondas progressivas e regressivas, as quais se propagam do ponto de distúrbio até os terminais de monitoramento. Esses distúrbios podem ser causados, por exemplo, por faltas ou manobras de chaveamento.

No caso de faltas, sabe-se ainda que os valores iniciais das OV's induzidas dependem de alguns fatores, como a resistência, ângulo de incidência e impedância característica do sistema (BO *et al.*, 1997). Em relação a estes fatores, destacam-se os seguintes comentários:

- Deve-se destacar que em situações de faltas com um ângulo de incidência de 0° ou 180° , idealmente, não existe degrau de tensão aplicado no ponto de falta (SCHWEITZER *et al.*, 2014), de forma que não são lançadas OV's na rede elétrica, resultando em transitórios atenuados. Sendo assim, pode-se concluir que o ângulo de 90° consiste na situação de OV's mais relevantes no sistema, visto que o degrau de tensão aplicado no ponto de falta é máximo.
- No momento de ocorrência de uma falta, as OV's induzidas enxergam um divisor de tensão à frente, de forma que o degrau de tensão aplicado é função da impedância característica da LT e da resistência de falta. Assim, quão maior for a resistência de falta, menor é o degrau de tensão que chega à LT, resultando, em casos de resistências de falta elevadas, em transitórios amortecidos (GREENWOOD, 1991).

Ademais, a análise de OV's deve levar em conta a configuração do sistema elétrico em que elas se propagam. Caso esse sistema conte com descontinuidades, a exemplo de derivações, linhas adjacentes e circuito duplo, devem-se considerar ainda os efeitos de reflexão e transmissão das OV's nesses pontos. Portanto, devido aos fatores supracitados, muitas aplicações baseadas na

teoria de OV's buscam compreender a propagação das OV's por meio de diagramas de reflexões, largamente conhecidos como diagramas de Lattice.

No âmbito da análise de OV's em sistemas elétricos, o diagrama de Lattice foi desenvolvido por Bewley (1931). Basicamente, utiliza-se uma escala vertical para representação do tempo t , uma escala horizontal para representação do espaço x na LT, e linhas diagonais com setas que representam a direção de propagação das OV's, cujas inclinações são proporcionais à velocidade de propagação das referidas frentes de onda (BEWLEY, 1931).

Ao montar o diagrama de reflexões, podem-se determinar as amplitudes das OV's refletidas e transmitidas, as quais são proporcionais ao produto dos coeficientes de reflexão e transmissão, respectivamente, pela OV incidente em estudo. Com isso, conhecendo-se a distribuição das OV's no espaço x e no tempo t , os sinais de tensão e corrente podem ser determinados pelo somatório de todos os termos incidentes em um ponto de monitoramento (GLOVER *et al.*, 2012). De forma mais específica, para o cálculo de uma OV medida em um dado terminal, diz-se que esta é dada pela soma das frentes de onda históricas que já incidiram no terminal monitorado com as novas OV's incidentes e refletidas no ponto de análise.

A Figura 2.4 ilustra um exemplo do diagrama de Lattice para um caso de um distúrbio entre dois terminais de uma LT de circuito simples. Na figura, dL e dR são as distâncias do distúrbio até os terminais local e remoto, respectivamente; $tL1$ e $tR1$ referem-se ao tempo em que as primeiras frentes de ondas oriundas do ponto de distúrbio atingem os terminais local e remoto, respectivamente; $tL2$ representa a incidência da onda refletida no ponto de distúrbio no terminal local; e $tR_{transm1}$ e $tL_{transm1}$ representam os instantes em que as OV's transmitidas no ponto do distúrbio incidem nas barras local e remota, respectivamente.

Com base no exposto, percebe-se que as OV's são lançadas a partir do ponto do distúrbio em direção aos dois terminais da LT. Neste sistema, são verificados três pontos de descontinuidade: os dois terminais da LT e o próprio ponto de distúrbio, locais esses nos quais, quando incidem OV's, são verificadas reflexões e transmissões. Assim, por meio do diagrama de reflexões, é possível ter uma noção exata das OV's que incidem nos terminais monitorados, viabilizando o cálculo das OV's medidas ao longo do tempo. Como consequência, torna-se mais fácil avaliar algoritmos baseados na teoria das OV's, bem como compreender o impacto de terminações com diferentes características sobre transitórios em uma LT.

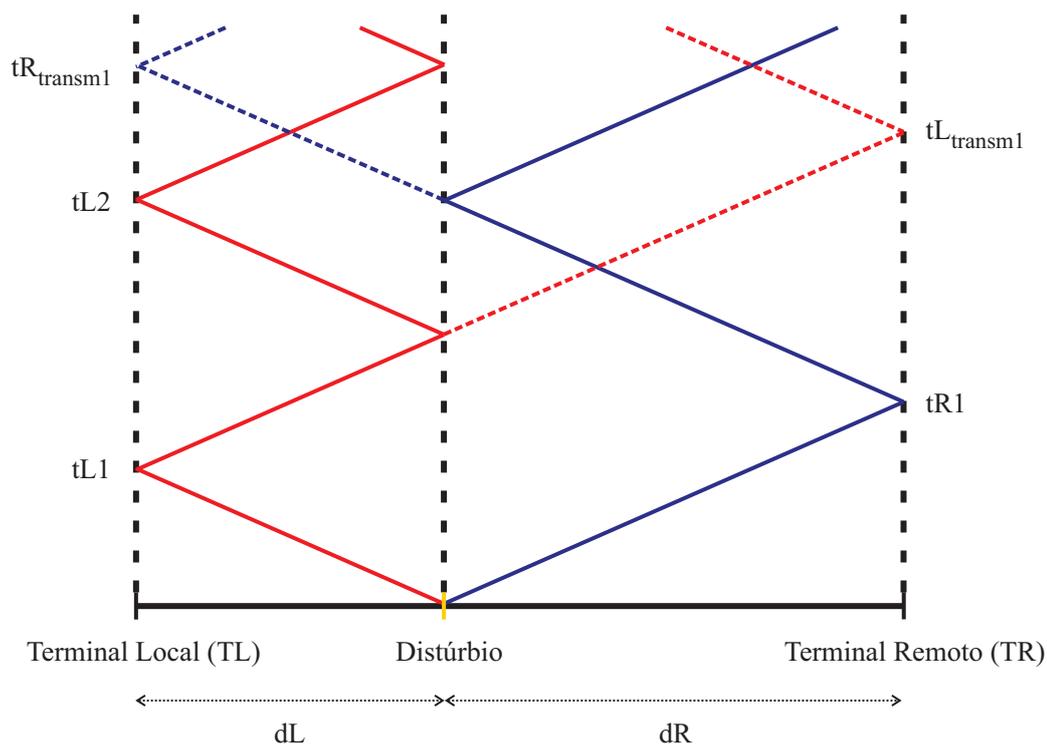


Figura 2.4. Exemplo de diagrama de Lattice.

Vale destacar que, neste trabalho, os diagramas de reflexões são representados com o tempo crescente no sentido de baixo para cima, seguindo a direção do crescimento tradicional dos eixos verticais de gráficos bidimensionais. Entretanto, é importante frisar que, na literatura, encontram-se também diagramas de reflexões cujo tempo cresce para os lados ou para baixo. Todas essas abordagens estão corretas e diferem apenas na forma de apresentação do diagrama de Lattice.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No atual campo de pesquisas de OV's, há soluções propostas que se baseiam na análise de diagramas de Lattice e alguns trabalhos nos quais são propostas soluções para construção do referido diagrama. Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica de trabalhos inseridos nessas duas vertentes, destacando-se a importância dos diagramas de Lattice para aplicações modernas em SEEs, bem como as características de algoritmos já existentes para construção automática desses diagramas.

3.1 O USO DO DIAGRAMA DE LATTICE NA LITERATURA

As tecnologias atuais buscam por mais robustez no que diz respeito ao desenvolvimento de técnicas para diagnóstico de distúrbios em LTs. Com isso, a teoria das OV's tem sido um promissor foco de pesquisa em virtude da rapidez, precisão e confiabilidade com que se pode, por exemplo, detectar e localizar uma falta.

Conforme disposto no capítulo anterior, o diagrama de Lattice representa a configuração do sistema e as posições e direções de cada onda incidente, refletida e transmitida em qualquer instante de tempo. Dessa maneira, esse diagrama facilita a compreensão da origem das frentes de onda causada por distúrbios em LTs, de modo que seu uso diminui dificuldades antes encontradas durante a análise de transitórios, a exemplo de casos de reflexões sucessivas de OV's em pontos específicos de um SEE monitorado.

Yu (1994) expressa, em seu trabalho, a importância dos diagramas de Lattice para a análise de distúrbios e para o uso em técnicas de proteção de equipamentos do SEE, como transformadores e máquinas elétricas. No entanto, ele destaca que, até a data da publicação do seu trabalho, os algoritmos computacionais capazes de gerar esses diagramas automaticamente eram difíceis de se compreender e de se aplicar. Dessa maneira, o autor propôs um método

alternativo para detectar as magnitudes e picos de OV's, além de também determinar o formato das OV's. Para validar sua proposta, Yu (1994) adotou um diagrama de Lattice construído manualmente como referência e comparou os resultados.

Bo *et al.* (1997) ilustram a importância dos diagramas de reflexões para o desenvolvimento de técnicas de localização de faltas baseadas na teoria de OV's. Em seu trabalho, os autores trazem uma revisão dos métodos de localização de falta mais utilizados e destacam algumas limitações das técnicas baseadas em OV's, a exemplo da situação em que a falta ocorre no momento em que o ângulo do sinal de tensão corresponde a zero ou do caso em que a falta ocorre muito próxima ao terminal de monitoramento, o que acarreta a dificuldade de diferenciar as OV's incidentes das refletidas. Diante disso, Bo *et al.* (1997) apresentam a aplicação de uma técnica de localização de faltas em LT's e linhas de distribuição que utiliza um princípio baseado em sinais de tensão em alta frequência ou sinais transitórios de corrente. Para ilustrar o princípio básico de seu trabalho, os autores fazem uso de um diagrama de Lattice numa configuração elétrica de LT com circuito simples com a finalidade de explicar a propagação de OV's.

Datta & Chatterjee (2012) ressaltam a importância dos diagramas de Lattice para a análise de transitórios e para a compreensão da propagação de OV's, apresentando seus princípios e propriedades básicas. Nesse trabalho, é realizada uma revisão da teoria de OV's e dos métodos de localização de falta baseados nela. Ademais, esse artigo efetua uma revisão de diferentes trabalhos que utilizaram o método de localização de faltas baseado em OV's com o auxílio do diagrama de reflexões, como aplicações em estudos de transitórios eletromagnéticos, localização de faltas em sistemas distribuídos e comunicação alternativa em banda larga utilizando redes de LT's. Entretanto, os autores não citam uma aplicação que seja capaz de construir os diagramas de Lattice automaticamente.

Choudhury & Ganguly (2015) também utilizam o diagrama de Lattice como ferramenta essencial para a compreensão da propagação de OV's no que diz respeito à detecção e localização de faltas utilizando o método de transformada wavelet. Esse artigo apresenta uma fundamentação teórica da transformada wavelet, da teoria das OV's e da decomposição modal. Com base nisso, os autores propõem um algoritmo de detecção de falta para um caso de estudo simulado com uma LT de circuito simples. Com o intuito de comprovar suas propostas, os autores utilizaram o diagrama de Lattice. Apesar desse artigo ter mais foco em localização de faltas,

ele destaca a importância do diagrama de reflexões para a análise de distúrbios em uma LT. Contudo, esse trabalho também apresenta apenas o estudo de uma LT de circuito simples, o que reforça a importância e incentiva a criação de uma ferramenta capaz de analisar sistemas mais complexos.

Silva (2008) propõe um algoritmo híbrido de localização de faltas, o qual utiliza métodos de OV's e de componentes fundamentais, já que, nos casos avaliados, o autor dispõe de componentes de altas e baixas frequências. Em Silva (2008), o sistema avaliado conta com três terminais de registro constituídos por LTs com alguns parâmetros diferentes, a exemplo da velocidade de propagação e do comprimento das linhas. Contudo, as impedâncias características são consideradas iguais. Em seu estudo, o autor constrói o diagrama de Lattice para validar o método de localização exposto, demonstrando mais uma vez a importância do diagrama de Lattice nesse tipo de aplicação.

Parentoni (2006) dispõe, em seu trabalho, um algoritmo de detecção do local de falta para um circuito também com três ramos. Em sua análise, o autor utiliza o diagrama de Lattice para a constatação básica dos tempos associados à incidência das OV's e para a avaliação dos tempos de propagação relacionados às componentes modais obtidas por meio da transformada de Clarke. Diferentemente do explicitado em Silva (2008), Parentoni (2006) traz, em seu diagrama, OV's refratadas no ponto de falta, as quais serão destacadas neste trabalho devido ao seu importante papel em análises mais robustas dos transitórios no sistema. Ademais, nota-se novamente a utilidade do diagrama de Lattice para validação de soluções baseadas na teoria das OV's.

Schweitzer *et al.* (2015) apresentam os fundamentos de um relé de proteção no domínio do tempo que utiliza funções baseadas na teoria das OV's. São funções do tipo direcional de potência e diferencial, as quais, em sua formulação, são consideradas informações de tempo de propagação, amplitude e polaridade. Também nesta aplicação, embora de forma indireta, demonstra-se a importância do entendimento da propagação das OV's em LTs, o que é facilitado sobremaneira pelo uso do diagrama de Lattice.

3.2 FERRAMENTAS PARA A CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE LATTICE

Todos os estudos apresentados até aqui são baseados na teoria de OV's e ratificam a necessidade de utilizar os diagramas de Lattice como ferramenta de entendimento da propagação de OV's em LT's. Dessa maneira, ressalta-se a importância de implementar ferramentas computacionais capazes de gerar esses diagramas automaticamente para sistemas mais complexos, já que, quanto maior for a complexidade da configuração do sistema, maior o número de reflexões em um dado ponto de monitoramento, o que, tradicionalmente, é reportado como um problema difícil de analisar (SAHA *et al.*, 2010).

Na literatura, embora a importância dos diagramas de Lattice seja reconhecida, há poucas propostas de implementações que realizam a construção automática desses diagramas. Lee (2000) propôs um aplicativo implementado em JAVA capaz de construir diagramas de reflexões para visualizar OV's. Contudo, o aplicativo proposto só promove a análise de sistemas com LT's de circuito simples.

Datta (2013) propôs um programa implementado em MATLAB que gera diagramas de Lattice automaticamente. Nele, apresenta-se uma metodologia para o cálculo do diagrama de Lattice, mas não são apresentadas informações de módulo e polaridade das OV's nos diagramas. Além disso, o algoritmo apresentado em Datta (2013) reporta apenas a análise de LT's com circuito simples e não se encontra embarcado em um aplicativo, dificultando seu uso.

A empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), fabricante do relé reportado em Schweitzer *et al.* (2015) que se baseia na teoria das OV's, implementou um *software* denominado *Syncrowave Event* que é capaz de gerar diagramas de Lattice de forma automática, conforme disposto no manual SEL (2015). Diferentemente das outras referências, o algoritmo proposto pela SEL permite ao usuário o ajuste fino da localização do distúrbio por intermédio da seleção do posicionamento de um cursor para definir o ponto exato do distúrbio após sua pré-estimação por meio de algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes fundamentais tomadas de um ou dois terminais. Ademais, esse aplicativo também permite a inserção dos parâmetros elétricos do sistema avaliado e possibilita a visualização das ondas transmitidas no ponto de distúrbio. Embora apresente mais recursos em relação às outras ferramentas, esse aplicativo também contempla apenas a análise de LT's de circuito simples, o que dificulta um

entendimento mais completo de fenômenos ocorridos em LTs de circuito duplo ou mesmo com LTs adjacentes.

Diante do exposto, constatou-se a necessidade de implementar um aplicativo capaz de gerar diagramas de Lattice automaticamente, contemplando a análise de topologias mais complexas, abrangendo LTs com circuito simples, LTs com circuito simples com LTs adjacentes e LTs com circuito duplo. Assim, este trabalho propõe o aplicativo LAPPICE, o qual, como já mencionado, opera em modo *offline*, contando com uma interface simples e intuitiva, e contemplando a análise de tempos de propagação, amplitude e polaridade das topologias supracitadas.

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam um comparativo entre o LAPPICE e os aplicativos reportados nessa revisão bibliográfica para a construção automática do diagrama de reflexões. As potencialidades do LAPPICE destacadas nas referidas tabelas serão apresentadas no próximo capítulo.

Tabela 3.1. Comparativo dos aplicativos existentes: configurações de sistemas.

Referência	LT circ. simples	LT c/ linha adjacente	LT circ. duplo
Lee e Kelvin	✓	–	–
Datta e Chaterjee	✓	–	–
Syncrowave Event (SEL)	✓	–	–
LAPPICE	✓	✓	✓

Tabela 3.2. Comparativo dos aplicativos existentes: recursos de visualização de gráficos.

Referência	OVs incidentes/refletidas	Torque	Modo zero
Lee e Kelvin	–	–	–
Datta e Chaterjee	–	–	–
Syncrowave Event (SEL)	–	–	–
LAPPICE	✓	✓	✓

Tabela 3.3. Comparativo dos aplicativos existentes: método de localização de falta envolvidos no processo.

Referência	Um terminal	Dois terminais
Lee e Kelvin	–	✓
Datta e Chaterjee	–	✓
Syncrowave Event (SEL)	✓	✓
LAPPICE	✓	✓

Com a finalidade de possibilitar a visualização da propagação de OV's de maneira mais detalhada e confiável, desenvolveu-se um aplicativo para computador denominado LAPPICE, cujos detalhes de implementação e metodologia são apresentados neste capítulo. Ademais, destacam-se as funcionalidades do aplicativo e suas potencialidades em relação aos aplicativos reportados na literatura.

4.1 VISÃO GERAL

O aplicativo LAPPICE foi desenvolvido em uma interface simplificada, de tal forma que o usuário precisa carregar apenas arquivos de simulação do ATP, informar dados das linhas e do sistema, bem como o tipo de sinal a ser analisado. Na Figura 4.1, ilustra-se a interface gráfica do LAPPICE.

O princípio de funcionamento do LAPPICE consiste, primeiramente, na seleção do número de terminais monitorados, ou seja, um ou dois terminais (neste último caso, considerando registros sincronizados). A partir dessa informação, seleciona-se em seguida o tipo de método de localização do distúrbio empregado, o qual pode considerar dados de um ou dois terminais. Assim, o usuário carrega registros oscilográficos gerados por meio do ATP através de uma rotina na linguagem MODELS, os quais possuem extensões dos tipos ".1" e/ou ".2", representando um ou dois terminais de monitoramento. Uma vez carregados os registros, o usuário deve informar o tipo de sistema em análise (LT com circuito simples; LT com circuito simples e LTs adjacentes; ou LT com circuito duplo), os comprimentos das LTs contidas na topologia selecionada, bem como os parâmetros dessas linhas, considerando a sequência positiva e a sequência zero, a depender do tipo de sinal que o usuário quer observar. Ademais, deve-se informar a frequência nominal do SEE avaliado e o tipo de sinal de análise em interesse.

LAPPICE

Tipo de distúrbio
 Falta Energização

Método de localização de faltas
 1 terminal 2 terminais

Selecionar arquivos para simulação

Sistema em análise
 LT simples
 LT adjacente LT esquerda LT direita
 LT circuito duplo

200 Comprimento da linha principal (km)
 30 Comprimento da linha adjacente esquerda (km)
 30 Comprimento da linha adjacente direita (km)
 Comprimento da linha de circuito duplo (km)

ILINE (ATP)	Parâmetros da linha de transmissão		Parâmetros da linha de transmissão (adjacente ou paralela)					
	Seq. positiva	Seq. zero	LT esquerda ou paralela		LT direita			
	R (Ω/km)	0.0346	0.4177	R (Ω/km)	0.0346	0.4177	0.0346	0.4177
<input checked="" type="radio"/> Y, X	Y (mho/km)	5.5106e- ℓ	2.8648e- ℓ	Y (mho/km)	5.5106e- ℓ	2.8648e- ℓ	5.5106e- ℓ	2.8648e- ℓ
<input type="radio"/> Z, v	X (ohm/km)	0.3005	1.5238	X (ohm/km)	1.5005	1.5238	1.5005	1.5238
<input type="radio"/> Z, τ								

60 Frequência (Hz) 4 Número de amostras do filtro DS

Tipo de sinal
 Corrente: Número de reflexões
 Tensão:

Plotar ondas incidentes e refletidas
 Visualizar gráficos da seq. zero
 Visualizar torque

LOCAL DA FALTA ESTIMADO
 TIPO DE FALTA

Universidade de Brasília - Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE)
 Leonardo Rodrigo S. de Meneses; Mariana Nunes de Oliveira; Felipe V. Lopes, D.Sc.

Figura 4.1. Interface gráfica do LAPPICE.

Na etapa seguinte, a partir dos sinais de corrente e/ou tensão extraídos dos arquivos de simulação, aplica-se a Transformada de Clarke com o objetivo de promover o desacoplamento das fases do sistema. Em seguida, utiliza-se um filtro passa-alta para eliminar oscilações em 60 Hz e o filtro DS para extrair as componentes de alta frequência, o qual tem sido utilizado com sucesso em dispositivos reais para extrair as OV's de sinais transitórios (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam os fluxogramas que ilustram o princípio de funcionamento do LAPPICE. O primeiro explora o aspecto da inserção dos dados pelo usuário até a requisição da construção do diagrama de Lattice. Já o segundo ilustra o processamento desses dados pelo algoritmo até a geração do diagrama de Lattice propriamente dito. Nas Seções 4.2 e 4.3, cada etapa ilustrada nos diagramas será explorada com maior detalhamento.

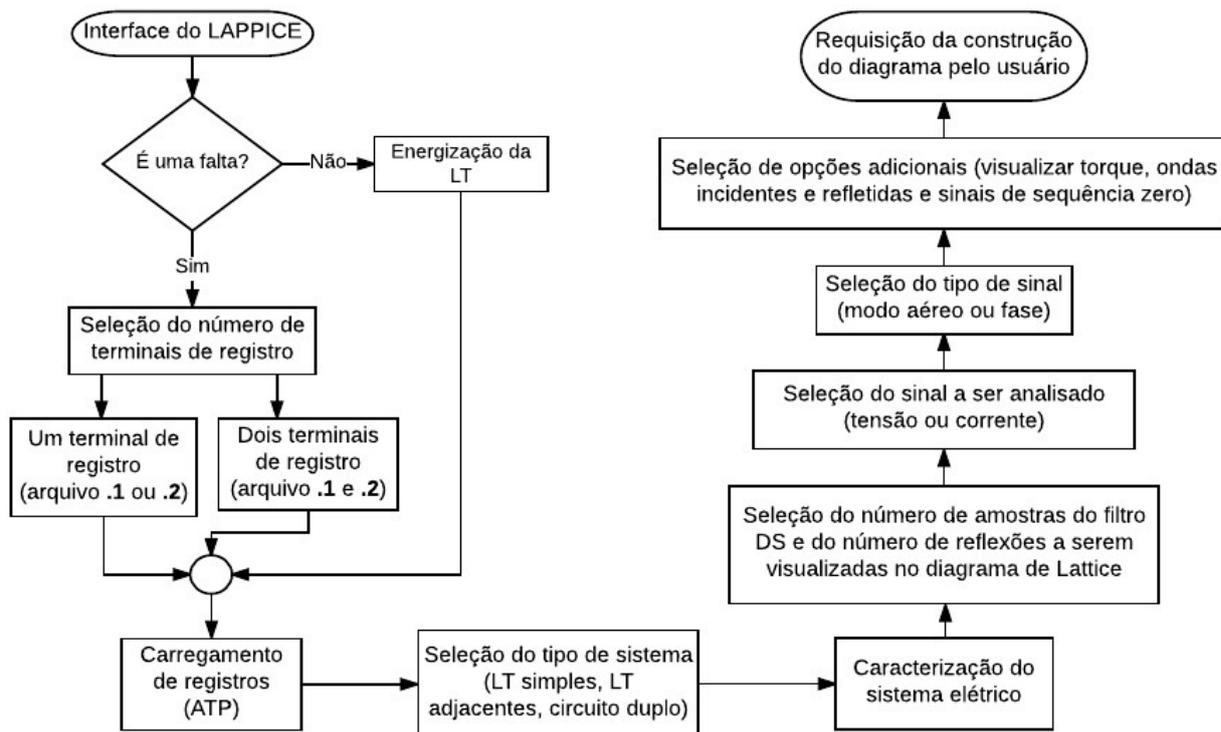


Figura 4.2. Fluxograma da aquisição de dados no LAPPICE.

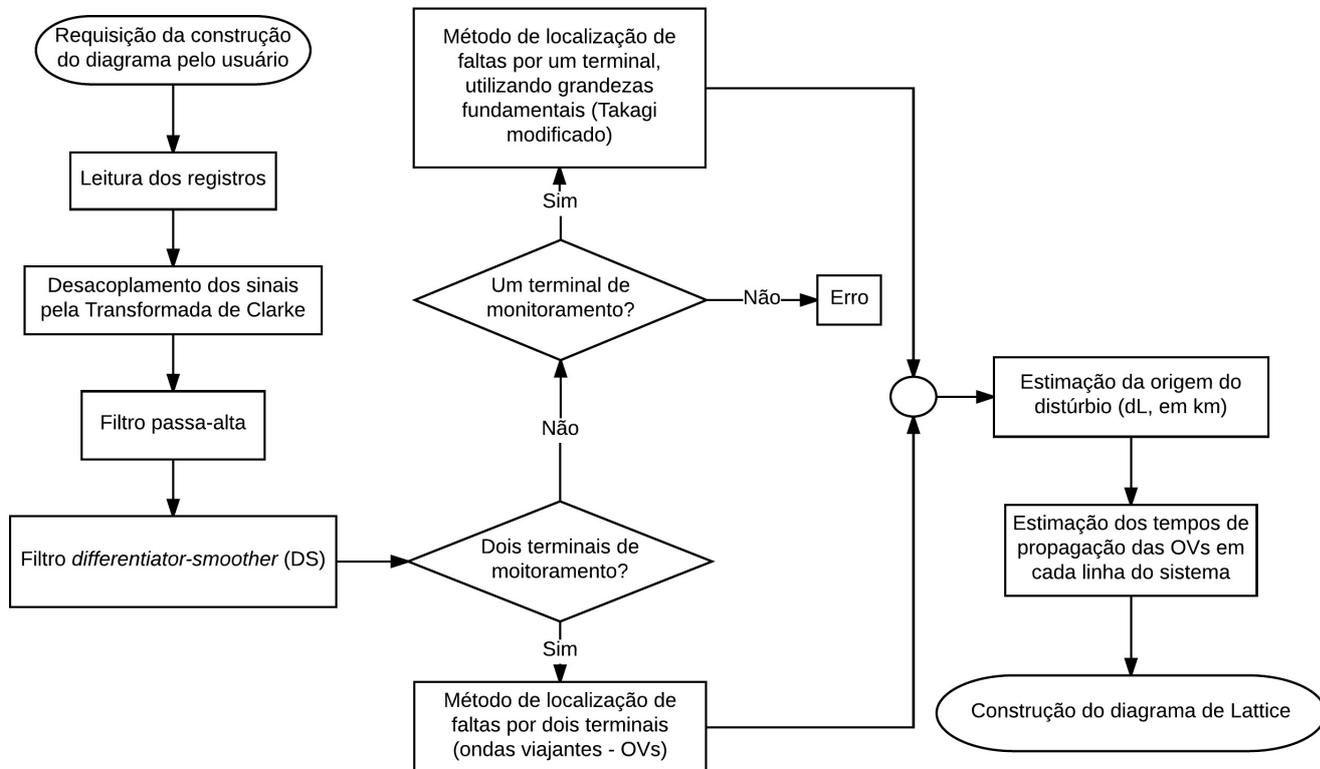


Figura 4.3. Fluxograma da modelagem e processamento dos sinais no LAPPICE.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Inicialmente, serão apresentadas todas as informações obrigatórias e opcionais que o usuário deverá inserir no LAPPICE para gerar o diagrama de reflexões de um caso de estudo, conforme a Figura 4.2. Assim, a aquisição de dados será composta por três etapas principais: seleção do número de terminais e carregamento dos registros, seleção do tipo de sistema e caracterização do SEE e demais seleções a critério do usuário, tais como número de amostras do filtro DS, seleção do tipo de sinal (corrente ou tensão e modo aéreo ou de fase) e comando para visualizar gráficos do sinal de modo zero, torque e/ou OV's incidentes e refletidas. Todos esses conceitos serão apresentados e aprofundados nesta seção e na Seção 4.3.

4.2.1 Seleção do Tipo de Distúrbio, Número de Terminais e Carregamento dos Registros Oscilográficos

Quando o usuário abre a interface do LAPPICE, ele primeiramente deve informar o tipo de distúrbio simulado no ATP. Caso ele selecione uma energização da LT, o próximo passo é carregar os arquivos de simulação. Entretanto, caso a análise seja relacionada a uma falta, o usuário deve informar o número de terminais de registro do sistema. Essa informação deve ser fornecida nesse instante, visto que ela definirá o método de localização de faltas utilizado para a identificação do ponto de lançamento das OV's no sistema. Caso o usuário selecione um terminal de monitoramento, utiliza-se o método de Takagi modificado (TAKAGI *et al.*, 1982). Entretanto, caso o usuário opte por uma configuração com dois terminais de registro, utiliza-se o método de dois terminais baseado na teoria de OV's. Esses métodos serão melhor detalhados na Seção 4.3.

Após a definição da quantidade de terminais, é possível carregar arquivos de simulação do ATP com extensões ".1" e ".2". Se apenas um arquivo for selecionado, considera-se apenas um terminal de registro. Caso dois arquivos com essas extensões sejam selecionados, consideram-se dois terminais de monitoramento. Vale destacar que o LAPPICE é capaz de realizar a conferência da compatibilidade das extensões dos arquivos e, caso o usuário selecione algum arquivo erroneamente, o aplicativo exibe mensagem de erro.

Os arquivos de simulação do ATP devem ser gerados por meio da impressão em arquivo de texto gerado através de uma rotina programada na linguagem *MODELS* do ATP, como descrito a seguir:

```
MODEL ImprimeLOC

INPUT

    v[1..3]
    i[1..3]

EXEC

    write1(t,v[1],v[2],v[3],i[1],i[2],i[3])

ENDEXEC

ENDMODEL
```

Nesse exemplo, armazenam-se, no arquivo de texto, as variáveis relativas ao tempo (t), às três fases dos sinais de tensão ($v[1]$, $v[2]$ e $v[3]$) e às três fases de corrente ($i[1]$, $i[2]$ e $i[3]$), escrevendo o registro oscilográfico na sequência ilustrada no código. Ressalta-se que é imprescindível que o registro gerado esteja em conformidade com essa sequência, pois, em caso contrário, o LAPPICE não identifica corretamente os sinais avaliados.

4.2.2 Seleção do Tipo de Sistema e Caracterização do SEE

Como descrito no Capítulo 3, um dos maiores diferenciais do LAPPICE em relação aos demais aplicativos e às ferramentas encontradas na literatura para a construção automática do diagrama de Lattice consiste na variedade de topologias de sistema que podem ser estudadas. No LAPPICE, o usuário pode escolher entre três tipos de sistemas simulados: LT com circuito simples, LT com circuitos simples e LTs adjacentes, e LT com circuito duplo.

Após a seleção da topologia do sistema, o aplicativo habilitará automaticamente as caixas correspondentes às informações dele, tais como frequência nominal do sistema (em Hz), parâmetros e comprimentos das LTs (em km). Além disso, com o intuito de promover maior integração com o ATP, é possível informar os parâmetros das LTs de três maneiras distintas:

inserindo resistência, admitância e indutância (R, Y e X); inserindo resistência, impedância de surto e velocidade de propagação (R, Z_0 e v_p); e inserindo resistência, impedância de surto e tempo de propagação da OV na LT (R, Z_0 e τ). Nesses três casos, a resistência representa as perdas nas LTs. Diante do exposto, chamando cada conjunto de parâmetros modelo de dados da LT, tem-se:

- **Modelo baseado na resistência, admitância e indutância (R, Y, X):** nesse caso, para efeitos de construção do diagrama de Lattice, calcula-se a velocidade de propagação das OVs pela expressão $v_p = 1/\sqrt{LC}$ e a impedância de surto usando (2.21), isto é, $Z_0 = \sqrt{L/C}$.
- **Modelo baseado na resistência, impedância de surto e velocidade de propagação (R, Z_0, v_p):** esse caso é mais direto, uma vez que a velocidade de propagação das OVs e as impedâncias de surto já são definidas pelo usuário, não sendo necessário calculá-las. É importante ressaltar que a velocidade de propagação deve ser informada no LAPPICE em km/s.
- **Modelo baseado na resistência, impedância de surto e tempo de propagação (R, Z_0, τ):** nesse caso, a impedância de surto já é definida pelo usuário. Além disso, τ consiste no tempo de propagação da OV na LT em segundos, ou seja, $\tau = L_{LT}/v_p$, onde L_{LT} é o comprimento da linha em km e v_p é a velocidade de propagação da OV, a ser determinada em km/s.

4.2.3 Demais Seleções a Critério do Usuário

Após o usuário informar todos os parâmetros das LTs em estudo, ele deve informar o número de amostras utilizadas no filtro DS, o qual compõe parte do processo de filtragem para extração das OVs dos sinais monitorados. Esse ajuste é determinado para o desempenho do processo de filtragem, pois permite uma maior ou menor banda de passagem do filtro. Após esse ajuste, o usuário deve indicar se o sinal a ser analisado é de corrente ou de tensão, bem como escolher se deseja visualizar o modo aéreo ou sinal de fase. Destaca-se que, apesar de o LAPPICE disponibilizar a análise de sinais de tensão, tradicionalmente, esses sinais não são explorados no que diz respeito ao estudo de OVs, uma vez que os transformadores potencial capacitivos (TPCs) apresentam grande atenuação para frequências na ordem de kHz e MHz (SAHA *et al.*,

2010). Dessa maneira, em casos reais, utilizam-se normalmente apenas sinais de corrente para a aplicação da teoria das OV's (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Em adição às configurações supracitadas, é possível determinar o número de reflexões que se deseja visualizar no diagrama de Lattice. Quanto menor for esse número, menos reflexões serão representadas graficamente. Isso pode ser útil quando o sistema em estudo for mais complexo (composto por duas LTs adjacentes ou circuito duplo, por exemplo), e seja do interesse do usuário visualizar um diagrama mais limpo.

Por fim, há três últimas seleções que o usuário pode optar por visualizar: gráficos de OV's incidentes e refletidas, gráficos do modo zero e gráficos do torque, assim definidos:

- **OV's incidentes e refletidas:** as OV's medidas em um terminal correspondem à soma de ondas incidentes e refletidas nele. Neste trabalho, utilizam-se expressões reportadas em Schweitzer *et al.* (2014) para separação de OV's incidentes de tensão e corrente (v_i e i_i) e OV's refletidas de tensão e corrente (v_r e i_r) a partir dos sinais medidos de tensão e corrente (v e i), conforme descrito a seguir:

$$v_i = \frac{v + i \cdot Z_c}{2}, \quad (4.1)$$

$$v_r = \frac{v - i \cdot Z_c}{2}, \quad (4.2)$$

$$i_i = \frac{v_i}{Z_c}, \quad (4.3)$$

$$i_r = \frac{v_r}{Z_c}. \quad (4.4)$$

- **Gráficos do modo zero:** conforme explicado posteriormente na Subseção 4.3.2, o sinal de corrente e o de tensão passam por um procedimento de desacoplamento, através do qual são obtidas as componentes modais do sistema. Essa opção permite que o usuário visualize gráficos dos sinais modais, bem como gráficos do modo zero, caso seja de seu interesse. Embora o modo zero não seja a componente mais apropriada para a localização de distúrbios em SEEs devido às atenuações e dispersões provocadas pelas perdas na terra e nos condutores, alguns métodos a utilizam para evitar a necessidade de informações da LT ou mesmo da sincronização de dados, evidenciando a importância de também representá-las graficamente.
- **Gráficos do torque:** o torque considerado no LAPPICE segue as diretrizes de cálculo apresentadas em Schweitzer *et al.* (2015). Em resumo, esse torque é definido pelo negativo

do produto entre os sinais filtrados de corrente e tensão, de modo que são verificadas ondas de torque positivas quando estas são provenientes da LT monitorada e negativas quando são oriundas de terminais no entorno da LT. Dessa forma, torna-se possível verificar com mais precisão a direcionalidade da OV em estudo.

4.3 MODELAGEM E PROCESSAMENTO DOS SINAIS EM ANÁLISE

Após o usuário inserir os dados necessários e requisitar a geração do diagrama de Lattice, o algoritmo implementado passa por um processo de modelagem e processamento dos sinais, conforme ilustrado na Figura 4.3. Esse procedimento é dividido em seis etapas principais: 1) leitura dos registros simulados no ATP, 2) desacoplamento dos sinais usando a Transformada de Clarke, 3) aplicação dos filtros passa-alta e DS, 4) localização do distúrbio, 5) estimação dos tempos de propagação das OVs e 6) construção do diagrama de Lattice.

4.3.1 Leitura dos Registros Simulados no ATP e dos Parâmetros do SEE

Nesta etapa inicial, a partir do carregamento dos arquivos de simulação no ATP, o LAPPICE extrai os sinais de interesse (corrente trifásica e tensão trifásica) e a variável que registra o tempo desses sinais. Ademais, nesta etapa, todos os dados do SEE, como comprimentos e parâmetros das LTs, já são lidos e, com isso, é possível determinar as velocidades de propagação das OVs e as impedâncias de surto.

4.3.2 Desacoplamento dos Sinais Usando a Transformada de Clarke

No estudo de SEP, utilizam-se amplamente componentes simétricas, principalmente no que diz respeito à análise de distúrbios. No entanto, no caso de análise de OVs no domínio do tempo, é mais comum o uso de transformações modais (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Portanto, no LAPPICE, utiliza-se a Transformada de Clarke para decomposição de tensões e correntes de fase em componentes modais, facilitando a análise das OVs de interesse.

Ainda em relação às componentes modais, as quais são tradicionalmente chamadas de modo

alfa (α), modo beta (β) e modo zero (0), ressalta-se que os modos aéreos (α e β) e o modo terra (0) possuem velocidades de propagação distintas, uma vez que cada modo possui diferentes parâmetros de linha. Assim, no caso da propagação de OV's, utilizam-se os sinais desacoplados, viabilizando uma melhor análise da propagação das OV's na LT monitorada. A matriz empregada para aplicação da Transformada de Clarke é apresentada a seguir, ilustrando o processo de desacoplamento de sinais de corrente em um SEE:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = [T_{CLARKE}] \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

sendo:

$$[T_{CLARKE}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

onde I_0 é a corrente modal de modo zero; I_α é a corrente modal de modo α ; I_β é a corrente modal de modo β ; e I_A , I_B e I_C são as correntes das fases A, B e C da linha, respectivamente.

Neste trabalho, a aplicação da Transformada de Clarke é essencial devido ao fato de que, ao analisar as correntes de fase, nota-se que o sinal obtido possui frentes de OV's misturadas. De fato, uma vez que as OV's de fase possuem os modos aéreos e zero sobrepostos, em algumas ocasiões, pode se tornar difícil a distinção entre OV's do modo zero e OV's de modo aéreo refletidas ao longo do sistema (SAHA *et al.*, 2010), especialmente pelo fato de as velocidades de propagação dessas OV's serem diferentes (modos aéreos possuem velocidade superior ao modo zero). Nestes casos, o desacoplamento é essencial para viabilizar uma análise mais fácil das OV's no sistema, contribuindo para uma melhor compreensão dos fenômenos transitórios.

4.3.3 Aplicação dos Filtros

4.3.3.1 Filtro Passa-Altas

Esse filtro é aplicado logo após o desacoplamento do sistema. Utiliza-se, nesse caso, um filtro Butterworth de terceira ordem com frequência de corte de 1 kHz. O sinal é filtrado por esse filtro com a finalidade de eliminar as oscilações em 60 Hz que porventura não sejam eliminadas pelo filtro DS descrito a seguir.

4.3.3.2 Filtro DS

O filtro *Differentiator-Smoother* ou filtro DS tem o intuito de extrair as componentes de alta frequência e auxiliar a detecção dos tempos de chegada das OV's nos terminais monitorados. Seu princípio de funcionamento se baseia no fato de que a incidência de uma OV no terminal monitorado resulta em uma mudança brusca dos valores instantâneos dos sinais de tensão e corrente. Essa variação, quando avaliada em uma escala de microssegundos, tem nível quase estacionário, se assemelhando a um degrau. Dessa maneira, o filtro DS responde a um sinal de entrada na forma de degrau com uma saída no formato triangular, mantendo ganho unitário (SCHWEITZER *et al.*, 2015). O tamanho da janela do filtro DS, ou seja, o número de coeficientes, é representado por N_{DS} , cujo ajuste é escolhido pelo usuário, conforme explicado na Subseção 4.2.3.

A aplicação do filtro DS resulta na atenuação de transitórios não relacionados à incidência de OV's, viabilizando o cálculo de sinais mais limpos que facilitam a identificação das OV's em estudo. Nesses sinais, os picos das ondas triangulares geradas são relacionados aos tempos de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados, informações estas que são empregadas no princípio básico de operação do LAPPICE para construir os diagramas de Lattice.

Na Figura 4.4, ilustra-se o princípio de funcionamento do filtro DS. Em 4.4(a), apresenta-se a janela do filtro DS com os seus respectivos coeficientes. Já na Figura 4.4(b), apresenta-se a operação do filtro, em que se destaca sua característica de ganho unitário.

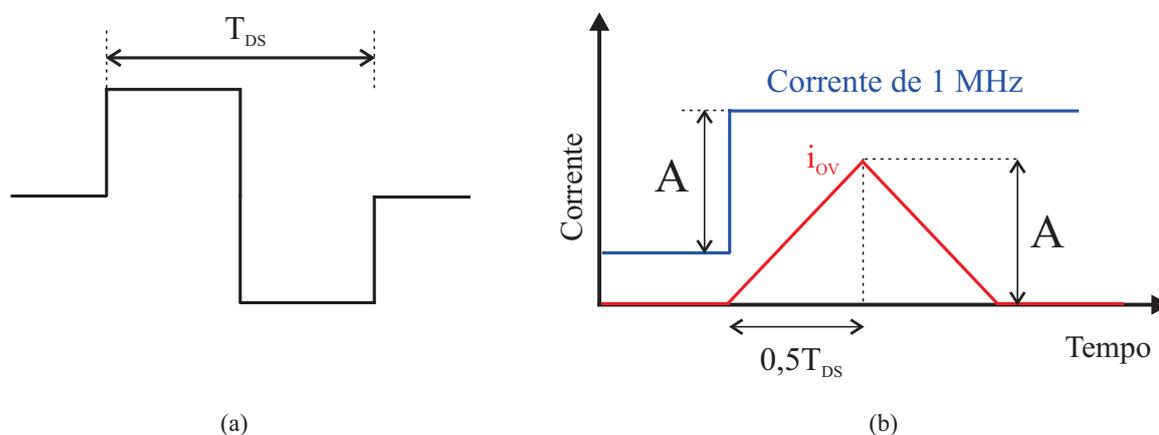


Figura 4.4. Princípio de funcionamento do filtro DS: (a) janela de dados; (b) operação do filtro.

4.3.4 Método de Localização do Distúrbio

A Subseção 4.2.1 expôs os dois tipos de métodos de localização de distúrbios utilizados no algoritmo do LAPPICE. Quando o usuário apenas dispõe de registros de um terminal, o método implementado no aplicativo é o de Takagi Modificado, uma vez que o método de um terminal baseado em OV's possui dificuldades na identificação de OV's refletidas no ponto de falta para topologias com LTs adjacentes ou com circuito duplo. Nesse caso, as OV's refletidas e transmitidas podem ser facilmente confundidas, acarretando em um erro de estimativa (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Em decorrência disso, utiliza-se o método baseado em OV's apenas quando o usuário carrega registros de dois terminais.

4.3.4.1 Método de Um Terminal: Takagi Modificado

O método de Takagi modificado se baseia na análise de fasores fundamentais. Esse método pode ser realizado de maneira *offline* e não exige sincronização de dados nem canais de comunicação entre os terminais da LT (LOPES, 2014). Em termos fundamentais, o método faz uso do princípio da superposição para desenvolver um equacionamento baseado em grandezas incrementais ou de sequência que é menos afetado pela resistência de falta, fator este que influencia tipicamente em algoritmos de um terminal.

Segundo Das *et al.* (2014), em sua forma clássica, o algoritmo de Takagi assume que os sistemas de transmissão são aproximadamente homogêneos¹, sendo aplicado por meio do seguinte equacionamento:

$$d = \frac{\text{imag} \left(\hat{V}_G \cdot \Delta \hat{I}_G^* \right)}{\text{imag} \left(Z_{L1} \cdot \hat{I}_G \cdot \Delta \hat{I}_G^* \right)} . \quad (4.7)$$

sendo d a distância do terminal local até o ponto de distúrbio estimado, \hat{V}_G , \hat{I}_G e $\Delta \hat{I}_G$ a tensão, corrente e corrente incremental relacionadas ao loop de falta do defeito em estudo, as quais assumem os valores descritos na Tabela 4.1.

Deve-se notar que, embora (4.7) viabilize boas estimativas para SEEs típicos, nem sempre a homogeneidade das redes elétricas é garantida, podendo existir desvios no resultado dependendo das configurações de ajuste dos relés. Por isso, com o intuito de promover um cálculo

¹Sistemas cujas impedâncias possuem um mesmo ângulo de fase.

Tabela 4.1. \hat{V}_G , \hat{I}_G e $\Delta\hat{I}_G$ para diferentes tipos de falta.

Tipo de Falta	\hat{V}_G	\hat{I}_G	$\Delta\hat{I}_G$
AT	\hat{V}_{AF}	$\hat{I}_{AF} - k\hat{I}_{G0}$	$\hat{I}_{AF} - \hat{I}_{Apre}$
BT	\hat{V}_{BF}	$\hat{I}_{BF} - k\hat{I}_{G0}$	$\hat{I}_{BF} - \hat{I}_{Bpre}$
CT	\hat{V}_{CF}	$\hat{I}_{CF} - k\hat{I}_{G0}$	$\hat{I}_{CF} - \hat{I}_{Cpre}$
AB, ABT, ABC	$\hat{V}_{AF} - \hat{V}_{BF}$	$\hat{I}_{AF} - \hat{I}_{BF}$	$(\hat{I}_{AF} - \hat{I}_{Apre}) - (\hat{I}_{BF} - \hat{I}_{Bpre})$
BC, BCT, ABC	$\hat{V}_{BF} - \hat{V}_{CF}$	$\hat{I}_{BF} - \hat{I}_{CF}$	$(\hat{I}_{BF} - \hat{I}_{Bpre}) - (\hat{I}_{CF} - \hat{I}_{Cpre})$
CA, CAT, ABC	$\hat{V}_{CF} - \hat{V}_{AF}$	$\hat{I}_{CF} - \hat{I}_{AF}$	$(\hat{I}_{CF} - \hat{I}_{Cpre}) - (\hat{I}_{AF} - \hat{I}_{Apre})$

onde $k = Z_{L0}/Z_{L1} - 1$

mais preciso do local da falta, foi proposto o algoritmo de Takagi Modificado, no qual apenas componentes de sequência zero são empregadas, considerando a correção da não homogeneidade do sistema monitorado. Para tanto, as impedâncias de sequência zero do SEE são relacionadas por meio da expressão:

$$|d_s| \angle \phi = \frac{Z_{G0} + Z_{L0} + Z_{H0}}{(1-d) \cdot Z_{L0} + Z_{H0}}, \quad (4.8)$$

onde Z_{L0} , Z_{G0} e Z_{H0} são as impedâncias de sequência zero da LT e dos equivalentes de Thévenin atrás dos terminais local e remoto da LT, respectivamente.

Percebe-se que em casos de SEEs homogêneos, $\phi \approx 0$. Porém, para SEEs não homogêneos, ϕ possui valor não nulo, o qual é um bom indicador do nível de não homogeneidade da rede elétrica em questão. Assim, a localização é então realizada usando:

$$d = \frac{\text{imag}(\hat{V}_G \cdot 3\hat{I}_{G0}^* \cdot e^{-j\phi})}{\text{imag}(Z_{L1} \cdot \hat{I}_G \cdot 3\hat{I}_{G0}^* \cdot e^{-j\phi})}, \quad (4.9)$$

sendo \hat{V}_{G0} e \hat{I}_{G0} a tensão e a corrente de sequência zero relacionadas ao loop de falta do defeito.

Deve-se notar que em (4.8), durante o cálculo de ϕ , necessita-se do conhecimento de d , ou seja, de uma estimativa inicial do defeito. Assim, no LAPPICE, utiliza-se (4.7) inicialmente para o cálculo de um d inicial e, na sequência, já em posse de ϕ , calcula-se o valor final da localização do distúrbio. Deve-se ainda frisar que no LAPPICE, em casos de faltas para as quais não existem as componentes de sequência zero, utiliza-se diretamente (4.7) para o cálculo da localização do distúrbio.

4.3.4.2 Método de Dois Terminais Baseado na Teoria de OV's

Quando os registros de dois terminais são carregados na partida do LAPPICE, utiliza-se o método clássico de dois terminais para localização de distúrbios baseado na teoria de OV's (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Esta é uma opção que favorece a precisão dos diagramas de reflexões construídos, visto que as técnicas baseadas em OV's são reconhecidamente mais precisas do que os métodos baseados em componentes fundamentais. Em resumo, emprega-se a seguinte fórmula:

$$d = \frac{1}{2} \cdot [L_{LT} - (t_{R1} - t_{L1})] \cdot v_p , \quad (4.10)$$

onde d é a distância do terminal local até o ponto de distúrbio estimado, v_p é a velocidade de propagação da OV, que depende dos parâmetros construtivos da linha, como explicado no Capítulo 2, t_{L1} é o instante de incidência da primeira OV incidente no terminal local e t_{R1} o instante de incidência da primeira OV incidente no terminal remoto.

4.3.5 Estimação dos Tempos de Propagação das OV's

Utilizando os registros oscilográficos lidos, sejam estes de um ou dois terminais, o LAPPICE realiza um procedimento para detecção das primeiras OV's incidentes nos terminais monitorados. Basicamente, detecta-se a primeira OV incidente nos terminais de medição por meio da comparação dos valores absolutos das saídas do filtro DS com um limiar fixo, que é definido como 40% do valor máximo absoluto dos sinais modais filtrados. Nesse momento, caso os valores absolutos excedam o limiar, aplica-se então uma busca pelos picos das OV's, obtendo-se detecções conforme ilustrado na Figura 4.5, onde as curvas azul e vermelha representam os sinais modais filtrados dos terminais local e remoto, respectivamente.

4.3.6 Construção e Interpretação do Diagrama de Lattice

Após a detecção dos primeiros picos das OV's nos terminais de medição, passa-se à última etapa executada pelo LAPPICE: a construção dos diagramas de reflexões. Na Figura 4.6, ilustra-se o princípio básico da construção do diagrama de Lattice utilizado no LAPPICE, considerando um caso genérico de falta, a qual está localizada a uma distância d do terminal

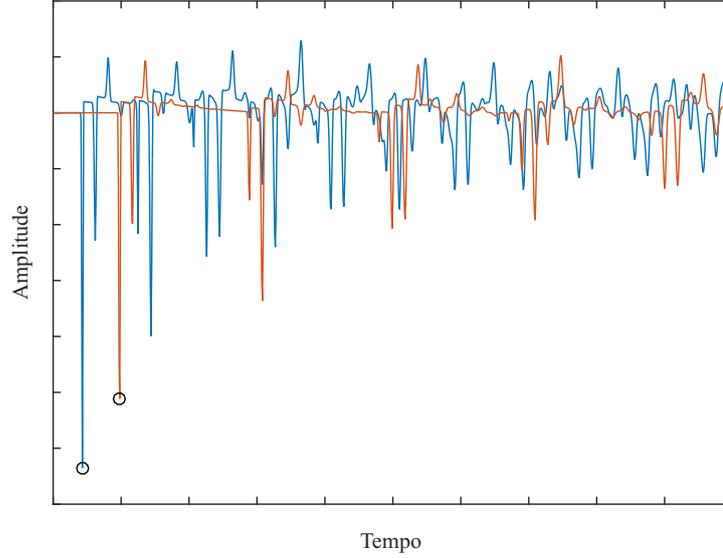


Figura 4.5. Detecção de picos das ondas incidentes nos terminais de monitoramento.

local. Para fins de dedução matemática, considera-se uma LT com comprimento L_{LT} , sendo o instante inicial da falta representado por t_0 e os instantes de incidência das primeiras OV's nos terminais local e remoto representados por t_{L1} e t_{R1} , respectivamente.

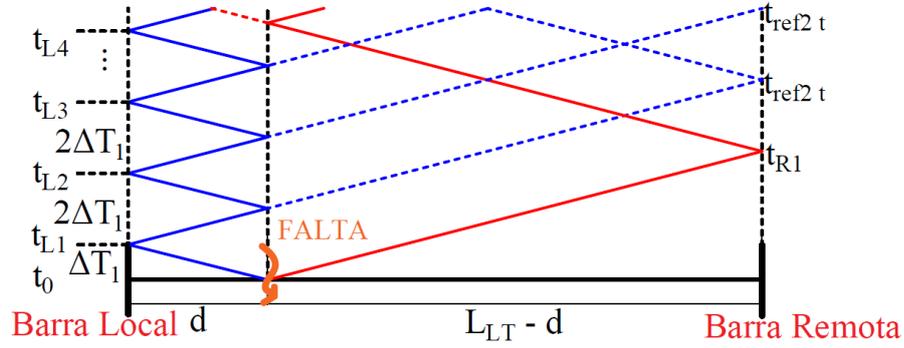


Figura 4.6. Construção do diagrama de Lattice.

Para facilitar as análises, ΔT_1 representa o intervalo de tempo entre a primeira frente de onda no terminal local e o inicial da falta, e é calculado por:

$$\Delta T_1 = t_{L1} - t_0 . \quad (4.11)$$

Ainda, sabe-se que:

$$\Delta T_1 = \frac{d}{v_p} , \quad (4.12)$$

ou seja:

$$\frac{d}{v_p} = t_{L1} - t_0 . \quad (4.13)$$

Portanto, reorganizando a expressão, tem-se que:

$$t_0 = t_{L1} - \frac{d}{v_p} . \quad (4.14)$$

Ainda analisando a Figura 4.6, deve-se notar que, conhecendo t_0 , d e o comprimento L_{LT} , todo o diagrama de reflexões pode ser construído, considerando incrementos no tempo de $2\Delta T_1$ entre duas incidências consecutivas no terminal local. O mesmo raciocínio serve para as reflexões no terminal remoto, bem como nos casos em que LTs adjacentes ou LTs de circuito duplo são consideradas, desde que as devidas velocidades de propagação e comprimentos dos trechos de LT em estudo sejam considerados.

A Figura 4.7 mostra a saída gráfica do LAPPICE para um caso simulado no ATP de uma falta a 80 km de distância do terminal local em uma LT com comprimento $L_{LT} = 200$ km e com LTs adjacentes de 100 km conectadas em ambos os terminais. O gráfico central corresponde ao diagrama de Lattice. Nele, três linhas espessas verticais representam as barras do sistema (linhas laterais) e o ponto de falta (linha central). Os gráficos nos lados esquerdo e direito do diagrama de reflexões são referentes aos sinais modais filtrados de corrente nos terminais local e remoto, respectivamente. Em destaque na figura, visualizam-se as frentes de onda incidentes no terminal local nos instantes t_{OVL1} , t_{OVL2} , t_{OVL3} , ..., t_{OVLn} , bem como no terminal remoto nos instantes t_{OVR1} , t_{OVR2} , t_{OVR3} , ..., t_{OVRn} .

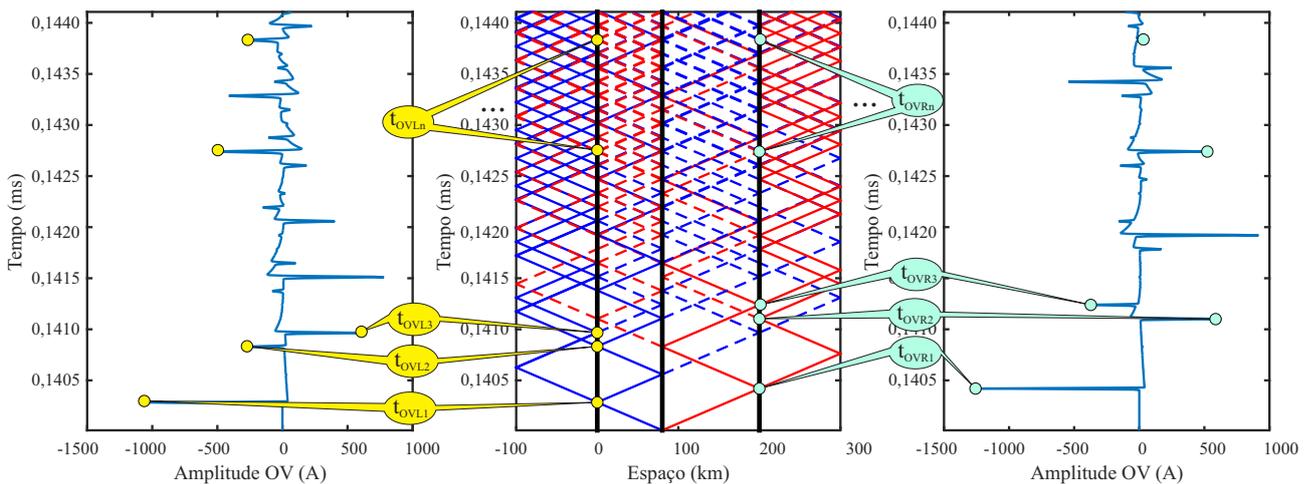


Figura 4.7. Exemplo de resultado obtido com o LAPPICE.

Para o caso de SEEs com circuito simples, sem LTs adjacentes, a diagramação das reflexões é realizada da forma convencional, ilustrando os dois terminais da LT monitorada e o ponto de ocorrência do distúrbio. Se LTs adjacentes são incluídas no circuito, o eixo horizontal que

representa o espaço será adequado para contemplar os comprimentos dos circuitos vizinhos. Por fim, se o SEE em análise for composto por uma configuração de circuito duplo, o diagrama inclui automaticamente uma representação específica para os terminais da LT, ou seja, cada terminal é representado duas vezes, facilitando o entendimento da propagação das OV's que refratam de um circuito para outro em diferentes direções. Dessa maneira, tomando como exemplo a Figura 4.7, as treliças que chegam em -100 km devem ser interpretadas como se estivessem chegando ao terminal remoto, enquanto que treliças que chegam em 300 km devem ser consideradas como frentes de onda incidentes no terminal local. Deve-se frisar que em todos os casos, no LAPPICE, o terminal local é representado na posição 0 km no eixo horizontal, enquanto que o terminal remoto é ilustrado na posição L_{LT} km, conforme indicado na Figura 4.7. Essas formas de representação do sistema poderão ser melhor visualizadas ao longo das análises realizadas no próximo capítulo.

AVALIAÇÃO DO LAPPICE

Este capítulo apresenta estudos de casos que utilizam as funcionalidades do LAPPICE. No primeiro, comparam-se simulações de faltas (para sistemas com LTs adjacentes e LTs de circuito duplo) com constatações presentes na literatura referentes à análise de reflexão e transmissão de OV's. Nesse caso, apresentam-se dois tipos de análise: 1) variação das indutâncias das LTs adjacentes ou do circuito duplo; e 2) variação da impedância de surto e da quantidade de LTs adjacentes. O segundo estudo avaliado consiste na análise da saída do LAPPICE para uma simulação de energização de uma LT, evento este também gerador de OV's. Por último, apresentam-se os recursos proporcionados pelo LAPPICE para a geração de gráficos do torque e de sinais modais.

5.1 ANÁLISE DE CASOS DE FALTAS EM LTS

Conforme mencionado em capítulos anteriores, o LAPPICE permite analisar situações que envolvem diferentes configurações de SEE. De fato, essas análises permitem um conhecimento mais detalhado sobre as origens e características das OV's que incidem em um dado terminal monitorado, facilitando a visualização de suas amplitudes, polaridades e tempos de propagação.

5.1.1 LT com Circuitos Adjacentes: Variação das Indutâncias das LTs Adjacentes

De maneira geral, em sistemas de transmissão, verifica-se uma grande quantidade de LTs que possuem LTs adjacentes. Devido à importância desses sistemas adjacentes e ao impacto que causam sobre a análise de OV's, essa subseção focará na geração e análise de diagramas de reflexões gerados via LAPPICE para sinais de corrente e de tensão tomados de uma LT de circuito simples com LTs adjacentes com: indutância cinco vezes superior à da LT principal; indutância cinco vezes inferior à da LT principal; e indutância igual à da LT principal.

É importante ressaltar que a situação mencionada é hipotética, pois não se observa em casos reais uma grande variação de valores de indutâncias para LTs adjacentes em um mesmo nível de tensão (GLOVER *et al.*, 2012). Diante disso, esses fatores tendem a se manter constantes na maioria dos segmentos de LTs conectados, fazendo com que as impedâncias de surto tenham valores próximos umas das outras. Conseqüentemente, as velocidades de propagação também não sofrem alteração significativa. Entretanto, ainda neste contexto, sabe-se que existem casos em que esses parâmetros podem variar, como em situações de: mudança do nível de tensão ao longo da rede elétrica; transição de LT aérea para LT subterrânea; ou no caso de junção de várias LTs em um terminal, diminuindo a impedância equivalente das linhas adjacentes, mas sem alterar as velocidades de propagação. Portanto, pode-se dizer que tais possibilidades justificam as análises realizadas.

Na Figura 5.1, apresenta-se o diagrama de Lattice para uma configuração de SEE com uma LT de circuito simples com LT adjacente conectada à esquerda da linha principal. Nessa figura, cada OV é representada com seus respectivos coeficientes de reflexão e transmissão, tanto para a LT principal quanto para a LT adjacente, sendo a análise para uma LT adjacente à direita realizada de maneira semelhante. Ademais, Γ_S e Γ_F são os coeficientes de reflexão na fonte de tensão local e no ponto de falta. Esse exemplo conta com três terminais e duas LTs com impedâncias correspondentes a Z_{sl} (para a linha adjacente) e Z_s (para a linha principal).

Ainda com base na Figura 5.1, é possível identificar a equação geral para OVs originadas no ponto de distúrbio e medidas no terminal de monitoramento, bem como a equação geral para OVs oriundas da linha adjacente que são medidas no terminal de monitoramento. Essas equações levam em conta as direcionalidades das OVs e foram obtidas considerando a polaridade dos TCs utilizados na medição dos sinais de corrente, isto é, obtêm-se medições positivas para correntes entrando na LT principal e negativas para correntes saindo. Assim, analisando a Figura 5.1, obtêm-se que:

$$1^a \text{ OV incidente: } i + \Gamma_1 \cdot i = i \cdot (1 + \Gamma_1) = \Gamma_F^0 \cdot \Gamma_1^0 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_1) , \quad (5.1)$$

$$1^a \text{ OV refletida: } \Gamma_F \cdot \Gamma_1 \cdot i + \Gamma_1^2 \cdot \Gamma_F \cdot i = \Gamma_F^1 \cdot \Gamma_1^1 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_1) , \quad (5.2)$$

$$2^a \text{ OV refletida: } \Gamma_F^2 \cdot \Gamma_1^2 \cdot i + \Gamma_1^3 \cdot \Gamma_F^2 \cdot i = \Gamma_F^2 \cdot \Gamma_1^2 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_1) , \quad (5.3)$$

$$3^a \text{ OV refletida: } \Gamma_F^3 \cdot \Gamma_1^3 \cdot i + \Gamma_1^4 \cdot \Gamma_F^3 \cdot i = \Gamma_F^3 \cdot \Gamma_1^3 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_1) . \quad (5.4)$$

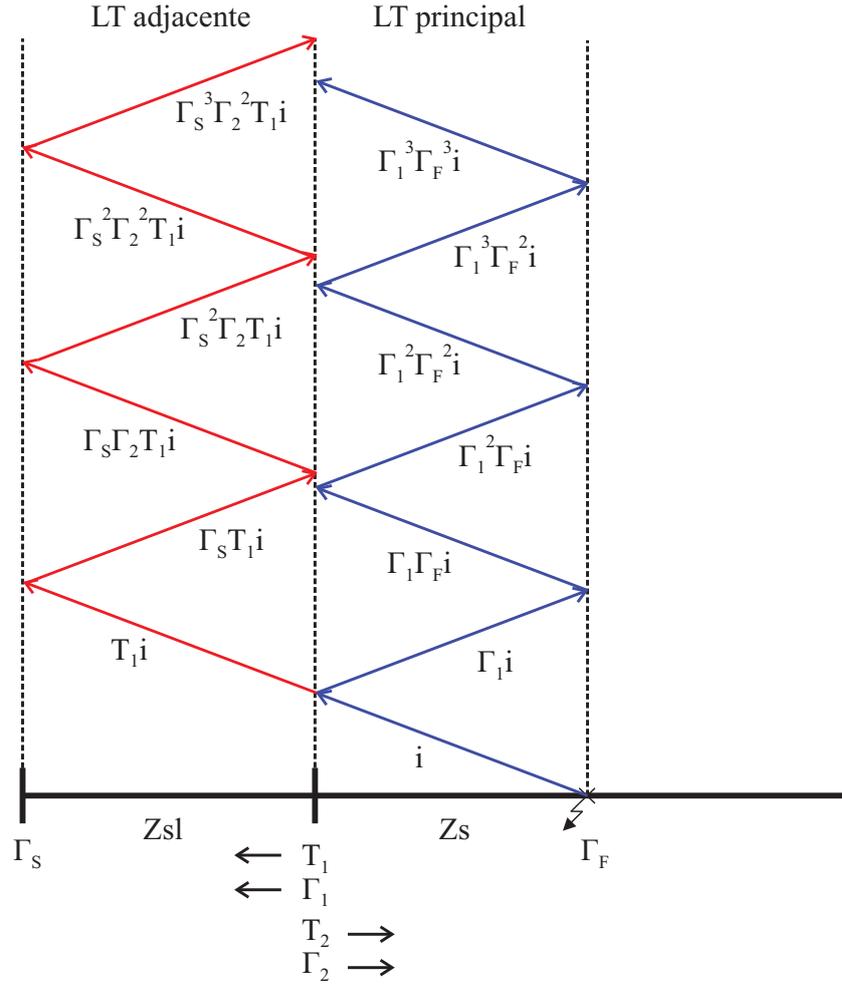


Figura 5.1. Diagrama de Lattice para análise das expressões de ondas viajantes.

Assim, considerando o exposto, pode-se obter a forma geral para as OV's:

$$OV_{LP} = \Gamma_F^n \cdot \Gamma_1^n \cdot (1 + \Gamma_1) \cdot i, \quad (5.5)$$

em que OV_{LP} são as OV's provenientes da LT principal; Γ_F é o coeficiente de reflexão no ponto de falta; Γ_1 é o coeficiente de reflexão da LT principal para a LT adjacente; n é a n -ésima incidência ($n = 0$) ou reflexão ($n > 0$) da OV.

Adicionalmente, avaliando agora as OV's provenientes da LT adjacente que são medidas no terminal monitorado, obtém-se que:

$$1^a \text{ OV refletida: } \Gamma_S \cdot T_1 \cdot i + \Gamma_S \cdot \Gamma_2 \cdot T_1 \cdot i = \Gamma_S^1 \cdot T_1 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_2), \quad (5.6)$$

$$2^a \text{ OV refletida: } \Gamma_S^2 \cdot \Gamma_2 \cdot T_1 \cdot i + \Gamma_S^2 \cdot \Gamma_2^2 \cdot T_1 \cdot i = \Gamma_S^2 \cdot \Gamma_2 \cdot T_1 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_2), \quad (5.7)$$

$$3^a \text{ OV refletida: } \Gamma_S^3 \cdot \Gamma_2^2 \cdot T_1 \cdot i + \Gamma_S^3 \cdot \Gamma_2^3 \cdot T_1 \cdot i = \Gamma_S^3 \cdot \Gamma_2^2 \cdot T_1 \cdot i \cdot (1 + \Gamma_2). \quad (5.8)$$

Portanto, como forma geral para análise, considera-se:

$$OV_{LA} = \Gamma_S^n \cdot \Gamma_2^{n-1} \cdot T_1 \cdot (1 + \Gamma_2) \cdot i, \quad (5.9)$$

em que OV_{LA} representa as OV's provenientes da LT adjacente; Γ_S é o coeficiente de reflexão na fonte de tensão local; Γ_2 é o coeficiente de reflexão da LT adjacente para a LT principal; n é a n -ésima reflexão da OV.

Diante disso, por meio da definição dos coeficientes de reflexão e transmissão e das relações presentes em (5.5) e (5.9), é possível determinar as polaridades e os módulos de cada OV que incide nos terminais de monitoramento. Com base nessas premissas, a análise será feita primeiro para sinais de corrente e, posteriormente, para sinais de tensão.

Durante a referida análise, é imprescindível saber que os coeficientes de reflexão e refração vistos pelas OV's dependem de seus sentidos de propagação, já que esses parâmetros serão diferentes para OV's vindas da esquerda para a direita em relação às que se originam da direita para a esquerda. A análise individual da influência de cada coeficiente presente em (5.5) e (5.9) é necessária para obter uma estimativa do comportamento das OV's na configuração do SEE com LTs adjacentes. Dessa maneira, a avaliação hipotética consiste em variar o valor da impedância da LT adjacente Z_{sl} em relação à da LT principal Z_s , como ilustrado nas Tabelas 5.1 e 5.2. Na Figura 5.2, apresenta-se a topologia do SEE com LTs adjacentes simulado no ATP, cujos parâmetros são especificados na Tabela 5.3.

Para os estudos apresentados neste trabalho, considera-se o coeficiente de reflexão no ponto de falta $\Gamma_F = 1$, uma vez que as simulações contemplam cenários com curtos-circuitos francos. Já o coeficiente de reflexão na impedância da fonte de tensão local, Γ_S , depende da impedância dela, Z_{Sv} , a qual se relaciona ao parâmetro *Source Impedance Ratio* (SIR) desse terminal. Esse parâmetro consiste na relação entre a impedância da fonte e a impedância da LT, Z_L , e é amplamente utilizado na indústria para estudos relacionados à força das fontes durante curtos-circuitos (THOMPSON; SOMANI, 2015). Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, constatou-se que, para as configurações de sistema simuladas, fontes mais fortes provocam a mudança do sinal do coeficiente de reflexão na fonte de tensão, enquanto que fontes mais fracas tornam esse coeficiente próximo a $\Gamma_S = 1$. Diante disso, ao longo das análises apresentadas neste trabalho, considera-se uma variação da impedância da fonte, permitindo a visualização da mudança de polaridade das OV's de acordo com essa alteração.

Tabela 5.1. Coeficientes de reflexão e transmissão para sinais de corrente.

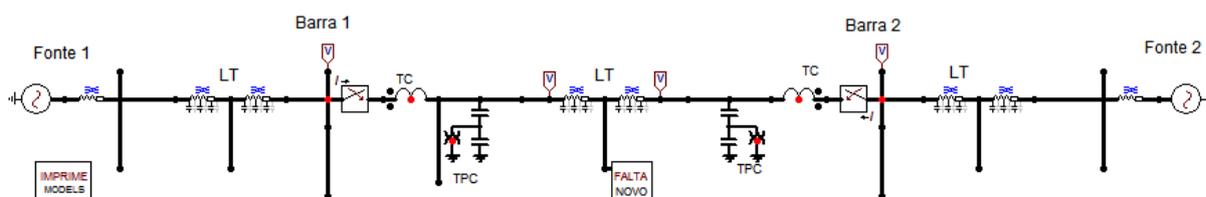
Coeficientes	$Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$	$Z_{sl} = Z_s$	$Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$
Γ_1	0,382	0	-0,382
T_1	1,382	1	0,618
Γ_2	-0,382	0	0,382
T_2	0,618	1	1,382

Tabela 5.2. Coeficientes de reflexão e transmissão para sinais de tensão.

Coeficientes	$Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$	$Z_{sl} = Z_s$	$Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$
Γ_1	-0,382	0	0,382
T_1	0,618	1	1,382
Γ_2	0,382	0	-0,382
T_2	1,382	1	0,618

Tabela 5.3. Parâmetros do sistema de linhas adjacentes simulados no ATP.

Tipo de Parâmetro	Parâmetro Utilizado
Tipo de sistema	LTs adjacentes
Tipo de falta	AB
σ	15 graus
Local da falta	80 km
Local da falta estimado	80,2251 km
Resistência de falta	Curto-circuito franco

**Figura 5.2.** Configuração do sistema simulado no ATP com linhas adjacentes.

5.1.1.1 Análise de Sinais de Corrente

Diante do exposto, por meio de (5.5) e (5.9) e da substituição dos valores dos coeficientes de reflexão e transmissão em cada caso, conforme a Tabela 5.1, tem-se:

- Para $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$:

$$OV_{iLP} = 1^n \cdot (0,382)^n \cdot (1,382) \cdot i, \quad (5.10)$$

$$OV_{iLA} = 1^n \cdot (-0,382)^{n-1} \cdot (0,854) \cdot i. \quad (5.11)$$

Considerando (5.10) e (5.11), espera-se que, quando Z_{sl} for menor do que Z_s , as OV's de corrente originadas no ponto de falta que se propagam em direção à barra local OV_{iLP} , mantenham suas polaridades de acordo com a primeira incidente. Já no caso das OV's oriundas do terminal da LT adjacente OV_{iLA} , suas polaridades serão sempre alternadas devido ao coeficiente Γ_2 dessa linha. Em relação a esse modelo, vale destacar que, caso haja uma falta na LT principal e a LT adjacente apresente parâmetros diferentes, a velocidade de propagação da OV será alterada quando ela for transmitida à LT adjacente. No entanto, se a LT adjacente apresentar parâmetros iguais aos da LT principal, a velocidade de propagação será a mesma. O impacto da mudança da velocidade das OV's entre ramos das LTs resulta, no diagrama de Lattice, em uma inclinação diferente das treliças em cada segmento da rede elétrica.

Na Figura 5.3, apresentam-se os resultados obtidos durante a análise de uma simulação de uma falta a 0,4 p.u. do terminal local na LT principal, em que as LTs adjacentes e LT principal apresentam comprimentos de 60 km e 200 km, respectivamente. Nessa simulação, a indutância da LT principal é cinco vezes maior do que a indutância da LT adjacente e a impedância da fonte é igual a 0,001 vezes a impedância da LT. Nessa figura, é possível comprovar as conclusões expressas a partir de (5.10) e (5.11) acerca da identificação da origem de cada frente de onda com base nas polaridades verificadas.

Adicionalmente, apresenta-se na Figura 5.4 o resultado da mesma simulação para um sistema com uma fonte mais forte, o que acarreta uma alteração dos coeficientes de reflexão e transmissão nesse terminal. Note que, nesse caso, as polaridades das reflexões das OV's na LT adjacente se mantêm constantes. Assim, constata-se que, para sistemas com fontes mais fracas, o coeficiente de reflexão na fonte Γ_S se aproxima de 1 e, para sistemas com fontes mais fortes, como o da Figura 5.4, esse coeficiente já passa a ser negativo, fazendo com que as OV's tenham comportamentos diferentes nesses dois casos analisados. Essa análise está intimamente relacionada ao SIR. Também vale destacar que um valor de SIR muito alto não é incomum em casos reais. Thompson & Somani (2015) ressaltam que, em geral, o valor do SIR pode variar

entre 0,5 e 4 para LTs médias. Já para LTs longas, esse valor permanece inferior a 0,5. Diante disso, as análises presentes neste trabalho contemplam os casos possíveis em LTs longas.

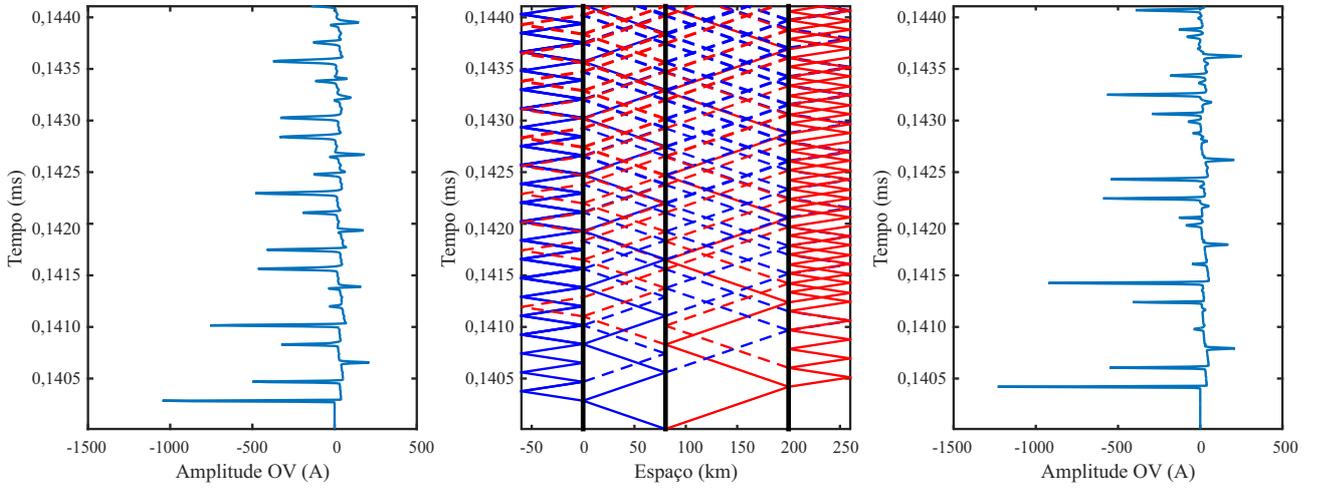


Figura 5.3. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$.

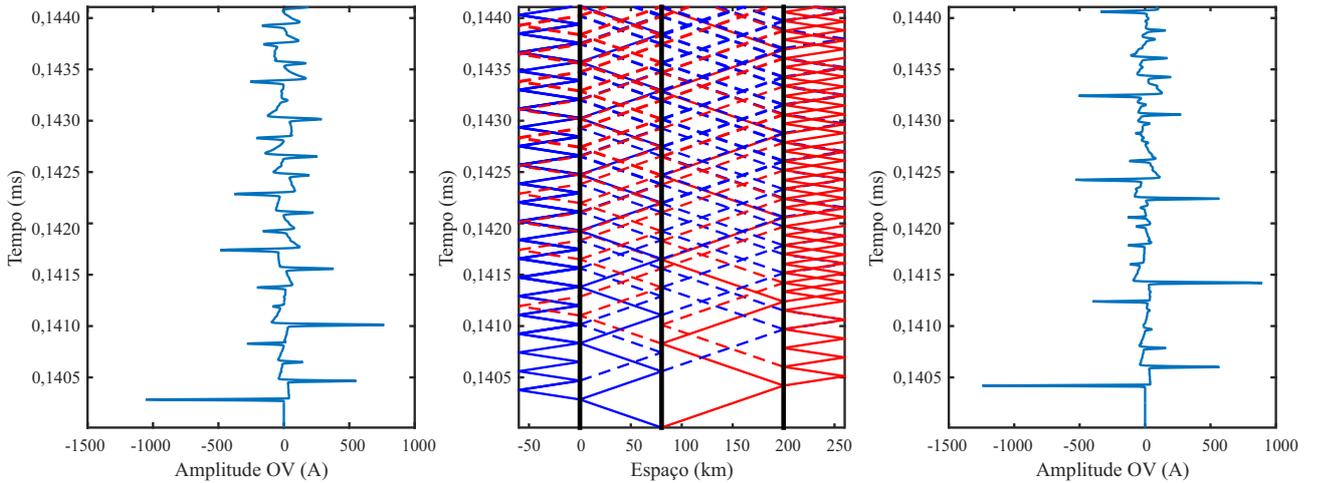


Figura 5.4. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$, com fonte mais forte.

- Para $Z_s = Z_{sl}$:

$$OV_{iLP} = OV_{iLA} = 0 \cdot i. \quad (5.12)$$

Para linhas com casamento de impedância, não há OVs refletidas, pois os coeficientes de reflexão são nulos, restando apenas ondas transmitidas, uma vez que o coeficiente de transmissão é unitário. Nota-se, na Figura 5.5, que as OVs que incidem na barra local não são refletidas nesse terminal e são transmitidas em direção à barra da LT adjacente, sendo, posteriormente, refletidas desta barra para o terminal local novamente. Essa característica se repete durante

a propagação das demais OV's. Essa simulação foi realizada com uma falta localizada em 0,4 p.u. do terminal local na LT principal, considerando LTs adjacentes e LT principal com comprimentos de 60 km e 200 km, respectivamente.

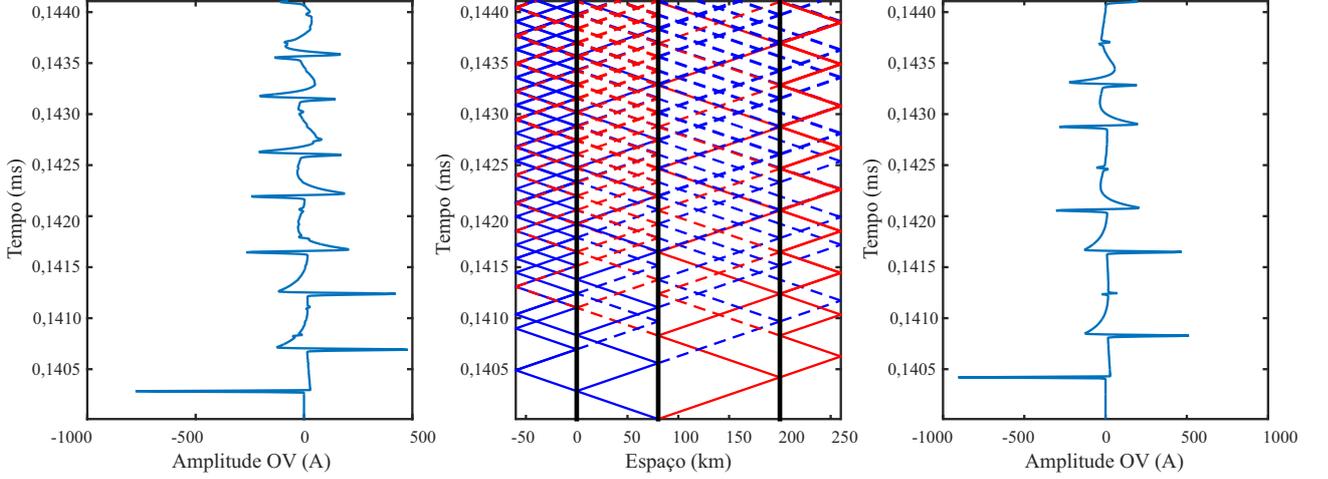


Figura 5.5. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}$.

- Para $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$:

$$OV_{iLP} = 1^n \cdot (-0,382)^n \cdot (0,618) \cdot i. \quad (5.13)$$

$$OV_{iLA} = 1^n \cdot (0,382)^{n-1} \cdot (0,854) \cdot i. \quad (5.14)$$

Nesse caso, a indutância das LTs adjacentes é cinco vezes superior em relação à indutância da LT principal. Com isso, as OV's na LT principal OV_{iLP} apresentam polaridades alternadas, pois o coeficiente de reflexão Γ_1 é negativo em (5.13). O comportamento oposto é observado nas OV's de corrente na LT adjacente OV_{iLA} , as quais têm suas polaridades mantidas constantes de acordo com a primeira OV incidente. A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos para uma falta em 0,4 p.u. do terminal local na linha principal. Novamente, foram consideradas LTs adjacentes com 60 km e uma LT principal com 200 km.

A Figura 5.7 demonstra os resultados obtidos para uma falta em 0,1 p.u. do terminal local na LT principal. As LTs adjacentes e principal possuem os mesmos comprimentos e parâmetros do caso anterior. Essa simulação foi realizada com o intuito de ilustrar a aplicação do LAPPICE no estudo de distúrbios próximos ao terminal de monitoramento, em que se pode observar e diferenciar as OV's incidentes das refletidas. Esse tipo de análise é crucial para o desenvolvimento de métodos de localização de distúrbios de um terminal baseados na teoria

de OV's, visto que, nesses casos, faltas próximas ao terminal monitorado são reconhecidamente problemáticas. De fato, por meio da saída gráfica do LAPPICE, nota-se a grande quantidade de reflexões no terminal local, o que dificultaria a identificação de OV's refletidas na falta.

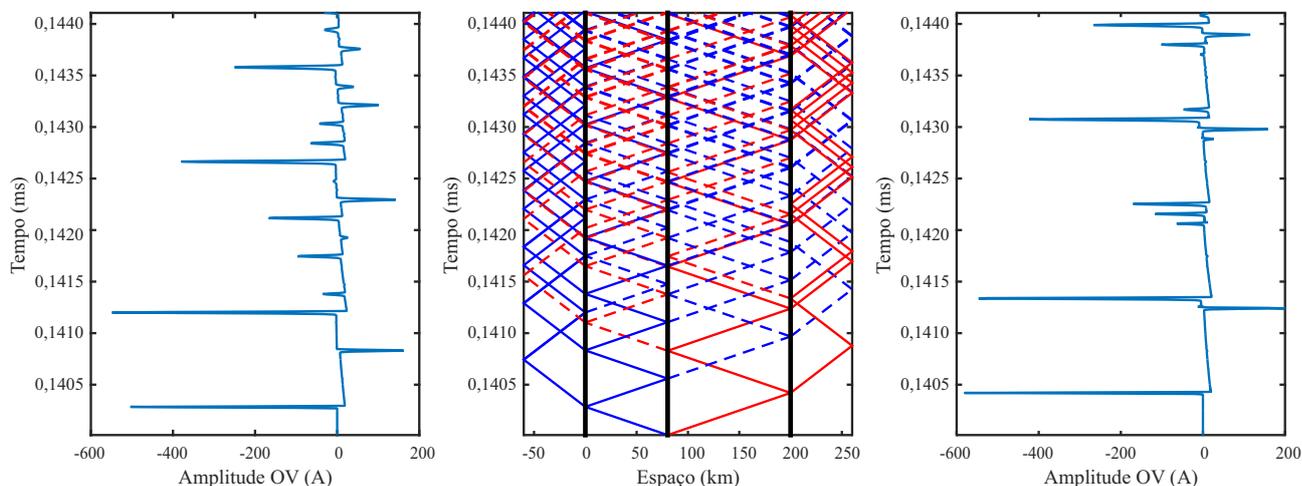


Figura 5.6. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$.

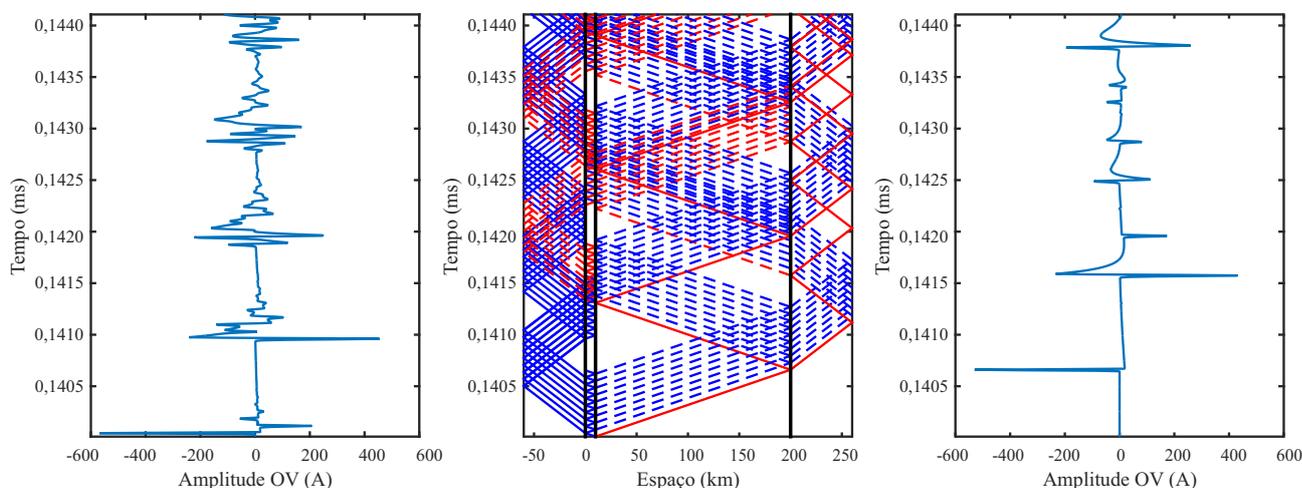


Figura 5.7. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$, com falta a 0,1 p.u. da barra local.

5.1.1.2 Análise de Sinais de Tensão

Os estudos para sinais de tensão são similares aos realizados para os sinais de corrente. Com base nos dados da Tabela 5.2 e a partir de (5.5) e (5.9), substituem-se os valores dos coeficientes de reflexão e de transmissão em cada caso.

- Para $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$:

$$OV_{vLP} = (-1)^n \cdot (-0,382)^n \cdot (0,618) \cdot v, \quad (5.15)$$

$$OV_{vLA} = (-1)^n \cdot (0,382)^{n-1} \cdot (0,854) \cdot v. \quad (5.16)$$

Comparando (5.15) e (5.16), nota-se que as OV's na LT principal apresentam polaridades que não se alteram devido aos valores negativos de Γ_F e Γ_1 . Por outro lado, as OV's nas LTs adjacentes têm suas polaridades alternando em relação à primeira incidente, já que $\Gamma_S = -1$. Essa diferença nos coeficientes de reflexão e transmissão na fonte de tensão e na falta, em relação à análise de corrente, se dá justamente pelo estudo da propagação de OV's em terminações, conforme exposto no Capítulo 2.

A Figura 5.8 ilustra o referido exemplo em que as impedâncias das LTs adjacentes são menores do que a impedância da LT principal. A falta está localizada em 0,4 p.u. do terminal local na LT principal, e o sistema conta com LTs adjacentes e LT principal com comprimentos de 60 km e 200 km, respectivamente.

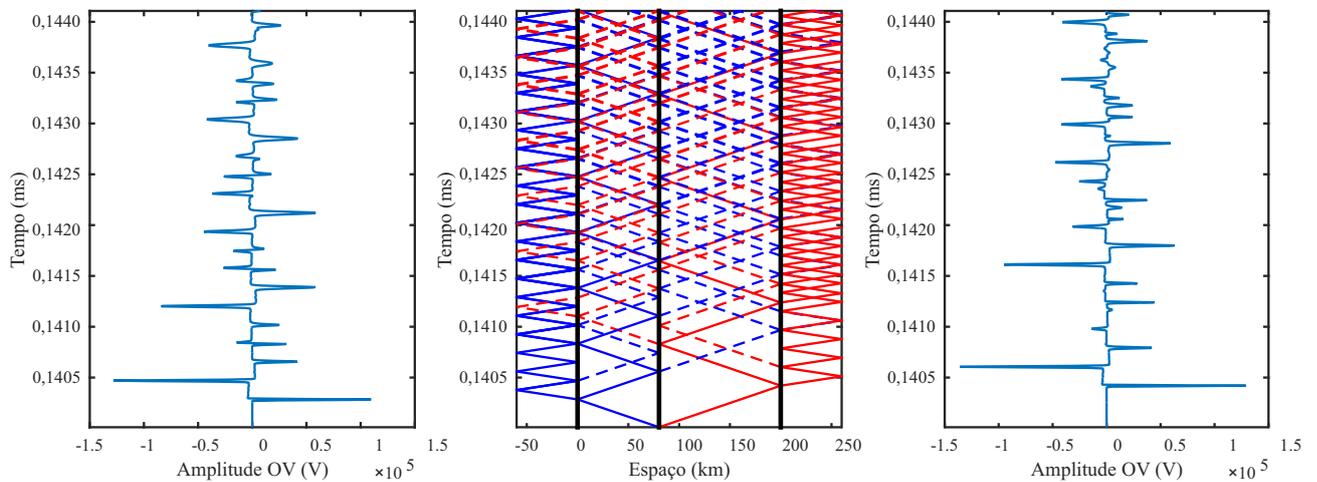


Figura 5.8. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl} \cdot \sqrt{5}$.

- Para $Z_{sl} = Z_s$:

$$OV_{vLP} = OV_{vLA} = 0 \cdot v. \quad (5.17)$$

A Figura 5.9 apresenta o diagrama de reflexões construído via LAPPICE para esse cenário, considerando uma falta localizada em 0,4 p.u. do terminal local na LT principal e com LTs adjacentes e LT principal com comprimentos de 60 km e 200 km, respectivamente.

Novamente, destaca-se que, para LTs com casamento de impedância entre as linhas principal e adjacentes, não há OV's refletidas, pois os coeficientes de reflexão são nulos, restando apenas OV's transmitidas, já que o coeficiente de transmissão é unitário. Esse comportamento é similar ao observado para sinais de corrente e pode ser verificado nos resultados apresentados para este caso.

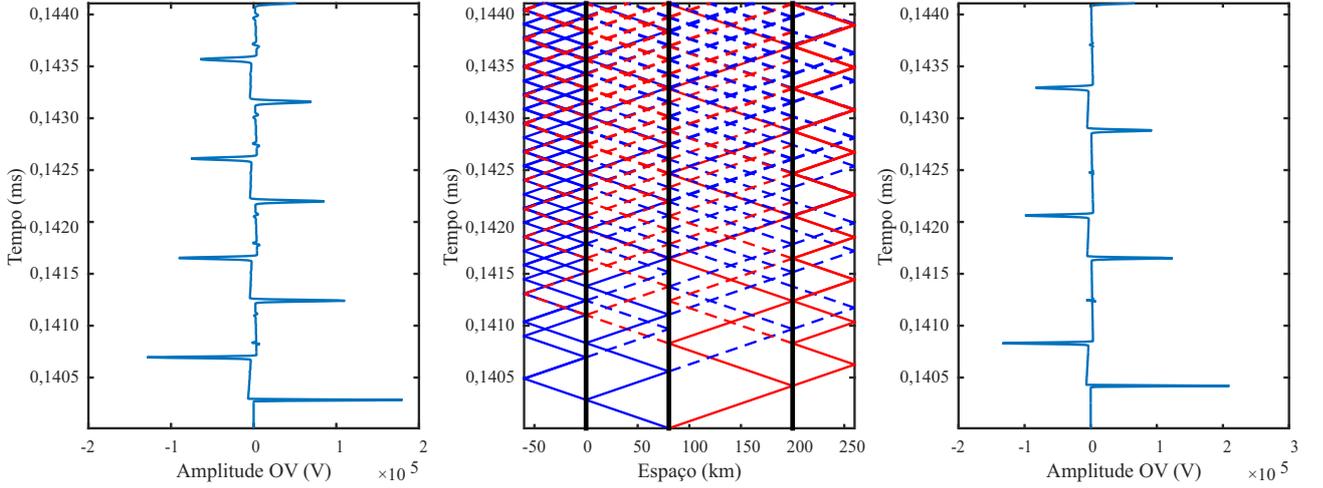


Figura 5.9. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl}$.

- Para $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$:

$$OV_{vLP} = (-1)^n \cdot (0,382)^n \cdot (1,382) \cdot v, \quad (5.18)$$

$$OV_{vLA} = (-1)^n \cdot (-0,382)^{n-1} \cdot (0,382) \cdot v. \quad (5.19)$$

Como se pode observar em (5.18) e (5.19), as ondas OV_{vLP} têm sempre polaridades alteradas de acordo com a primeira OV incidente. Um comportamento diferente é observado nas OV's de tensão OV_{vLA} , as quais apresentam polaridades que não se alteram.

Na Figura 5.10, apresenta-se o resultado obtido na simulação para esse caso avaliado, considerando uma falta em 0,4 p.u. do terminal local na LT principal e com LTs adjacentes e LT principal com comprimentos de 60 km e 200 km, respectivamente. Os resultados corroboram com as conclusões matemáticas obtidas a partir das expressões gerais das OV's.

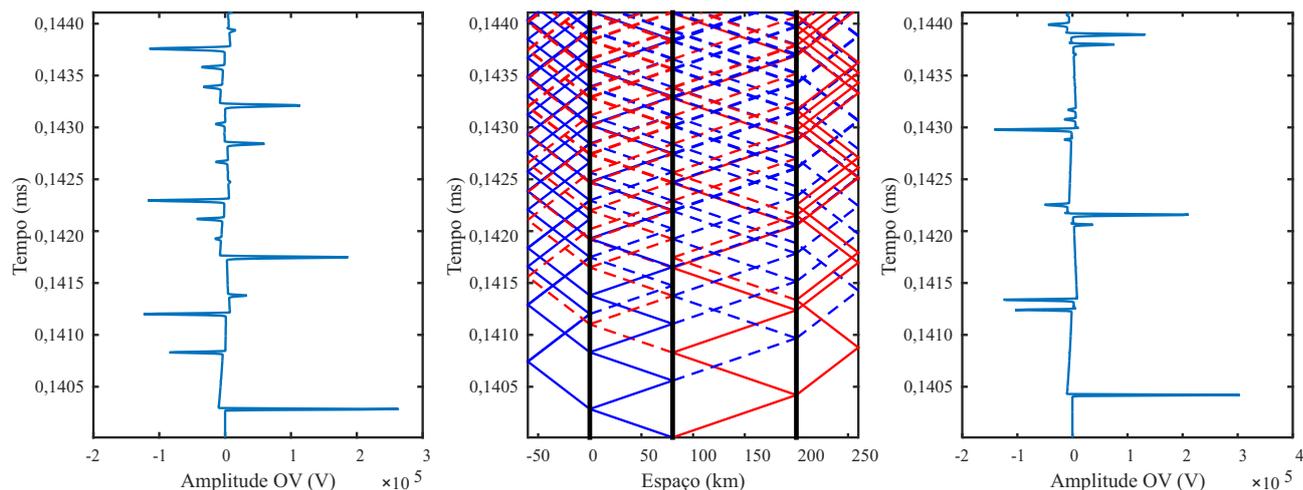


Figura 5.10. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com duas LTs adjacentes e dois terminais de monitoramento para sinais de tensão: $Z_s = Z_{sl}/\sqrt{5}$.

5.1.2 LT com Circuito Duplo: Variação das Indutâncias

A análise de LTs com circuito duplo se assemelha ao estudo de sistemas com LTs adjacentes, já que as expressões obtidas para esse modelo continuam valendo para o caso de LTs paralelas. No entanto, há algumas particularidades devido ao paralelismo de condutores, a exemplo da maneira diferenciada de interpretar o diagrama de reflexões na saída do LAPPICE, conforme explicado na Seção 4.3.6. O sistema simulado no ATP está representado na Figura 5.11 e seus parâmetros são listados na Tabela 5.4.

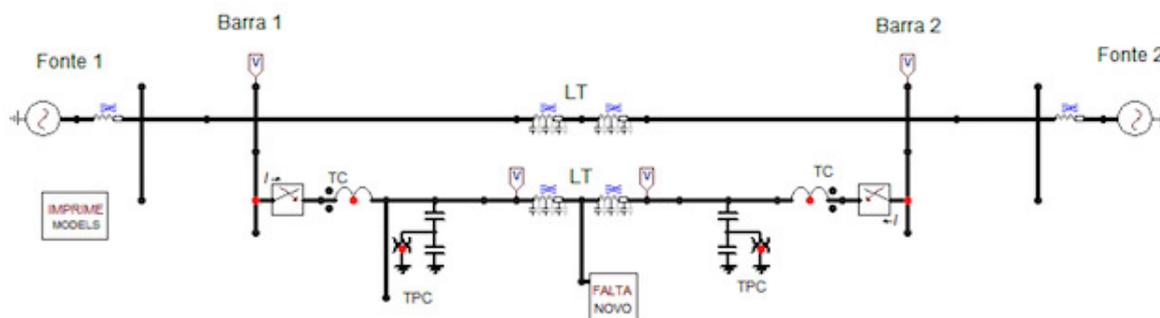


Figura 5.11. Configuração do sistema simulado no ATP com circuito duplo.

Também neste caso, constatou-se que a impedância da fonte também possui relevância. De fato, conforme esperado, ao mudar as impedâncias equivalentes terminais do sistema, mudam-se

Tabela 5.4. Configuração do sistema com circuito duplo simulados no ATP.

Tipo de Parâmetro	Parâmetro Utilizado
Tipo de sistema	Circuito Duplo
Tipo de falta	AB
σ	15 graus
Local da falta	80 km
Local da falta estimado	80,2251 km
Resistência de falta	Curto-circuito franco

os coeficientes de reflexão e transmissão nas barras local e remota, mudando as características das OV's no sistema. Neste trabalho, o sistema da Figura 5.11 foi simulado para diferentes valores de impedância terminal, considerando esta como sendo 0,2 e 0,001 vezes a impedância equivalente das LTs analisadas.

A Figura 2.3, apresentada no Capítulo 2 pode ser avaliada para um melhor entendimento dos cálculos realizados nesse caso. De fato, percebe-se que é necessário ter conhecimento da impedância da fonte, uma vez que a frente de OV oriunda do ponto de falta e incidente no terminal local percebe um equivalente à frente dado pelo paralelo entre a impedância da LT do segundo circuito em paralelo Z_{CD} e pela impedância da fonte Z_{Sv} . Com isso, define-se $Z_P = Z_{CD} || Z_{Sv}$. No ponto de junção, há uma divisão da frente de onda, a qual se propaga em cada meio de acordo com (2.37), (2.38) e (2.39). Por isso, avaliaram-se valores diferentes da impedância da fonte, conforme mencionado anteriormente. Com essa informação, é possível estimar o resultado esperado para o comportamento do sistema. Para o valor de impedância da fonte mais baixo, nota-se que o paralelo das impedâncias da fonte e da LT do segundo circuito se aproxima de zero, caracterizando um ramo em curto-circuito. Nessa análise, a expressão de I_2^t equivale a $I_2^t = (0/0) \cdot T_1 \cdot I_1^i$. Essa indeterminação matemática pode ser resolvida pela Regra de L'Hospital. Além disso, como o coeficiente de transmissão da onda de corrente percebe um curto-circuito à sua frente, o valor de T_1 é igual a 2. Com isso, tem-se $I_2^t = 2 \cdot I_1^i$. Isso mostra que a frente de onda originada no ponto de falta e incidente na barra de monitoramento se divide e a componente que flui através da fonte é igual ao dobro da OV incidente. No caso da OV que se propaga pelo ramo em paralelo, tem-se $I_3^t = (0/Z_P) \cdot T_1 \cdot I_1^i$.

Do exposto, pode-se concluir que nenhuma OV será transmitida nesse sistema, restando apenas OV's refletidas entre a barra e o ponto de falta para ambos os terminais local e remoto. Essa constatação pode ser confirmada pela Figura 5.12, em que se simulou um sistema com

impedância da fonte igual a 0,001 vezes a impedância equivalente das LTs, com falta em 0,4 p.u. do terminal local, considerando LTs principal e paralela com comprimentos de 200 km. Já no segundo caso, no qual se considerou uma impedância da fonte 0,2 vezes a impedância equivalente das LTs, percebe-se um comportamento similar ao observado para linhas adjacentes, em que são verificadas, para a LT paralela com impedância Z_{CD} , sendo esta inferior à da LT principal Z_s , frentes de onda originadas na LT principal com polaridades sempre constantes e frentes de onda originadas na linha paralela com polaridades alternadas. A Figura 5.13 ilustra esse efeito, para uma falta em 0,4 p.u., assumindo LTs principal e paralela novamente com 200 km.

Agora considerando a LT paralela com impedância superior em relação à da LT principal, um comportamento oposto é verificado, ou seja, observam-se OV's oriundas da LT principal com polaridades alternadas e OV's originadas na linha paralela com polaridades constantes. Isso pode ser observado na Figura 5.14, na qual se considerou uma falta em 0,4 p.u. e LTs com comprimentos de 200 km, assim como no caso anterior.

Além disso, a Figura 5.15 ilustra um caso em que a LT principal e a LT paralela possuem a mesma impedância. Como essas linhas possuem o mesmo comprimento, o diagrama de Lattice apresenta frentes de onda incidentes e refletidas nos mesmos instantes de tempo, dificultando a diferenciação das origens dos picos observados nos sinais filtrados. Entretanto, essa situação recai na mesma analisada para o caso de linhas adjacentes, em que não há OV's refletidas nos terminais local e remoto, restando apenas as transmitidas.

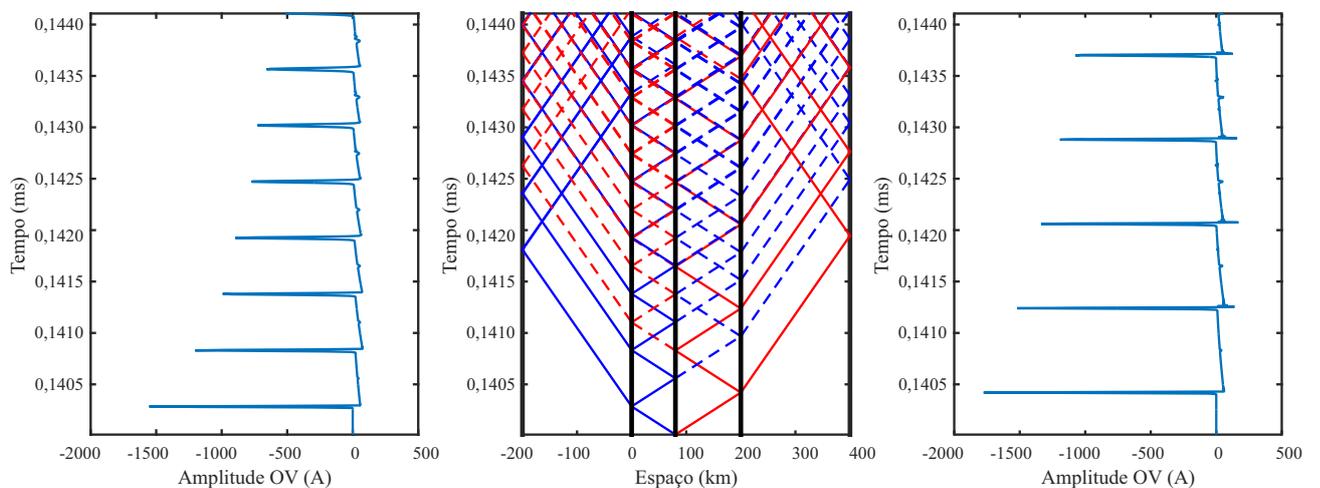


Figura 5.12. Análise das ondas transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD} \cdot \sqrt{5}$ com impedância da fonte pequena.

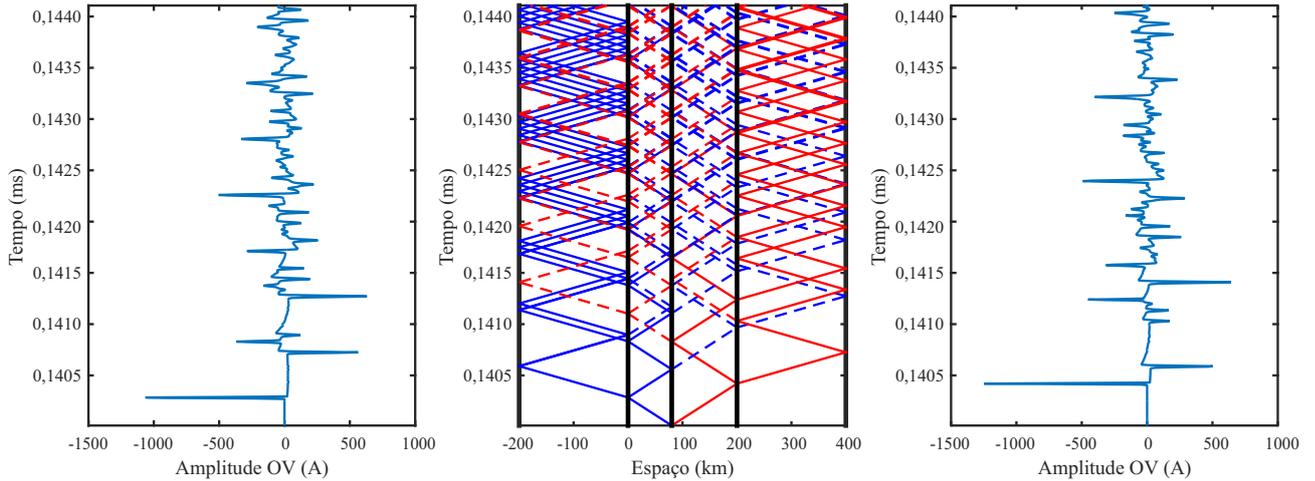


Figura 5.13. Análise das OVs transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD} \cdot \sqrt{5}$.

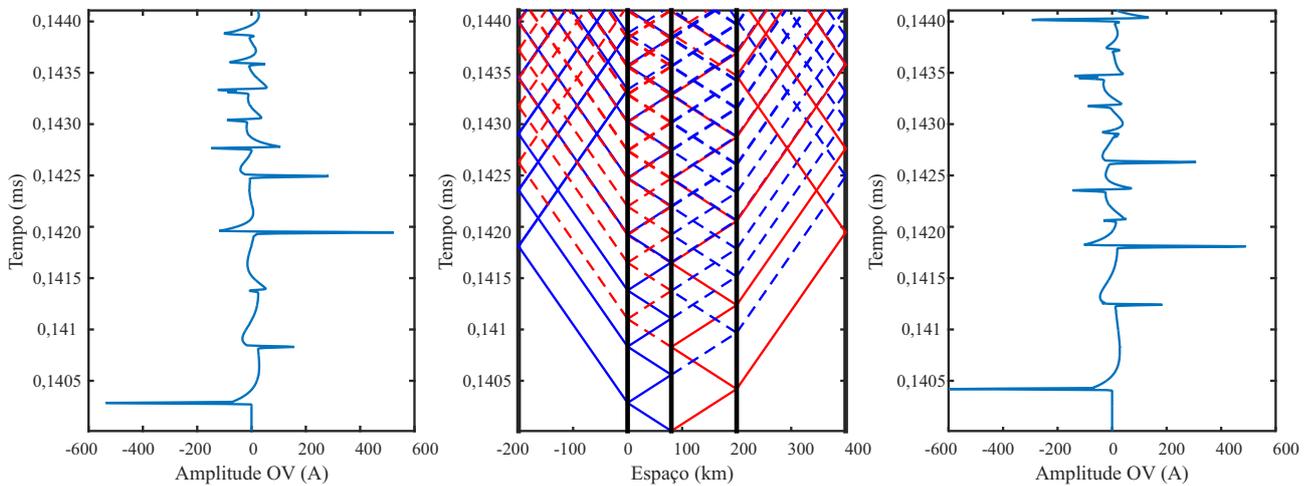


Figura 5.14. Análise das OVs transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: $Z_s = Z_{CD}/\sqrt{5}$.

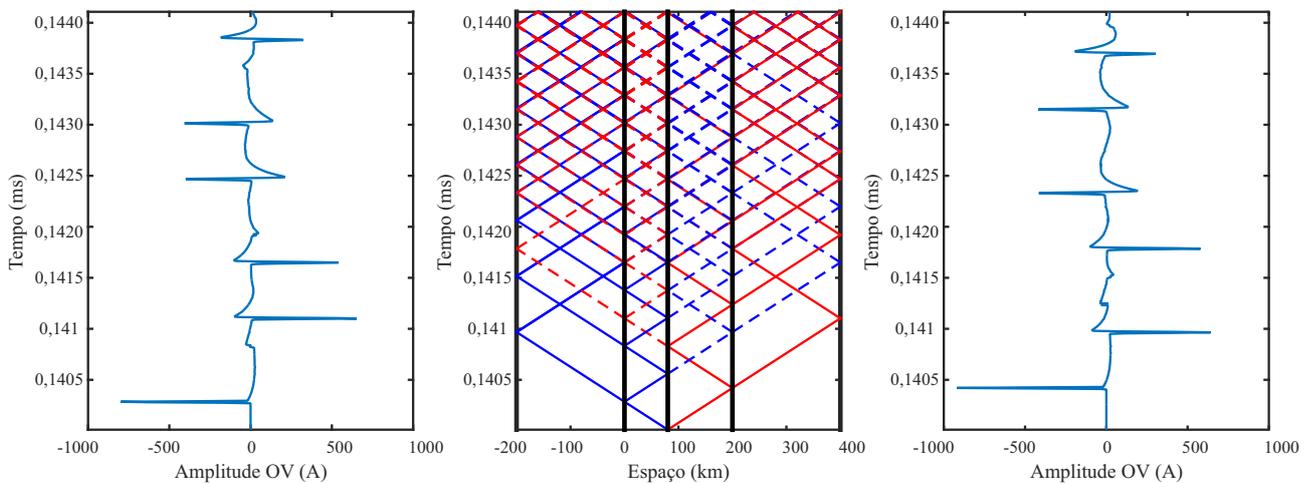


Figura 5.15. Análise das OVs transmitidas e refletidas para sistema com circuito duplo e dois terminais de monitoramento: (a) $Z_s = Z_{CD}$.

5.1.3 Variação da Impedância de Surto por meio da Variação da Quantidade de LTs Adjacentes

Em SEEs reais, a variação da velocidade de propagação das OV's entre as LTs é desprezível para LTs de um mesmo nível de tensão e que possuem trechos apenas aéreos ou apenas subterrâneos. Nesses casos, em geral, não se observam mudanças significativas nos parâmetros elétricos de uma LT para outra, resultando em velocidades de propagação próximas à velocidade da luz c . Assim, com o intuito de efetuar um estudo mais próximo do verificado em casos reais, o LAPPICE foi avaliado também considerando uma variação da impedância de surto (não apenas da indutância como no caso anterior), sendo os ramos adjacentes tomados por um circuito equivalente composto por um dado número de LTs conectadas nos terminais monitorados. Para analisar esses cenários, simularam-se SEEs que possuem duas e quatro LTs adjacentes conectadas em cada terminal da LT principal, conforme ilustrado na Figura 5.16.

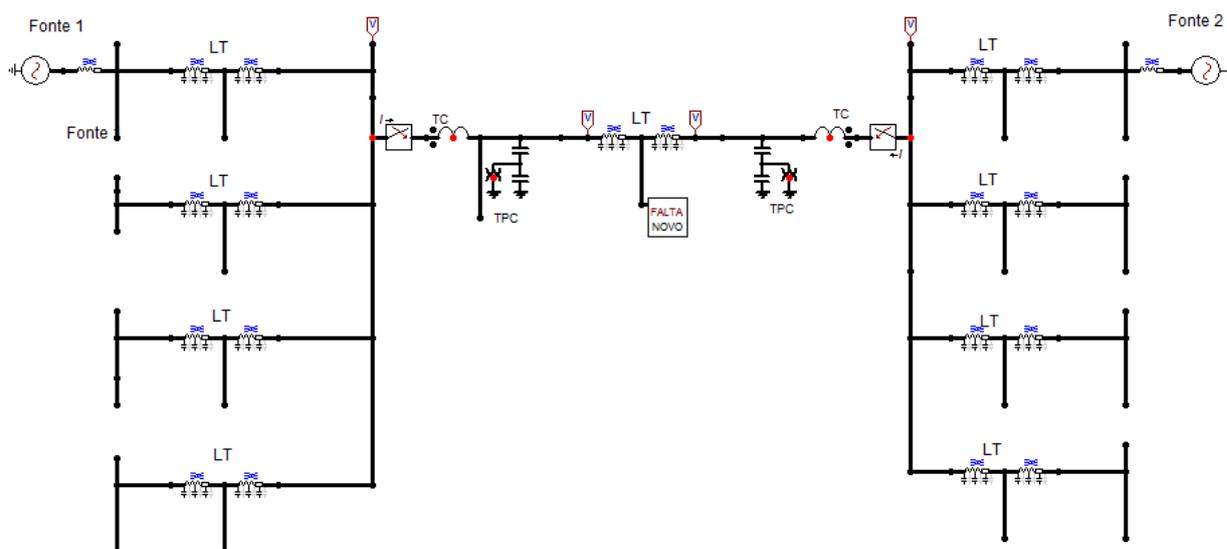


Figura 5.16. Simulação ATP considerando diversas LTs adjacentes com mesmos parâmetros.

Essa análise tem a finalidade de confirmar a relação entre a variação de impedância de surto terminal e a quantidade de LTs adjacentes conectadas na junção das LTs. Essa relação pode ser verificada por meio da análise aos pares das Figuras 5.17 e 5.18, e 5.19 e 5.20. Nota-se que as OV's possuem a mesma velocidade e que a mudança da impedância de surto tem efeito direto na magnitude das OV's dadas por (5.5) e (5.9), sendo mínima a diferença entre as primeiras frentes de onda do sinal de corrente do registro em cada par de diagramas gerados.

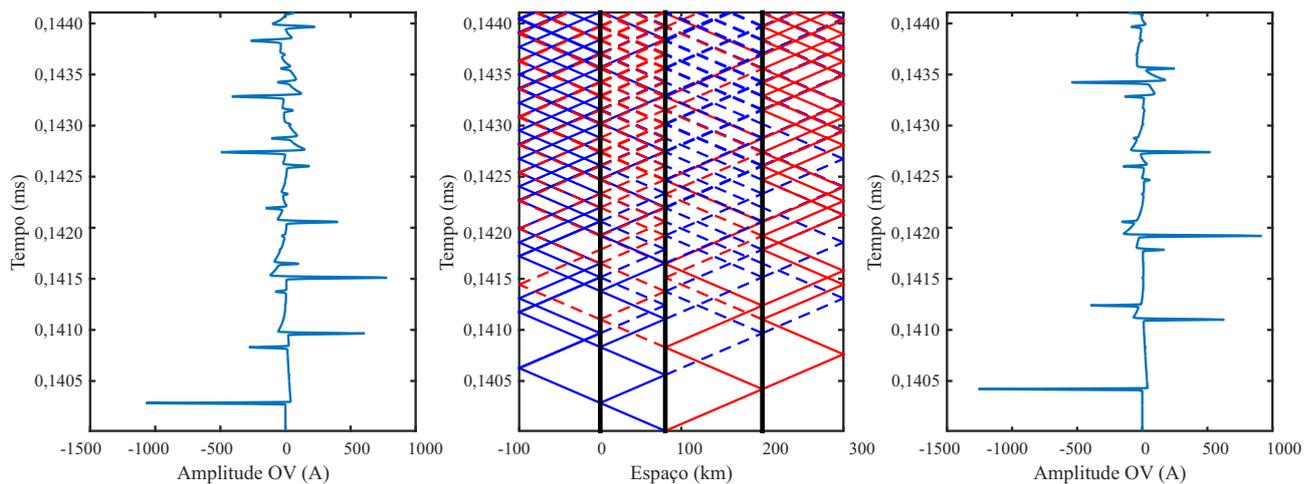


Figura 5.17. Sistema com duas linhas adjacentes.

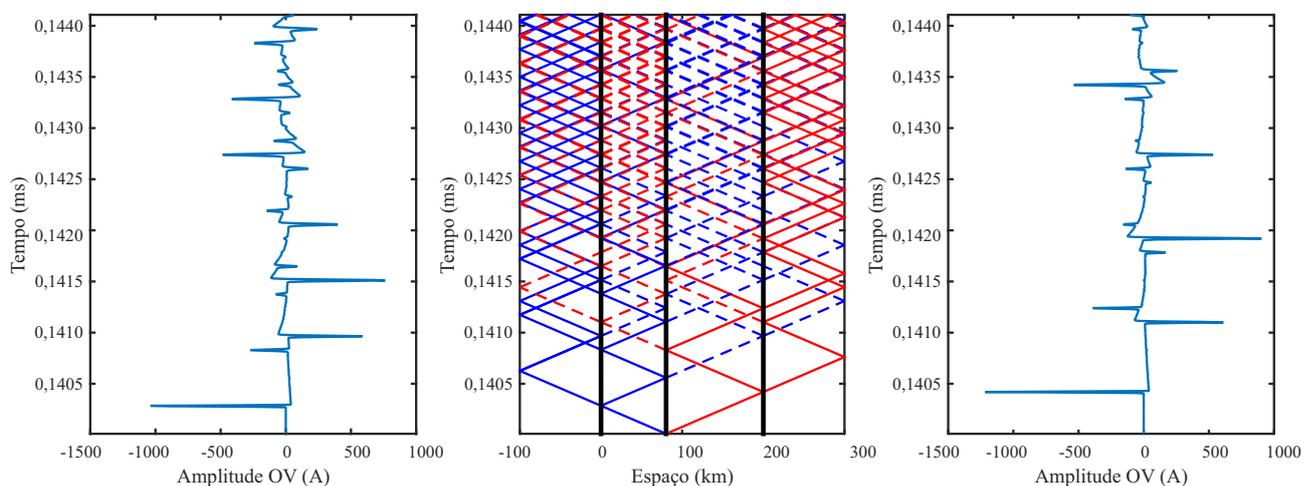


Figura 5.18. Impedância de surto da linha adjacente duas vezes menor.

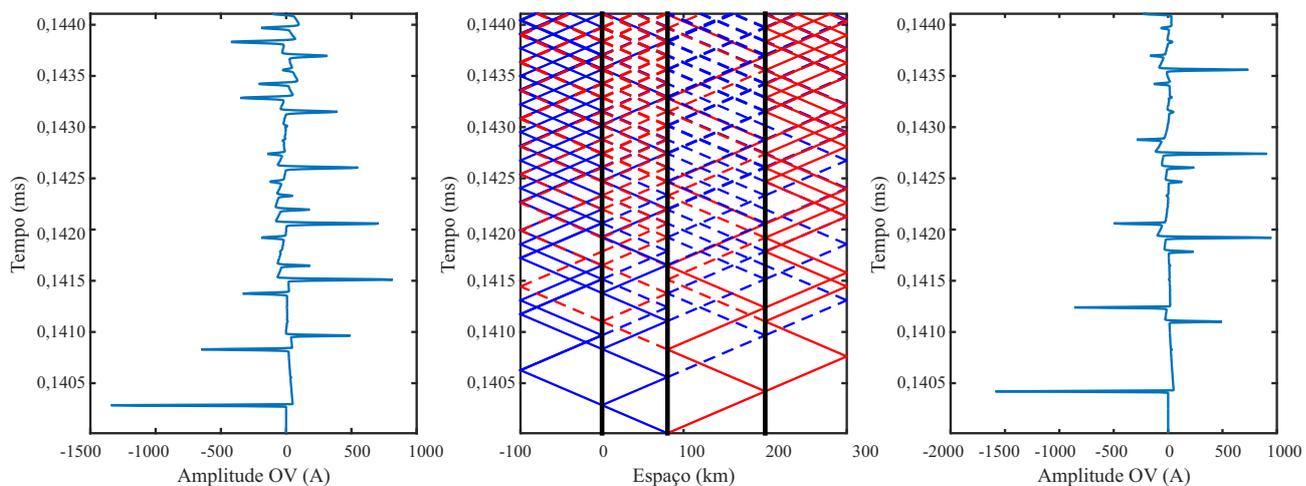


Figura 5.19. Sistema com quatro linhas adjacentes.

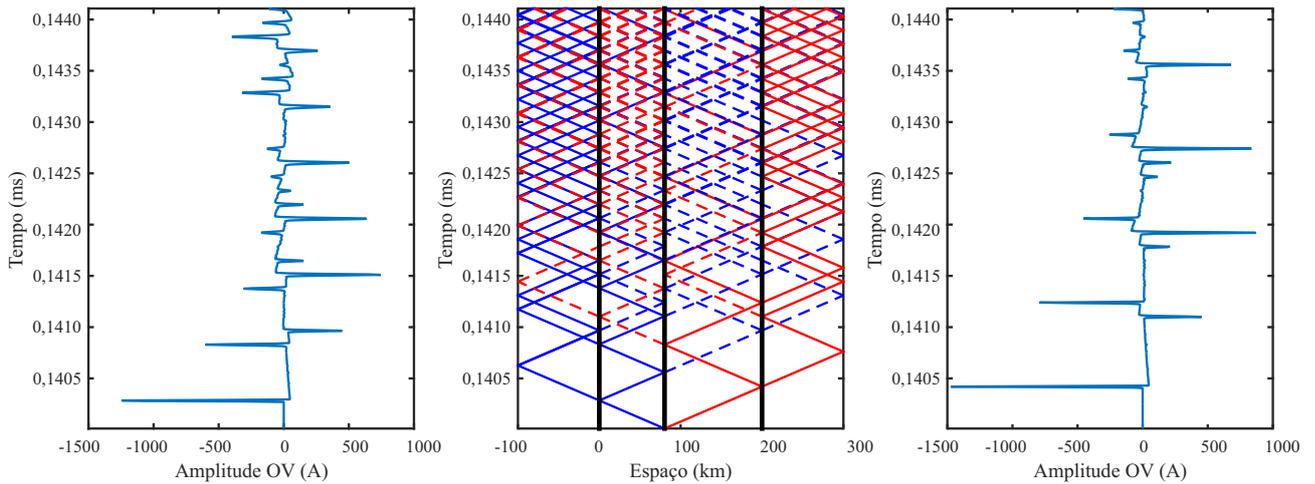


Figura 5.20. Impedância de surto da linha adjacente quatro vezes menor.

5.2 ANÁLISE DE CASOS DE ENERGIZAÇÃO DE LTS

Além da simulação de faltas, é possível analisar a saída do LAPPICE para casos de energização de LTS, situação esta comum em SEEs e que também lança OV no sistema. Para isso, realizaram-se simulações em duas etapas para uma LT com circuito simples. A primeira simulação consiste em deixar o terminal local aberto e fechar o disjuntor do terminal remoto (representado por uma chave trifásica no ATP) em 0,14 segundos. A segunda simulação consiste em fechar o disjuntor do terminal local em 0,14 segundos, já com o disjuntor do terminal remoto fechado. Cada caso foi simulado para diferentes valores das impedâncias dos equivalentes de Thévenin, resultando em valores de SIR iguais a 0,1 e 0,001, conforme demonstrado nas Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24. Vale ressaltar que, por questões de simplificação, essa simulação considerou o fechamento dos disjuntores das três fases simultaneamente, sem nenhuma diferença entre os momentos nos quais os contatos dos disjuntores estabelecem contato elétrico e sem modelar possíveis arcos elétricos.

Por meio dos resultados obtidos, constata-se que também existe influência da impedância terminal do sistema no caso de energização de LTS, assim como verificado nos casos de análise de curtos-circuitos. De fato, essa influência é esperada, uma vez que, alterando a relação entre a impedância da fonte e a impedância da LT, as características das OVs também sofrem variação.

Por meio da análise das Figuras 5.21 e 5.22, nas quais são avaliados registros obtidos do terminal remoto, observa-se que, quando este é energizado e o terminal local é mantido aberto, as polaridades das OVs são alternadas. Isso pode ser associado ao fato de que, como a OV

percebe um circuito aberto quando se propaga no sentido do terminal local, ela é refletida e retorna ao terminal de monitoramento com polaridade oposta à da OV incidente, conforme demonstrado no Capítulo 2. Por outro lado, nos casos avaliados nas Figuras 5.23 e 5.24, em que o terminal local já se encontra com o disjuntor fechado, as OVs não enxergam mais essa descontinuidade como circuito aberto, mas sim como uma impedância da fonte de tensão. Nesse caso, sendo o $SIR = 0,001$, o coeficiente de reflexão da fonte é praticamente unitário, fazendo com que as OVs refletidas tenham sempre as mesmas polaridades.

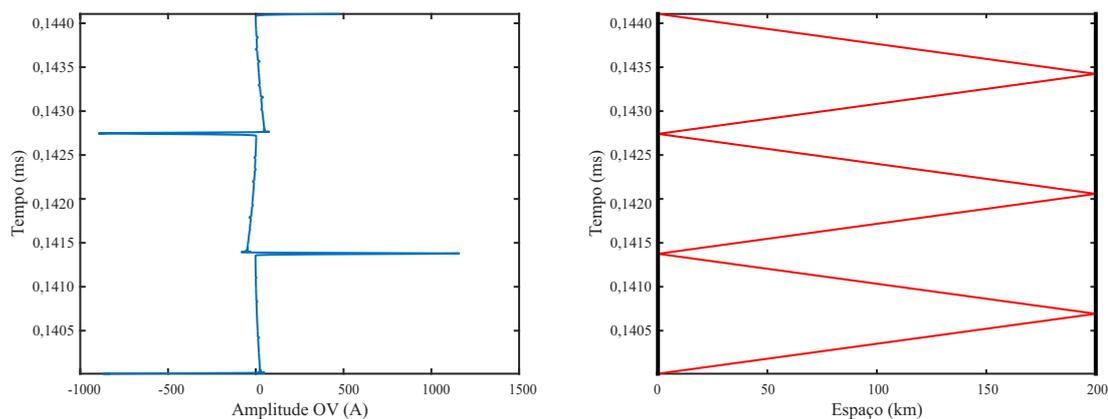


Figura 5.21. Terminal remoto energizado e terminal local aberto com $SIR = 0,001$.

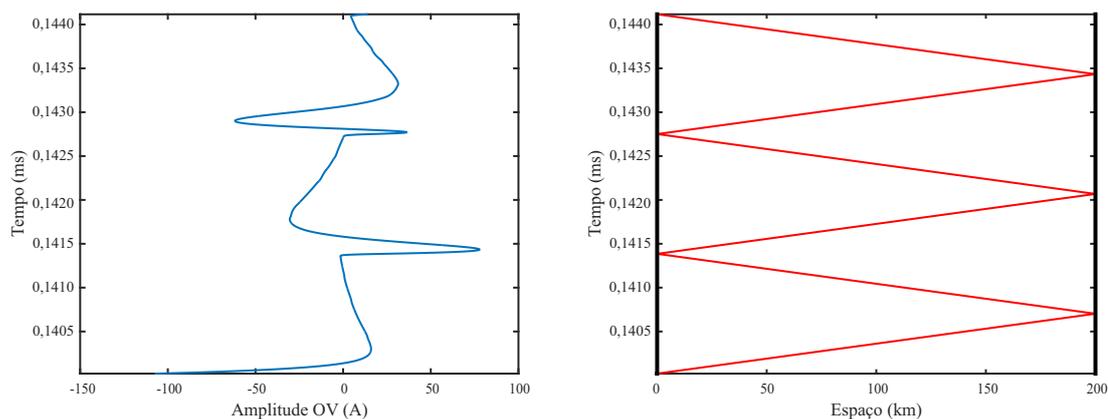


Figura 5.22. Terminal remoto energizado e terminal local aberto com $SIR = 0,1$.

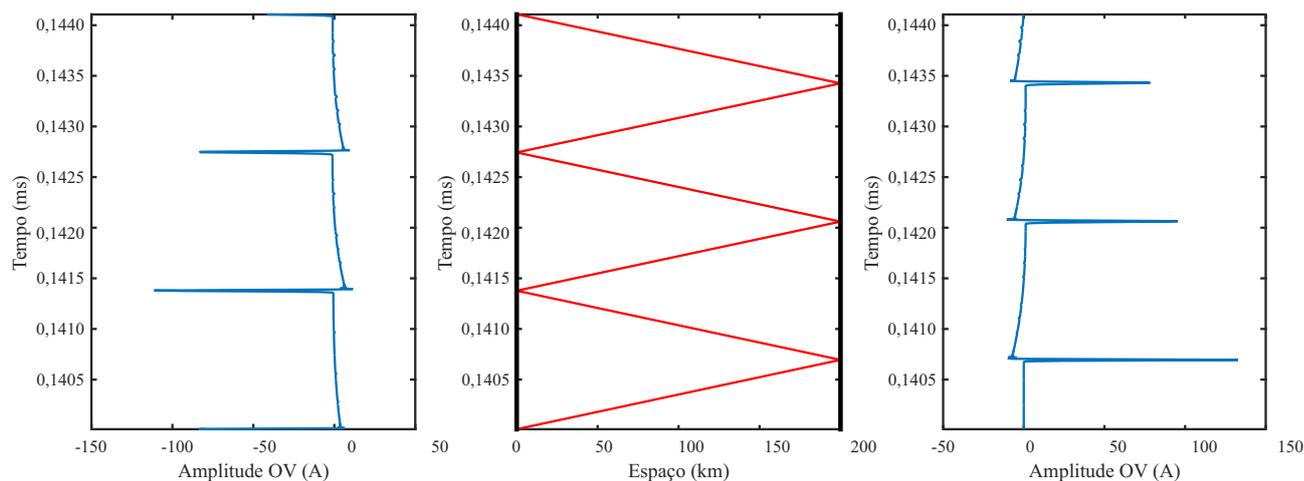


Figura 5.23. Terminal remoto energizado e terminal local energizado após 0,14 segundos com $SIR = 0,001$.

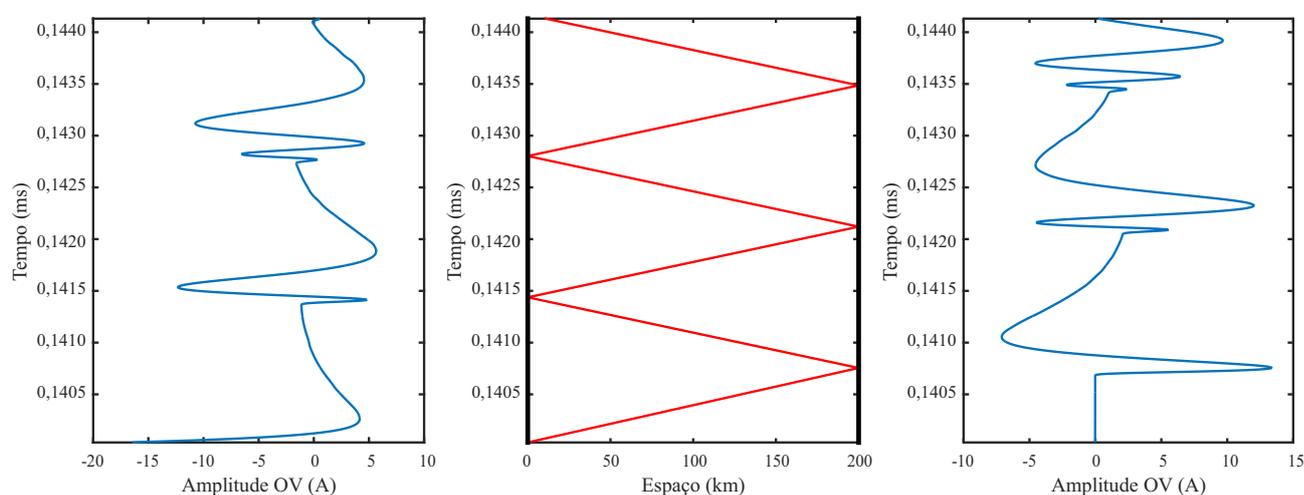


Figura 5.24. Terminal remoto energizado e terminal local energizado após 0,14 segundos com $SIR = 0,1$.

5.3 RECURSOS ADICIONAIS DO LAPPICE

Conforme mencionado no Capítulo 4, O LAPPICE possui recursos adicionais de visualização de gráficos, tais como geração dos gráficos do torque e de sinais modais. Diante disso, esta seção tem como intuito apresentar essas funcionalidades, as quais têm utilidade em aplicações específicas.

Na Figura 5.25, apresenta-se um exemplo da saída do LAPPICE com os gráficos dos torques para uma falta AT. Esses sinais possuem informações importantes relacionadas à direcionalidade das OV's (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Considerando essa figura e a expressão que define o torque, é possível identificar que a primeira frente de onda induzida pela falta possui módulo

negativo, e o torque normalizado possui sinal oposto em consequência do sinal positivo do sinal de tensão. Assim, todas as frentes de ondas provenientes do ponto de falta e incidentes no terminal local terão o torque sempre positivo. Já as OV's originadas das LT's adjacentes ou do circuito paralelo terão o torque negativo. Essa construção permite a determinação da origem de cada frente de onda, pois elas seguem um padrão bem definido para as primeiras OV's detectadas. Com isso, seria possível criar novos algoritmos de localização baseados no torque e na análise do diagrama, mas, como destacado, o torque depende do sinal de tensão, o qual é fortemente atenuado na faixa de frequência na qual o sistema opera devido às limitações dos TPCs, restringindo a análise aos sinais de corrente. Porém, ainda é possível identificar padrões no comportamento dos transitórios de corrente que possam motivar novos trabalhos, como apresentado nas seções anteriores deste capítulo.

Na Figura 5.26, apresenta-se um resultado gerado no LAPPICE em que se habilitou a opção de visualização de gráficos de modo zero. Note que este sinal encontra-se filtrado. Comparando este resultado com resultados previamente obtidos de sinais filtrados do modo alfa, identificam-se as grandes atenuações e dispersões causadas pelas perdas na terra e nos condutores, fazendo com que o sinal filtrado e desacoplado de modo zero apresente maior dificuldade no que diz respeito à identificação de OV's.

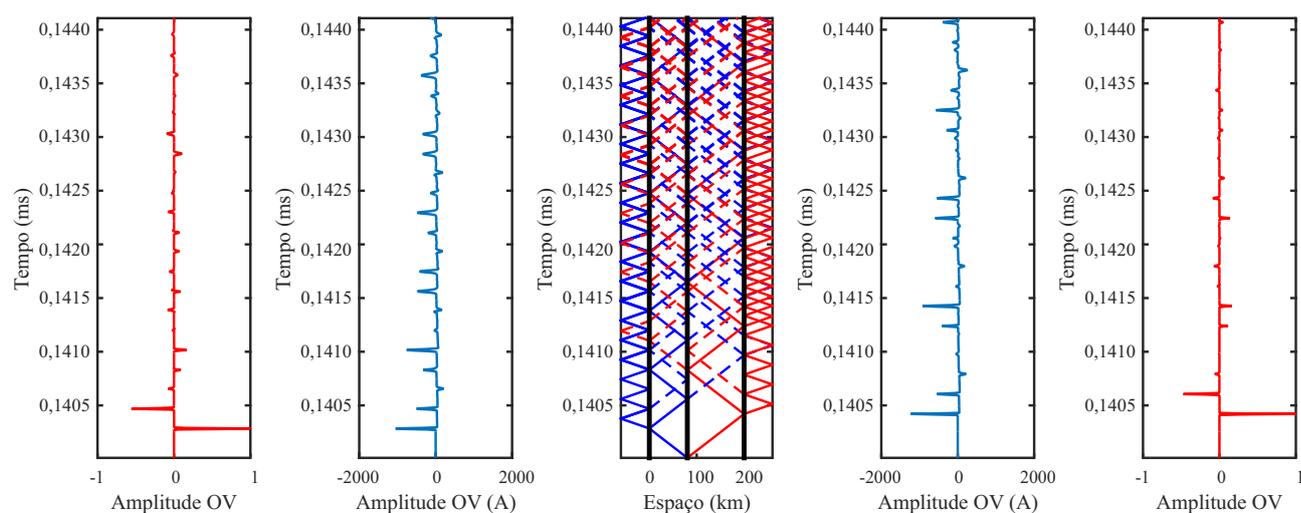


Figura 5.25. Exemplo de resultado gráfico com o torque.

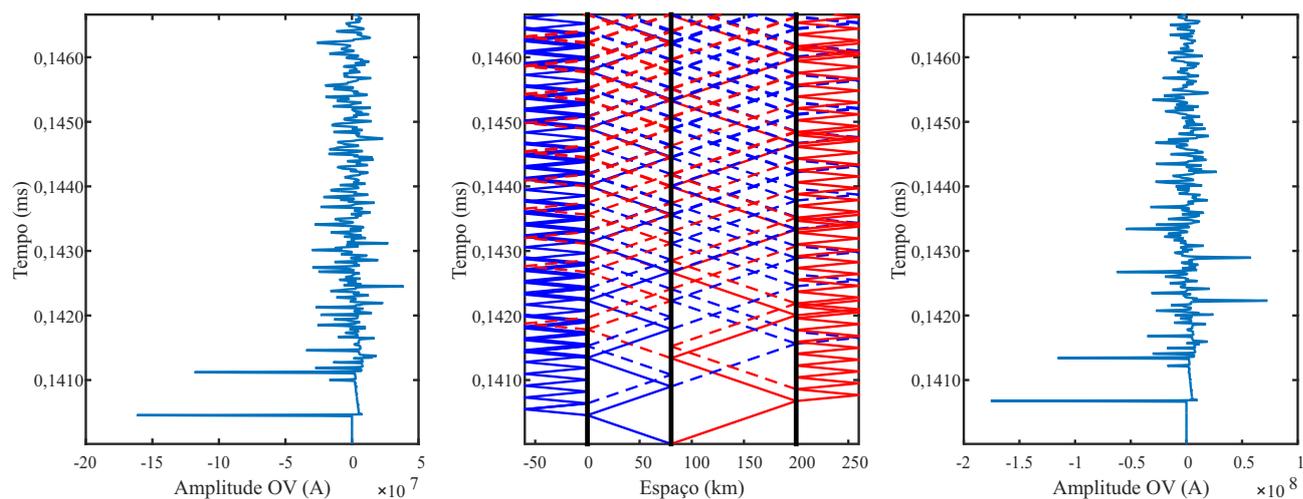


Figura 5.26. Exemplo de resultado gráfico dos sinais filtrados e desacoplados de modo zero.

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados alguns estudos que evidenciam a aplicabilidade do LAPPICE. Adicionalmente, baseando-se em análises matemáticas dos casos estudados, comprovou-se a eficiência do aplicativo desenvolvido. Embora nem todas as funcionalidades gráficas do LAPPICE tenham sido detalhadas, destaca-se que o uso dessas seria simplificado, requerendo apenas um processo de configuração do aplicativo por meio de sua interface gráfica. Portanto, acredita-se que o LAPPICE pode ser de grande utilidade para as concessionárias interessadas no estudo de funções baseadas na teoria das OV's, bem como para pesquisadores inseridos nessa linha de pesquisa, pois permite uma visualização mais ampla da propagação de OV's em LTs, o que seria de difícil realização em casos de construção manual dos diagramas de reflexão.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho, propõe-se uma ferramenta alternativa para estudos relacionados à propagação de OV's em LTs. Diante da escassez de soluções encontradas na literatura que viabilizam a construção de diagramas de Lattice de forma automática para a análise da propagação de OV's induzidas por distúrbios em LTs, apresentou-se um aplicativo denominado LAPPICE. Este aplicativo é capaz de ilustrar os diagramas de reflexões de OV's em LTs, considerando diferentes configurações do sistema, como LTs com circuito simples, LTs com circuito duplo e LT com circuitos simples com linhas adjacentes. Além disso, o aplicativo desenvolvido possibilita ao usuário uma variação ampla dos parâmetros elétricos que modelam os SEEs simulados, além de viabilizar a análise de gráficos que diversas ferramentas atuais encontradas não contemplam, tais como gráficos do torque, de modo zero e de ondas incidentes e refletidas.

Para avaliar o LAPPICE, foram considerados três cenários distintos de falta em uma LT com circuito simples com duas LTs adjacentes e em uma LT com circuito paralelo. Em cada caso, foram adotadas diferentes relações entre as impedâncias características das LTs principal e das adjacentes, assim como da paralela. Além disso, para validar o aplicativo, foram obtidas as equações gerais que descrevem o comportamento das OV's no sistema em cada caso, as quais foram confrontadas com os resultados obtidos via LAPPICE.

Nos cenários de falta estudados, os resultados obtidos usando o LAPPICE estiveram de acordo com o esperado teoricamente, comprovando a confiabilidade do aplicativo. Das análises apresentadas, demonstrou-se a utilidade do LAPPICE no que diz respeito ao estudo dos transitórios decorrentes de falta, facilitando, conseqüentemente, o entendimento de fenômenos que fundamentam soluções baseadas na teoria das OV's. De fato, os diagramas de reflexão obtidos por meio do aplicativo proposto promovem uma visão ampla do fenômeno de propagação de OV's, fornecendo informações sobre módulo, polaridade e instantes de incidência das frentes de onda lançadas no sistema após a ocorrência de faltas e em casos de energização de LTs.

Em todos os casos, demonstrou-se a utilidade da ferramenta proposta, através da qual foram obtidos diagramas de reflexões condizentes com o esperado teoricamente.

Dessa maneira, constata-se que os resultados obtidos são promissores devido ao grande interesse comercial de equipamentos de proteção que utilizam o princípio de OV's para suas atuações no sistema, a exemplo de modelos de relés no domínio do tempo. Dessa forma, usando o LAPPICE, torna-se mais fácil avaliar a aplicação dessas soluções, viabilizando um melhor entendimento dos transitórios causados pela propagação de OV's em SEEs.

Como propostas de trabalhos futuros, destacam-se:

- Implementação de rotinas para a leitura de registros COMTRADE no LAPPICE, o que viabilizará a leitura de registros reais obtidos por relés de proteção;
- Adaptação do LAPPICE para realizar a leitura de registros no formato ".pl4";
- Inclusão de funções para a localização de faltas no LAPPICE, por meio da indicação manual dos instantes de tempo de interesse;
- Ampliação do aplicativo para a análise de LTs com múltiplos terminais;
- Inclusão de funções para a análise de faltas externas, isto é, faltas localizadas em LTs adjacentes ou no circuito paralelo;
- Avaliação do aplicativo considerando LTs com compensação reativa shunt e série, bem como com inclusão de cargas;
- Avaliação do aplicativo para casos de energização que contem com resistor de pré-inserção, pára-raios, entre outros;
- Implementação da interface do aplicativo na língua inglesa;
- Otimização da interface gráfica, incluindo funcionalidades que facilitem o uso do aplicativo e que agreguem funcionalidades ao LAPPICE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532–550, June 1931. ISSN 0096-3860. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 16.
- BO, Z.; JOHNS, A.; AGGARWAL, R. A novel fault locator based on the detection of fault generated high frequency transients. IET, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 19.
- CHOUDHURY, M.; GANGULY, A. An improved fault area detection & fault location methodology using wavelet transform. In: IEEE. *Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 19.
- DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, IEEE, v. 2, p. 537–557, 2014. Citado na página 33.
- DATTA, B.; CHATTERJEE, S. A literature review on use of Bewley’s lattice diagram. *2012 1st International Conference on Power and Energy in NERIST, ICPEN 2012 - Proceedings*, p. 1–4, 2012. Citado na página 19.
- DATTA, S. C. B. Simulation of bewley’s lattice diagram using matlab. In: *2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 11–16. Citado na página 21.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power System Analysis & Design, SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 6, 8, 9, 10, 16, and 40.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13, and 15.
- LEE, K. Visualizing wavelet transformed travelling waves on power transmission line using JAVA. *APSCOM 2000 - 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, v. 2000, n. October, p. 349–353, 2000. Citado na página 21.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese (Doutorado), 2014. Citado na página 33.
- PARENTONI, M. F. C. *Localização de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão de três terminais - abordagem baseada em decomposição wavelet*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2006. Citado na página 20.
- SADIKU, M. N. O. *Elements of Electromagnetics*. [S.l.]: Oxford university Press, 2014. Citado na página 6.

- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado 5 vezes nas páginas 4, 8, 21, 29, and 31.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves. *13th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2016)*, p. 1–6, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 13.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2014*, p. 95–110, 2014. Citado 8 vezes nas páginas 6, 7, 10, 15, 29, 30, 33, and 35.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Desempenho dos elementos de proteção de linha no domínio do tempo para faltas do mundo real. p. 1–20, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 4, 20, 21, 24, 29, 32, and 58.
- SEL. *SYNCHROWAVE Event 2015 Software Instruction Manual*. [S.l.], 2015. Citado na página 21.
- SILVA, M. D. *Implementação de um localizador de faltas híbrido para linhas de transmissão com três terminais baseado na transformada wavelet*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 20.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, aug. 1982. ISSN 0018-9510. Citado na página 26.
- THOMPSON, M. J.; SOMANI, A. A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length. *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2015*, p. 833–841, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 42 and 44.
- YU, L. Quick evaluation of voltage surge in electrical power systems. In: IEEE. *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1994. Conference Record, Papers Presented at the 1994 Annual Meeting, 1994 IEEE*. [S.l.], 1994. p. 197–201. Citado 2 vezes nas páginas 18 and 19.