

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Avaliação da Qualidade de Modelos de Linhas de Transmissão para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

Kécio Patrick Delgado Ferreira

Campina Grande – Paraíba – Brasil

©Kécio Patrick Delgado Ferreira, outubro de 2014

Kécio Patrick Delgado Ferreira

Avaliação da Qualidade de Modelos de Linhas de
Transmissão para Estudos de Transitórios
Eletromagnéticos

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento às exigências para obtenção do Grau de
Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Outubro de 2014

À minha esposa, Danielle, que sempre me incentivou e motivou na busca por este sonho. Aos meus filhos, Filipe e Davi, que em vários momentos não tiveram a minha atenção, mas me proporcionaram inúmeros de imensa alegria. Aos meus pais, Neto e Paula, que deram início e sempre me apoiaram ao longo desta jornada. Às minhas irmãs, Janaina e Janailma, que sempre acreditaram em mim, DEDICO.

Kécio Patrick Delgado Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo e de todos por sempre estar presente.

Além de dedicar, agradeço a toda a minha família, especialmente a minha esposa, Danielle, que sempre esteve presente, desde a graduação, me apoiando e dando suporte para realização desse sonho, sempre acreditaram em mim. Agradeço por toda paciência, incentivo e confiança.

Aos professores Washington Neves e Damásio Fernandes pela amizade, pela orientação e ensinamentos dignos de um verdadeiro facilitador.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação da Copele pelos ensinamentos

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), pela oportunidade de crescimento profissional que me foi dada.

Aos colegas da Chesf que fizeram parte dessa jornada, Elias, Alexandre Borja, Josué, Ferdinando e Ladário, que me ajudaram na coleta de dados e informações usadas nesse trabalho.

Aos colegas e amigos de pós-graduação da Chesf e UFCG, Elerson, Eduardo, Rodrigo, Borja, Emanuel, Adriana, SÍntia, Raimundo, Nelson, Wellinsilvio, Célio, Daphne, Felipe, que estiveram sempre prontos a me dá ajuda e apoio.

Kécio Patrick Delgado Ferreira

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Resumo	x
Abstract.....	xi
Capítulo 1 Introdução.....	12
1.1 Motivação da Dissertação	12
1.2 Objetivos da Dissertação	13
1.3 Metodologia Adotada	13
1.4 Organização da Dissertação.....	14
Capítulo 2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica.....	15
2.1 Transitórios eletromagnéticos.....	15
2.2 Componentes do sistema	16
2.3 Modelo de Linha de Transmissão	17
Modelo a Parâmetros Distribuídos	21
Modelo a Parâmetros Concentrados	24
Modelos Computacionais	24
2.4 Coeficiente de Determinação R^2	25
Capítulo 3 Estudo do Modelo de Referência	27
3.1 Simulações do Modelo IEEE.....	28
Resultados das Simulações do Modelo de Sistema IEEE.....	30
Capítulo 4 Sistema Piloto.....	36
4.1 Modelo do sistema Chesf no ATP	37
4.2 Modelagem das Linhas de Transmissão	38
4.3 Ajuste do Caso Base	40
4.4 Simulações com o Sistema Piloto.....	40
Resultados das Simulações com o Sistema Piloto	42
Capítulo 5 Conclusões	47
Referências Bibliográficas.....	49
Anexo I Parâmetros das LT Referentes aos Circuitos do Sistema Piloto.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação infinitesimal do circuito equivalente da linha de transmissão monofásica.	17
Figura 2. Linha de transmissão no domínio modal.	21
Figura 3. Circuito equivalente para uma linha de transmissão sem perdas.	22
Figura 4. Equivalente RC para simular $Z_c(\omega)$ no domínio do tempo.	23
Figura 5. Representação de uma linha de transmissão monofásica através de cascata de circuitos PI.	24
Figura 6. Modelo do sistema básico para teste de proteção de linha de transmissão (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).....	27
Figura 7. Versão detalhada do modelo do Sistema Básico com os nomes dos nós ATP. (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).....	28
Figura 8. Modelo de chave para aplicação de falta.	29
Figura 9. Modelo de torre com cadeias de isoladores para injeção de surto atmosférico.	30
Figura 10. Forma de onda do sinal de corrente do surto atmosférico.	30
Figura 11. Gráfico de falta trifásica observada do terminal L2F1, obtido com o modelo de J. Marti para linhas não transpostas.	31
Figura 12. Gráfico de falta trifásica observada do terminal L2F1, obtido com o modelo PI com cascata de 3 seções.	31
Figura 13. Formas de onda de tensão e corrente observados no terminal L2F1 durante a energização em vazio da LT L2. (a) Modelo de referência. (b) PI equivalente.	34
Figura 14. Formas de onda de tensão e corrente observados no terminal L1F1 durante a energização em carga da LT L2. (a) Modelo de referência. (b) K. C. Lee para LT Transposta.	35
Figura 15. Diagrama unifilar do Sistema Piloto.	36
Figura 16. Diagrama unifilar do sistema Chesf representado pelo modelo ATP. O Sistema Piloto é destacado pela cor verde.	37

Figura 17. Sinais registrados de falta monofásica fase C a terra e os obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti, do modelo de K. C. Lee, do modelo PI e do modelo disponibilizado pela Chesf.....	43
Figura 18. Sinais de tensão e corrente registrados no terminal de AGD da falta monofásica fase C à terra e obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti.....	44
Figura 19. Sinais de tensão e corrente registrados no terminal de RCD da falta monofásica fase B à terra e obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Origens e faixas de frequência de transitórios em Sistemas de Potência (MARTINEZ-VELASCO, 2010).....	16
Tabela 2.	Desempenho dos modelos de LT para o comportamento das tensões, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.	32
Tabela 3.	Desempenho dos modelos de LT para o comportamento das correntes, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.	32
Tabela 4.	Desempenho dos modelos de LT para energização em carga e em vazio da LT L2 através do terminal L2F1, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.	33
Tabela 5.	Características físicas das LT que compõem o sistema piloto.	39
Tabela 6.	Características físicas dos condutores utilizados na construção das LT.....	39
Tabela 7.	Informações de faltas reais ocorridas na LT L1 e registradas pelos sistemas de proteção e supervisão da Chesf.....	41
Tabela 8.	Localizações adotadas para simulação das faltas ocorridas na LT L1.	41
Tabela 9.	Valores de R^2 para avaliação dos valores das tensões simuladas, comparadas aos registros de falta real registrados com o RDP.	46
Tabela 10.	Valores de R^2 para avaliação dos valores das correntes simuladas, comparadas aos registros de falta real registrados com o RDP.	46
Tabela 11.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGD500-RCD500, 500 kV, L1.	52
Tabela 12.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGD500-RCD500, 500 kV, L2.	52
Tabela 13.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito SUD500-RCD500, 500 kV, L3.....	53
Tabela 14.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito MSI500-SUD500, 500 kV, L4.....	53
Tabela 15.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para os circuitos AGL230-RCD230, 230 kV, L5 e L6.	54
Tabela 16	Paramatros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para os circuitos RCD230-PRD230, 230kV, L7 e L8.....	54
Tabela 17.	Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGL230-RIB230, 230 kV, L9.	54

Tabela 18. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito RIB230-RCD230, 230kV, L10.	54
--	----

RESUMO

É apresentada uma avaliação de modelos de linhas de transmissão, adequados aos estudos de transitórios eletromagnéticos para um sistema piloto de diagnóstico de desempenho do sistema de proteção da Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco). Os dados para elaboração dos modelos foram obtidos mediante tratamento das características físicas e elétricas reais das linhas de transmissão, conhecidas vão a vão. Baseado nos dados tratados, foram gerados os modelos das linhas de transmissão que compõem o sistema piloto sob estudo, adotando-se parâmetros distribuídos constantes, dependentes da frequência e o PI nominal. Para avaliar a qualidade dos modelos obtidos, com uso do ATP (*Arternative Transients Program*), foram simuladas faltas com características de ângulo de incidência e localização, semelhantes às de faltas reais conhecidas, comparando-se os resultados por meio do coeficiente de determinação R^2 . Constatou-se uma semelhança de pelo menos 94% entre os sinais simulados e os registros reais da falta, sendo o modelo a parâmetros dependentes da frequência o que apresentou melhor resultado.

Palavras-chave: Transitórios eletromagnéticos, linhas de transmissão, PI-nominal, modelagem, EMTP.

ABSTRACT

An evaluation of transmission line models is presented, appropriate for electromagnetic transients studies for a pilot system diagnostic performance of the Chest protection system. The data for preparation of the models were obtained from treatment of the real physical and electrical characteristics of the known transmission lines. Based on the processed data, models of transmission lines that make up the pilot system were obtained, adopting distributed constant parameters, frequency dependent parameters and the nominal PI. In order to evaluate the quality of the obtained models, using ATP (Alternative Transients Program), were simulated faults with incidence angle and location characteristics similar to the known real faults, comparing the results using the coefficient of determination R^2 . It was obtained a similarity of at least 94% of the simulated signals and the real fault records, and the frequency dependent model parameters presented better result.

Keywords: Electromagnetic transients, transmission lines, nominal PI, modeling, EMTP.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O estudo de perturbação em um sistema elétrico de potência (SEP), por vezes, pode demandar muito esforço e tempo para um resultado conclusivo e confiável. Com o objetivo de tornar as análises de perturbações mais rápidas e confiáveis a Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), por meio de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), está desenvolvendo em conjunto com a UFCG um sistema de análise de distúrbios em sistemas elétricos. Inicialmente pretende-se fazer a análise do desempenho da proteção de um sistema piloto composto por linhas de transmissão barramentos e autotransformadores.

Para a análise dos distúrbios são necessários modelos que os representem com fidelidade satisfatória. Assim, é necessária a modelagem do sistema para estudos de transitórios eletromagnéticos de modo a permitir avaliações com o sistema real. A análise de desempenho das cadeias de proteção das linhas de transmissão é o objetivo principal desse projeto piloto. Desse modo os modelos de linha de transmissão para o estudo de desempenho da proteção são de grande importância, sendo necessária a validação de tais modelos.

Diante do exposto, é necessário um estudo para definição de qual modelo para transitórios eletromagnéticos é o mais adequado para representação das linhas de transmissão que compõem o sistema de transmissão da Chesf.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desse trabalho é analisar os modelos mais adequados para realizar os estudos de análise de transitórios eletromagnéticos das linhas de transmissão (LT) do sistema piloto da Chesf, considerando situações de manobras, curtos-circuitos e descargas atmosféricas.

Definidos os modelos a serem adotados e tomando-se por base os dados disponíveis do sistema real, será realizada a parametrização desses modelos, comparando a resposta das simulações dos modelos com os registros de falta do sistema real.

1.3 METODOLOGIA ADOTADA

O trabalho foi dividido em quatro etapas, apresentadas a seguir:

- Revisão bibliográfica dos modelos dos componentes. Estudo dos modelos matemáticos para representação dos parâmetros das LT aplicados ao estudo de transitórios eletromagnéticos.
- Simulação de caso base usando o Modelo IEEE - *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing* (RMRT). Foram gerados para as linhas de transmissão os modelos baseados nos métodos de J. Marti (parâmetros dependentes da frequência), K. C. Lee (parâmetros constantes na frequência) e PI nominal (parâmetros concentrados). Foram realizadas simulações com os modelos de sistema e LT definidos pelo RMRT para as situações de faltas, manobras e descargas atmosféricas. Para as simulações foram utilizados os programas MATLAB[®] e ATP (*Arternative Transients Program*);

- Simulação de caso base usando o sistema piloto. Foram aplicadas as técnicas utilizadas no estudo do modelo IEEE para a representação do sistema piloto definido pela Chesf;
- Ajuste dos parâmetros dos modelos do sistema piloto em função de registros oscilográficos de faltas reais e outros dados disponíveis.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2 são apresentadas a fundamentação teórica em conjunto com a revisão bibliográfica, onde são abordados os métodos utilizados para modelagem de linhas de transmissão e ainda, o método estatístico para avaliação de modelos matemáticos representativos de sistemas reais.

No capítulo 3 é apresentado o estudo do caso base que faz uso do Modelo IEEE - *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. Neste capítulo são desenvolvidas as técnicas que serão aplicadas ao estudo do Sistema Piloto.

No capítulo 4 são aplicadas as metodologias desenvolvidas no capítulo 4 para elaboração e estudos dos modelos de linha de transmissão que formam o sistema piloto. São realizadas simulações replicando as características reais de faltas, registradas no sistema transmissão da Chesf. Na sequência, procede-se a análise dos resultados das simulações, comparando-os aos registros da falta real, para validação dos modelos de linha analisados.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO

BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Os estudos de transitórios eletromagnéticos exigem uma modelagem adequada dos componentes do sistema em estudo para que os resultados obtidos reflitam com fidelidade as ocorrências no sistema real.

As perturbações no sistema elétrico de potência (SEP) envolvem uma faixa de frequência que varia de DC a 50 MHz, ocasionadas pelas origens dessas perturbações (MARTINEZ-VELASCO, 2010). A Tabela 1 apresenta os fenômenos transitórios com as respectivas faixas de frequências envolvidas.

A representação do sistema em estudo, com um único modelo que apresente resposta satisfatória para toda faixa de frequência, é praticamente impossível. Dessa forma, opta-se por representá-lo com modelos que apresentem resposta satisfatória para distúrbios específicos e por consequência, para faixas de frequência específicas.

Tabela 1 Origens e faixas de frequência de transitórios em Sistemas de Potência (MARTINEZ-VELASCO, 2010).

Origem	Faixa de Frequência
Ferromressonância	0,1 Hz a 1 kHz
Rejeição de carga	0,1 Hz a 3 kHz
Eliminação de falta	50 Hz a 1 kHz
Religamento de linha	50 Hz a 20 kHz
Tensão de restabelecimento transitória	50 Hz a 100 kHz
Descargas atmosféricas	10 kHz a 3 MHz
Chaveamentos em subestação isolada a gás (GIS)	100 kHz a 50 MHz

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA

O estudo de transitórios eletromagnéticos em sistema de potência envolve a sua modelagem com seus respectivos componentes. A depender da complexidade do fenômeno e da informação que se deseja, o nível de detalhamento do modelo do sistema torna-se mais rigoroso. Desse modo, consideram-se na modelagem de um sistema os seus elementos principais como as linhas de transmissão, os transformadores, as fontes, chaves, etc. O detalhamento do modelo será maior ou menor a depender do fenômeno estudado e do grau de fidelidade que se deseja para a sua representação. Como exemplo, pode-se citar o caso de transformadores, que podem ser representados por um transformador ideal ou por um modelo que contemple as perdas e/ou ainda a saturação magnética do núcleo.

Adicione-se a etapa de modelagem, a dificuldade já mencionada de se definir modelos únicos para os diversos tipos de perturbação possíveis. Por vezes, é possível adotar modelos que respondam a uma faixa larga de frequência, contudo podem apresentar alto esforço computacional ou parâmetros muito complexos (MARTINEZ-VELASCO, 2010).

Portando a etapa de modelagem busca uma relação de compromisso entre o fenômeno estudado, a precisão e a simplicidade do modelo, de modo que o objetivo seja alcançado da forma mais apropriada.

2.3 MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são componentes de grande importância, tendo como função a transmissão de energia entre pontos distintos e por vezes, remotos. O estado da arte apresenta diversos modelos para sua representação, na busca de uma representação mais adequada ao fenômeno estudado.

Os modelos de linha de transmissão mais utilizados para solução de problemas envolvendo transitórios eletromagnéticos são baseados na solução das equações de ondas, que podem ser obtidas através da observação da representação infinitesimal da linha de transmissão mostrada na Figura 1 (FERNANDES, 1996).

Sendo:

r - Resistência em Ω/km ;

g - Condutância de dispersão em Ω^{-1}/km ;

l - Indutância em H/km ;

c - Capacitância em F/km .

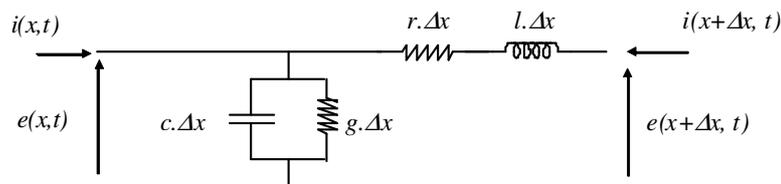


Figura 1 - Representação infinitesimal do circuito equivalente da linha de transmissão monofásica.

Analisando a representação infinitesimal da linha, pode-se escrever a corrente da linha:

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - g \cdot \Delta x \cdot e(x, t) - c \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial e(x, t)}{\partial t} \quad \text{ou,}$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -g \cdot e(x, t) - c \cdot \frac{\partial e(x, t)}{\partial t}$$

Quando, $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g \cdot e + c \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

De forma análoga, a queda de tensão na linha pode ser escrita como:

$$e(x, t) - e(x + \Delta x, t) = r \cdot \Delta x \cdot i(x + \Delta x, t) + l \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad \text{ou,}$$

$$\frac{e(x, t) - e(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = r \cdot i(x + \Delta x, t) + l \cdot \frac{\partial i(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

Quando, $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se:

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = r \cdot i + l \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2)$$

Para uma linha de transmissão polifásica, os elementos das Equações (1) e (2) são substituídos por matrizes, e assim, as tensões e correntes são relacionadas pelas seguintes equações diferenciais parciais:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial [e]}{\partial x} &= [L'] \cdot \frac{\partial [i]}{\partial t} + [R'] \cdot [i] \\ -\frac{\partial [i]}{\partial x} &= [C'] \cdot \frac{\partial [e]}{\partial t} + [G'] \cdot [e], \end{aligned} \quad (3)$$

em que, $[R']$, $[L']$, $[G']$ e $[C']$ são matrizes de resistência, indutância, condutância e capacitância, por unidade de comprimento, da linha.

Essa abordagem leva em consideração a característica distribuída dos parâmetros da linha e o tempo de propagação da onda, chamado de tempo de trânsito, τ . Isso significa que o reflexo de uma perturbação em um terminal da linha só será identificado no outro após o tempo de trânsito.

Os parâmetros de indutância, capacitância, resistência e condutância por unidade de comprimento são funções das características físicas da LT em estudo, influenciadas pela geometria dos condutores, torres e características do solo onde a linha está instalada.

Escrevendo a equação (3) no domínio da frequência tem-se:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial[E]}{\partial x} &= \{[R'] + j\omega[L']\} \cdot [I] = [Z'] \cdot [I] \\ -\frac{\partial[I]}{\partial x} &= \{[G'] + j\omega[C']\} \cdot [E] = [Y'] \cdot [E] \end{aligned} \quad (4)$$

sendo, $[E]$ e $[I]$: vetores de tensão e corrente no domínio da frequência;

$[Z'] = [R'] + j\omega[L']$: matriz de impedância série da linha, sendo complexa e simétrica;

$[Y'] = [G'] + j\omega[C']$: matriz de admitância *shunt* da linha, sendo também complexa e simétrica.

Diferenciando novamente as equações (4), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2[E]}{\partial x^2} &= -[Z'] \cdot \frac{\partial[I]}{\partial x} \\ \frac{\partial^2[I]}{\partial x^2} &= -[Y'] \cdot \frac{\partial[E]}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

Substituindo as equações (4) em (5), temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2[E]}{\partial x^2} &= [Z'] \cdot [Y'] \cdot [E] \\ \frac{\partial^2[I]}{\partial x^2} &= [Y'] \cdot [Z'] \cdot [I] \end{aligned} \quad (6)$$

Tanto $[Z']$ como $[Y']$ são simétricas, desta forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2[E]}{\partial x^2} &= [P] \cdot [E] \\ \frac{\partial^2[I]}{\partial x^2} &= [P]^T \cdot [I] \end{aligned} \quad (7)$$

sendo, $[P] = [Z'] \cdot [Y']$ e $[P]^T = [Y'] \cdot [Z']$.

Para resolver as equações (7), transformam-se as correntes e tensões de fase da linha, em correntes e tensões modais, de modo que as matrizes não-diagonais de fase se tornam matrizes diagonais modais (DOMMEL, 1996).

As equações no domínio modal são independentes e portanto, podem ser resolvidas separadamente, como se fossem linhas monofásicas.

As equações modais correspondentes às equações (6) e (7), são:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 [V]}{\partial x^2} &= [\gamma^2] \cdot [V] \\ \frac{\partial^2 [J]}{\partial x^2} &= [\gamma^2] \cdot [J]\end{aligned}\quad (8)$$

Os elementos da matriz diagonal $[\gamma^2]$ são os autovalores de $[P]$, as matrizes $[V]$ e $[J]$ são as tensões e correntes no domínio modal, respectivamente (DOMMEL, 1996).

As matrizes diagonalizantes de $[P]$ e $[P]^T$ serão denominadas de $[T_v]$ e $[T_i]$, respectivamente, e possuem a seguinte propriedade:

$$\begin{aligned}[\gamma^2] &= [T_v]^{-1} \cdot [Z' \cdot Y'] \cdot [T_v] = [T_v]^{-1} \cdot [P] \cdot [T_v] \\ [\gamma^2] &= [T_i]^{-1} \cdot [Y' \cdot Z'] \cdot [T_i] = [T_i]^{-1} \cdot [P]^T \cdot [T_i]\end{aligned}\quad (9)$$

Substituindo (9) em (8), temos:

$$\begin{aligned}[E] &= [T_v] \cdot [V] \\ [I] &= [T_i] \cdot [J]\end{aligned}\quad (10)$$

sendo, $[T_v]$: matriz cujas colunas são os autovetores de $[P]$;

$[T_i]$: matriz cujas colunas são os autovetores de $[P]^T$.

As matrizes $[T_v]$ e $[T_i]$ se relacionam pela seguinte expressão:

$$[T_v]^{-1} = [T_i]^T.$$

Aplicando a transformação modal às matrizes $[Z']$ e $[Y']$, obtemos as matrizes impedância e admitância modais, dadas por:

$$\begin{aligned}[Z'_{\text{mod}}] &= [T_v]^{-1} \cdot [Z'] \cdot [T_i] \\ [Y'_{\text{mod}}] &= [T_i]^{-1} \cdot [Y'] \cdot [T_v]\end{aligned}\quad (11)$$

Os parâmetros modais $[Z'_{\text{mod}}]$ e $[Y'_{\text{mod}}]$ possuem dependência com a frequência, tendo em vista que são funções dos parâmetros da linha de transmissão no domínio de fases, $[Z']$ e $[Y']$, respectivamente.

Modelo a Parâmetros Distribuídos

Os modelos a parâmetros distribuídos levam em consideração a natureza distribuída das grandezas elétricas ao longo da linha, conferindo ao modelo maior rigor na representação e melhores resultados para estudos de transitórios eletromagnéticos. Os parâmetros variam com a frequência, isto é, $R(\omega)$, $L(\omega)$, $C(\omega)$ e $G(\omega)$ (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004) e devem ser levados em consideração a depender do estudo necessário a ser realizado. Quando essa dependência não é considerada, os parâmetros são definidos para uma frequência fixa.

Consideremos a linha de transmissão monofásica, no domínio modal, da Figura 2.

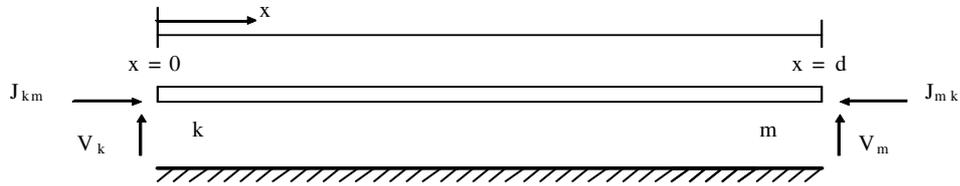


Figura 2. Linha de transmissão no domínio modal.

Para a linha apresentada acima, pode-se escrever as equações de propagação de ondas (8), no domínio da frequência

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= Z'_{\text{mod}} \cdot Y'_{\text{mod}} \cdot V \\ \frac{\partial^2 J}{\partial x^2} &= Y'_{\text{mod}} \cdot Z'_{\text{mod}} \cdot J \end{aligned}, \quad (12)$$

sendo $Z'_{\text{mod}}(\omega)$ e $Y'_{\text{mod}}(\omega)$ dados pelas equações (11). No caso de linha polifásica, V e J são tensões e correntes modais respectivamente.

A solução das equações (12) é dada pela soma de duas ondas viajantes com propagação em sentidos opostos, chamadas de ondas progressiva e regressiva:

$$\begin{aligned} V &= V_{fk} \cdot e^{-\gamma \cdot x} + V_{bk} \cdot e^{+\gamma \cdot x} \\ J &= \frac{1}{Z_c} \cdot V_{fk} \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{1}{Z_c} \cdot V_{bk} \cdot e^{+\gamma \cdot x}, \end{aligned} \quad (13)$$

sendo, $\gamma = \sqrt{Z'_{\text{mod}} \cdot Y'_{\text{mod}}}$: constante de propagação;

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z'_{\text{mod}}}{Y'_{\text{mod}}}} : \text{ impedância característica;}$$

x : distância de um ponto na linha ao terminal k ;

d : comprimento da linha de transmissão.

Considerando apenas a onda progressiva de tensão, que se propaga do terminal k para o terminal m da equação (13), tem-se:

$$V_f(x) = V_{fk} \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \text{ sendo, } V_{fk} = V_f(x) \Big|_{x=0}.$$

Ou seja, a tensão em um ponto x da linha é dada pelo produto da tensão no terminal de origem ($x = 0$) e um termo exponencial, que depende da constante de propagação e da distância x . No terminal m , teremos:

$$V_f(x) \Big|_{x=d} = V_{fk} \cdot e^{-\gamma \cdot d} \quad (14)$$

O termo exponencial da equação (14) é denominado de fator de propagação ou função de transferência da linha de transmissão, sendo definido como:

$$A = e^{-\gamma \cdot d} \quad (15)$$

Podemos combinar as equações (13), obtendo:

$$\begin{aligned} V + Z_c \cdot J &= 2 \cdot V_{fk} \cdot e^{-\gamma \cdot x} \\ V - Z_c \cdot J &= 2 \cdot V_{bk} \cdot e^{+\gamma \cdot x} \end{aligned} \quad (16)$$

Utilizando as equações (16), Dommel propôs o circuito equivalente da Figura 3 para cada modo de uma linha de transmissão sem perdas ($[R'] = 0$ e $[G'] = 0$ na equação (4)), no domínio do tempo.

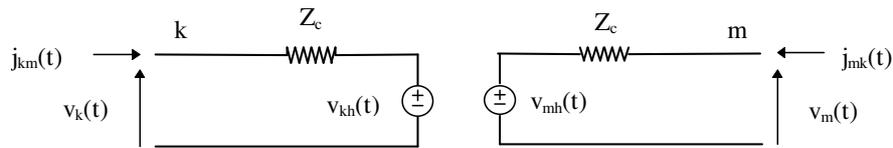


Figura 3. Circuito equivalente para uma linha de transmissão sem perdas.

$$\begin{aligned} \text{Sendo: } v_k(t) - Z_c \cdot j_{km}(t) &= v_m(t - \tau) + Z_c \cdot j_{mk}(t - \tau), \\ v_m(t) - Z_c \cdot j_{mk}(t) &= v_k(t - \tau) + Z_c \cdot j_{km}(t - \tau), \\ v_{kh}(t) &= v_m(t - \tau) + Z_c \cdot j_{mk}(t - \tau), \\ v_{mh}(t) &= v_k(t - \tau) + Z_c \cdot j_{km}(t - \tau). \end{aligned} \quad (17)$$

Sendo: τ o tempo de *trânsito* da linha, $Z_c = \sqrt{L'/C'}$ e $\gamma = j\omega \cdot \sqrt{L' \cdot C'} = j\omega \cdot (\tau/d)$.

Um modelo para representação mais rigorosa dos fenômenos eletromagnéticos deve considerar as perdas da linha e a dependência da frequência de seus parâmetros contudo, essa representação mais rigorosa do fenômeno implica em maior esforço matemático, haja vista a dependência dos parâmetros ser no domínio da frequência e a resposta desejada ser no domínio do tempo, implicando em transformação de domínios.

Na busca da simplificação do modelo dependente da frequência, J. Marti propôs representar $Z_c(\omega)$ e $A(\omega)$ por funções polinomiais racionais aproximadas para $Y_c(\omega)$ e $A(\omega)$, do tipo:

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = G \cdot \frac{(s + z_1) \cdot (s + z_2) \cdot (s + z_3) \cdots (s + z_n)}{(s + p_1) \cdot (s + p_2) \cdot (s + p_3) \cdots (s + p_m)} \quad (18)$$

Decompondo em frações parciais:

$$P(s) = k_\infty + \frac{k_1}{(s + p_1)} + \frac{k_2}{(s + p_2)} + \cdots + \frac{k_m}{(s + p_m)}, \text{ para } n = m \quad (19)$$

$$P(s) = \frac{k_1}{(s + p_1)} + \frac{k_2}{(s + p_2)} + \cdots + \frac{k_m}{(s + p_m)}, \text{ para } n < m.$$

Como $Z_c(\omega)$ corresponde a resposta de um sistema físico passivo que tende para um valor constante quando $\omega \rightarrow \infty$, o número de zeros deve ser igual ao número de pólos, ou seja, $n = m$ na equação (18). Considerando todos os pólos e zeros negativos reais e com multiplicidade um, cada modo da impedância característica, $Z_c(\omega)$, pode ser aproximada por uma conexão série-paralela de blocos RC. O circuito equivalente para $Z_c(\omega)$, é apresentado na Figura 4.

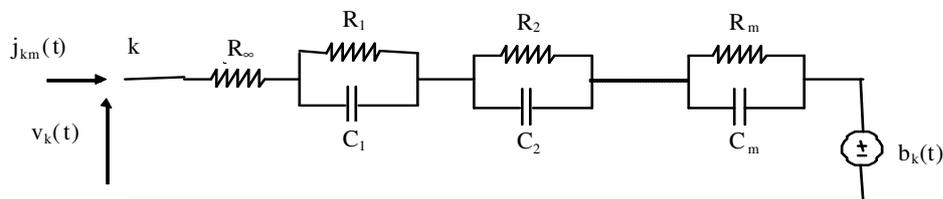


Figura 4. Equivalente RC para simular $Z_c(\omega)$ no domínio do tempo.

Dessa forma, quando a variação dos parâmetros $R(\omega)$, $L(\omega)$, $C(\omega)$ e $G(\omega)$ com a frequência não são considerados no modelo, diz-se que este é um modelo a parâmetros

distribuídos constante com a frequência (FC) e quando considerado, diz-se que é um modelo a parâmetros distribuídos dependentes da frequência (FD).

Modelo a Parâmetros Concentrados

Uma maneira simples de modelar uma linha de transmissão, do ponto de vista do esforço computacional, consiste na sua representação por elementos a parâmetros concentrados, calculados para uma frequência fixa, onde são consideradas a resistência, a indutância e a capacitância total da linha. Nessa modelagem, a resistência e a indutância são representadas por elementos em série e a capacitância por duas partes que são conectadas aos terminais da linha em *shunt*. Esse método é denominado modelo π (PI).

O uso do modelo π para estudos de transitórios eletromagnéticos restringe-se basicamente, a circuitos curtos e para estudos de regime permanente (FERNANDES, 2001). Para respostas mais próximas das observadas em campo, implementam-se cascatas π , para o estudo de transitórios eletromagnéticos (ARAÚJO e NEVES, 2005). A Figura 5 apresenta uma cascata de π para um circuito monofásico.

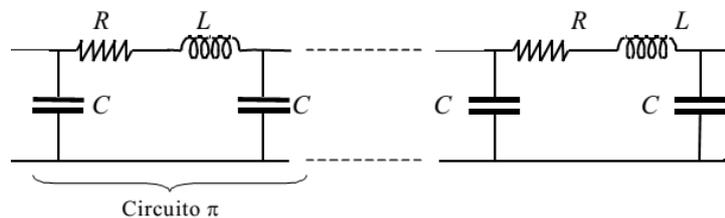


Figura 5. Representação de uma linha de transmissão monofásica através de cascata de circuitos PI (FERNANDES, 2001).

Para os circuitos polifásicos, o acoplamento entre as fases é representado pela capacitância mútua.

Modelos Computacionais

Ao longo dos anos, vários modelos computacionais foram propostos buscando representar linhas de transmissão para a simulação de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo. Estes modelos foram desenvolvidos visando à obtenção de um modelo ótimo quanto aos critérios de precisão e esforço computacional (NAIDU & LIMA, 1985; MARTI et al., 1985; MORENO, 1991; DOMMEL, 1992).

FERNANDES (1996) propõe um procedimento de otimização para o ajuste das funções racionais à $Yc(\omega)$ e $A(\omega)$. O autor mostra que o número de zeros e pólos das funções racionais aproximadas pode ser consideravelmente menor que aqueles obtidos utilizando o método de ajuste assintótico utilizado por J. Marti, com praticamente a mesma precisão. São realizadas simulações no domínio do tempo para linhas de transmissão monofásica e trifásica, demonstrando uma redução considerável do esforço computacional para simulação de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo.

GUSTAVSEN (2002) apresenta um modelo de linha híbrida, que reduz o esforço computacional sem perda de precisão, quando um ou mais circuitos do sistema de transmissão é tratado como continuamente transposto. Isto é obtido por meio da combinação de uma matriz de transformação constante com um número de modelos de linha monofásica (no domínio modal). Se nenhum dos circuitos for transposto, o modelo da linha transforma-se em um modelo de linha de domínio de fase completa.

Nesta dissertação é realizada a avaliação dos modelos obtidos através da rotina suporte LINE CONSTANTS (LEUVEN EMTP CENTER, 1987; Dommel, 1996) do ATP. São eles:

- Modelo a Parâmetros Distribuídos, constantes com a frequência: Modelo de K. C. Lee;
- Modelo a Parâmetros Distribuídos, dependentes da frequência: Modelo de J. Marti;
- Modelo a Parâmetros Concentrados: Modelo PI Nominal.

2.4 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO R^2

O coeficiente de determinação R^2 ou r^2 é uma medida da correlação entre duas variáveis é usado para indicar o quanto um modelo matemático é preciso na representação do fenômeno observado (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Considerando um valor observado y_i e um valor estimado \hat{y}_i , pode-se calcular o erro entre os dois valores $e_i = y_i - \hat{y}_i$. Escrevendo y_i em termos do valor médio observado, definido por \bar{y} , tem-se:

$$y_i = (y_i - \hat{y}_i) + (y_i - \bar{y}) + \bar{y} .$$

É possível demonstrar que:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (y_i - \bar{y})^2 .$$

De outro modo:

$$SQT = SQ_{Res} + SQ_{Exp},$$

sendo: SQT a soma dos quadrados total,

SQ_{Res} a soma dos quadrados dos resíduos

SQ_{Exp} a soma dos quadrados explicados ou explicitados pelo modelo.

O coeficiente de determinação R^2 é dado pelo valor de SQ_{Exp} normalizado por SQT :

$$R^2 = \frac{SQ_{Exp}}{SQT} = \frac{SQT - SQ_{Res}}{SQT} = 1 - \frac{SQ_{Res}}{SQT}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

sendo ($0 \leq R^2 \leq 1$).

O coeficiente de determinação pode ser interpretado como a proporção da variação de y que é explicada pelo seu valor estimado \hat{y} . Em outras palavras, quando o coeficiente de determinação R^2 tende a 1, os sinais comparados estão muito próximos entre si e quando R^2 tende a 0, os sinais comparados apresentam grande discrepância entre si.

Capítulo 3

ESTUDO DO MODELO DE REFERÊNCIA

Para os estudos iniciais de transitórios em LT foi adotado o modelo IEEE definido em *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing (RMRT)*. O modelo de referência é formado por vários componentes, com linhas de transmissão, transformadores, geradores, fontes equivalentes, chaves e disjuntores. Este modelo é apresentado na Figura 6.

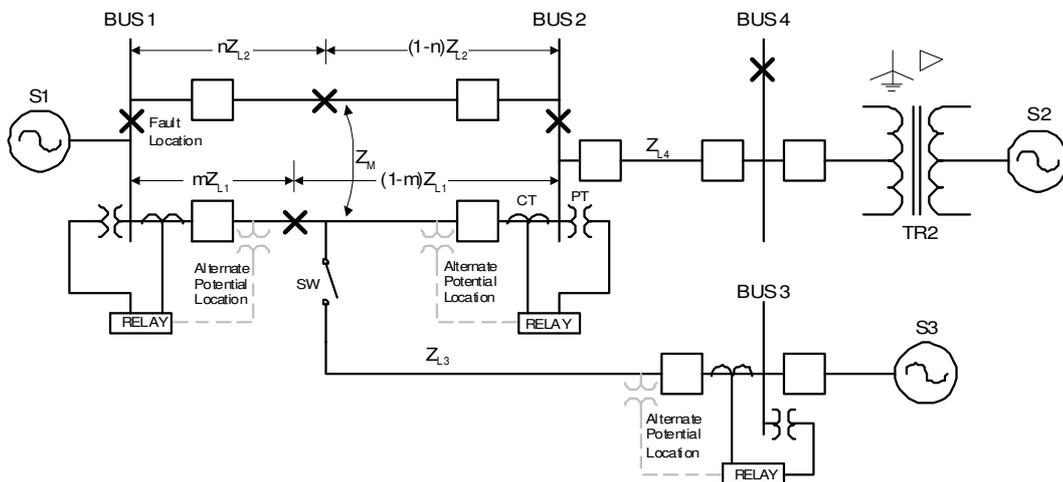


Figura 6. Modelo do sistema básico para teste de proteção de linha de transmissão (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).

O modelo é composto por quatro LT sendo duas, L1 e L2, mutuamente acopladas, em que L2 possui três terminais, sendo o terminal intermediário conectado através de chave à L3. Consideram-se todas as LT não transpostas. Além das LT, compõem o sistema

três fontes S1, S2 e S3, um transformador, disjuntores e nós que permitem a simulação das faltas variando o local e a topologia do sistema.

Os parâmetros físicos e o código em ATP para todos os seus componentes são apresentados no RMRT.

3.1 SIMULAÇÕES DO MODELO IEEE

Nesta etapa do estudo apresenta-se a metodologia que será aplicada para definição do modelo mais adequado para representação das LT que fazem parte do projeto piloto da Chesf.

Inicialmente, para simulação dos casos de interesse, implementou-se no ATP um modelo de chave, apresentado na Figura 8, que permite a parametrização do local da falta, as fases envolvidas, a influência ou não da resistência de falta e os valores das resistências de falta para o caso em estudo. A Figura 7 apresenta o detalhamento do modelo IEEE com os nomes dos nós ATP identificados. A Figura 8 apresenta o modelo de chave implementado para aplicação das faltas.

As simulações dos casos de transitórios eletromagnéticos foram realizadas para as faltas localizadas em L1 e L2.

No RMRT é disponibilizado o código ATP com os parâmetros de L1 e L2 gerados com o modelo de K. C. Lee, para circuitos acoplados e não-transpostos. Partindo-se dos parâmetros físicos das LT foram obtidos os parâmetros elétricos das LT para os modelos de K. C. Lee, J. Marti e PI, para linhas perfeitamente transpostas e não transpostas para os dois primeiros, permitindo o estudo comparativo dos modelos de LT.

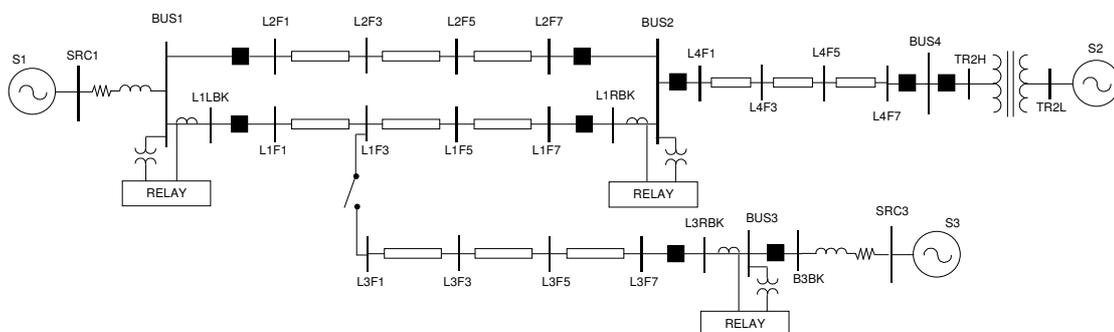


Figura 7. Versão detalhada do modelo do Sistema Básico com os nomes dos nós ATP. (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004)

Para cada um dos modelos gerados, foram simuladas as faltas fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e trifásica com resistências de falta de 20,5 Ω, energização de LT em carga e em vazio.

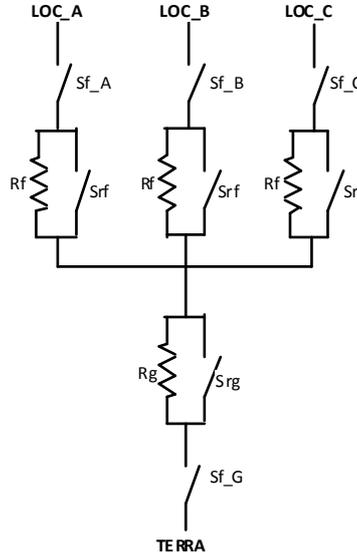


Figura 8. Modelo de chave para aplicação de falta.

Nos estudos de surtos atmosféricos, adotou-se uma fonte do tipo rampa dupla como fonte de injeção de corrente, definido pela amplitude (A), pelo tempo de frente de onda (t_f) e o tempo de calda (t_c) (Araújo e Neves, 2005). Para injeção do surto, considerou-se a existência de uma torre, no local do surto, modelada como uma linha monofásica representada pela impedância de surto (Z_s) juntamente com o tempo de trânsito da onda (τ) e a resistência de pé de torre (R_{pt}), além das cadeias de isoladores modeladas pela capacitância (C_i) em paralelo com a resistência (R_i), mais uma chave (S_i) controlada por tensão para simulação da ruptura do dielétrico (NEVES et al., 2002). O modelo da torre com as cadeias de isoladores é apresentado na Figura 9.

A impedância de surto e o tempo de trânsito da onda da torre podem ser calculados pela aproximação da estrutura a um cilindro ou a um cone (SLUIS, 2001), através das Equações 20 e 21, respectivamente.

$$Z = 60 \left(\ln \left(2\sqrt{2} \cdot \frac{h}{r} \right) - 1 \right), \text{ com } \tau = \frac{h}{0,85 \cdot c} \quad (20)$$

e

$$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right), \text{ com } \tau = \frac{h}{c}. \quad (21)$$

O valor da tensão de controle da chave controlada por tensão é definido por:

$$V_{cont} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot d, \quad (22)$$

sendo: d : o comprimento da cadeia de isoladores em m,

t : o tempo de frente de onda em μ s.

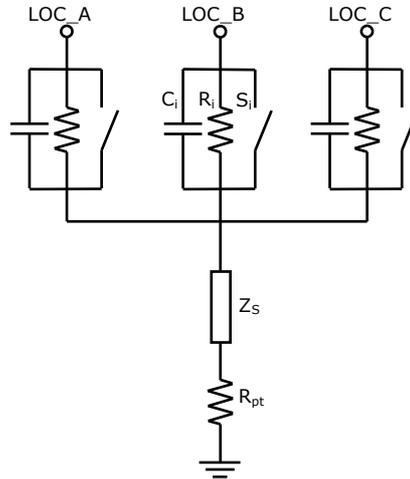


Figura 9. Modelo de torre com cadeias de isoladores para injeção de surto atmosférico.

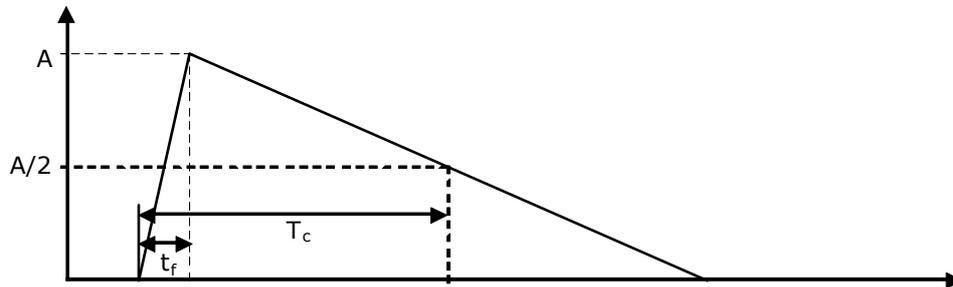


Figura 10. Forma de onda do sinal de corrente do surto atmosférico.

Resultados das Simulações do Modelo de Sistema IEEE

Para o teste dos modelos faltas permanentes foram aplicadas no nó L2F3 com tempo de pré-falta de cinco ciclos, passo de integração de $4,16 \cdot 10^{-6}$ s e tempo de simulação de 0,3333 s. Simulações de energização da LT L2 pelo terminal L2F1 com o terminal remoto, L2F7, energizado ou aberto foram realizadas. Considerou-se também, que a energização ocorre após cinco ciclos de simulação.

Por se tratar de um modelo teórico e portanto, não dispondo de grandezas reais para análise dos modelos de representação das LT, adotou-se como modelo de referência o obtido pelo método de J. Marti para LT não transposta. Para isso, considerou-se no código ATP as transposições das fases com rotação a cada 1/3 do comprimento da LT.

A avaliação dos modelos foi feita por meio do cálculo do coeficiente de determinação, R^2 , definido por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(V_{ref} - V_{modelo})^2}{\sum(V_{ref} - \bar{V}_{ref})^2}, \quad (23)$$

sendo: V_{ref} é o: valor de referência,

\bar{V}_{ref} é o: valor médio de referência,

V_{modelo} é: valor avaliado.

Foram registrados os valores de tensão e corrente nos nós terminais de L1, L1F1 e L1F7 e nos nós terminais de L2, L1L2F1 e L2F7. As Figura 11 e Figura 12 apresentam o comportamento das tensões e correntes medidas no nó L2F1 durante um curto-circuito trifásico, considerando o modelo de referência (J. Marti) para linhas não transpostas e o modelo PI, respectivamente.

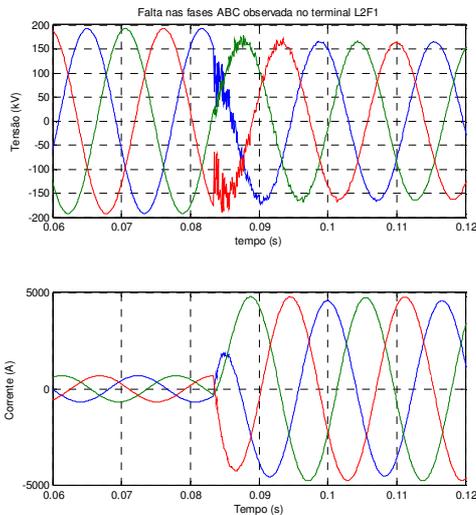


Figura 11. Gráfico de falta trifásica observada do terminal L2F1, obtido com o modelo de J. Marti para linhas não transpostas.

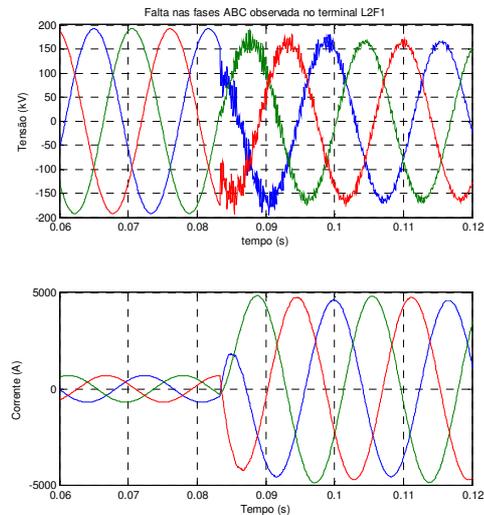


Figura 12. Gráfico de falta trifásica observada do terminal L2F1, obtido com o modelo PI com cascata de 3 seções.

Para análise dos registros de falta correspondente a cada um dos terminais, tipo de falta e modelo avaliado, foram obtidos os valores de R^2 para os sinais de tensão e corrente no intervalo que compreende os três ciclos seguintes a falta, identificando-se dentre os modelos propostos, os que mais se aproximam e divergem para cada caso.

A síntese das análises é apresentada nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Desempenho dos modelos de LT para o comportamento das tensões, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.

Modelo	Terminal	Tipo de Falta			
		AT	ABT	AB	ABC
PI Nominal	L1F1	0,99684	0,99768	0,99949	0,99407
PI Nominal	L1F7	0,99163	0,99186	0,99961	0,99359
PI Nominal	L2F1	0,99684	0,99768	0,99949	0,99407
PI Nominal	L2F7	0,99163	0,99186	0,99961	0,99359
J. Marti Transposto	L1F1	0,99977	0,99974	0,99992	0,99908
J. Marti Transposto	L1F7	0,99979	0,99955	0,99971	0,99636
J. Marti Transposto	L2F1	0,99977	0,99974	0,99992	0,99908
J. Marti Transposto	L2F7	0,99979	0,99955	0,99971	0,99636
K. C. Lee Não Transposto	L1F1	0,99776	0,99793	0,99978	0,99796
K. C. Lee Não Transposto	L1F7	0,99346	0,99264	0,99973	0,99723
K. C. Lee Não Transposto	L2F1	0,99776	0,99793	0,99978	0,99796
K. C. Lee Não Transposto	L1F4	0,99346	0,99264	0,99973	0,99723
K. C. Lee Transposto	L1F1	0,99763	0,99764	0,99976	0,99721
K. C. Lee Transposto	L1F7	0,99354	0,99164	0,99958	0,99425
K. C. Lee Transposto	L2F1	0,99763	0,99764	0,99976	0,99721
K. C. Lee Transposto	L2F7	0,99354	0,99164	0,99958	0,99425

Tabela 3. Desempenho dos modelos de LT para o comportamento das correntes, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.

Modelo	Terminal	Tipo de Falta			
		AT	ABT	AB	ABC
PI Nominal	L1F1	0,96387	0,97429	0,99862	0,99166
PI Nominal	L1F7	0,99229	0,98938	0,99696	0,98894
PI Nominal	L2F1	0,99786	0,99890	0,99974	0,99975
PI Nominal	L2F7	0,99732	0,99820	0,99930	0,99934
J. Marti Transposto	L1F1	0,99884	0,99821	0,99823	0,99422
J. Marti Transposto	L1F7	0,99683	0,99716	0,99644	0,98944
J. Marti Transposto	L2F1	0,99966	0,99943	0,99929	0,99883
J. Marti Transposto	L2F7	0,99898	0,99929	0,99909	0,99866
K. C. Lee Não Transposto	L1F1	0,99849	0,99908	0,99973	0,99841
K. C. Lee Não Transposto	L1F7	0,99864	0,99841	0,99922	0,99682
K. C. Lee Não Transposto	L2F1	0,99987	0,99981	0,99986	0,99977
K. C. Lee Não Transposto	L1F4	0,99956	0,99957	0,99962	0,99969
K. C. Lee Transposto	L1F1	0,99793	0,99775	0,99841	0,99367
K. C. Lee Transposto	L1F7	0,99589	0,99649	0,99655	0,98737
K. C. Lee Transposto	L2F1	0,99958	0,99941	0,99926	0,99883
K. C. Lee Transposto	L2F7	0,99863	0,99914	0,99900	0,99858

Embora a análise não tenha sido realizada com valores reais, os resultados obtidos corroboram com a literatura, ou seja, o modelo de menor precisão é o PI para maioria dos

casos, mesmo para o caso no qual a LT é modelada com três PI em cascata, o que o torna mais próximo do ideal. O modelo que mais se aproximou do caso de referência foi o de K. C. Lee para linhas não transpostas para o comportamento das correntes e o de J. Marti para linhas transpostas para o comportamento das tensões. Ressalta-se que os valores calculados de R^2 foram maiores que 0,99 para todos os casos analisados.

Para análise dos registros de energização pelo cálculo de R^2 , considerou-se o período de análise com início em 90% do ciclo anterior e termino após 3 ciclos a partir do fechamento do disjuntor. A Tabela 4 apresenta os resultados da análise. Nota-se que para os casos de energização em vazio, a corrente no terminal remoto da LT energizada é nula, não havendo, portanto, análise a ser feita.

Para energização de LT, constata-se que os resultados obtidos são bastante sensíveis ao modelo adotado para sua representação, apresentando melhores respostas os modelos que consideram parâmetros distribuídos e os dependentes da frequência.

Tabela 4. Desempenho dos modelos de LT para energização em carga e em vazio da LT L2 através do terminal L2F1, comparados ao modelo de J. Marti para linhas não transpostas.

Modelo	Terminal	Em carga		Em vazio	
		V	I	V	I
PI Nominal	L1F1	0,99980	0,15305	0,97343	0,10349
PI Nominal	L1F7	0,99947	0,97699	0,30959	0,32069
PI Nominal	L2F1	0,99980	0,12680	0,97288	0,44842
PI Nominal	L2F7	0,99947	0,97834	0,78992	NA
J. Marti Transposto	L1F1	0,99988	0,98476	1,00000	1,00000
J. Marti Transposto	L1F7	0,99952	0,97593	1,00000	1,00000
J. Marti Transposto	L2F1	0,99988	0,97686	1,00000	1,00000
J. Marti Transposto	L2F7	0,99952	0,97796	1,00000	NA
K. C. Lee Não Transposto	L1F1	0,99989	0,98448	0,99201	0,99205
K. C. Lee Não Transposto	L1F7	0,99980	0,97517	0,95739	0,99779
K. C. Lee Não Transposto	L2F1	0,99989	0,97507	0,99175	0,37286
K. C. Lee Não Transposto	L1F4	0,99980	0,97612	0,88444	NA
K. C. Lee Transposto	L1F1	0,99975	0,98664	0,99490	0,99645
K. C. Lee Transposto	L1F7	0,99920	0,97888	0,98364	0,99808
K. C. Lee Transposto	L2F1	0,99975	0,97968	0,99475	0,28340
K. C. Lee Transposto	L2F7	0,99920	0,98074	0,93525	NA

A Figura 13 apresenta o gráfico dos sinais de corrente e tensão da energização em vazio, observados no terminal L2F1 para o modelo de referência e o modelo PI. Observa-

se que no modelo PI, as reflexões das ondas viajantes levam um tempo maior para serem atenuadas.

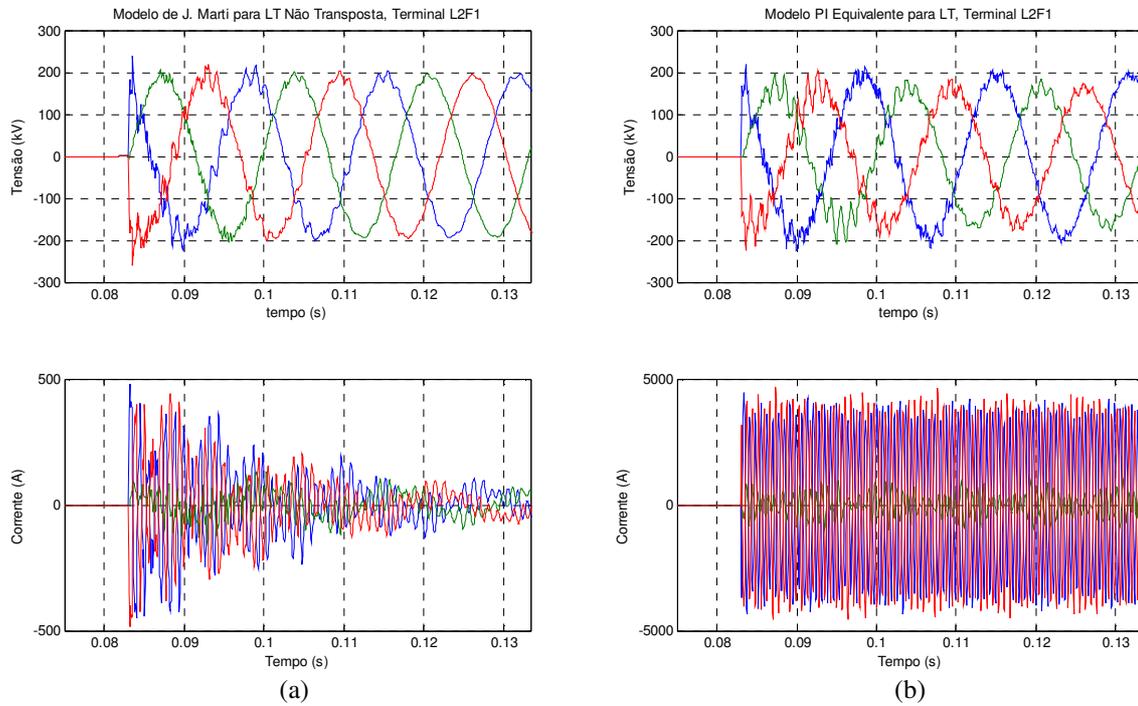


Figura 13. Formas de onda de tensão e corrente observados no terminal L2F1 durante a energização em vazio da LT L2. (a) Modelo de referência. (b) PI equivalente.

Na Figura 14 são apresentados os resultados obtidos para energização em carga da LT L2, observado no terminal L1F1 com os modelos de referência e o obtido pelo método de K. C. Lee para LT transposta. Os dois modelos apresentam respostas muito próximas, sendo possível observar a redução da carga da LT L1 no momento em que L2 é conectada ao sistema.

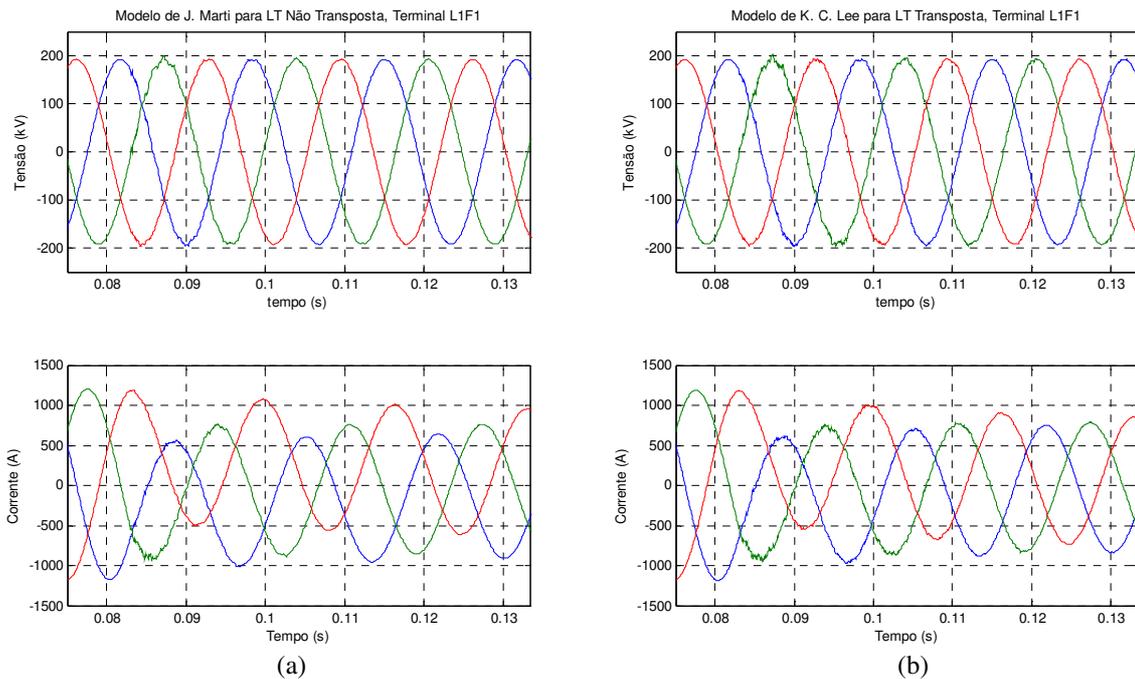


Figura 14. Formas de onda de tensão e corrente observados no terminal L1F1 durante a energização em carga da LT L2. (a) Modelo de referência. (b) K. C. Lee para LT Transposta.

Os resultados das simulações comprovam, portanto, as dificuldades de uso do modelo PI para representação de LT. Sendo assim, deve-se evitar a sua aplicação para estudos de transitórios eletromagnéticos. Os modelos de K. C. Lee e J. Marti se apresentam como opções mais robustas para esse fim, sendo o de K. C. Lee para linhas transpostas o mais simples para implementação de estudos de falta ao longo da linha, tendo em vista que os seus parâmetros não são dependentes do comprimento da linha.

SISTEMA PILOTO

O modelo piloto é composto por uma parte do sistema Chesf, contemplando 4 linhas de transmissão de 500 kV, 6 linhas de 230 kV, 4 barras de 500 kV, 5 barras de 230 kV e 6 autotransformadores 500/230 kV, conforme apresentado na Figura 15.

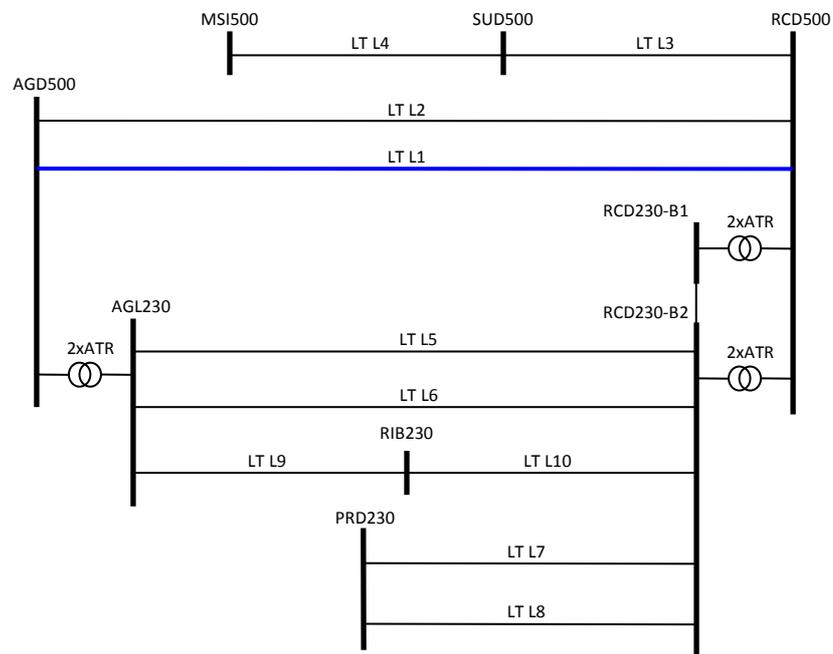


Figura 15. Diagrama unifilar do Sistema Piloto.

Nesse capítulo são apresentados os estudos para definição dos modelos a serem adotados para representação das LT. Os demais componentes do sistema são representados por modelos já utilizados pela Chesf.

4.1 MODELO DO SISTEMA CHESF NO ATP

Nesse trabalho é utilizado um caso base para estudos de transitórios eletromagnéticos no sistema de transmissão da Chesf. O modelo contempla a representação dos componentes principais do sistema, as linhas de transmissão, transformadores, autotransformadores, reatores, compensadores síncronos, banco de capacitores, dentre outros. Além dos equipamentos que pertencem ao sistema Chesf, são representados aqueles que apresentam influência significativa no sistema de transmissão como é o caso dos parques eólicos e termoelétricas. Não estão representados no modelo, os transformadores para instrumentos e os para-raios, além das chaves seccionadoras e disjuntores, que quando necessário, são representados por elementos de chaveamento simples disponíveis no ATP. São considerados equivalentes nas barras ULG 500 kV, PAQ 500 kV, JDM 230 kV, PAF 230 kV e CGD 230 kV.

A Figura 16 apresenta de forma simplificada o sistema representado pelo modelo no ATP.

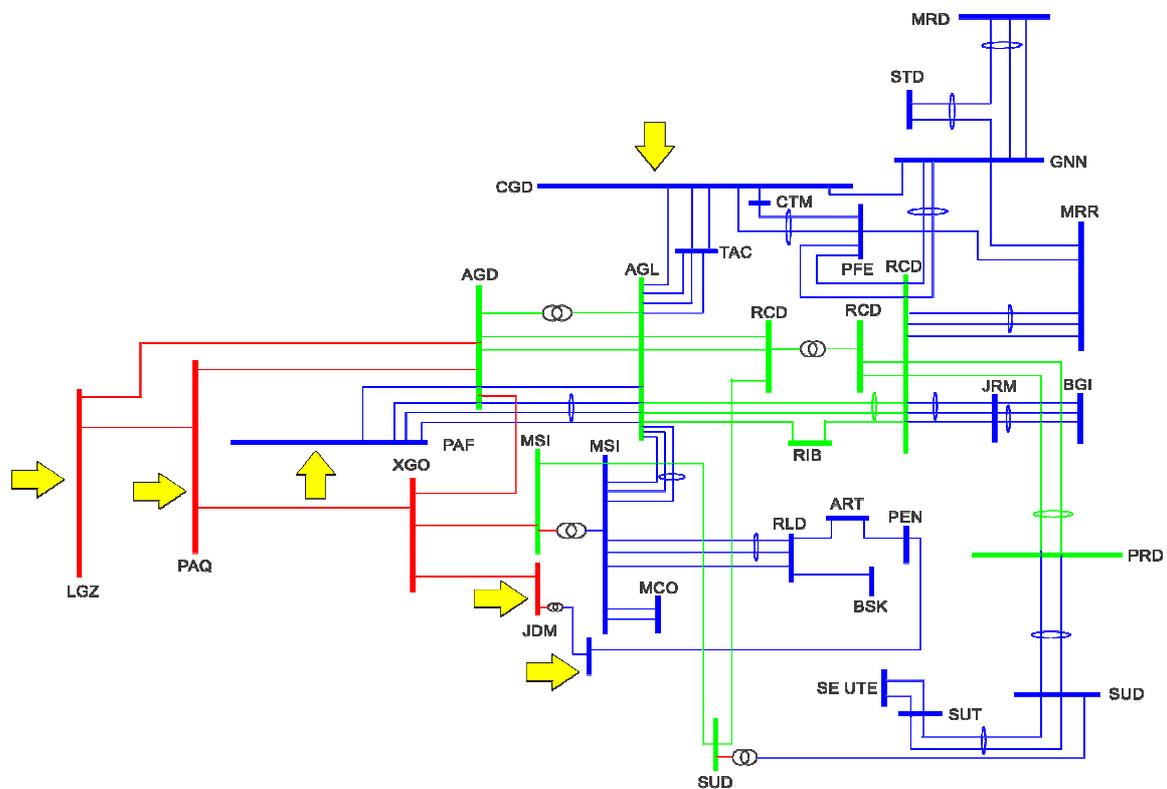


Figura 16. Diagrama unifilar do sistema Chesf representado pelo modelo ATP. O Sistema Piloto é destacado pela cor verde.

As barras e linhas que fazem parte do Sistema Piloto são apresentadas na cor verde.

Para o estudo do Sistema Piloto, fez-se nova modelagem apenas de suas linhas de transmissão. Os demais componentes foram mantidos, incluindo as linhas que não fazem parte do Sistema Piloto. Para a representação das linhas, foram utilizados modelos a parâmetros distribuídos e dependentes da frequência.

4.2 MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A modelagem matemática das LT do Sistema Piloto baseou-se nas informações do sistema físico disponíveis na Chesf. Foram utilizados dados contidos nos diagramas unifilares, nos desenhos do corte frontal da silhueta das estruturas típicas instaladas nas LT, no Sistema Integrado de Gestão de Ativos (SIGA) e as informações prestadas pelos órgãos normativos do seguimento de linha de transmissão.

Dos registros do SIGA, foram obtidas as seguintes informações vão a vão por LT:

- Identificação da estrutura;
- Tipo da estrutura;
- Altura útil: altura do solo ao cabo mais baixo sustentado pela estrutura;
- Comprimento do vão.

Tratando-se as informações disponíveis, foram obtidos os dados necessários para a modelagem das LT sob estudo. Utilizou-se o comprimento total da LT, a altura útil média dos vãos, o comprimento médio dos vãos, o tipo de cabo de fase, o tipo de cabos para-raios e a estrutura típica do circuito. A compilação dos dados referentes às LT é apresentada na Tabela 5 e as características dos condutores, na Tabela 6.

Tabela 5. Características físicas das LT que compõem o sistema piloto.

Circuito	Nº Cond/ fase	Nº Circ./ Torre	Comp. (km)	Alt. Útil Média (m)	Vão Médio (m)	Estr. Típica	Cabo PR	Cabo fase
AGD500-RCD500, 500 kV, L1	4	1	169,1	28,35	435,18	HB- AR2	Dotterel	Hawk
AGD500-RCD500, 500 kV, L2	4	1	170,7	29,72	489,88	A-1	Aço 3/8" EHS	Grosbeak
SUD500-RCD500, 500 kV, L3	4	1	45,4	31,26	463,27	A0	OPGW	Grosbeak
MSI500-SUD500, 500 kV, L4	4	1	176,6	30,26	486,40	A0	OPGW	Grosbeak
AGL230-RCD230, 230 kV, L5	1	2	171,7	18,50	436,85	A	Aço 3/8" HS	Grosbeak
AGL230-RCD230, 230 kV, L6	1	2	171,7	18,50	436,80	A	Aço 3/8" HS	Grosbeak
AGL230-RIB230, 230 kV, L9	1	1	115,7	22,81	473,78	A	Aço 3/8" HS	Grosbeak
RIB230-RCD230, 230kV, L10	1	1	56,6	21,88	429,57	A	Aço 3/8" HS	Grosbeak
RCD230-PRD230, 230kV, L7	1	2	27,6	18,30	447,43	A-21d	Aço 3/8" EHS	Grosbeak
RCD230-PRD230, 230kV, L8	1	2	27,6	18,30	444,94	A-21d	Aço 3/8" EHS	Grosbeak

Tabela 6. Características físicas dos condutores utilizados na construção das LT.

Cabo	Bitola	Diâmetro Externo (mm)	Rcc (Ohms/km)	Temp. Ref (°C)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)
Hawk	477 MCM	21,79	0,1199	20	974,9	10.590
Grosbeak:	636 MCM	25,15	0,08989	20	1299	11.340
Dotterel	176,9 MCM	15,42	0,3224	20	654,7	7.455
OPGW:	176,9 MCM	15,42	0,3224	20	654,7	7.455
Aço 3/8" HS:	3/8"	9,11	4,23244	30	406	4.899
Aço 3/8"EHS:	3/8"	9,11	4,23244	30	406	6.986

Conhecidas as características geométricas e elétricas das LT, pode-se então, com o auxílio da rotina LINE CONSTANTS (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), obter os modelos de representação. Os parâmetros de entrada para obtenção do modelo referente aos circuitos de interesse são apresentados no Anexo I.

Por não ser possível prever o local onde ocorrerá uma falta, foram gerados apenas os modelos de LT transpostas, de modo a facilitar a implementação dos casos de falta ao longo de toda linha. De outro modo, seria necessário verificar em qual trecho de linha a falta ocorrerá, para então seccionar o trecho e aplicar a falta.

4.3 AJUSTE DO CASO BASE

Gerados os modelos das linhas de transmissão, conforme apresentado na seção 4.2, procederam-se os ajustes necessários no caso base disponibilizado no ATP pela Chesf. Tais ajustes contemplaram além da substituição dos modelos das LT, a inclusão da chave para aplicação de falta, apresentada na seção 3.1 e uma rotina em linguagem de programação MODELS para emular o funcionamento de registrador digital de perturbação (RDP) e os relés digitais nos terminais das LT sob estudo.

A rotina em MODELS possibilita o registro dos sinais de tensão, corrente e o estado da chave no nó indicado. Além dessas informações, é registrado o instante da aplicação da falta. Esse instante é representado pelo estado da chave de aplicação de falta.

Por se tratar de reprodução de faltas ocorridas no sistema real, foram inseridas chaves controladas por tempo para simulação dos disjuntores terminais da LT, possibilitando dessa maneira a simulação da interrupção das faltas.

Para que a falta fosse aplicada no local correto ao longo da LT L1, a linha foi seccionada em duas partes de acordo com a localização do distúrbio ocorrido a ser estudado. Realizou-se também a adequação do modelo da LT L1 representado no caso base, de modo a possibilitar a simulação das faltas.

4.4 SIMULAÇÕES COM O SISTEMA PILOTO

Para os testes no Sistema Piloto, foram reproduzidas as faltas reais ocorridas ao longo da LT L1 que interliga as barras de AGD 500 kV e RCD 500 kV e registradas no sistema Chesf.

Como referência, foram utilizadas as informações contidas nos Relatórios de Análise de Desempenho da Proteção de quatro ocorrências nessa LT, sendo três faltas fase-terra e uma falta bifásica envolvendo as fases A e C.

A Tabela 7 apresenta as informações referentes às faltas ocorridas na LT L1 e registradas pelos sistemas de proteção e supervisão da Chesf.

Tabela 7. Informações de faltas reais ocorridas na LT L1 e registradas pelos sistemas de proteção e supervisão da Chesf.

Falta		Terminal AGD				Terminal RCD				Local da falta Inspeção (km)
Tipo	Fases	Localização (km)			El. Falta (ciclos)	Localização (km)			El. Fatal (ciclos)	
		PP	PS	RDP		PP	PS	RDP		
fase-fase	AC	79,4	79,7		3,0	105,2	105,7	102,1	3,0	71,46
fase-terra	C	30	29,7		2,5	149	149	126,3	4,0	
fase-terra	A	129	129	118,5	3,9	42,2	42,2	43,55	2,9	
fase-terra	B	140	140		3,8	44,4	45,1	-	2,9	

Como os locais das faltas fase-terra não foram confirmados por inspeção, adotou-se a média aritmética das distâncias indicadas pelos relés de proteção a partir da barra de AGD. Esses valores são indicados na Tabela 8.

Tabela 8. Localizações adotadas para simulação das faltas ocorridas na LT L1.

Falta		Local da falta adotado (km)
Tipo	Fases	
Fase-fase	AC	71,46
Fase-terra	CT	24,98
Fase-terra	AT	127,95
Fase-terra	BT	132,18

Foram simuladas as quatro faltas com as características apresentadas anteriormente com os modelos de LT disponibilizados pela Chesf e os desenvolvidos nesse trabalho para parâmetros distribuídos, dependentes da frequência e PI. É importante destacar que para o modelo PI, as LT foram representadas com um único trecho, ou seja, não foram implementadas cascatas de PI, à exceção da LT onde são aplicadas as faltas para a qual foram considerados dois trechos.

No caso da simulação com os modelos a parâmetros distribuídos dependentes da frequência e o PI, foram gerados quatro modelos para LT L1, um para cada local de falta, dividindo a LT em duas partes. Para os modelos a parâmetros distribuídos constantes, esse procedimento não foi necessário, haja vista o desacoplamento entre os parâmetros da LT e o seu comprimento, o que possibilita a definição dos comprimentos dos trechos de linha no momento da simulação.

Os dispositivos implementados utilizando a rotina MODELS, para registro dos sinais da perturbação, foram parametrizados para registrar os sinais nos dois terminais da LT, antes e após os disjuntores.

Resultados das Simulações com o Sistema Piloto

As simulações com os modelos foram realizadas no ATP, considerando um tempo de pré-falta de três ciclos, passo de integração de $2,0 \cdot 10^{-6} s$ e tempo de simulação de 0,600 s. Procedeu-se a simulação das quatro faltas apresentadas anteriormente para o modelo adotado no caso base da Chesf e para os modelos a parâmetros distribuídos, dependentes da frequência e PI.

Para análise das respostas obtidas com as simulações, procedeu-se a amostragem dos sinais com frequências semelhantes às dos relés digitais e RDP instalados nos terminais da LT. Antes da amostragem, os sinais foram filtrados através de um filtro passa baixa, *anti-aliasing*, com frequência de corte definida por

$$f_c = 0,8 \cdot 0,5 \cdot f \cdot NCD, \quad (24)$$

sendo: f_c : frequência de corte;

f : frequência do sistema;

NCD : número de amostras por ciclo do dispositivo.

Na Figura 17 são mostrados os sinais registrados pelo RDP para a falta monofásica a terra (fase C) ocorrida a 24,98 km a partir do terminal AGD e observadas nesse terminal, comparados com os valores simulados utilizando os modelos de J. Marti, K. C. Lee, PI e o disponibilizado pela Chesf. Foram consideradas as condições de falta semelhantes.

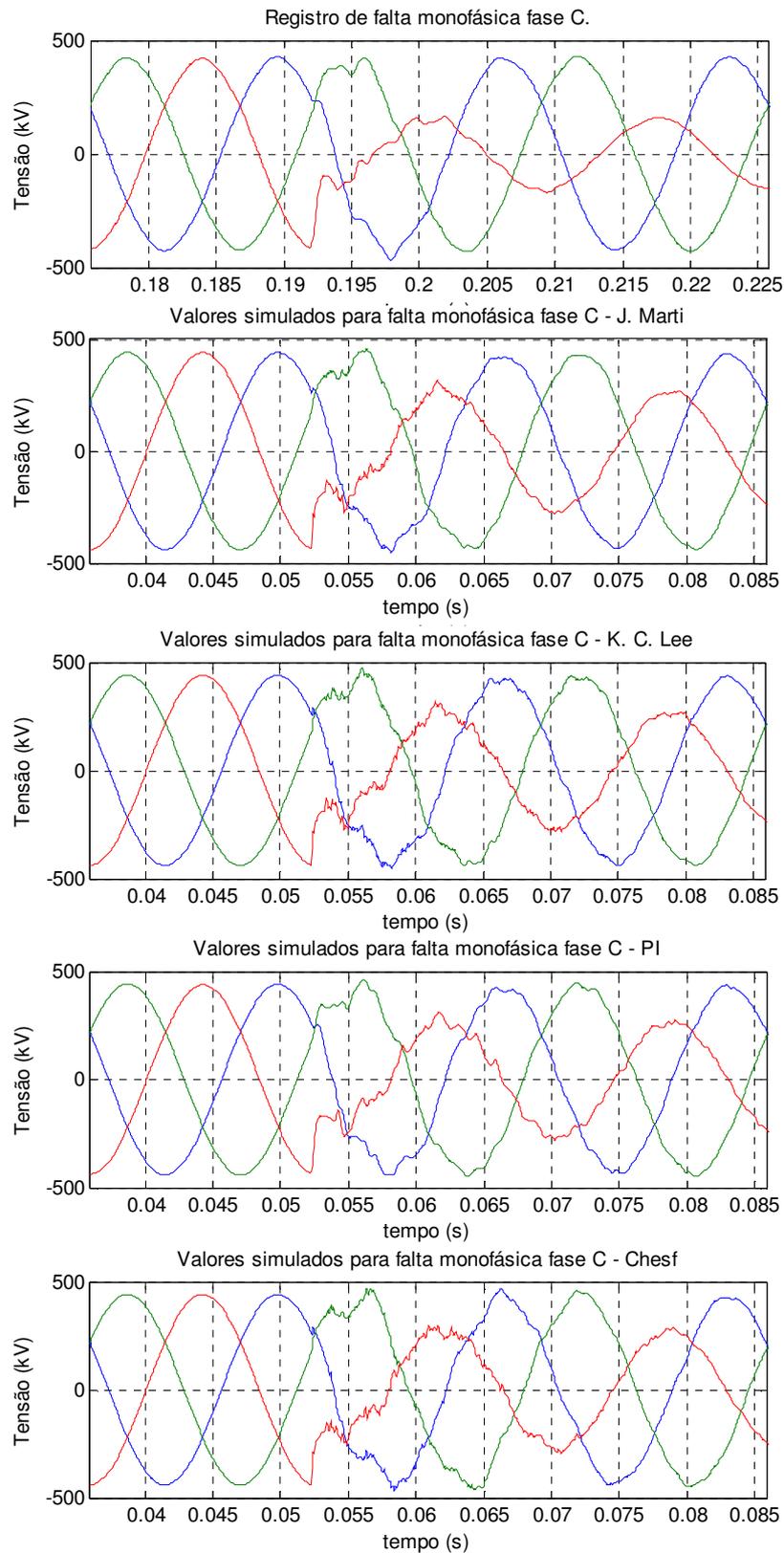


Figura 17. Sinais registrados de falta monofásica fase C a terra e os obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti, do modelo de K. C. Lee, do modelo PI e do modelo disponibilizado pela Chesf.

Por avaliação visual, observa-se que os sinais obtidos por simulação se aproximam dos valores de campo registrados pelo RDP. Percebe-se também, que os valores simulados apresentam mais oscilações de alta frequência, que podem ser explicadas pelo fato de serem valores calculados para o terminal da linha, enquanto que, os valores medidos são referentes aos terminais dos transformadores para instrumentos conectados ao terminal.

Na análise gráfica dos resultados, foram constatados problemas com os registros de campo das faltas estudadas.

A corrente da fase C referente à falta desta à terra, tendeu a zero, quando se esperava sua elevação e também com os registros de corrente da falta da fase B à terra no terminal de RCD se apresentam com polaridades invertidas. Estas constatações podem ser observadas nas Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

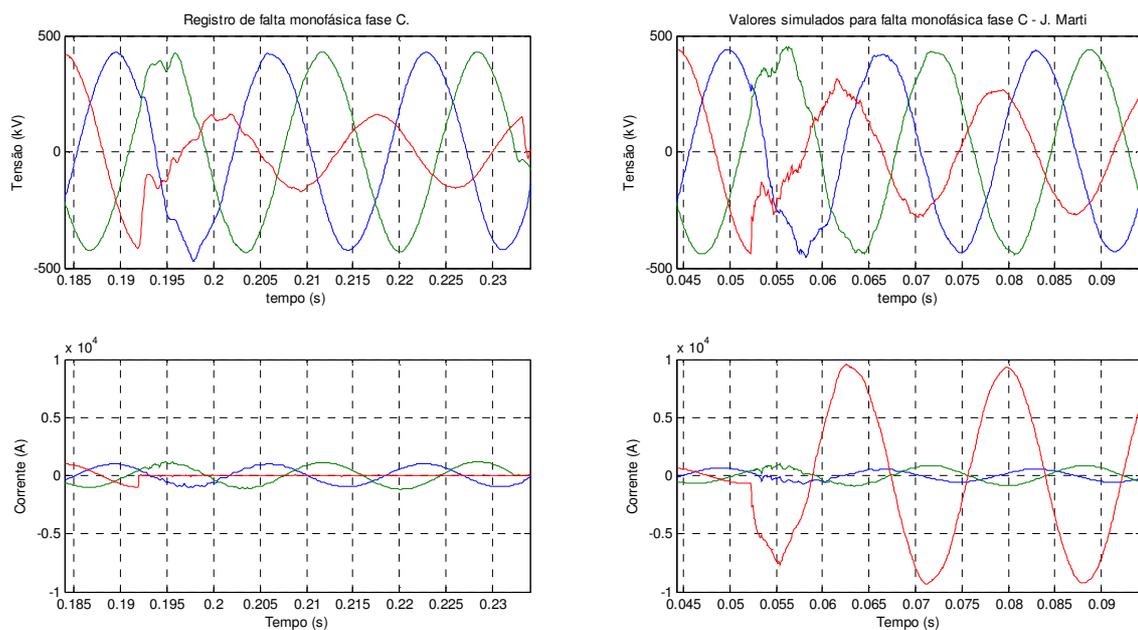


Figura 18. Sinais de tensão e corrente registrados no terminal de AGD da falta monofásica fase C à terra e obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti.

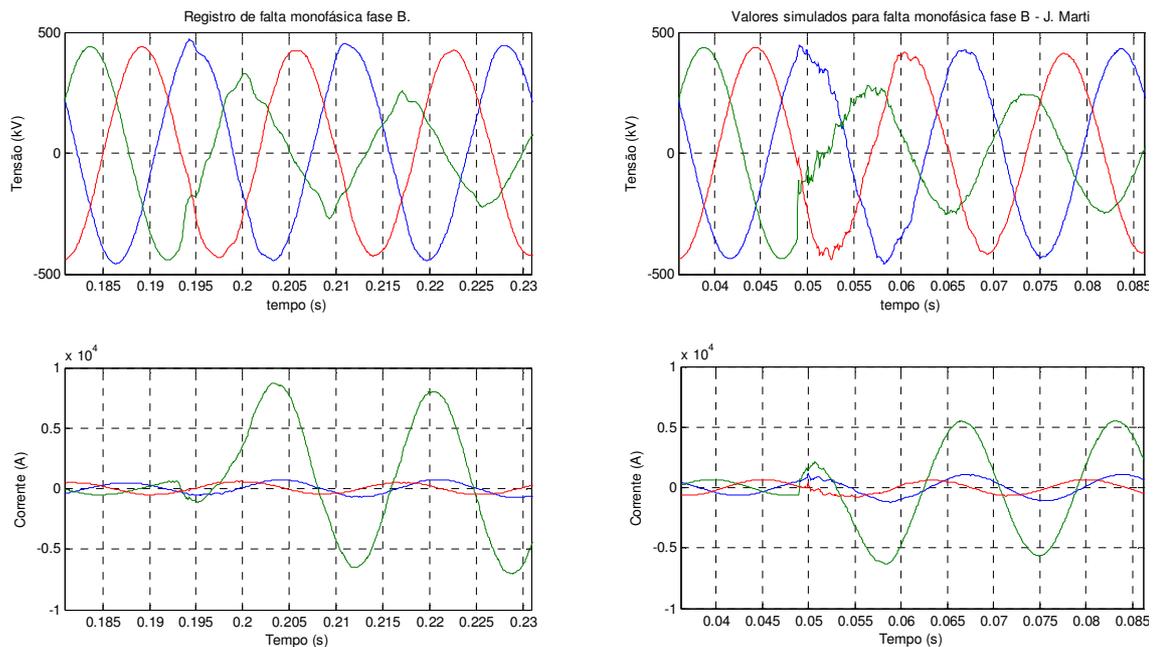


Figura 19. Sinais de tensão e corrente registrados no terminal de RCD da falta monofásica fase B à terra e obtidos por simulação com uso do modelo de J. Marti.

Para análise numérica dos resultados obtidos, foram calculados os valores do coeficiente de determinação R^2 , adotando como referência os valores registrados pelos RDP. Em função dos registros disponíveis, a análise restringiu-se a falta da fase B à terra nos dois terminais e a falta da fase C à terra apenas no terminal de AGD.

A fim de viabilizar a análise dos sinais de corrente para falta da fase B à terra no terminal de RCD, procedeu-se inicialmente a rotação de 180 graus deste sinal. Referente aos sinais de corrente da falta da fase C à terra no terminal de AGD, não realizou-se análise e função da notória discrepância.

Os valores de R^2 para os sinais de tensão e corrente são apresentados nas Tabela 9 e 10.

A análise do coeficiente de determinação R^2 , calculado para cada um dos casos estudados, demonstra que a resposta mais próxima do valor medido foi obtida com o uso do modelo de J. Marti. Contudo, é importante observar que a variação desse valor é pequena e a semelhança entre o sinal simulado e medido é superior a 94,0%, chegando a 98,7% para os sinais de tensão e para os sinais de corrente variou de 86,3% a 90,0%.

Tabela 9. Valores de R^2 para avaliação dos valores das tensões simuladas, comparadas aos registros de falta real registrados com o RDP.

Modelo	Terminal	Tipo de Falta			
		AC	AT	BT	CT
J. Marti	AGD			0,9874	0,9504
J. Marti	RCD			0,9766	
K. C. Lee Transposto	AGD			0,9846	0,9492
K. C. Lee Transposto	RCD			0,9708	
PI Nominal	AGD			0,9870	0,9494
PI Nominal	RCD			0,9751	
Utilizado pela Chesf	AGD			0,9841	0,9459
Utilizado pela Chesf	RCD			0,9767	

Tabela 10. Valores de R^2 para avaliação dos valores das correntes simuladas, comparadas aos registros de falta real registrados com o RDP.

Modelo	Terminal	Tipo de Falta			
		AC	AT	BT	CT
J. Marti	AGD			0,9059	NA
J. Marti	RCD			0,8789	
K. C. Lee Transposto	AGD			0,8885	NA
K. C. Lee Transposto	RCD			0,8614	
PI Nominal	AGD			0,8967	NA
PI Nominal	RCD			0,8761	
Utilizado pela Chesf	AGD			0,8901	NA
Utilizado pela Chesf	RCD			0,8638	

A semelhança observada para os resultados pode ser explicada pelo fato de os sinais simulados serem filtrados, com o objetivo de compatibilizá-los com os sinais de campo que também passam por processo semelhante. Desse modo, as componentes de alta frequência, inerentes aos transitórios eletromagnéticos, são suprimidas tornando as respostas próximas umas das outras.

Embora seja um modelo a parâmetros distribuídos constante na frequência, em alguns casos, os resultados mais discrepantes dos valores reais foram os obtidos através da simulação realizada com o modelo utilizado pela Chesf. Este fato pode ser explicado devido ao modelo utilizar precisão simples ou ainda, o fato de que alguns modelos de LT apresentem comprimentos um pouco divergentes dos dados de campo, levantados durante este trabalho.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Foi realizada de forma sistematizada a obtenção e tratamento de dados, destinados a elaboração de modelos de linhas de transmissão para aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos. A partir dos dados obtidos, foram gerados modelos para as dez linhas de transmissão que compõem o Sistema Piloto de diagnóstico de desempenho da proteção. Os modelos foram gerados utilizando os métodos de J. Marti, K. C. Lee e PI nominal, com uso de rotina suporte do ATP.

Para analisar a qualidade dos modelos estudados, foram realizadas simulações de faltas com as mesmas características de faltas reais e comparadas a semelhança entre os valores reais e simulados através do coeficiente de determinação R^2 .

Como resultado, observou-se que o modelo mais completo, estudados por J. Marti, apresentou respostas mais próximas às observadas em campo. Contudo, todos os modelos analisados neste trabalho apresentaram resultados para R^2 superiores a 0,94, o que pode ser interpretado com sendo uma semelhança dos valores simulados com os valores de campo de 94%.

Diante da semelhança de resultados obtidos, para o estudo do desempenho de cadeias de proteção em resposta aos transitórios eletromagnéticos, é possível fazer uso de qualquer dos modelos analisados, levando-se em consideração, para tomada de decisão a facilidade de uso de um modelo ou outro para o caso em estudo.

Durante a avaliação dos modelos das LT, constatou-se falhas nos circuitos de medição de corrente, reforçando a importância de se ter sistemas de suporte a análise de desempenho das cadeias de proteção.

Como proposta de trabalhos futuros, podemos citar:

- Avaliar o comportamento dos modelos com a introdução dos transformadores para instrumentos;
- Avaliar e adequar os modelos propostos para os estudos com descargas atmosféricas;
- Automatizar a definição do ângulo de falta para uso nos estudos;
- Desenvolver uma rotina/*software* para a preparação de modelos de LT, tendo como fonte a base de dados de campo referente a estas linhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- DOMMEL, H. **EMTP Theory Book**. 2ª. ed. Vancouver B. C.: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- FERNANDES, A. B. **Linhas de Transmissão: Modelo Otimizado para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
- FERNANDES, A. B. **Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- GUSTAVSEN, B. Frequency-Dependent Transmission Line Modeling Utilizing Transposed Conditions. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, XVII, Julho 2002. 834-839.
- LEUVEN EMTP CENTER. ATP – Alternative Transients Program - Rule Book, Heverlee, Belgium, July 1987.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Power System Transients: Parameter Determination**. [S.l.]: CRC Press, 2010.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia Estatística**. 2ª. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.
- NEVES, W. L. A. et al. **Ocorrência na Chave 32BA-1, Subestação Bongí/CHESF**. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2002.
- POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing**. IEEE - Power & Energy Society. [S.l.]. 2004.

SLUIS, L. V. D. **Transients in Power Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

Anexo I

PARÂMETROS DAS LT REFERENTES AOS CIRCUITOS DO SISTEMA PILOTO

Os parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), para obtenção dos modelos referentes aos circuitos de interesse são apresentados nas Tabelas 11 a 18.

Tabela 11. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGD500-RCD500, 500 kV, L1.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	0,32240	1,542	-6,10	37,15	26,75
1	0,5	0,11990	2,179	-9,77	29,81	18,91
1	0,5	0,11990	2,179	-10,23	29,81	18,91
1	0,5	0,11990	2,179	-10,23	29,35	18,45
1	0,5	0,11990	2,179	-9,77	29,35	18,45
2	0,5	0,11990	2,179	0,23	28,81	17,91
2	0,5	0,11990	2,179	-0,23	28,81	17,91
2	0,5	0,11990	2,179	-0,23	28,35	17,45
2	0,5	0,11990	2,179	0,23	28,35	17,45
3	0,5	0,11990	2,179	10,23	29,81	18,91
3	0,5	0,11990	2,179	9,77	29,81	18,91
3	0,5	0,11990	2,179	9,77	29,35	18,45
3	0,5	0,11990	2,179	10,23	29,35	18,45

Tabela 12. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGD500-RCD500, 500 kV, L2.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	4,23244	0,911	-8,40	39,22	30,50
0	0,5	4,23244	0,911	8,40	39,22	30,50
1	0,5	0,08989	2,515	-10,57	30,18	12,99
1	0,5	0,08989	2,515	-11,03	30,18	12,99
1	0,5	0,08989	2,515	-11,03	29,72	12,53
1	0,5	0,08989	2,515	-10,57	29,72	12,53
2	0,5	0,08989	2,515	0,23	30,18	12,99
2	0,5	0,08989	2,515	-0,23	30,18	12,99
2	0,5	0,08989	2,515	-0,23	29,72	12,53
2	0,5	0,08989	2,515	0,23	29,72	12,53
3	0,5	0,08989	2,515	11,03	30,18	12,99
3	0,5	0,08989	2,515	10,57	30,18	12,99
3	0,5	0,08989	2,515	10,57	29,72	12,53
3	0,5	0,08989	2,515	11,03	29,72	12,53

Tabela 13. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito SUD500-RCD500, 500 kV, L3.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	0,3224	1,54	-9,85	40,76	28,98
0	0,5	0,3224	1,54	9,85	40,76	28,98
1	0,5	0,0899	2,515	-10,57	31,72	16,35
1	0,5	0,0899	2,515	-11,03	31,72	16,35
1	0,5	0,0899	2,515	-11,03	31,26	15,89
1	0,5	0,0899	2,515	-10,57	31,26	15,89
2	0,5	0,0899	2,515	0,23	31,72	16,35
2	0,5	0,0899	2,515	-0,23	31,72	16,35
2	0,5	0,0899	2,515	-0,23	31,26	15,89
2	0,5	0,0899	2,515	0,23	31,26	15,89
3	0,5	0,0899	2,515	11,03	31,72	16,35
3	0,5	0,0899	2,515	10,57	31,72	16,35
3	0,5	0,0899	2,515	10,57	31,26	15,89
3	0,5	0,0899	2,515	11,03	31,26	15,89

Tabela 14. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito MSI500-SUD500, 500 kV, L4.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	0,32240	1,54	-9,85	39,76	26,78
0	0,5	0,32240	1,54	9,85	39,76	26,78
1	0,5	0,08989	2,515	-10,57	30,72	13,78
1	0,5	0,08989	2,515	-11,03	30,72	13,78
1	0,5	0,08989	2,515	-11,03	30,26	13,32
1	0,5	0,08989	2,515	-10,57	30,26	13,32
2	0,5	0,08989	2,515	0,23	30,72	13,78
2	0,5	0,08989	2,515	-0,23	30,72	13,78
2	0,5	0,08989	2,515	-0,23	30,26	13,32
2	0,5	0,08989	2,515	0,23	30,26	13,32
3	0,5	0,08989	2,515	11,03	30,72	13,78
3	0,5	0,08989	2,515	10,57	30,72	13,78
3	0,5	0,08989	2,515	10,57	30,26	13,32
3	0,5	0,08989	2,515	11,03	30,26	13,32

Tabela 15. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para os circuitos AGL230-RCD230, 230 kV, L5 e L6.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	4,2324	0,911	-2,13	37,05	30,12
0	0,5	4,2324	0,911	2,13	37,05	30,12
1	0,5	0,0899	2,515	-5,79	31,91	18,24
2	0,5	0,0899	2,515	-5,79	25,20	11,54
3	0,5	0,0899	2,515	-5,79	18,50	4,83
4	0,5	0,0899	2,515	5,79	31,91	18,24
5	0,5	0,0899	2,515	5,79	25,20	11,54
6	0,5	0,0899	2,515	5,79	18,50	4,83

Tabela 16. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para os circuitos RCD230-PRD230, 230 kV, L7 e L8.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	4,23244	0,911	-2,40	35,70	28,42
0	0,5	4,23244	0,911	2,40	35,70	28,42
1	0,5	0,08989	2,515	-5,50	30,30	15,96
2	0,5	0,08989	2,515	-5,50	24,30	9,96
3	0,5	0,08989	2,515	-5,50	18,30	3,96
4	0,5	0,08989	2,515	5,50	30,30	15,96
5	0,5	0,08989	2,515	5,50	24,30	9,96
6	0,5	0,08989	2,515	5,50	18,30	3,96

Tabela 17. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito AGL230-RIB230, 230 kV, L9.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	4,23244	0,911	-2,13	41,37	33,21
0	0,5	4,23244	0,911	2,13	41,37	33,21
1	0,5	0,08989	2,515	-5,79	36,22	20,15
2	0,5	0,08989	2,515	-5,79	29,52	13,45
3	0,5	0,08989	2,515	-5,79	22,81	6,74

Tabela 18. Parâmetros de entrada da rotina LINE CONSTANTS para o circuito RIB230-RCD230, 230 kV, L10.

Condutor	skin	resist (ohms/km)	diam (cm)	H torre (m)	V torre (m)	Vmid (m)
0	0,5	4,23244	0,911	-2,13	40,43	33,73
0	0,5	4,23244	0,911	2,13	40,43	33,73
1	0,5	0,08989	2,515	-5,79	35,29	22,08
2	0,5	0,08989	2,515	-5,79	28,58	15,37
3	0,5	0,08989	2,515	-5,79	21,88	8,67