



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia
DSCE-FEEC-UNICAMP



Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão

Autora: Michelly Alcantara de Freitas

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Sérgio Kurokawa – DEE/FEIS/UNESP

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para o preenchimento dos requisitos parciais exigidos à obtenção do Título de **MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Pissolato Filho – DSCE/FEEC/UNICAMP

Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha – DEE/UFPA

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares – DSCE/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari – DSEE/FEEC/UNICAMP

CAMPINAS
2007

Autora: Michelly Alcantara de Freitas
Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho
Co-Orientador: Prof. Dr. Sérgio Kurokawa – DEE/FEIS/UNESP

Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão

Título em Inglês: A Contribution to the Study of the Corona Effect in Transmission Lines

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para o preenchimento dos requisitos parciais exigidos à obtenção do Título de **MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA ELÉTRICA (AF)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Pissolato Filho – DSCE/FEEC/UNICAMP
Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha – DEE/UFPA
Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares – DSCE/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari – DSEE/FEEC/UNICAMP

Campinas, 15 de Junho de 2007.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE – UNICAMP**

F884c Freitas, Michelly Alcantara de
Uma contribuição ao estudo do efeito corona em linhas de transmissão / Michelly Alcantara de Freitas. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: José Pissolato Filho, Sérgio Kurokawa
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Linhas elétricas aéreas. 2. Corona (Eletricidade). 3. Transitórios (Eletricidade). 4. Modelos matemáticos. 5. Energia elétrica - Transmissão. I. Pissolato Filho, José. II. Kurokawa, Sérgio. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: A Contribution to the study of the corona effect in transmission lines
Keywords: Area electric lines, Corona (Electricity), Transients (Electricity),
Mathematics models, Electric Power - Transmission.

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Brígida Ramati Pereira da Rocha, Maria Cristina Dias Tavares,
Carlos Alberto Favarin Murari

Data da defesa: 15/06/2007

Programa de Pós-Graduação: Mestrado em Engenharia Elétrica

**Dissertação de Mestrado Defendida em 15 de Junho de 2007,
Aprovada pela Banca Examinadora e Corrigida pelo Orientador.**

Foi declarado que a aluna **Michelly Alcantara de Freitas** defendeu Dissertação de **Mestrado** intitulada “**Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão**”, na área de **Energia Elétrica**, no dia **15 de Junho de 2007**, perante a banca examinadora composta pelos Professores Doutores **José Pissolato Filho, Brígida Ramati Pereira da Rocha, Maria Cristina Dias Tavares e Carlos Alberto Favarin Murari**, tendo sido considerada **APROVADA**.

Campinas, 15 de Junho de 2007.

Prof. Dr. José Pissolato Filho
DSCE/FEEC/UNICAMP

Agradecimentos

Quero expressar meu profundo e sincero agradecimento:

- A Deus;
- Aos meus pais, Ercilia e Lourival, pelo suporte e incentivo dados ao longo de toda a minha vida e, sobretudo, pela confiança depositada para que eu fosse sempre adiante;
- Ao Diogo, pelo constante apoio e idéias inspiradoras;
- A Edilene Pelaes (D. Pelaes) pelo grande apoio e pelos deliciosos bolos finos;
- Aos Professores *José Pissolato Filho* (orientador) e *Sérgio Kurokawa* (co-orientador), por suas excelentes orientações, pela confiança depositada, estímulo, paciência, amizade e respeito;
- À Universidade Estadual de Campinas, por sua excelente qualidade acadêmica;
- A todos os amigos do Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE) e do Laboratório de Alta Tensão (LAT), pela amizade, respeito e disposição em ajudar;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro, fundamental na realização deste trabalho.

Ao Diogo que tanto me ajudou com a programação no MatLab e soube me compreender em diversas situações; aos meus pais pelo carinho e a todos que me ajudaram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Neste trabalho é mostrado um estudo a respeito do efeito corona em linhas de transmissão. A linha de transmissão foi representada por meio de uma cascata de circuitos π e o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha foi representado por meio de uma associação série e paralela de resistores e indutores. Neste trabalho o efeito corona foi representado por meio dos modelos de Gary e de Skilling-Umoto devido ao fato destes modelos permitirem a sua inserção na cascata de circuitos π . O sistema mencionado anteriormente foi utilizado para representar a linha por meio de variáveis de estado, onde as equações de estado são a corrente longitudinal e a tensão transversal em cada um dos circuitos π . O modelo desenvolvido foi utilizado para simular as sobretensões originadas por uma descarga atmosférica em uma linha monofásica. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais mostrados em outros trabalhos. Esta comparação mostrou que os resultados obtidos com o modelo proposto são bem próximos aos resultados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: atenuação, cascata de circuitos π , domínio do tempo, efeito corona, linhas de transmissão, parâmetros variáveis com a frequência, técnica de variáveis de estado.

Abstract

In this work it is presented a study about the corona effect in transmission lines. The line was represented as being a cascade of π circuits and the frequency dependence of the longitudinal parameters of the line was synthesized with series and parallel resistors and inductors. In this work was used the Gary's model and Skilling-Umoto model for representing the corona effect because they can be inserted in the cascade of π circuits. With the system above mentioned, a state model of the line was obtained using longitudinal currents and transversal voltages in each π circuit as the state variables. The proposed model was used to simulate the overvoltages resulting of a lighting surge in a single-phase line. The simulation results were compared with experimental results that are available in several papers. It is possible to conclude that results obtained with proposed model are in agreement with experimental results.

Keywords: attenuation, cascade of π circuits, corona effects, frequency dependence, state space methods, time domain analysis, transmission lines.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Estrutura do Trabalho	x

Capítulo 1: Introdução

1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Motivação	2

Capítulo 2: Linhas de Transmissão

2.1 Introdução	5
2.2 Sistema de Energia Elétrica - SEE	6
2.3 Linhas de Transmissão	7
2.3.1 Análise dos Parâmetros das Linhas de Transmissão em Baixas Frequências	10
2.3.1.1 Resistência Série	11
2.3.1.2 Indutância Série	12
2.3.1.3 Capacitância em Derivação	14
2.4 Propagação de Ondas em Linhas de Transmissão	16
2.5 Equações de Propagação de Ondas numa Linha de Transmissão considerando o Efeito da Frequência	21

2.6 Representação de Linhas de Transmissão por meio de uma Cascata de Circuitos π	25
2.6.1 Linha cujos Parâmetros são considerados Constantes	25
2.6.2 Linha cujos Parâmetros são considerados Variáveis em relação à Frequência	27

Capítulo 3: Efeito Corona em Linhas de Transmissão

3.1 Introdução	37
3.2 Manifestação do Efeito Corona na Linha de Transmissão	37

Capítulo 4: Inclusão do Efeito Corona no Modelo da Linha de Transmissão

4.1 Introdução	42
4.2 Representação do Efeito Corona	42
4.2.1 Modelo de Gary	43
4.2.2 Modelo de Skilling-Umoto	44
4.2.3 Condutância Corona	44
4.3 Representação do Efeito Corona em Linhas cujos Parâmetros são considerados Constantes	44
4.3.1 Descrição do Modelo	44
4.3.2 Resultados e Análises	45
4.4 Representação do Efeito Corona em Linhas considerando o Efeito da Frequência sobre os Parâmetros Longitudinais	48
4.4.1 Descrição do Modelo	48
4.4.2 Resultados para uma Linha Energizada com uma Tensão Constante	49
4.4.3 Resultados para uma Linha Energizada com uma Tensão Exponencial	55
4.5 Conclusões	58

<u>Capítulo 5: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</u>	60
<u>Referências Bibliográficas</u>	63
<u>Anexo 1: Exemplos de Ensaios Laboratoriais de Efeito Corona</u>	67
<u>Anexo 2: Câmeras Detectoras de Efeito Corona</u>	70

Lista de Figuras

Figura 2.1: Circuito π equivalente de uma linha de transmissão	5
Figura 2.2: Extensão das linhas de transmissão do setor elétrico brasileiro (em km)	7
Figura 2.3: Representação do campo elétrico	8
Figura 2.4: Campo eletromagnético de uma linha monofásica ideal: condutor imagem	8
Figura 2.5: Gerador – Receptor	9
Figura 2.6: Seção transversal de uma linha monofásica constituída por duas fases	12
Figura 2.7: Seção transversal de uma linha monofásica	14
Figura 2.8: Capacitâncias linha/linha e linha/neutro	15
Figura 2.9: Representação esquemática (método das imagens)	16
Figura 2.10: Representação da linha de transmissão através de uma secção infinitesimal	17
Figura 2.11: Representação da linha de transmissão através de uma Cascata de Circuitos π	26
Figura 2.12: Circuito π com o efeito da frequência	27
Figura 2.13: Linha Monofásica	33
Figura 2.14: Circuito utilizado para sintetizar os parâmetros unitários da linha	33
Figura 2.15: Resistência Unitária da Linha Sintetizada com os Elementos da Tabela 2.1	34
Figura 2.16: Indutância Unitária da Linha Sintetizada com os Elementos da Tabela 2.1	35
Figura 2.17: Tensão no terminal da linha obtida com as equações de estado (curva 1) e com o programa EMTP (curva 2)	36
Figura 3.1: Fenômeno do efeito corona	37
Figura 4.1: Modelo equivalente de uma linha de transmissão com corona, representada através de uma cascata de circuitos π	45
Figura 4.2: Linha monofásica submetida a uma tensão dupla exponencial	45
Figura 4.3: Simulação da tensão ao longo da linha após energização, considerando o efeito corona através do Modelo de Gary e parâmetros constantes	46
Figura 4.4: Simulação da tensão ao longo da linha após energização, considerando o efeito corona através do Modelo Skilling-Umoto e parâmetros constantes	47
Figura 4.5: k -ésimo circuito π da cascata com efeito corona	48

Figura 4.6: Linha de Transmissão monofásica com efeito corona	49
Figura 4.7: Linha de Transmissão monofásica representada por uma cascata de circuitos π , considerando o efeito corona e os parâmetros longitudinais dependentes da frequência	50
Figura 4.8: Tensões simuladas no terminal da linha (posição $x = 10$ km): sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	51
Figura 4.9: Tensões simuladas em 7,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	51
Figura 4.10: Tensões simuladas em 5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	52
Figura 4.11: Tensões simuladas em 2,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	52
Figura 4.12: Tensões simuladas no terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	53
Figura 4.13: Tensões simuladas em 7,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	54
Figura 4.14: Tensões simuladas em 5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	54
Figura 4.15: Tensões simuladas em 2,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2)	55
Figura 4.16: Linha monofásica	55
Figura 4.17: (a) Resistência unitária da linha sintetizada com os elementos da Tabela 5.1. (b) Indutância unitária da linha sintetizada com os elementos da Tabela 5.1	56
Figura 4.18: Resposta da simulação da linha com efeito corona (modelo de Skilling-Umoto) e parâmetros dependentes da frequência na posição $x = 0$ m (1), $x = 655,6$ m (2), $x = 1291,4$ m (3) e $x = 2185,4$ m (4)	57
Figura 4.19: Resposta da simulação da tensão ao longo da linha com efeito corona na posição $x = 0$ m (1), $x = 658,4$ m (2), $x = 1295,5$ m (3) e $x = 2185,4$ m (4)	58

Lista de Tabelas

TABELA 2.1: Elementos Utilizados para Sintetizar os Parâmetros da Linha Dependentes da Freqüência	34
TABELA 4.1: Elementos Utilizados para Sintetizar os Parâmetros da Linha Dependentes da Freqüência com Corona e Demais Dados para Simulação do Circuito da Fig. 4.16	56

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

FDTP – *Frequency Domain Transients Program*;

FFT – *Fast Fourier Transform*;

SEE – Sistema de Energia Elétrica;

LT – Linha (s) de Transmissão;

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;

SIESE – Sistema de Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica;

SIE – Sistema Integrado de Informações Energéticas;

MME – Ministério das Minas e Energia;

RI – Radio interferência;

EMTP – *Eletromagnetic Transient Programs*;

CC – Corrente contínua;

CA – Corrente alternada.

Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, conforme descrito a seguir:

No capítulo 1 é feita uma introdução ou algumas considerações iniciais, bem como são apresentados o objetivo e a motivação a respeito do trabalho realizado.

No capítulo 2 são definidas as linhas de transmissão e suas equações diferenciais. É apresentada uma revisão bibliográfica sobre as linhas de transmissão, seus parâmetros e o sistema de energia elétrica. São apresentados os modelos de linhas de transmissão no domínio do tempo, particularmente, a representação da linha através de uma cascata de circuitos π e a descrição dos parâmetros longitudinais desta linha variáveis em relação à frequência (efeito skin e efeito do solo).

No capítulo 3 é feita uma avaliação de como o efeito corona se manifesta ao longo das linhas de transmissão e seu impacto.

No capítulo 4 é feito um estudo do modelo proposto em [9] para representar o efeito corona em linhas de transmissão monofásicas em situações em que os parâmetros da linha podem ser considerados constantes. Os resultados são mostrados e comparados com a literatura, em especial os apresentados no artigo do Mamis [9]. Também é desenvolvido um modelo para a linha de transmissão monofásica, que leva em conta o efeito da frequência sobre os parâmetros e o efeito corona. São feitas análises da contribuição do trabalho no estudo do efeito corona nas linhas de transmissão, considerando então a inserção do efeito corona no modelo de linha desenvolvido a parâmetros variáveis com a frequência.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões referentes ao trabalho desenvolvido, bem como são dadas sugestões para trabalhos futuros.

O anexo 1 mostra, através de ilustrações, ensaios laboratoriais realizados pela CHESF de teste de efeito corona visual.

O anexo 2 mostra uma das formas a qual é feita, na prática, a medição e visualização do efeito corona ao longo da linha de transmissão, i.e., através de câmeras especiais de filmagem que detectam o ponto onde se tem a manifestação do efeito corona. A aplicação destas imagens é muito importante na programação de investigação por sondagens.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A confiabilidade dos sistemas de energia elétrica é fortemente dependente da modelagem dos seus componentes em programas de simulação. As linhas de transmissão destacam-se pela variedade de modelos encontrados na literatura técnica, sendo a modelagem de seus elementos de extrema importância, especialmente, neste contexto, na observação das distribuições das tensões e correntes ao longo da linha. Logo, o grande desafio na modelagem de linhas é a representação da variação de seus parâmetros com relação à frequência, devido ao efeito pelicular nos condutores e à impedância de retorno pelo solo [4].

Em sistemas de energia elétrica de alta tensão, a análise do efeito corona é de vital importância, uma vez que as ondas de correntes e tensões, provenientes de descargas atmosféricas, que trafegam nas linhas de transmissão são significativamente influenciadas por este fenômeno. O efeito corona geralmente é inserido nos modelos de linhas de transmissão, quando estes modelos são utilizados na simulação de sobretensões muito elevadas como as decorrentes de descargas atmosféricas, energização da linha e outras fontes de transitórios eletromagnéticos.

Neste trabalho será apresentado um modelo de linha de transmissão monofásica, que leva em consideração os efeitos solo, pelicular e corona. O modelo utilizado para representar a linha de transmissão considera a mesma como sendo representada através de uma cascata de circuitos tipo π . Este modelo permite que a linha seja descrita diretamente no domínio do tempo sem o uso

de transformadas inversas de Fourier. A cascata de circuitos π é então representada na forma de variáveis de estado, sendo que os parâmetros representativos do efeito corona são inseridos nas matrizes de coeficientes do modelo. O efeito corona, que é representado pelos modelos de Gary e Skilling-Umoto. Em seguida, através da utilização do método numérico de integração trapezoidal [1, 2], obtêm-se as correntes e tensões em diversos pontos da linha, de acordo com uma abordagem bidimensional (correntes e tensões ao longo do tempo e em determinados pontos da linha).

Portanto, neste trabalho, é feito um estudo detalhado sobre a inserção do efeito corona em linhas de transmissão considerando o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais. Os estudos foram realizados usando um programa desenvolvido através do software MATLAB[®] 7.0, considerando-se as tensões em diversas posições na linha. Baseados nos resultados obtidos são analisados os impactos que a inserção do efeito corona produz nas linhas e, conseqüentemente, nos sistemas de transmissão. O modelo desenvolvido neste trabalho foi usado para representar uma linha monofásica, mas pode ser estendido para uma linha trifásica não idealmente transposta com simetria plana vertical através de uma matriz de transformação modal [3].

1.2 Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo mostrar uma representação alternativa para uma linha de transmissão monofásica, levando em consideração os efeitos solo, pelicular e corona. O efeito corona será representado através dos modelos de Gary e de Skilling-Umoto, considerando o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais, utilizando a técnica de variáveis de estado [5, 6] e a modelagem da linha através de cascatas de circuitos tipo π .

1.3 Motivação

Em programas do tipo FDTP (Frequency Domain Transients Program), a obtenção da resposta temporal de uma linha de transmissão a partir da aplicação de transformada numérica (FFT – Fast Fourier Transform) sobre amostras da saída no domínio da frequência é um tanto

dispendiosa do ponto de vista computacional, pois demanda a avaliação da rede em um número de frequências muito elevado. As simulações ficam bem lentas, descartando, assim, a adoção do procedimento em simuladores em tempo real. Nos modelos do sistema baseados na matriz de impedância e nas tensões terminais, a resposta analítica da saída é obtida via ajuste de funções racionais, o que torna as simulações mais rápidas, já que a síntese da resposta discreta permite uma resposta analítica da transformada inversa no domínio do tempo [4].

Em [7], Ametani propôs o tratamento da transformada numérica de Fourier que retornava para uma saída, por exemplo, $V(j\omega)$, através da FFT, considerando-se apenas frequências complexas, i.e., $s = \sigma + j\omega$. A amostragem da linha em s possibilita que sua resposta seja suave no domínio da frequência. Entretanto, a utilização da FFT implica numa limitação do tempo máximo de observação dos transitórios. Em contrapartida ao desenvolvimento de programas no domínio da frequência há a modelagem de sistemas diretamente no domínio do tempo. Este tipo de abordagem é, atualmente, mais comum tanto na literatura técnica como nas empresas do setor elétrico, visto a grande disseminação de programas do tipo EMTP - Electromagnetic Transients Program [8]. Nestes simuladores, os modelos de linha de transmissão mais tradicionais são fundamentados na teoria de ondas viajantes, que é baseada nos parâmetros de propagação, i.e., a admitância (ou impedância) característica e o fator de propagação, o que leva a linha a ser representada por duas fontes de corrente em paralelo com a admitância característica.

Uma característica dos modelos de linha de transmissão baseados em ondas viajantes é o alto custo computacional associado ao tratamento de convoluções no domínio do tempo. Dependendo da finalidade da simulação, isto se pode tornar um problema.

Neste trabalho foi utilizada a técnica de variáveis de estado para a obtenção das tensões e correntes em qualquer ponto da linha. A grande vantagem em se utilizar a técnica de variáveis de estado é que a mesma permite que a resposta seja obtida diretamente no domínio do tempo, sem a necessidade de se utilizar integrais de convolução e/ou transformadas rápidas de Fourier, da utilização da técnica de variáveis de estado e permite a obtenção da distribuição das ondas de correntes e tensões ao longo da linha de forma mais prática e rápida.

A representação da linha por meio de variáveis de estado leva em consideração que a linha pode ser representada por uma grande cascata de circuitos π que, por sua vez, permite incluir no modelo da linha o efeito solo, pelicular e corona.

Capítulo 2

Linhas de Transmissão

2.1 Introdução

As linhas de transmissão representam um elemento essencial no desenvolvimento do setor elétrico. O Brasil conta hoje com aproximadamente 80 mil quilômetros de linhas, considerando apenas a rede básica, nível entre 230 kV e 765 kV. Com o crescimento do sistema de transmissão, torna-se cada vez mais importante a representação adequada de seu comportamento em programas de simulação, que são inúmeros e aumentam conforme a necessidade atual. Neste contexto, deve-se prestar atenção especial na determinação dos parâmetros da linha, i.e., a impedância série e admitância em derivação, de acordo com a Figura 2.1, pela variedade de metodologias de cálculo encontradas na literatura técnica, mencionadas por Martins [4].

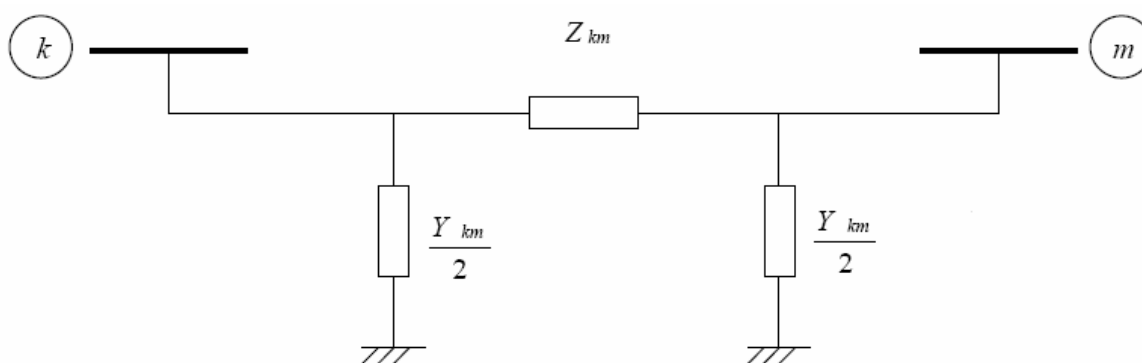


Figura 2.1: Circuito π equivalente de uma linha de transmissão.

Sendo: Z_{km} : Impedância série total da linha de transmissão [Ω];
 Y_{km} : Admitância em derivação (linha/neutro) total da linha de transmissão [S];
 k : emissor;
 m : receptor.

Neste capítulo será feito um estudo referente à linha de transmissão. Serão mostrados os modelos que representam uma linha de transmissão, considerando baixas e altas frequências.

Diversos autores mostram que os parâmetros longitudinais de uma linha de transmissão são variáveis em função da frequência, sendo que esta dependência é devida aos efeitos solo e pelicular [10, 11].

2.2 Sistema de Energia Elétrica – SEE

O Sistema de Energia Elétrica (SEE) tem a finalidade de transportar a energia elétrica dos centros produtores para os centros de consumo, sendo composto por todos os equipamentos e instalações empregados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica [12]. Os principais componentes do SEE são os seguintes:

- Linhas de Transmissão;
- Transformadores;
- Geradores, banco de capacitores, banco de reatores e cargas.

Embora a maior parte dos equipamentos e instalações sejam trifásicos, na análise em regime permanente de Alta Tensão (AT, de 69 kV a 230 kV, inclusive), Extra Alta Tensão (EAT, de 230 kV a 800 kV, inclusive) e Ultra Alta Tensão (UAT, acima de 800 kV) os circuitos são considerados equilibrados e emprega-se a análise por fase, i. e., análise monofásica [12].

No Brasil, em função do parque gerador ser baseado na energia hidrelétrica, o sistema de transmissão desempenha um papel muito importante, pois as distâncias entre os centros consumidores e geradores são elevadas.

Os dados do setor elétrico brasileiro podem ser obtidos nos boletins do Sistema de Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica (SIESE) que é parte do Sistema Integrado

de Informações Energéticas (SIE) da Secretaria Geral do Ministério das Minas e Energia (MME) ou através da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Verifica-se a evolução da extensão das linhas de transmissão do setor elétrico brasileiro de 1990 a 2003, conforme a Figura 2.2.

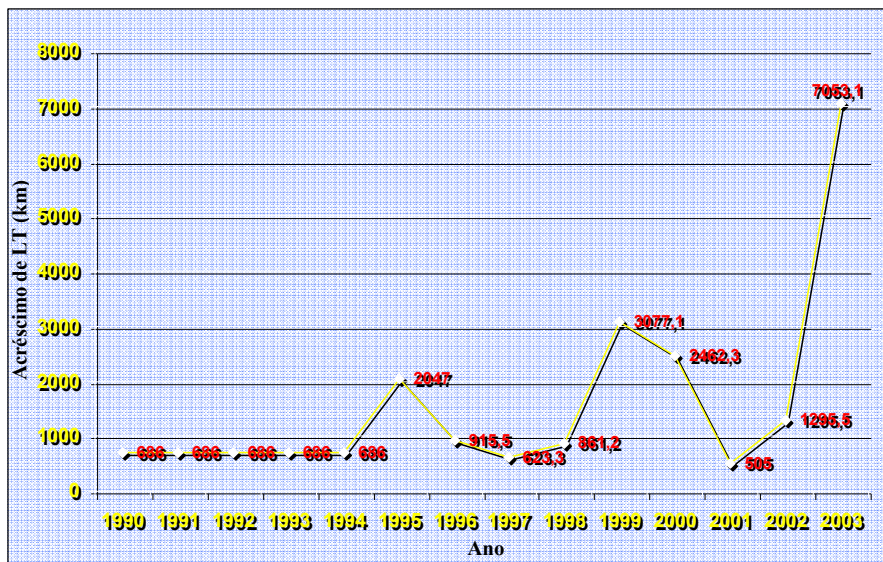


Figura 2.2: Extensão das Linhas de Transmissão do Setor Elétrico Brasileiro (em km).

Fonte: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (disponível em: <http://www.aneel.gov.br>, acesso em: 19/06/2007).

2.3 Linhas de Transmissão

A conceituação que é uma linha de transmissão será estabelecida ao longo deste capítulo. A princípio, genericamente, uma linha de transmissão é toda a linha cujo comprimento físico seja da ordem de grandeza do comprimento de onda, i.e., uma linha de transmissão pode ser definida como sendo um sistema de condutores que conduz um sinal elétrico entre dois ou mais terminais, ou seja, é um sistema usado para transmitir energia eletromagnética. Esta transmissão não é irradiada, mas guiada de uma fonte geradora para uma carga consumidora, podendo ser uma guia de onda, um cabo coaxial ou fios paralelos ou torcidos. Este sinal elétrico é conduzido através do campo elétrico (**E**) e do campo magnético (**H**) presente no sistema de condutores, conforme mostra a Figura 2.3 (em **negrito**, a grandeza vetorial).

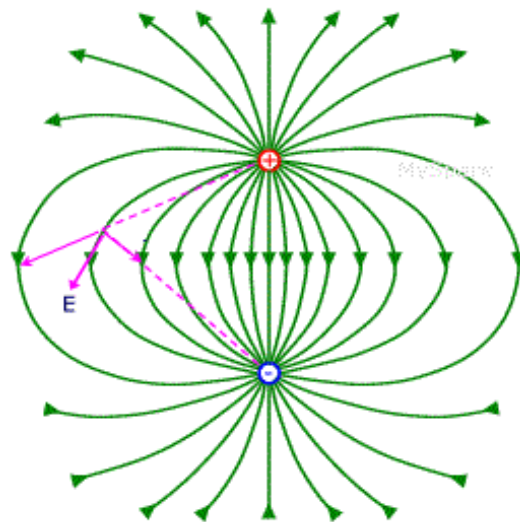


Figura 2.3: Representação do campo elétrico.

Os campos elétrico e magnético de uma linha monofásica podem ainda serem representados de acordo com a Figura 2.4, mostrando a imagem do condutor que conduz o sinal elétrico.

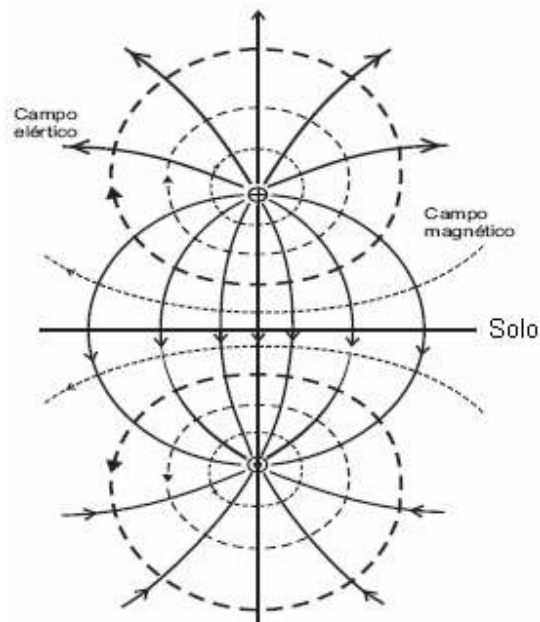


Figura 2.4: Campo eletromagnético de uma linha monofásica ideal: condutor imagem [2].

Geralmente uma linha de transmissão (LT) é alimentada por um gerador que por sua vez envia um sinal elétrico para um receptor (carga), conforme mostra a Figura 2.5.

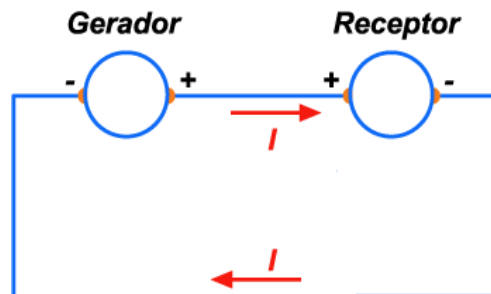


Figura 2.5: Gerador – Receptor.

A definição de LT aplica-se tanto para a transmissão de sinais de pequena potência (da ordem de 10^3 Watts) como para a área de sistemas elétricos de potência, onde grandes blocos de energia elétrica (da ordem de 10^6 Watts) são transmitidos através de longas distâncias com níveis de tensão de, por exemplo, 750 kV [13].

A metodologia desenvolvida neste trabalho visa somente as LT de energia elétrica que são responsáveis pela transmissão de grandes blocos de energia e abordados modelos utilizados na análise de fenômenos transitórios causados por manobras, faltas ou chaveamento destas linhas.

A análise dos fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas em LT é bastante complexa uma vez que:

- O solo ao longo da linha não é plano, nem homogêneo e suas características não são conhecidas com precisão;
- A configuração geométrica exata da linha é relativamente complexa, para efeitos da distribuição do campo eletromagnético;
- Os cabos pára-raios (condutores no topo da estrutura, cuja finalidade é evitar a incidência de descargas atmosféricas diretamente na linha) possuem características magnéticas não lineares.

Geralmente se consideram as seguintes aproximações [13]:

- O solo é plano nas vizinhanças da LT;

- O solo é homogêneo, com condutividade e constante dielétrica independentes da frequência e constantes ao longo da linha;
- Os condutores são paralelos entre si e ao solo sendo que o raio dos condutores é muito menor que a distância entre os condutores;
- No cálculo do campo eletromagnético, os efeitos terminais da linha e das estruturas são desprezados;
- Os cabos pára-raios, que são de aço, possuem permeabilidade magnética constante;
- Os condutores das fases, compostos por fios encordoados com alma de aço, são representados através de uma seção reta na forma de uma coroa circular sendo que a corrente na alma de aço é desprezada.

Conforme descrito por Araújo [2], uma linha de transmissão tem seus parâmetros distribuídos ao longo da sua extensão. Logo, qualquer perturbação gerada por chaveamentos ou descargas atmosféricas resulta na propagação de ondas pela linha. O efeito de uma variação de corrente ou tensão em qualquer dos terminais da linha não é sentido pelo outro até que ondas eletromagnéticas geradas por essa variação percorram todo o comprimento da linha. Assim, os modelos utilizados em cálculos de transitórios eletromagnéticos que envolvem linhas de transmissão são baseados na solução de equações de onda de tensão e corrente.

2.3.1 Análise dos Parâmetros das Linhas de Transmissão em Baixas Frequências

Uma linha de transmissão de energia elétrica possui quatro parâmetros básicos: resistência série, indutância série, capacitância em derivação e condutância em derivação, descritas a seguir. Estes parâmetros influem diretamente no seu comportamento como componente de um sistema de energia elétrica, mas a condutância em derivação geralmente é desprezada por ser muito pequena, no entanto, em determinado momento neste trabalho, ela é utilizada para representar o efeito corona, considerando um modelo específico, embora seja utilizada também para representar a fuga de corrente pelos isoladores [14].

Na análise em regime permanente de uma linha de transmissão são considerados apenas três parâmetros: resistência série, indutância série e capacitância em derivação. Conforme já

mencionado, neste trabalho é considerada também a condutância em derivação, importante para análise do efeito corona na linha, descrito mais adiante.

A seguir é feita uma descrição dos parâmetros longitudinais da linha de transmissão, considerando apenas uma abordagem constante, i.e., em baixas frequências.

2.3.1.1 Resistência Série:

A resistência série é a principal causa das perdas de energia elétrica nas linhas de transmissão.

Em corrente contínua (CC) a resistência de um condutor é dada por:

$$R_{cc} = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Sendo:

ρ : Resistividade do condutor¹ [$\Omega \cdot m$];

l : Comprimento [m];

A : Área da seção transversal [m^2].

Na determinação da resistência dos condutores devem-se levar em consideração os seguintes aspectos [14]:

- Para a faixa normal de operação, a variação da resistência de um condutor metálico é praticamente linear, ou seja:

$$R_2 = R_1 \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1} \quad (2.2)$$

Sendo:

T_1 : Temperatura do condutor 1 [$^{\circ}C$];

¹ Para o alumínio a 20 $^{\circ}C$, $\rho = 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

T_2 : Temperatura do condutor 2 [$^{\circ}\text{C}$];

T_0 : Constante do Material² [$^{\circ}\text{C}$];

R_1 : Resistência do condutor 1 [Ω].

- Em cabos encordoados, o comprimento dos fios periféricos é maior que o comprimento do cabo (devido ao encordoamento helicoidal). Isto acresce a resistência efetiva em 1 a 2%.

Em corrente alternada (CA) devido ao efeito pelicular (*skin*), a corrente tende a concentrar-se na superfície do condutor. Isto provoca um acréscimo na resistência efetiva (proporcional à frequência) observável a 60 Hz (em torno de 3%).

2.3.1.2 Indutância Série:

Um condutor constituído de dois ou mais elementos ou fios em paralelo é chamado condutor composto [14], observando que isto inclui os condutores encordoados e também os feixes (*bundles*) de condutores.

Sejam duas fases arranjadas conforme a Figura 2.6. A fase x é formada por n fios cilíndricos idênticos, cada um transportando a corrente \bar{I}/n e a fase de retorno Y é formada por M fios cilíndricos idênticos, cada uma transportando a corrente \bar{I}/M .

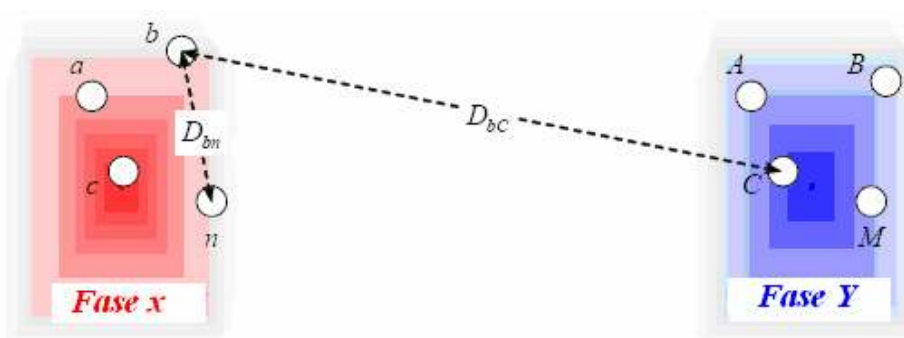


Figura 2.6: Seção transversal de uma linha monofásica constituída por duas fases.

² Para o alumínio a 20 $^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 228$ $^{\circ}\text{C}$.

Considerando as distâncias indicadas na Figura 2.6, a indutância dos fios a e b que fazem parte da fase x são dadas por [14]:

$$L_a = n \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[M]{D_{aA} D_{aB} D_{aC} \cdots D_{aM}}}{\sqrt[n]{r'_a D_{ab} D_{ac} \cdots D_{an}}} \quad (2.3)$$

$$L_b = n \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[M]{D_{bA} D_{bB} D_{bC} \cdots D_{bM}}}{\sqrt[n]{r'_b D_{ba} D_{bc} \cdots D_{bn}}} \quad (2.4)$$

Sendo:

L_a : Indutância do fio a [H/m];

L_b : Indutância do fio b [H/m];

$\mu = \mu_r \mu_0$: Permeabilidade do meio³ (para o vácuo, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$);

D_{aB} : Distância entre os fios a e B [m];

r'_a : Raio de uma fase fictícia (sem fluxo interno), porém com a mesma indutância que a fase a , cujo raio é r_a [m].

Nas expressões anteriores, é imprescindível que D_{aB} e r'_a estejam na mesma unidade (em metros, por exemplo).

A indutância da fase x é igual ao valor médio da indutância dos fios dividido pelo número de fios (associação em paralelo), ou seja [14]:

$$L_x = \frac{L_{x \text{ médio}}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n^2} \quad [H/m] \quad (2.5)$$

Segue daí que:

$$L_x = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[M]{(D_{aA} D_{aB} \cdots D_{aM})(D_{bA} D_{bB} \cdots D_{bM}) \cdots (D_{nA} D_{nB} \cdots D_{nM})}}{\sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} \cdots D_{an})(D_{ba} D_{bb} \cdots D_{bn}) \cdots (D_{na} D_{nb} \cdots D_{nn})}} \quad [H/m] \quad (2.6)$$

³ Geralmente é utilizada a permeabilidade do vácuo, pois, para o ar, a permeabilidade relativa é unitária: $\mu_r \approx 1$.

Sendo $D_{aa} = r'_a$. O numerador da expressão (2.6) é denominado Distância Média Geométrica (DMG) e é notado por D_m ; o denominador é denominado Raio Médio Geométrico (RMG) e é notado por D_s . Assim,

$$L_x = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad [H/m] \quad (2.7)$$

Sendo f a frequência de operação da linha, a reatância indutiva é dada por:

$$X_L = 2\pi f L_x \quad [\Omega/m] \quad (2.8)$$

Em uma linha trifásica, com espaçamento assimétrico, a indutância das fases é diferente e o circuito é desequilibrado, o que não é tratado neste trabalho, somente linhas monofásicas.

2.3.1.3 Capacitância em Derivação:

Para uma linha de transmissão monofásica formada por condutores de raio r , conforme mostra a Figura 2.7, a capacitância entre os dois fios desta linha é dada por [14]:

$$C_{ab} = \frac{\pi k}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F/m] \quad (2.9)$$

sendo k a permissividade do meio ($k_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$ é a permissividade do vácuo, geralmente empregada no cálculo das linhas aéreas).

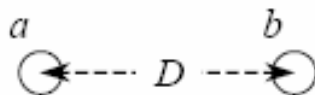


Figura 2.7: Seção transversal de uma linha monofásica.

Assim, a capacitância de qualquer um dos fios ao neutro corresponde ao dobro do valor determinado pela equação (2.9) – associação série de capacitores – conforme ilustra a Figura 2.8.

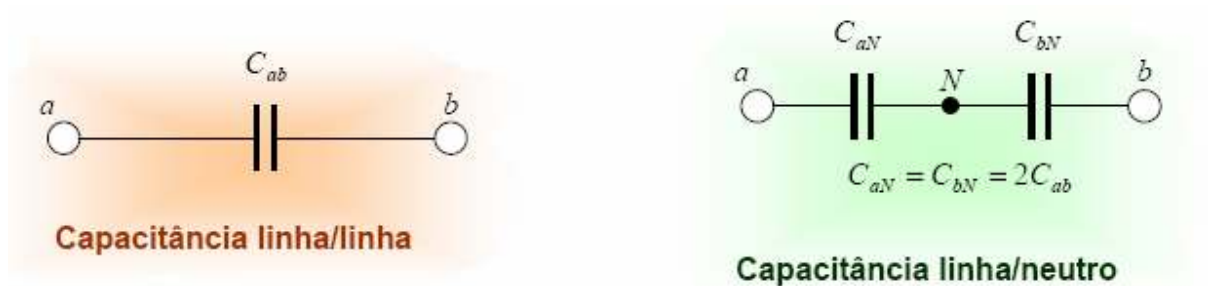


Figura 2.8: Capacitâncias linha/linha e linha/neutro.

Desta forma, a expressão da capacitância entre linha/neutro, para uma linha monofásica é dada por:

$$C_N = \frac{2\pi k}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F/m] \quad (2.10)$$

Sendo f a frequência de operação da linha e C_N a capacitância linha/neutro, a reatância capacitiva das fases em relação ao neutro é dada por [14]:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_N} \quad [\Omega.m] \quad (2.11)$$

Observa-se que a unidade de X_L é diferente da unidade de X_C , vistas nas equações (2.8) e (2.11), pois enquanto o primeiro é dado em Ω/m (pois a reatância é diretamente proporcional à indutância que é dada em H/m), o segundo é dado em $\Omega.m$ (a reatância é inversamente proporcional à capacitância que é dada em F/m).

2.4 Propagação de Ondas em Linhas de Transmissão

Qualquer distúrbio em uma linha de transmissão, tal como descargas atmosféricas, ou uma interrupção das condições de regime permanente, dá origem a ondas viajantes, que se propagam no sentido das extremidades da linha, onde são refletidas e transmitidas [13]. Durante a propagação ao longo da linha, as ondas viajantes são atenuadas e distorcidas até serem totalmente extintas após várias reflexões.

Para se determinar as equações que descrevem o comportamento de linhas monofásicas, considera-se o caso simples de um circuito com um condutor. O condutor está a uma altura h do solo e a sua respectiva imagem fica à mesma distância h abaixo do solo (considerando que o solo é um condutor ideal). A Figura 2.9 mostra a representação da linha mencionada anteriormente.

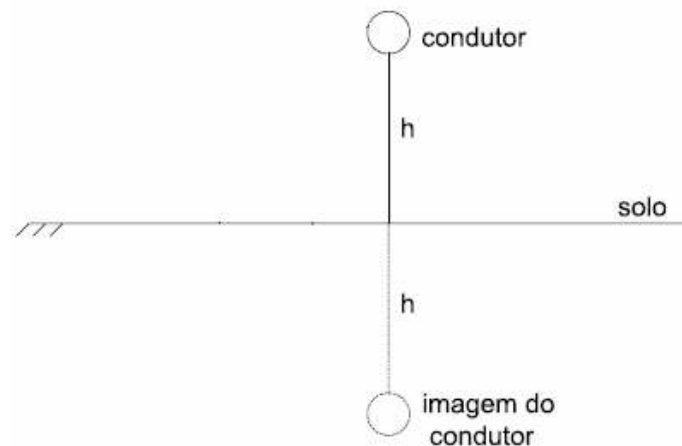


Figura 2.9: Representação esquemática (método das imagens).

A Figura 2.10 mostra um elemento diferencial da linha monofásica de comprimento Δz , com as tensões e as correntes em seus terminais. Como descrito por Araújo [2], é considerado que a distância entre os condutores é pequena em relação ao comprimento da onda propagante. É considerado ainda que a corrente nos condutores não é constante ao longo da linha e que é impossível de se determinar regiões, no espaço que envolve a linha, nas quais exista somente campo magnético ou somente campo elétrico. Não se pode, assim, falar de resistência, indutância e capacitância concentradas em pontos determinados. Desta forma, considera-se a linha como um elemento com parâmetros distribuídos – indutância L por unidade de comprimento [H/m] e a

capacitância C por unidade de comprimento [F/m]. Além destes dois parâmetros, as linhas de transmissão apresentam uma resistência R por unidade de comprimento [Ω/m], responsável pelas perdas ôhmicas e uma condutância G por unidade de comprimento [S/m], responsável pelas perdas no isolamento (dielétrico). Embora os parâmetros R , L , C e G estejam uniformemente distribuídos ao longo da linha, pode-se supor que uma linha de transmissão seja constituída por secções infinitesimais Δz , conforme expresso na Figura 2.10.

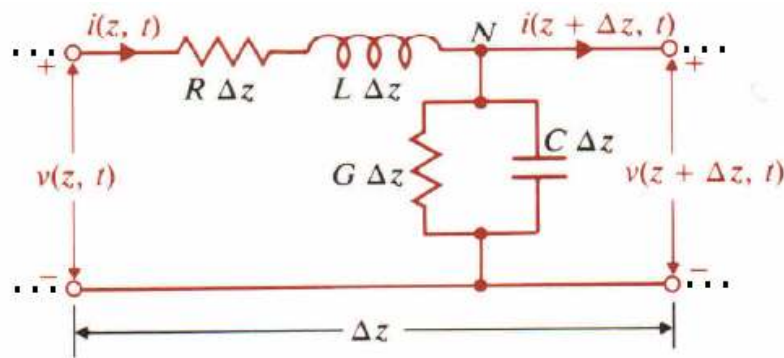


Figura 2.10: Representação da linha de transmissão através de uma secção infinitesimal.

Observando a Figura 2.10, nota-se que a indutância e a resistência embora concentradas num dos condutores, representam na realidade a contribuição total dos condutores na secção infinitesimal Δz .

Considerando agora uma secção infinitesimal de uma linha de transmissão, com valores instantâneos de tensão e de corrente $v(z, t)$ e $i(z, t)$, respectivamente, da Fig. 2.10, e utilizando a lei das malhas, obtém-se:

$$v(z, t) - R \Delta z i(z, t) - L \Delta z \frac{\partial i}{\partial t}(z, t) - v(z + \Delta z, t) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{v(z, t) - v(z + \Delta z, t)}{\Delta z} = R i(z, t) + L \frac{\partial i}{\partial t}(z, t) \quad (2.13)$$

Fazendo $\Delta z \rightarrow 0$:

$$-\frac{\partial v}{\partial z}(z, t) = R i(z, t) + L \frac{\partial i}{\partial t}(z, t) \quad (2.14)$$

Utilizando a lei dos nós, obtém-se:

$$i(z, t) = i(z + \Delta z, t) + G \Delta z v(z + \Delta z, t) + C \Delta z \frac{\partial v}{\partial t}(z + \Delta z, t) \quad (2.15)$$

$$-\frac{i(z + \Delta z, t) - i(z, t)}{\Delta z} = G v(z + \Delta z, t) + C \frac{\partial v}{\partial t}(z + \Delta z, t) \quad (2.16)$$

Fazendo $\Delta z \rightarrow 0$:

$$-\frac{\partial i}{\partial z}(z, t) = G v(z, t) + C \frac{\partial v}{\partial t}(z, t) \quad (2.17)$$

As equações (2.14) e (2.17) descrevem as variações da corrente e da tensão da linha em função da posição z e do tempo t .

Agrupando as equações (2.14) e (2.17), tem-se:

$$-\frac{\partial v}{\partial z}(z, t) = R i(z, t) + L \frac{\partial i}{\partial t}(z, t) \quad (2.18a)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial z}(z, t) = G v(z, t) + C \frac{\partial v}{\partial t}(z, t) \quad (2.18b)$$

Considerando uma onda harmônica e usando o co-seno como referência, utilizando o recurso de fasores, obtém-se [2]:

$$\begin{aligned} v(z, t) &= \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}] \\ i(z, t) &= \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t}(z, t) &= \frac{d}{dt} V(z)e^{j\omega t} = j\omega V(z)e^{j\omega t} \\ \frac{\partial i}{\partial t}(z, t) &= \frac{d}{dt} I(z)e^{j\omega t} = j\omega I(z)e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial z}(z,t) &= \frac{d}{dz}V(z)e^{j\omega t} = e^{j\omega t} \frac{d}{dz}V(z) \\ \frac{\partial i}{\partial z}(z,t) &= \frac{d}{dz}I(z)e^{j\omega t} = e^{j\omega t} \frac{d}{dz}I(z)\end{aligned}\quad (2.21)$$

Combinando as equações (2.18a) e (2.18b) e (2.21), obtêm-se:

$$\begin{aligned}-e^{j\omega t} \frac{d}{dz}V(z) &= RI(z)e^{j\omega t} + j\omega LI(z)e^{j\omega t} \\ -e^{j\omega t} \frac{d}{dz}I(z) &= GV(z)e^{j\omega t} + j\omega CV(z)e^{j\omega t}\end{aligned}\quad (2.22)$$

Daí segue que:

$$\frac{d}{dz}V(z) = (R + j\omega L)I(z) \quad (2.23)$$

$$\frac{d}{dz}I(z) = (G + j\omega C)V(z) \quad (2.24)$$

Diferenciando as duas expressões anteriores, (2.23) e (2.24), tem-se o seguinte:

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}V(z) &= \frac{d}{dz}[(R + j\omega L)I(z)] \\ \frac{d^2}{dz^2}I(z) &= \frac{d}{dz}[(G + j\omega C)V(z)]\end{aligned}\quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}V(z) &= (R + j\omega L)\frac{d}{dz}I(z) \\ \frac{d^2}{dz^2}I(z) &= (G + j\omega C)\frac{d}{dz}V(z)\end{aligned}\quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}V(z) &= (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(z) \\ \frac{d^2}{dz^2}I(z) &= (G + j\omega C)(R + j\omega L)I(z)\end{aligned}\quad (2.27)$$

As expressões da equação (2.27) são conhecidas como *equações telegráficas* [13]. Para o caso particular de uma linha sem perdas, tem-se $R=0$ e $G=0$. Neste caso, as expressões da equação (2.27) tornam-se:

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}V(z) &= LCV(z) \\ \frac{d^2}{dz^2}I(z) &= LCI(z)\end{aligned}\tag{2.28}$$

Definindo a constante de propagação da linha como sendo $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}V(z) &= \gamma^2 V(z) \\ \frac{d^2}{dz^2}I(z) &= \gamma^2 I(z)\end{aligned}\tag{2.29}$$

Desta forma, as soluções das equações diferenciais da equação (2.29) são:

$$V(z) = V^+(z) + V^-(z) = V_0^+ e^{jz} + V_0^- e^{-jz}\tag{2.30}$$

$$I(z) = I^+(z) + I^-(z) = I_0^+ e^{jz} + I_0^- e^{-jz}\tag{2.31}$$

As equações (2.30) e (2.31) representam duas ondas progressivas de tensão e corrente, respectivamente. O primeiro termo corresponde a uma onda progressiva propagando-se na direção dos zz positivos (considerando o sentido de zz da esquerda para a direita) e o segundo termo corresponde a uma onda a propagar-se na direção de zz negativos (considerando a origem de zz o lado esquerdo).

Combinando a equação (2.23) com a equação (2.30), tem-se:

$$\begin{aligned}-\frac{d}{dz}V(z) &= (R + j\omega L)I(z) \quad \Rightarrow \quad \gamma V_0^+ e^{-jz} - \gamma V_0^- e^{jz} = (R + j\omega L)I(z) \\ V(z) &= V_0^+ e^{jz} + V_0^- e^{-jz}\end{aligned}\tag{2.32}$$

E definindo a *impedância característica* da linha como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (2.33)$$

Obtém-se, portanto, uma expressão que relaciona a corrente $i(z, t)$ com a tensão $v(z, t)$:

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z} \quad (2.34)$$

2.5 Equações de Propagação de Ondas numa Linha de Transmissão considerando o Efeito da Freqüência

Os parâmetros de uma linha de transmissão podem ser considerados distribuídos ao longo de sua extensão e apresentam forte dependência da freqüência, podendo-se modelar o comportamento dinâmico da linha de forma aproximada e eficiente. As linhas podem ser representadas e modeladas de diferentes formas [2], o que neste trabalho foi feito utilizando modelo a parâmetros dependentes da freqüência, que representa com maior precisão o fenômeno de propagação de ondas.

É mais conveniente, segundo Araújo [2], para o cálculo de transitórios no domínio do tempo, formular-se a solução das equações que descrevem a propagação de onda ao longo das linhas de transmissão no domínio da freqüência. Assim, tensões e correntes em um determinado ponto z , ao longo da linha, são descritas por $V(z, \omega)$ e $I(z, \omega)$ de acordo com as equações:

$$-\frac{\partial}{\partial z} V(z, \omega) = Z(\omega) I(z, \omega) \quad (2.35)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} I(z, \omega) = Y(\omega) V(z, \omega) \quad (2.36)$$

em que $Z(\omega)$ e $Y(\omega)$ são, respectivamente, a impedância série e a admitância em derivação da linha por unidade de comprimento. Dessas equações obtêm-se as equações de propagação [2]:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} V(z, \omega) = P(\omega)V(z, \omega) \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} I(z, \omega) = P(\omega)I(z, \omega)$$

em que $P(\omega) = Z(\omega)Y(\omega)$.

A solução geral dessas equações em um ponto z , ao longo da linha, é:

$$V(z, \omega) = e^{-\Gamma(\omega)z}V_p(\omega) + e^{\Gamma(\omega)z}V_r(\omega) \quad (2.38)$$

$$I(z, \omega) = e^{-\Gamma(\omega)z}I_p(\omega) + e^{\Gamma(\omega)z}I_r(\omega) \quad (2.39)$$

em que:

$$\Gamma(\omega) = \sqrt{P(\omega)} \quad (2.40)$$

$V_p(\omega)$ e $V_r(\omega)$ representam as ondas de tensão progressivas e regressivas, enquanto $I_p(\omega)$ e $I_r(\omega)$ representam as ondas de corrente progressivas e regressivas, respectivamente, em $z = 0$, ou seja, no início da linha [2].

$\Gamma(\omega)$ é a constante de propagação tanto para a tensão como para corrente. Diferenciando a equação (2.39) em relação a z e substituindo na equação (2.36), tem-se:

$$\Gamma(\omega)e^{-\Gamma(\omega)z}I_p(\omega) - \Gamma(\omega)e^{\Gamma(\omega)z}I_r(\omega) = Y(\omega)V(z, \omega) \quad (2.41)$$

ou

$$Y_c(\omega)V(z, \omega) = \{e^{-\Gamma(\omega)z}I_p(\omega) - e^{\Gamma(\omega)z}I_r(\omega)\} \quad (2.42)$$

em que $Y_c(\omega)$ é a admitância característica definida como [2]:

$$Y_c(\omega) = \left(\sqrt{Y(\omega)Z(\omega)} \right)^{-1} Y(\omega) \quad (2.43)$$

Adicionando as equações (2.42) e (2.39), obtém-se:

$$Y_c(\omega)V(z, \omega) + I(z, \omega) = 2e^{-\Gamma(\omega)z} I_p(\omega) \quad (2.44)$$

Admitindo-se que existe uma linha de transmissão entre $z = 0$ e $z = d$, tem-se [2]:

$$Y_c(\omega)V(0, \omega) + I(0, \omega) = 2I_p(\omega) \quad (2.45)$$

$$Y_c(\omega)V(d, \omega) + I(d, \omega) = 2e^{-\Gamma(\omega)d} I_p(\omega) \quad (2.46)$$

E ainda substituindo o valor de $I_p(\omega)$ da equação (2.45) na equação (2.46), tem-se:

$$Y_c(\omega)V(d, \omega) + I(d, \omega) = e^{-\Gamma(\omega)d} \{Y_c(\omega)V(0, \omega) + I(0, \omega)\} \quad (2.47)$$

Considerando-se apenas os terminais de uma linha de transmissão entre o terminal $z = 0$ (emissor k) e o terminal $z = d$ (receptor m), podem-se escrever as seguintes condições de contorno [2]:

- em $z = 0$:

$$\begin{aligned} V(0, \omega) &= V_k(\omega) \\ I(0, \omega) &= I_k(\omega) \end{aligned} \quad (2.48)$$

- em $z = d$:

$$\begin{aligned} V(d, \omega) &= V_m(\omega) \\ I(d, \omega) &= -I_m(\omega) \end{aligned} \quad (2.49)$$

em que $I_k(\omega)$ e $I_m(\omega)$ são as correntes que entram nos terminais k e m de uma linha de transmissão. Substituindo-se as equações (2.48) e (2.49) na equação (2.47), tem-se:

$$Y_c(\omega)V_m(\omega) - I_m(\omega) = e^{-\Gamma(\omega)d} \{Y_c(\omega)V_k(\omega) + I_k(\omega)\} \quad (2.50)$$

Admitindo-se que a linha é um elemento linear e bilateral [2], i.e., mesmas propriedades independentemente do terminal analisado, pela simples troca na denominação dos nós, ou terminais k e m na equação (2.50), a seguinte equação também é válida [2]:

$$Y_c(\omega)V_k(\omega) - I_k(\omega) = e^{-\Gamma(\omega)d} \{Y_c(\omega)V_m(\omega) + I_m(\omega)\} \quad (2.51)$$

O cálculo de tensão e corrente nos terminais de uma linha resume-se à solução das equações (2.50) e (2.51).

O termo $A(\omega) = e^{-\Gamma(\omega)d}$ é definido como fator de propagação [2]. Substituindo este termo nas equações (2.50) e (2.51), obtêm-se:

$$\begin{aligned} I_k(\omega) &= Y_c(\omega)V_k(\omega) + I_{kh}(\omega) \\ I_m(\omega) &= Y_c(\omega)V_m(\omega) + I_{mh}(\omega) \end{aligned} \quad (2.52)$$

em que

$$\begin{aligned} I_{kh}(\omega) &= -A(\omega) \{Y_c(\omega)V_m(\omega) + I_m(\omega)\} \\ I_{mh}(\omega) &= -A(\omega) \{Y_c(\omega)V_k(\omega) + I_k(\omega)\} \end{aligned} \quad (2.53)$$

As equações (2.51) e (2.52) sugerem um circuito equivalente de uma linha no domínio da frequência.

Não é simples obter-se Γ na equação (2.40) e $A(\omega)$ no termo $A(\omega) = e^{-\Gamma(\omega)d}$ de forma direta por elas envolverem o cálculo da “raiz quadrada” e da “exponencial”, respectivamente.

Os modelos utilizados para a representação de linhas de transmissão no domínio do tempo têm como objetivo converter as equações (2.50) e (2.51) para o domínio do tempo. Como essas equações contêm produtos no domínio da frequência, no domínio do tempo é necessário o cálculo de convoluções. Esses cálculos podem ser feitos no domínio modal [26] ou diretamente no domínio das fases [2]. No entanto, com a utilização da técnica de variáveis de estado, não há a necessidade de se usar integrais de convolução e/ou transformadas rápidas de Fourier para a obtenção da resposta diretamente no domínio do tempo.

2.6 Representação de Linhas de Transmissão por meio de uma Cascata de Circuitos π

Sabe-se que uma linha de transmissão pode ser representada, no domínio do tempo, por meio de uma grande quantidade de circuitos π conectados em cascata. Este modelo pode ser utilizado para representar uma linha cujos parâmetros são considerados constantes e também pode ser utilizado para representar linhas em situações em que se considera o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais.

As correntes e tensões ao longo da cascata que representa a linha podem ser obtidas a partir da inserção da cascata de circuitos em um programa do tipo EMTP ou podem ser obtidas por meio da técnica de variáveis de estado [16].

2.6.1 Linha cujos Parâmetros são considerados Constantes

Sabe-se que uma linha de transmissão monofásica, cujos parâmetros são considerados independentes da frequência, pode ser representada, de maneira aproximada e obedecendo a uma série de restrições, como sendo uma cascata de circuitos π [16].

A Figura 2.11 mostra uma linha de transmissão monofásica de comprimento d representada através de n circuitos π conectados em cascata.

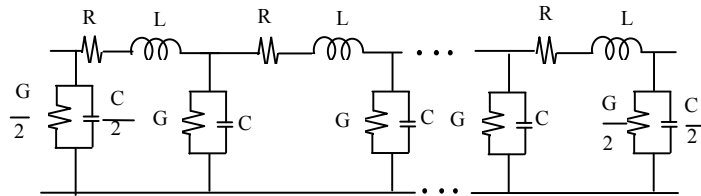


Figura 2.11: Representação da linha de transmissão através de uma cascata de circuitos π .

Na Figura 2.11 os parâmetros R e L são, respectivamente, a resistência e a indutância longitudinais da linha e os parâmetros G e C são, respectivamente, a condutância e a capacitância transversais. Estes parâmetros são escritos como:

$$R = R' \frac{d}{n} ; L = L' \frac{d}{n} \quad (2.54)$$

$$G = G' \frac{d}{n} ; C = C' \frac{d}{n} \quad (2.55)$$

sendo R' , L' , G' e C' os parâmetros da linha por unidade de comprimento, d é o comprimento total da linha e n é a quantidade de circuitos π conectados em cascata.

A cascata de circuitos π da Figura 2.11 pode ser diretamente implementada em programas do tipo EMTP [3]. Este circuito pode ser representado através de equações de variáveis de estado. Neste caso, o modelo pode ser formulado utilizando uma tensão capacitiva e uma corrente indutiva como as variáveis de estado [6, 9, 16 e 17]. Se o modelo de estado for usado, as equações de estado podem ser implementadas em um computador pessoal e solucionadas através de várias técnicas [6, 9, 16 e 17].

2.6.2 Linha cujos Parâmetros são considerados Variáveis em relação à Frequência

O efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais pode ser sintetizado por meio de uma associação série e paralela de resistores e indutores [18] que substituirão a associação RL série em cada um dos circuitos π mostrados na Figura 2.11 [3, 18].

Tavares *et al.* [3] propuseram uma cascata de circuitos π para representar o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais de uma linha de transmissão, como mostrado na Figura 2.12.

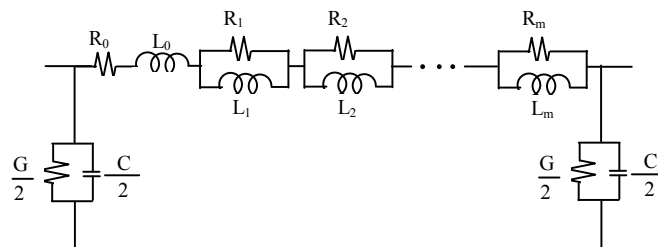


Figura 2.12: Circuito π com o efeito da frequência.

Na Figura 2.12, $R_0, R_1, R_2, \dots, R_m$ são resistências constantes e $L_0, L_1, L_2, \dots, L_m$ são indutâncias constantes, sendo m o número de blocos RL paralelos. A associação série/paralelo da Figura 2.12 resulta em uma resistência e uma indutância dependentes da frequência de um segmento de linha representado por um circuito π .

De acordo com Tavares *et al.* [3], uma linha de transmissão monofásica cujos parâmetros são variáveis em relação à frequência, pode ser representada por meio de uma cascata de n circuitos π , do tipo mostrado na Figura 2.12. A cascata de circuitos π , em que o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais é considerado, pode então ser implementada em programas do tipo EMTP que calculem as correntes e tensões ao longo da cascata. Este modelo de linha geralmente é utilizado para simular transitórios oriundos de operações de manobras e chaveamento.

A partir dos modelos propostos em [6, 9], em que as correntes e tensões ao longo da linha, cujos parâmetros são considerados constantes, são descritas por meio de variáveis de estado,

Kurokawa *et al.* [15] desenvolveram uma representação por meio de variáveis de estado para situações em que o efeito da frequência é incluído nos parâmetros longitudinais da linha. E neste item será mostrado o modelo desenvolvido por Kurokawa *et al.* [15].

Uma linha monofásica pode ser representada por uma cascata constituída de n circuitos π , onde o efeito da frequência é representado por m associações RL em paralelo, conforme mostrado na Figura 2.12. A técnica de variáveis de estados pode ser utilizada e o circuito sintetizado como:

$$\dot{[X]} = [A][X] + [B]u(t) \quad (2.56)$$

Sendo:

$$\dot{[X]} = \frac{d[X]}{dt} \quad (2.57)$$

Em (2.61) $[X]$ é o vetor com as variáveis de estado, $u(t)$ é a entrada, enquanto que $[A]$ e $[B]$ são matrizes de estado.

Em uma linha monofásica representada por n pequenas seções nominais na cascata de circuitos π (seções nominais π da Figura 2.12), podem-se definir as variáveis de estado como sendo a tensão em cada capacitância da cascata de circuitos π e as correntes em cada uma das indutâncias que sintetizam o efeito da frequência em cada um dos circuitos π .

O vetor $[X]$ terá $(m+2)n$ elementos e a matriz $[A]$ terá dimensão $(m+2)n \times (m+2)n$ elementos. O vetor $[X]$ e a matriz $[A]$, mostrados em (2.56), assumirão as seguintes formas:

$$[X]^T = [[X_1] \quad [X_2] \quad \cdots \quad [X_n]] \quad (2.58)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] & \cdots & [A_{1n}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] & \cdots & [A_{2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [A_{n1}] & [A_{n2}] & \cdots & [A_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Em (2.58) $[X]^T$ é a transposta do vetor $[X]$.

Um elemento $[X_k]$ genérico do vetor $[X]$ é escrito como sendo:

$$[X_k]^T = [i_{Lk0} \quad i_{Lk1} \quad i_{Lk2} \quad \cdots \quad i_{Lkm} \quad v_k] \quad (2.60)$$

Em (2.60) $[X_k]^T$ é a matriz transposta de $[X_k]$ e k pode variar de $1, \dots$ até n . Os elementos de $[X_k]$ são as correntes e tensões do k -ésimo circuito π . Desta forma, tem-se:

- i_{Lk0} : corrente no indutor L_0 , do k -ésimo circuito π ;
- i_{Lk1} : corrente no indutor L_1 , do k -ésimo circuito π ;
- i_{Lk2} : corrente no indutor L_2 , do k -ésimo circuito π ;
- i_{Lkm} : corrente no indutor L_m , do k -ésimo circuito π ;
- v_k : tensão no terminal, do k -ésimo circuito π .

Logo, é possível mostrar as equações diferenciais que permitem obter a matriz $[A]$. Considerando o circuito da Figura 2.12 uma malha fechada (2ª Lei de *Kirchhoff*) cujas correntes nos indutores são i_{Lk0} , i_{Lk1} , i_{Lk2} , i_{Lkm} e v_k é a tensão no terminal do k -ésimo circuito π , tem-se, para m blocos RL paralelos:

$$u(t) - R_0 i_{Lk0} - L_0 \frac{d}{dt} i_{Lk0} - (R_1 i_{Lk0} - R_1 i_{Lk1}) - (R_2 i_{Lk0} - R_2 i_{Lk2}) - \dots - (R_m i_{Lk0} - R_m i_{Lkm}) - v_k = 0 \quad (2.61)$$

Isolando a derivada da corrente i_{Lk0} , verifica-se que:

$$\frac{d}{dt} i_{Lk0} = - \frac{\left(\sum_{j=0}^{j=m} R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_m \right)}{L_0} i_{Lk0} + \frac{R_1}{L_0} i_{Lk1} + \frac{R_2}{L_0} i_{Lk2} + \dots + \frac{R_m}{L_0} i_{Lkm} - \frac{1}{L_0} v_k + \frac{1}{L_0} u(t) \quad (2.62)$$

Tem-se ainda que:

$$L_1 \frac{d}{dt} i_{Lk1} = R_1 (i_{Lk0} - i_{Lk1}) \quad (2.63)$$

Isolando a derivada da corrente i_{Lk1} , segue que:

$$\frac{d}{dt}i_{Lk1} = \frac{R_1}{L_1}i_{Lk0} - \frac{R_1}{L_1}i_{Lk1} \quad (2.64)$$

Continuando os cálculos, observa-se ainda que:

$$L_2 \frac{d}{dt}i_{Lk2} = R_2(i_{Lk0} - i_{Lk2}) \quad (2.65)$$

Isolando a derivada da corrente i_{Lk2} , segue que:

$$\frac{d}{dt}i_{Lk2} = \frac{R_2}{L_2}i_{Lk0} - \frac{R_2}{L_2}i_{Lk2} \quad (2.66)$$

Por fim, para o m -ésimo bloco RL, segue que:

$$L_m \frac{d}{dt}i_{Lkm} = R_m(i_{Lk0} - i_{Lkm}) \quad (2.67)$$

Isolando a derivada da corrente i_{Lkm} , tem-se:

$$\frac{d}{dt}i_{Lkm} = \frac{R_m}{L_m}i_{Lk0} - \frac{R_m}{L_m}i_{Lkm} \quad (2.68)$$

Verificando a tensão no k -ésimo circuito π :

$$v_k = \frac{2}{C} \int idt \Rightarrow \frac{d}{dt}v_k = \frac{2}{C} \left(i_{Lk0} - \frac{G}{2}v_k \right) \quad (2.69)$$

Então, encontra-se a derivada da tensão v_k :

$$\frac{d}{dt}v_k = \frac{2}{C}i_{Lk0} - \frac{G}{C}v_k \quad (2.70)$$

Na forma da técnica de variáveis de estado, de acordo com a equação (2.56):

$$\dot{[X]} = \frac{d[X]}{dt} = [A] \begin{bmatrix} i_{Lk0} \\ i_{Lk1} \\ i_{Lk2} \\ \vdots \\ i_{Lkm} \\ v_k \end{bmatrix} + [B]u(t). \text{ Logo,} \quad (2.71)$$

$$\dot{[X]} = \begin{bmatrix} -\frac{\sum_{j=0}^{j=m} R_j}{L_0} & \frac{R_1}{L_0} & \frac{R_2}{L_0} & \dots & \frac{R_m}{L_0} & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{R_1}{L_1} & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{R_2}{L_2} & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ \frac{R_m}{L_m} & 0 & 0 & \dots & -\frac{R_m}{L_m} & 0 \\ \frac{2}{C} & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{G}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lk0} \\ i_{Lk1} \\ i_{Lk2} \\ \vdots \\ i_{Lkm} \\ v_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (2.72)$$

A matriz $[A]$ descrita em (2.59), é uma matriz tridiagonal de dimensão $(n \times n)$ e uma matriz $[A_{kk}]$ genérica da diagonal principal possui dimensão de $(m+2) \times (m+2)$ e, conforme as equações diferenciais descritas de (2.61) a (2.70), é escrita na forma:

$$[A_{kk}] = \begin{bmatrix} -\frac{\sum_{j=0}^{j=m} R_j}{L_0} & \frac{R_1}{L_0} & \frac{R_2}{L_0} & \dots & \frac{R_m}{L_0} & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{R_1}{L_1} & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{R_2}{L_2} & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ \frac{R_m}{L_m} & 0 & 0 & \dots & -\frac{R_m}{L_m} & 0 \\ \frac{2}{C} & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{G}{C} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

onde k pode variar de $1, \dots$ até n .

Uma matriz qualquer da subdiagonal superior em (2.73) possui ordem $(m+2)$ e possui um único elemento não nulo que se situa na primeira coluna da última linha e possui valor $(-1/C)$. Ou seja, um elemento genérico $[A_{k-1,k}]$ em (2.73) é escrito como:

$$[A_{k-1,k}] = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -1/C & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

onde k pode variar de 2 até n .

Quanto às matrizes da subdiagonal inferior, as mesmas também possuem um único elemento não nulo que se situa na última coluna da primeira linha e o valor deste elemento é $(1/L_0)$. Ou seja, um elemento de $[A_{k+1,k}]$ em (2.73) pode ser escrito na forma geral:

$$[A_{k+1,k}] = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1/L_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

onde k pode variar de 1 até $(n-1)$.

Portanto, pode-se observar que a matriz $[A]$ tem dimensão $(m+2)n \times (m+2)n$.

Em (2.61), $[B]$ é um vetor coluna de dimensão $n(m+2)$. Para o caso de $u(t)$ ser uma fonte de tensão conectada no início da linha, $[B]$ possui um único elemento não nulo, que é o primeiro elemento da matriz, e possui valor $(1/L_0)$, ou seja, o vetor $[B]$ terá a forma geral como se segue:

$$[B]^T = \begin{bmatrix} 1/L_0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Desta forma, usando (2.56) a (2.76) é possível descrever uma cascata de circuitos π que representa uma linha de transmissão dependente da frequência. O conjunto de equações

diferenciais ordinárias pode ser transformado em um conjunto de equações diferenciais lineares usando a integração trapezoidal que pode ser resolvida usando um computador pessoal [9, 16].

Para verificar o desempenho do modelo proposto por Kurokawa et al. [15] foi utilizada uma linha hipotética de 10 km, que possui um transformador em seu terminal, representado por C_T . A linha foi energizada com um degrau de tensão de 20 kV, como mostrado na Figura 2.13.

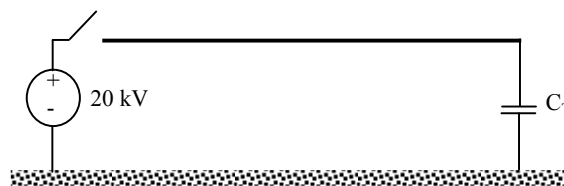


Figura 2.13: Linha Monofásica.

Na Figura 2.13 foi utilizado um transformador que, durante as operações de manobras e chaveamentos da linha, pode ser representado por uma capacitância $C_T = 6 \text{ nF}$ [16].

Considerou-se que a linha mostrada na Figura 2.14 possui um comprimento de 10 km e o condutor possui um raio de 2,54 cm. Os parâmetros transversais foram considerados constantes, sendo que a capacitância unitária da linha possui valor $C = 11,11 \text{ nF/km}$ e a condutância unitária tem valor $G = 0,556 \text{ μS/km}$. A linha está a uma altura média de 18,9 m em relação ao solo.

Considerou-se que os parâmetros longitudinais da linha, por unidade de comprimento, podem ser sintetizados por um bloco RL série conectado em série com 4 blocos RL paralelos, ou seja, $m = 4$, considerando ainda os efeitos solo e pelicular, conforme mostra a Figura 2.14.

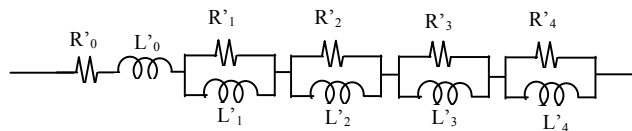


Figura 2.14: Circuito utilizado para sintetizar os parâmetros unitários da linha.

Os valores dos resistores e indutores utilizados no circuito da Figura 2.14 são mostrados na Tabela 2.1.

TABELA 2.1

ELEMENTOS UTILIZADOS PARA SINTETIZAR OS PARÂMETROS DA LINHA DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA

Resistências (ohms)		Indutâncias (mH)	
R'_0	0,026	L'_0	2,209
R'_1	1,470	L'_1	0,740
R'_2	2,354	L'_2	0,120
R'_3	20,149	L'_3	0,100
R'_4	111,111	L'_4	0,050

As Figuras 2.15 e 2.16 mostram os parâmetros longitudinais unitários da linha (associação série e paralela de resistências e indutâncias) dependentes da frequência [8] que foram sintetizados pelo circuito mostrado na Figura 2.14.

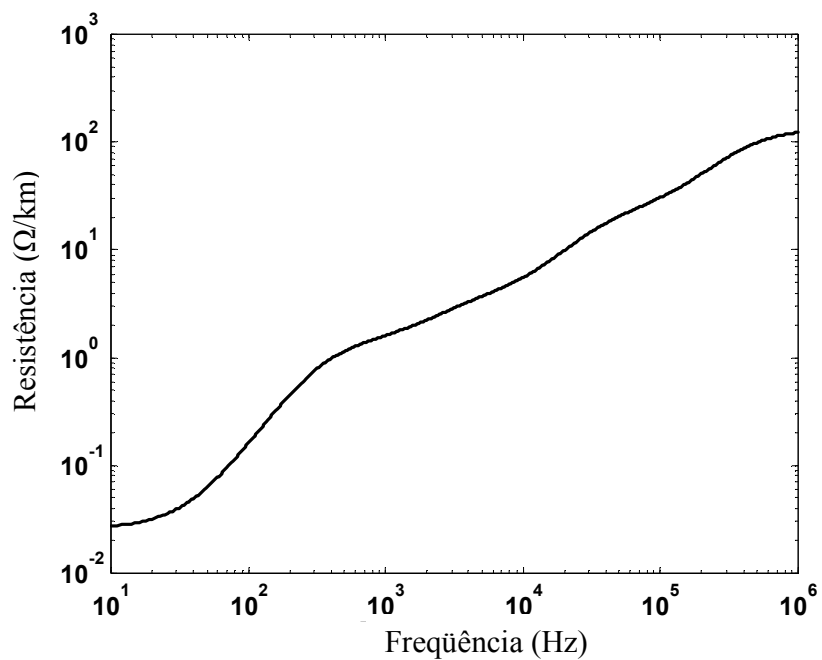


Figura 2.15: Resistência Unitária da Linha Sintetizada com os Elementos da Tabela 2.1.

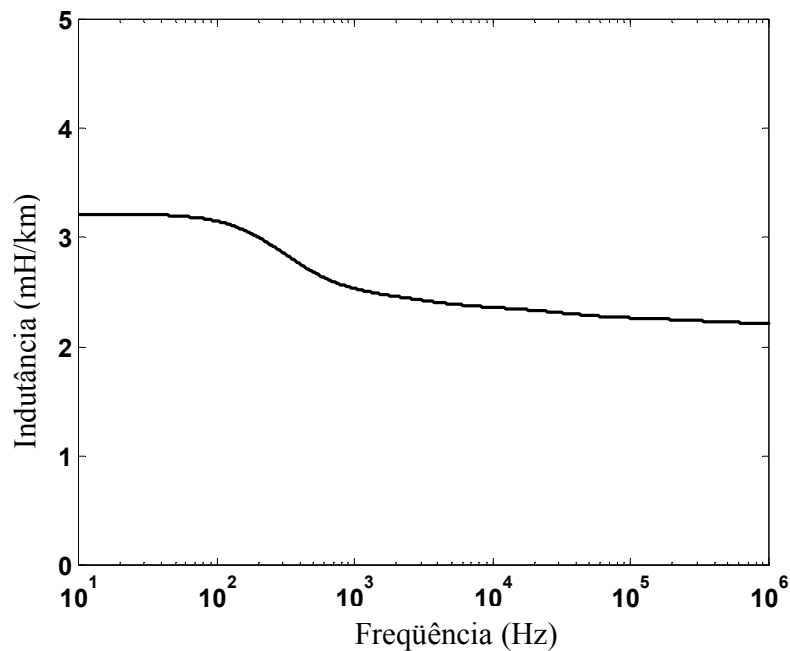


Figura 2.16: Indutância Unitária da Linha Sintetizada com os Elementos da Tabela 2.1.

A linha da Figura 2.13 foi representada por meio de 110 circuitos π ($n = 110$) em cascata e, em seguida, as correntes e tensões na mesma foram escritas na forma de variáveis de estado conforme mostradas em [15, 19, 20, 22 e 23]. Portanto, tem-se 10 km de linha correspondentes a 110 circuitos π em cascata. Logo, são aproximadamente 90,91 m de linha para cada circuito π , com $m = 4$ blocos RL paralelos (1 circuito π para cada 90,91 m de linha).

Para se assegurar que as equações de estado desenvolvidas neste trabalho para representar a linha cujos parâmetros longitudinais são dependentes da freqüência, mostrada na Figura 2.13, compararam-se os resultados obtidos da solução destas equações de estado com os resultados obtidos do procedimento desenvolvido por Tavares *et al.* [3], onde as correntes e as tensões ao longo da cascata de circuitos π foram calculadas com um programa do tipo EMTP [8].

Na Figura 2.17 é mostrada a tensão na extremidade da linha obtida das soluções das equações de estado e de um programa do tipo EMTP após o processo de energização.

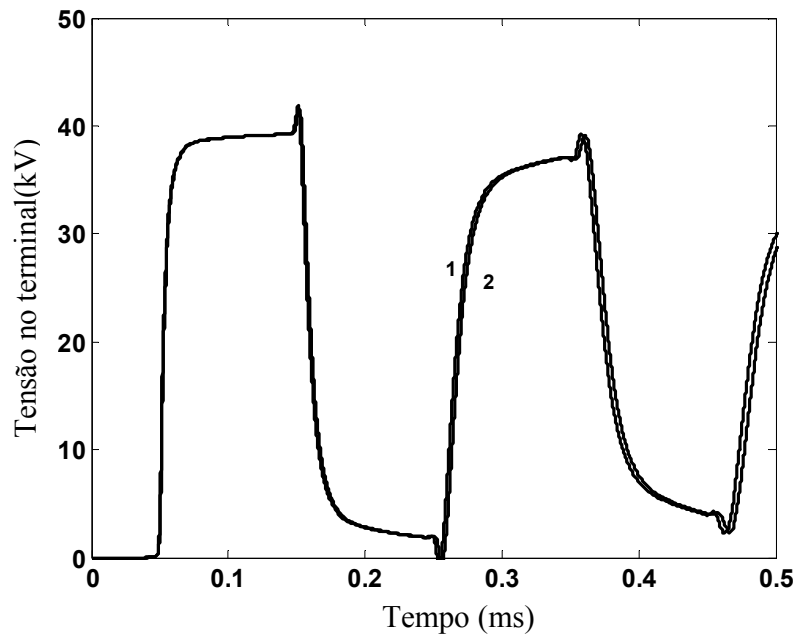


Figura 2.17: Tensão no terminal da linha obtida com as equações de estado (curva 1) e com o programa EMTP (curva 2).

A Figura 2.17 mostra que, praticamente, não há diferença relevante entre os resultados obtidos das equações de variáveis de estado e o programa EMTP. O defasamento para tempos maiores implica em alterações em baixa frequência. Conseqüentemente, as equações de estado que descrevem as correntes e tensões ao longo da linha de transmissão estão corretas.

No capítulo seguinte será feita uma avaliação de como o efeito corona se manifesta ao longo das linhas de transmissão e seu impacto.

Capítulo 3

Efeito Corona em Linhas de Transmissão

3.1 Introdução

Neste capítulo, avalia-se como o efeito corona se manifesta ao longo da linha de transmissão e qual o seu impacto.

3.2 Manifestação do Efeito Corona na Linha de Transmissão

Pode-se obter o fenômeno do efeito corona por meio de um dispositivo com simetria cilíndrica, como o exemplo da Figura 3.1. O efeito corona se manifesta por uma luminosidade em volta do fio ou condutor.



Figura 3.1: Fenômeno do efeito corona.

Fenômenos do tipo corona ocorrem em linhas de transmissão. Estas descargas são prejudiciais tanto pela perda de energia, como pela deformação da onda de tensão que provocam. Para atenuar estas descargas, o diâmetro externo dos condutores deve ser suficientemente grande — pelo menos quatro centímetros para tensões de 400 kV — e isto se obtém na prática com cabos de seção oca e condutores múltiplos.

O efeito corona aparece na superfície dos condutores de uma linha aérea de transmissão quando o valor do gradiente de potencial aí existente excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar, i.e., quando excede a rigidez dielétrica do ar. Mesmo em um campo elétrico uniforme, entre dois eletrodos planos paralelos no ar, uma série de condições controla essa tensão disruptiva, tais como a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a fotoionização incidente. No campo não uniforme em torno de um condutor, a divergência do campo exerce influência adicional, e qualquer partícula contaminadora, como poeira, por exemplo, transforma-se em fonte pontual de descargas [24].

Descargas elétricas em gases são geralmente iniciadas por um campo elétrico que acelera elétrons livres aí existentes. Quando esses elétrons adquirem energia suficiente do campo elétrico, podem produzir novos elétrons por choque com outros átomos. É o processo de ionização por impacto. Durante a sua aceleração no campo elétrico, cada elétron livre colide com átomos de oxigênio, nitrogênio e outros gases presentes, perdendo, nessa colisão, parte de sua energia cinética. Ocasionalmente um elétron pode atingir um átomo com força suficiente, de forma a excitá-lo. Nessas condições, o átomo atingido passa a um estado de energia mais elevado. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron que colidiu com o átomo perde parte de sua energia, para criar esse estado. Posteriormente, o átomo atingido pode reverter ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. Um elétron pode igualmente colidir com um íon positivo, convertendo-o em átomo neutro. Esse processo, denominado recombinação, também libera excesso de energia.

Toda a energia liberada ou irradiada deve provir do campo elétrico da linha, portanto, do sistema alimentador, para o qual representa perda de energia, por conseguinte, prejuízo. Essas perdas e suas conseqüências econômicas tem sido objeto de pesquisas e estudos há mais de meio século, não obstante, só recentemente se alcançaram meios que permitem determinar, com

razoável segurança, qual o desempenho que se poderá esperar para as diversas soluções possíveis para uma linha de transmissão, no que diz respeito a essas perdas. De um modo geral, elas se relacionam com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais. Constatou-se, por exemplo, que as perdas por corona em linhas em tensões extra-elevadas podem variar de alguns quilowatts por quilômetro até algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva ou garoa. As perdas médias, como se verificou, podem constituir apenas pequenas partes das perdas por efeito Joule, porém as perdas máximas podem ter influência significativa nas demandas dos sistemas, pois a capacidade geradora para atender a essa demanda adicional deverá ser prevista ou a diferença de energia importada.

São significativos os valores obtidos em medições realizadas na Rússia, por exemplo, em linhas de 500 kV. Mediram-se perdas médias anuais da ordem de 12 kW/km de linha trifásica, com tempo bom, perdas máximas da ordem de 313 kW/km sob chuva e 374 kW/km sob garoa.

Tanto as perdas com tempo bom como aquelas sob chuva dependem dos gradientes de potencial na superfície dos condutores. As perdas sob chuva dependem não só do índice de precipitações, como também do número de gotículas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores.

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica há muito têm sido consideradas como causadoras de impacto visual sobre o meio ambiente em que são construídas. Uma espécie de poluição visual que os conservadores, urbanistas e estetas há muito vem combatendo. O advento da transmissão em tensões extra-elevadas e as perspectivas de transmissão em tensões ultra-elevadas enfatizaram dois outros tipos de perturbação do meio, provocados pelo efeito corona, sendo-lhes atribuído também caráter de poluição : a rádio interferência (RI) e o ruído audível (RA).

Descargas individuais de corona provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração que se propagam ao longo das linhas, resultando em campos eletromagnéticos em suas imediações. Essas descargas ocorrem durante ambos os semiciclos da tensão aplicada, porém aquelas que ocorrem durante os semiciclos positivos é que geram ruídos capazes de interferir na rádio recepção nas faixas de frequência das transmissões em amplitude modulada (AM), em

particular nas faixas das ondas médias. Eflúvios de corona também ocorrem em outros componentes das linhas, tais como ferragens e isoladores, porém a intensidade dos ruídos gerados é bastante inferior à dos gerados pelos condutores. Ferragens defeituosas, pinos e contra pinos mal-ajustados ou soltos podem igualmente gerar pulsos eletromagnéticos. Estes, no entanto, ocorrem nas faixas das frequências de "FM" e "TV", provocando interferência ou ruídos nas recepções de "FM" e "TV" (TVI).

A geração desses ruídos interfere com os direitos individuais dos moradores das vizinhanças das linhas de transmissão, uma vez que os ruídos se podem propagar além das faixas de servidão das linhas. Ainda não é possível projetar-se economicamente uma linha de transmissão aérea em tensões acima de 100 kV e que não produza rádio interferência. Não obstante, critérios corretos e atenção aos aspectos relevantes do projeto podem produzir um sistema que resulte pelo menos em níveis aceitáveis de perturbação. O estudo do comportamento das linhas no que se refere à "RI" é bastante complicado em virtude dos inúmeros fatores que afetam seu comportamento, muitos dos quais ainda são indefinidos e nem mesmo completamente entendidos, de forma que os efeitos cumulativos são considerados em bases estatísticas.

Nos projetos de pesquisa sobre corona em tensões extra e ultra-elevadas verificou-se, outrossim, que uma outra manifestação sua não mais poderia ser descurada nas linhas de 500 kV ou tensões mais elevadas, dado o caráter de poluição ambiental que apresenta. É a poluição acústica causada pelo ruído característico provocado pelos efeitos do corona. Esse aspecto também vem merecendo crescente atenção no dimensionamento das linhas, a fim de que o grau de perturbação seja mantido em níveis aceitáveis. Tais estudos mostraram que o ruído auditivo é função dos máximos gradientes de potencial na superfície dos condutores.

Em vista do exposto, pode-se concluir que, para as linhas de transmissão em tensões extra e ultra-elevadas, o dimensionamento econômico das linhas está diretamente relacionado com a escolha do gradiente de potencial máximo admissível na superfície dos condutores das linhas de transmissão. Gradientes para uma mesma classe de tensão somente são reduzidos mediante o emprego dos condutores de diâmetros maiores, ou maior espaçamento entre fases, ou pelo emprego de condutores múltiplos, com número crescente de sub-condutores, entre outros.

Alternativamente, vêm sendo pesquisados outros métodos para a redução da rádio interferência e ruídos audíveis, como o seu envolvimento em capas de neoprene. A disposição dos sub-condutores em forma de polígono irregular também vem sendo investigada como meio de reduzir os gradientes de potencial. O emprego dos condutores múltiplos assimétricos tem apresentado problemas de estabilidade mecânica sob ação do vento, e a melhor solução sob esse aspecto poderá conflitar com a melhor solução sob o aspecto de distribuição de gradientes de potencial.

O capítulo seguinte será feito um estudo do modelo proposto em [9] para representar o efeito corona em linhas de transmissão monofásicas em situações em que os parâmetros da linha podem ser considerados constantes. Os resultados serão mostrados e comparados com a literatura, em especial os apresentados no artigo do Mamis [9]. Também será desenvolvido um modelo para a linha de transmissão monofásica, que leva em conta o efeito da frequência sobre os parâmetros e o efeito corona. Serão feitas análises da contribuição do trabalho no estudo do efeito corona nas linhas de transmissão, considerando então a inserção do efeito corona no modelo de linha desenvolvido a parâmetros variáveis com a frequência.

Capítulo 4

Inclusão do Efeito Corona no Modelo da Linha de Transmissão

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os modelos utilizados para a representação do efeito corona em linhas de transmissão, bem como os resultados e análises do modelo proposto.

4.2 Representação do Efeito Corona

Os modelos de Gary e Skilling-Umoto consideram o efeito corona em uma posição genérica P da linha que pode ser representado por uma condutância e uma capacitância adicionais entre o condutor e a terra. Estes elementos são denominados capacitância corona e indutância corona e são elementos extras conectados no circuito quando a tensão V nestes elementos é maior que a tensão em que o efeito corona se manifesta V_C e a taxa de variação de V em relação ao tempo é positiva. Considerando os modelos dinâmicos que representam o efeito corona, a capacitância e a condutância corona são conectadas no circuito se as condições descritas são satisfeitas simultaneamente [9, 20]:

- A tensão V no ponto P é maior que a tensão V_C ($V > V_C$);
- A derivada da tensão V sobre os elementos corona (no ponto P) em relação ao tempo é positiva $\left(\frac{dV}{dt} > 0\right)$.

Caso uma das condições acima não seja atendida, este ponto não terá a capacitância C_C e a condutância G_C que representam o efeito corona, sendo elementos nulos.

Quando as condições são satisfeitas, é possível calcular C_C e G_C em função da tensão sobre estes elementos. Desta forma, quando a linha é modelada através da técnica de variáveis de espaço e há a presença do efeito corona na posição genérica determinada na linha, as matrizes [A] e [B] deverão ser corrigidas. Assim, a capacitância e a condutância que representam o efeito corona na linha são inseridas na matriz [A] como mostrada por [6, 9, 16 e 17].

Os modelos utilizados neste trabalho para calcular C_C e G_C e analisar os modelos a parâmetros constantes através de uma cascata de circuitos π e a parâmetros longitudinais variáveis com a frequência são: Modelo de Gary e Modelo de Skilling-Umoto [9].

4.2.1 Modelo de Gary

Se a capacitância corona for representada pelo modelo de Gary, a mesma é definida como sendo [9, 20]:

$$C_C = C \eta \left(\frac{V}{V_C} \right)^{\eta-1} \quad F/m \quad (4.1)$$

Em (3.1), C_C é a capacitância corona, C a capacitância geométrica do segmento de linha representado por um circuito π , V é a tensão aplicada sobre a capacitância transversal da linha, V_C é o valor mínimo de tensão necessário para que o efeito corona se manifeste e η é o coeficiente definido como sendo [9]:

$$\eta = 0,22 r + 1,2 \quad (4.2)$$

onde r é o raio do condutor em centímetros.

4.2.2 Modelo de Skilling-Umoto

No modelo de Skilling-Umoto, a capacitância corona é definida como sendo [9]:

$$C_C = 2k_C \left(1 - \frac{V}{V_C}\right) \quad F/m \quad (4.3)$$

onde

$$k_C = \sigma_C 10^{-11} \sqrt{\frac{r}{2h}} \quad (4.4)$$

Em (3.4), σ_C é uma constante de perda por corona, h é a altura do condutor em relação a terra e r é o raio do condutor em centímetros.

4.2.3 Condutância Corona

A condutância corona é calculada como sendo [9]:

$$G_C = k_R \left(1 - \frac{V_C}{V}\right)^2 \quad mho/m \quad (4.5)$$

onde

$$k_R = \sigma_G 10^{-11} \sqrt{\frac{r}{2h}} \quad (4.6)$$

Em (3.6), σ_G é uma constante de perda por corona.

4.3 Representação do Efeito Corona em Linhas cujos Parâmetros são considerados Constantes

4.3.1 Descrição do Modelo

Para o estudo do efeito corona no modelo de uma linha de transmissão em que se consideram inicialmente seus parâmetros constantes (fixos), este trabalho propõe a utilização dos modelos de Gary e de Skilling-Umoto [9].

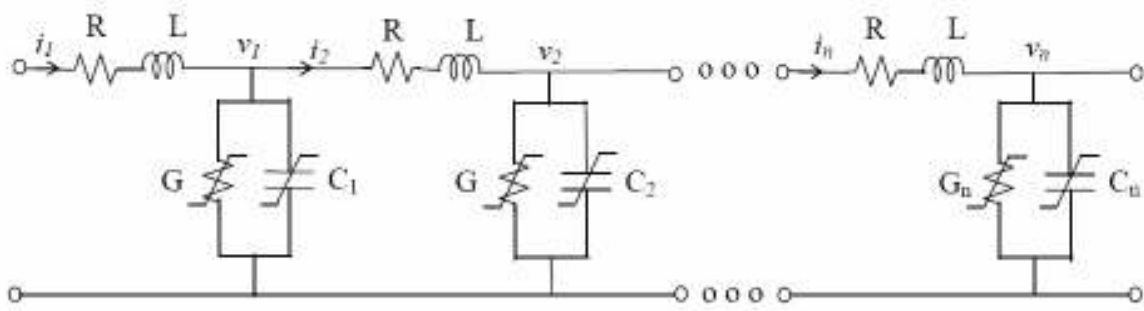


Figura 4.1: Modelo equivalente de uma linha de transmissão com corona, representada através de uma cascata de circuitos π .

Deste modo, o efeito corona é representado por meio de uma capacitância e de uma condutância corona que são conectadas em paralelo com os parâmetros transversais da linha em cada circuito, do tipo mostrado na Figura 4.1.

4.3.2 Resultados e Análises

Para verificar o desempenho do modelo, utilizou-se uma linha monofásica representada através de uma cascata de circuitos π , considerando o efeito corona. Os resultados obtidos nesta seção do trabalho foram comparados com os resultados medidos por Mamis [9].

A Figura 4.2 mostra uma linha monofásica de 2185,4 m de comprimento.

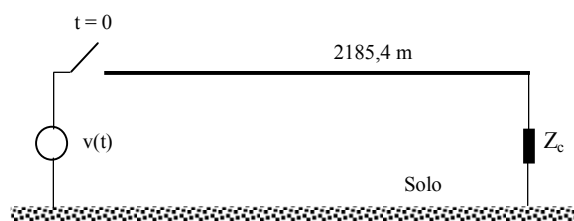


Figura 4.2: Linha monofásica submetida a uma tensão dupla exponencial.

Na Figura 4.2, Z_c é a impedância característica da linha. A linha é representada por 110 circuitos π (19,87 m para cada circuito π), pois se sabe que quanto mais circuitos π melhor. São considerados parâmetros longitudinais não dependentes da frequência, cuja resistência R é igual a 11,35 Ω/km e indutância L igual a 1,73 mH/km.

Consideraram-se os parâmetros transversais constantes, sendo que a capacitância unitária da linha possui valor $C = 11,11 \text{ nF/km}$ e a condutância unitária com um valor $G = 0,556 \text{ }\mu\text{S/km}$. A linha está a uma altura média de 18,9 m em relação ao solo e o condutor possui um raio de 2,54 cm.

Os valores das constantes do efeito corona dos modelos de Gary e Skilling-Umoto foram obtidos do artigo do Mamis [9], tais como: $\sigma_C = 30$ e $\sigma_G = 10^7$ (σ_C e σ_G são adimensionais). Considerou-se ainda a tensão corona $V_C = 550 \text{ kV}$ [9].

Foi aplicada no início da linha (posição $x = 0$) uma tensão dupla exponencial escrita como se segue:

$$v(t) = V_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (4.7)$$

sendo $V_0 = 4100 \text{ kV}$, $a = 0,1 \cdot 10^7$ e $b = 0,33 \cdot 10^6$.

Na Figura 4.3 é mostrada a resposta da simulação da tensão ao longo da linha considerando o efeito corona e os parâmetros transversais constantes através da técnica de variáveis de estados de acordo com o modelo de Gary. Foram consideradas cinco posições e obtidas as tensões, cujas curvas foram plotadas ao longo do eixo do tempo (Figura 4.3).

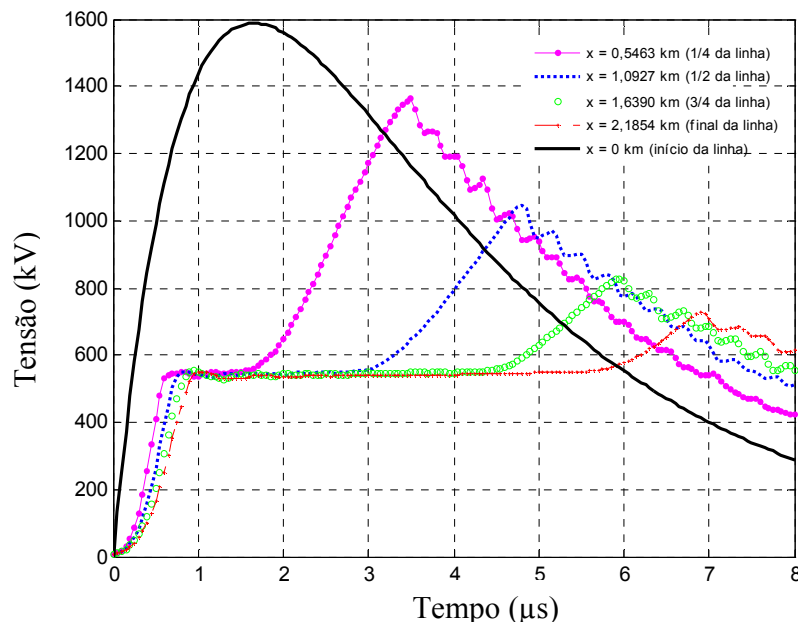


Figura 4.3: Simulação da tensão ao longo da linha após energização, considerando o efeito corona através do Modelo de Gary e parâmetros constantes.

Na Figura 4.4 é mostrada a resposta da simulação da tensão ao longo da linha considerando o efeito corona e os parâmetros transversais constantes através da técnica de variáveis de estados de acordo com o modelo de Skilling-Umoto.

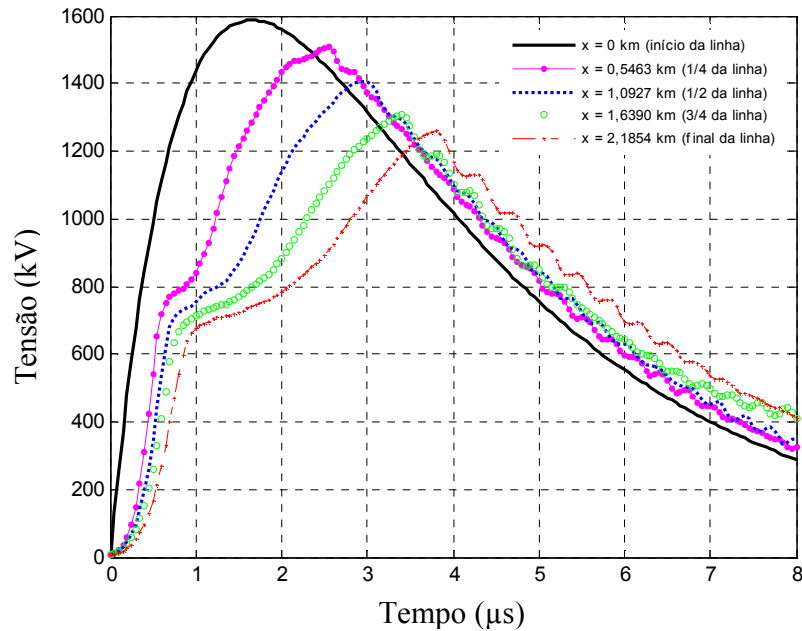


Figura 4.4: Simulação da tensão ao longo da linha após energização, considerando o efeito corona através do Modelo Skilling-Umoto e parâmetros constantes.

Assim, verifica-se que se pode representar a linha diretamente no domínio do tempo por meios de variáveis de estado, considerando-a determinada por uma cascata de circuitos π e parâmetros transversais constantes, levando ainda em consideração o efeito corona através dos modelos de Gary e Skilling-Umoto. De acordo com estes modelos, a admitância que representa o efeito corona é função do valor da tensão e da taxa de variação da mesma.

Os resultados da simulação mostram que, na linha utilizada como exemplo, o efeito corona reduz significativamente o valor de pico das tensões, o que está de acordo com os resultados obtidos em outros trabalhos [22].

Foi utilizada uma linha monofásica, mas pode ser aplicado os conceitos em linhas trifásicas que possuem plano de simetria vertical [26]. O modelo foi implementado no ambiente

MatLab, mas pode ser implementado em outras linguagens computacionais, utilizando o método numérico de integração trapezoidal [6].

4.4 Representação do Efeito Corona em Linhas considerando o Efeito da Freqüência sobre os Parâmetros Longitudinais

4.4.1 Descrição do Modelo

Quando a tensão na superfície do condutor é mais elevada do que a tensão em que o efeito corona se manifesta, o ar em torno do condutor torna-se ionizado e os íons carregados. O efeito corona em ondas viajantes resulta basicamente em perdas de energia e mudança da capacitância transversal. Conseqüentemente, em uma linha monofásica dependente da freqüência representada pelo modelo desenvolvido e mostrado no Capítulo 2 deste trabalho, o efeito corona pode ser representado como uma capacitância e uma condutância adicionais entre o condutor e a terra em cada seção π que representa a linha. A Figura 4.5 mostra a inclusão do efeito no k -ésimo circuito π da cascata que representa uma linha dependente da freqüência ($k > 1$ e $k < n$, sendo n o número de circuitos π).

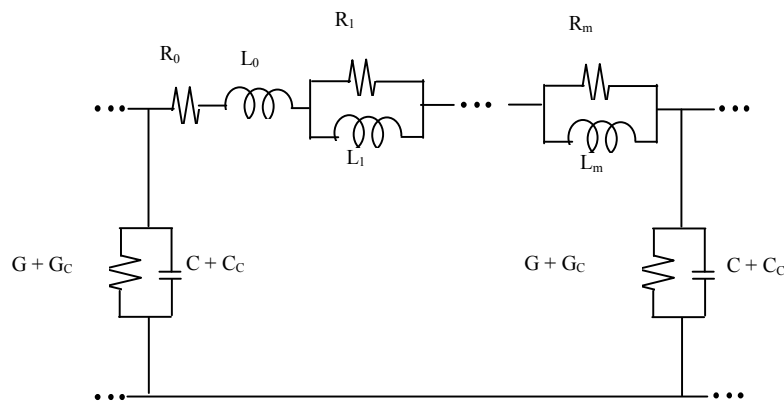


Figura 4.5: k -ésimo circuito π da cascata com efeito corona.

Na Figura 4.5 C_C e G_C são, respectivamente, a capacitância e a condutância corona da linha [20], C é a capacitância geométrica e G é a condutância geométrica que pode ser geralmente negligenciada, exceto nas freqüências muito baixas [27].

Como já foi dito no Capítulo 2, para que o efeito corona esteja presente em um ponto genérico da linha representada por meio de uma cascata de circuitos π , do tipo mostrado na Figura 4.5, é necessário que a tensão neste ponto satisfaça as duas condições: se a tensão V é maior que V_C e se a taxa de variação de V em relação ao tempo é positiva. Caso uma das condições não seja atendida, este ponto não terá a capacitância e a condutância que representam o efeito corona, C_C e G_C , respectivamente. Assim, se o efeito corona se manifestar em determinado ponto, a capacitância e a condutância que representam o efeito corona na linha devem então ser inseridas na matriz $[A]$, calculada através da técnica de variáveis de estados, utilizando o método numérico de integração trapezoidal [6] para o desenvolvimento das equações de estado. Nota-se que a cascata é constituída por n circuitos π , onde o efeito da frequência é representado por m associações de elementos R e L em paralelo, conforme mostrado na Figura 4.5.

4.4.2 Resultados para uma Linha Energizada com uma Tensão Constante

Para validar o modelo proposto, utilizou-se uma linha monofásica hipotética de 10 km de comprimento, mostrada no Capítulo 2.

Na simulação a linha foi energizada com uma fonte de tensão de 600 kV DC (fonte de tensão tipo degrau) como mostrado na Figura 4.6.

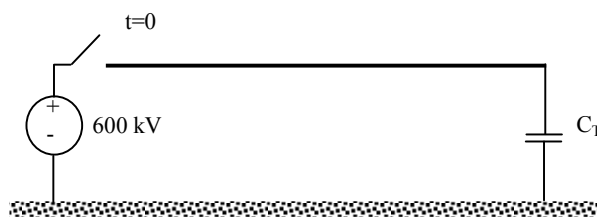


Figura 4.6: Linha de Transmissão monofásica com efeito corona.

Considerou-se a capacitância geométrica C e a condutância geométrica G da linha por unidade de comprimento constantes, cujas magnitudes foram mostradas no Capítulo 2.

A linha de transmissão foi representada através de uma cascata de 110 circuitos π e seus parâmetros longitudinais dependentes da frequência são mostrados pelo circuito mostrado da Figura 4.7. Nota-se que $m = 4$. Os valores dos resistores e dos indutores usados no circuito de Figura 4.7 já foram mencionados anteriormente no Capítulo 2. O efeito da corona foi representado pelo modelo de Gary e pelo modelo de Skilling-Umoto [9, 20], cujos parâmetros são: $V_C = 550$ kV, $\sigma_C = 30$ e $\sigma_G = 10^7$. As correntes e as tensões ao longo da linha foram descritas através das equações de estado e solucionadas pela técnica de integração trapezoidal.

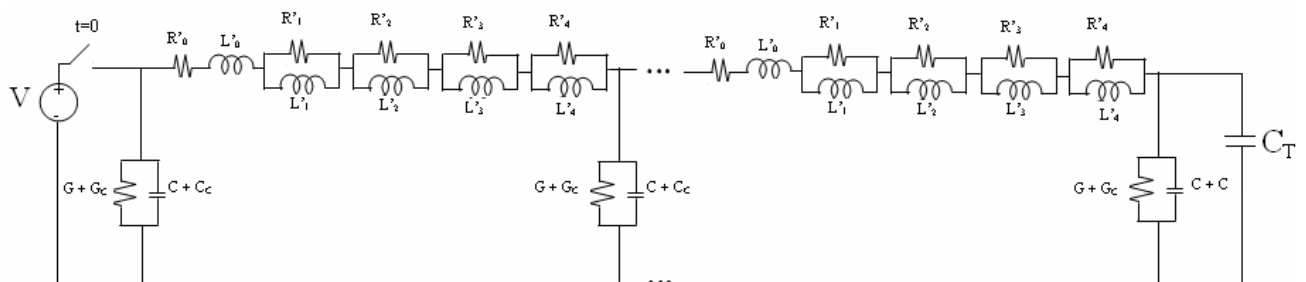


Figura 4.7: Linha de Transmissão monofásica representada por uma cascata de circuitos π , considerando o efeito corona e os parâmetros longitudinais dependentes da frequência.

São mostrados os resultados obtidos com uma linha dependente da frequência, fazendo uma análise do efeito corona através dos modelos de Gary e Skilling-Umoto. É feita uma comparação das tensões simuladas em um determinado ponto da linha para dois casos: sem efeito corona e com efeito corona.

As Figuras 4.8 – 4.11 mostram as tensões em quatro diferentes posições da linha durante o processo de energização, com e sem a inclusão do efeito corona. O efeito corona foi representado pelo modelo de Gary.

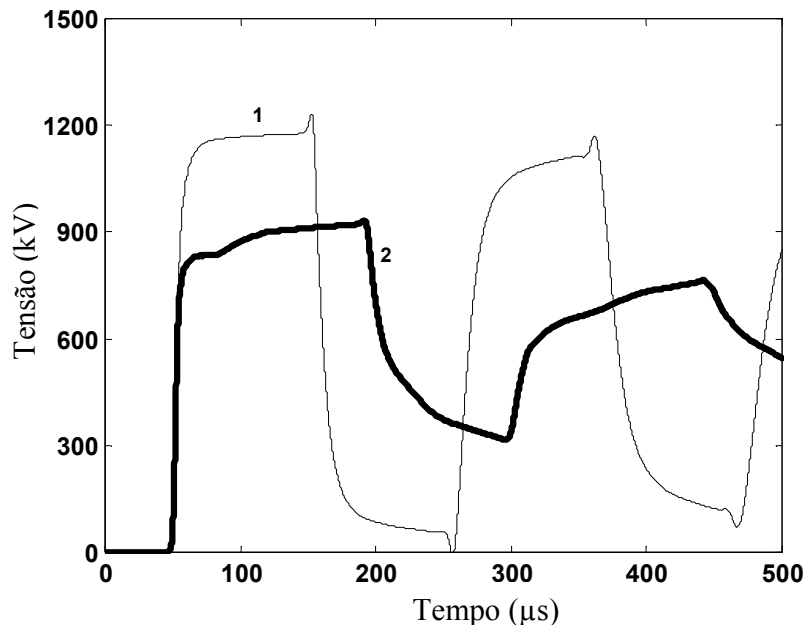


Figura 4.8: Tensões simuladas no terminal da linha (posição $x = 10$ km): sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

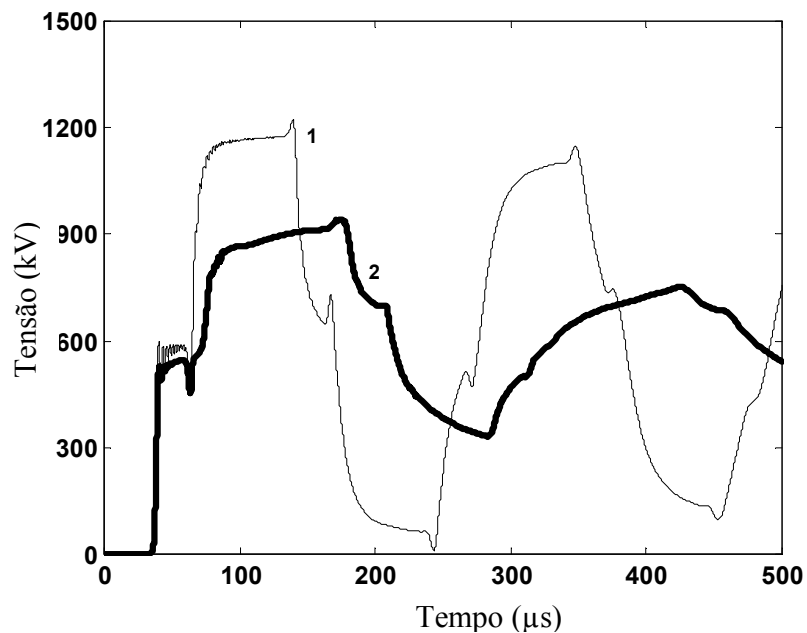


Figura 4.9: Tensões simuladas em 7,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

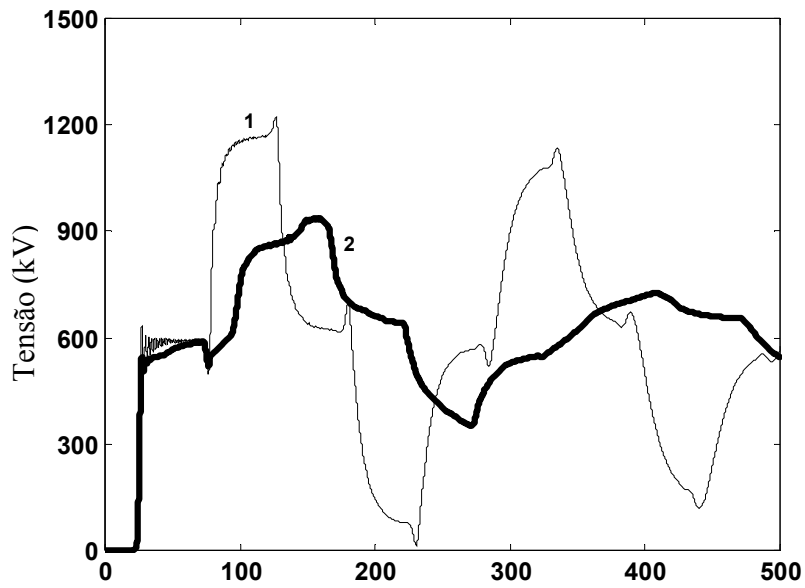


Figura 4.10: Tensões simuladas em 5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

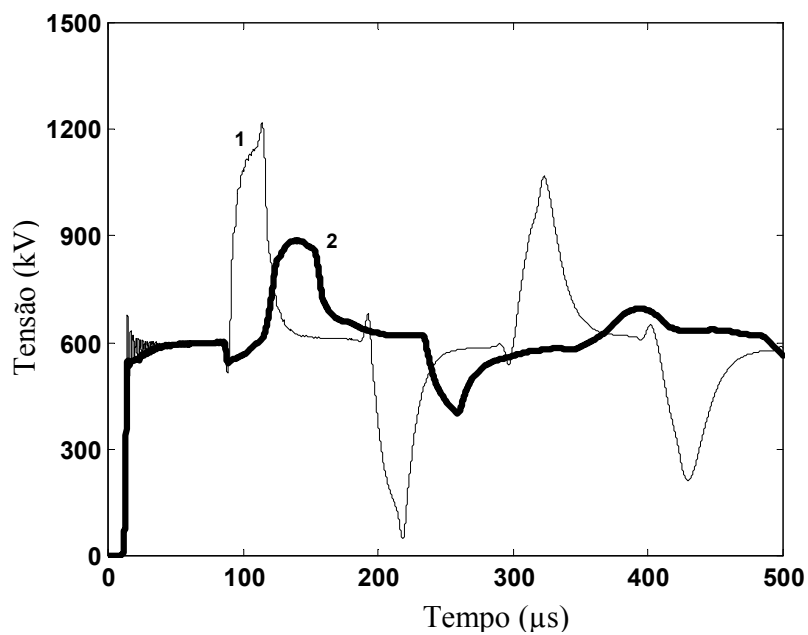


Figura 4.11: Tensões simuladas em 2,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

Nas Figuras 4.8 – 4.11 são verificadas as sobretensões, resultado do processo de energização que se propaga ao longo da linha, que são atenuadas e distorcidas pelo efeito corona. Conseqüentemente, conclui-se que o modelo proposto de uma linha dependente da frequência considerando o efeito corona é correto e pode ser considerado, sem dúvidas, adequado para representar uma linha de transmissão durante a simulação de transitórios eletromagnéticos.

As Figuras 4.12 – 4.15 mostram as tensões em quatro diferentes posições da linha durante o processo de energização, com e sem a inclusão do efeito corona. O efeito corona foi representado pelo modelo de Skilling-Umoto. Nestas figuras é possível observar que o modelo de Skilling-Umoto também pode ser usado para representar o efeito corona em uma linha dependente da frequência. Neste modelo, as distorções e as atenuações das sobretensões ao longo da linha são menos acentuadas do que quando o modelo de Gary é usado. Estes resultados concordam com aqueles obtidos por Mamis [9].

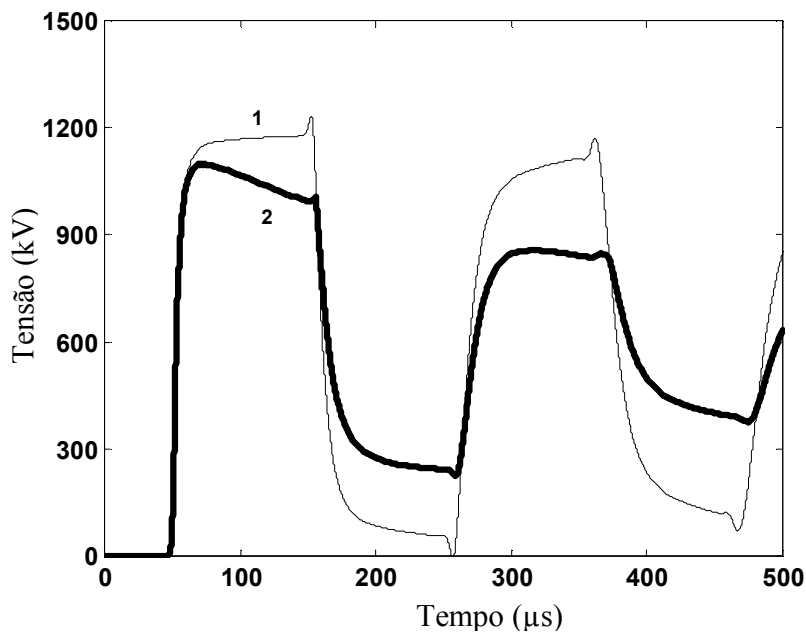


Figura 4.12: Tensões simuladas no terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

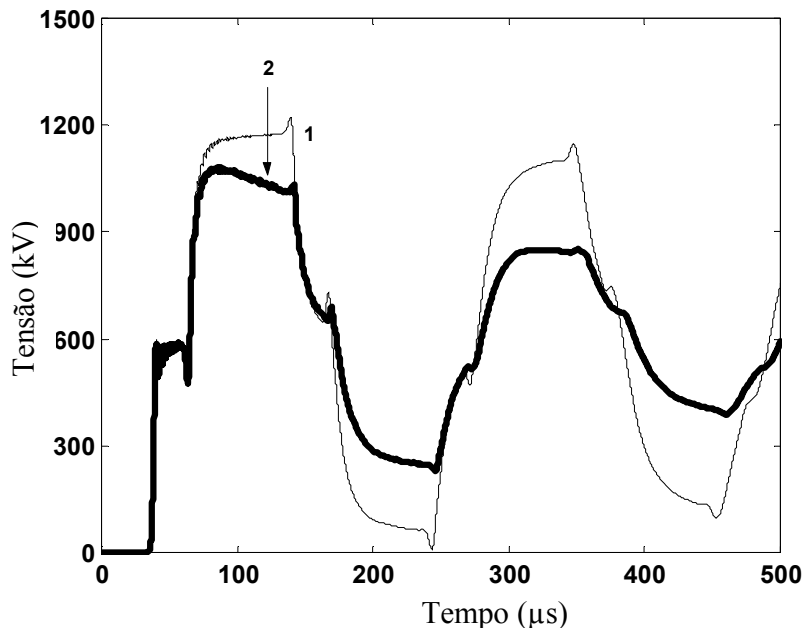


Figura 4.13: Tensões simuladas em 7,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

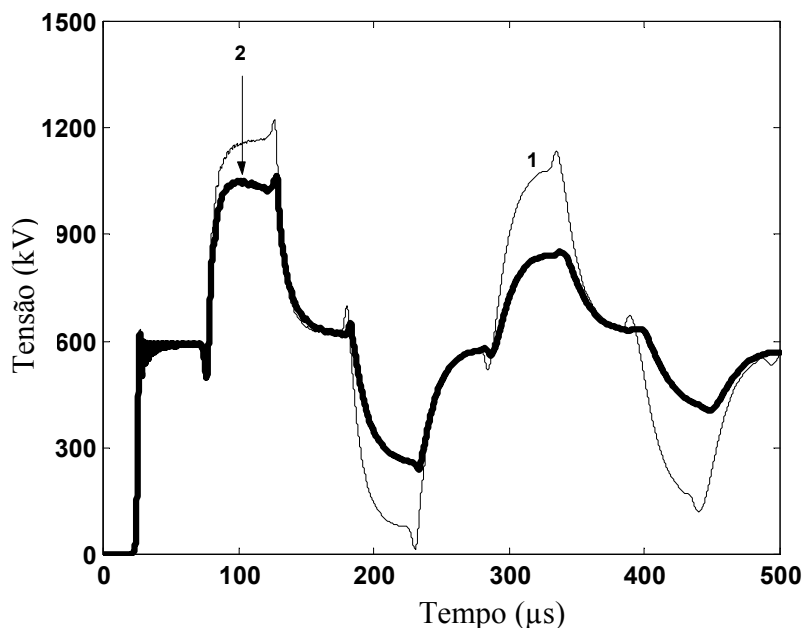


Figura 4.14: Tensões simuladas em 5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

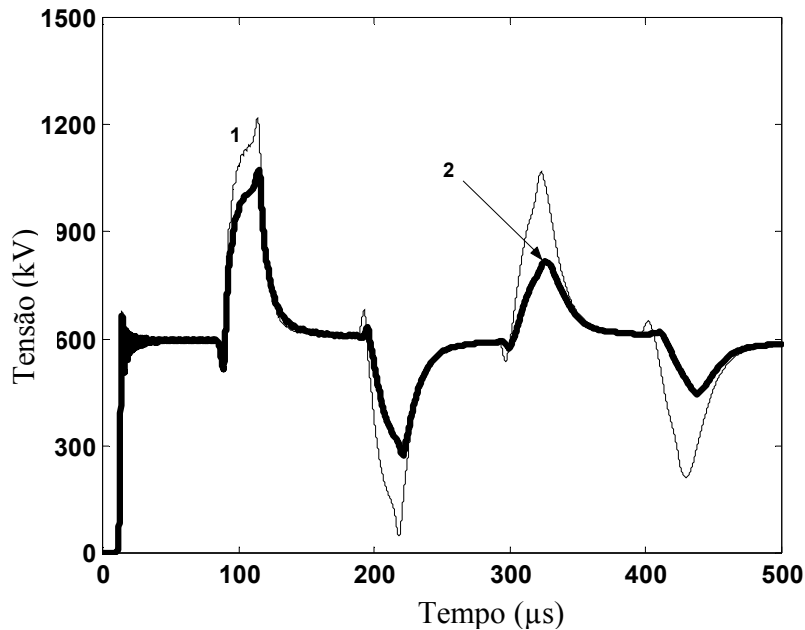


Figura 4.15: Tensões simuladas em 2,5 km do terminal da linha: sem efeito corona (curva 1) e com efeito corona (curva 2).

De acordo com os modelos de Gary e Skilling-Umoto, a admitância que representa o efeito corona é função do valor da tensão V sobre o elemento e da taxa de variação desta tensão.

Os resultados de simulação mostram que, na linha de transmissão utilizada como exemplo, o efeito corona reduz o valor de pico das sobretensões, o que significa fisicamente que ocorrem perdas de energia ao longo da linha. Estes resultados estão de acordo com resultados obtidos em outros trabalhos, tais como o de Carneiro *et al.* [22].

4.4.3 Resultados para uma Linha Energizada com uma Tensão Exponencial

Um outro exemplo proposto para simular a resposta da tensão de uma linha monofásica cujos parâmetros são dependentes da frequência é dado pela Figura 4.16 a seguir:

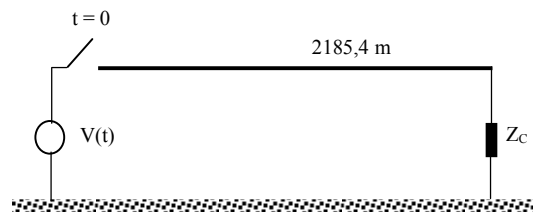


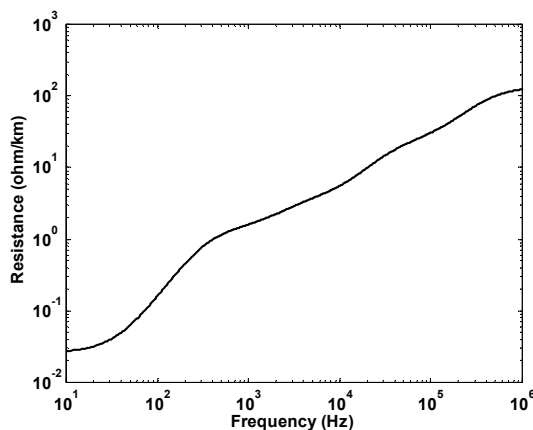
Figura 4.16: Linha monofásica.

Na Figura 4.16, Z_C é a impedância característica da linha [14]. Linha esta representada através de 110 circuitos π , onde serão consideradas duas situações: uma delas não são considerados os parâmetros longitudinais dependentes da frequência e neste caso foram usadas elevadas frequências nos parâmetros da linha, que são $r = 12 \Omega/\text{km}$ e $l = 2,2 \text{ mH}/\text{km}$. Estes valores foram obtidos através das Figuras 4.17a e 4.17b para 100 kHz, a partir dos valores da Tabela 4.1. Em outra situação analisada os parâmetros longitudinais da linha são considerados como dependentes da frequência, por unidade de comprimento, e neste caso foram usados 4 blocos RL série cujos valores estão dispostos na Tabela 4.1.

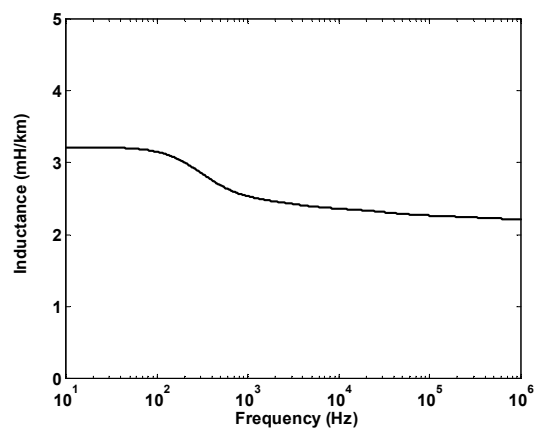
TABELA 4.1

ELEMENTOS UTILIZADOS PARA SINTETIZAR OS PARÂMETROS DA LINHA DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA COM CORONA E DE MAIS DADOS PARA SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DA FIG. 4.16.

Dados Utilizados	Resistências (ohms)		Indutâncias (mH)	
$V_C = 550 \text{ kV}$	R'_0	0,026	L'_0	2,209
$\sigma_c = 30$; $\sigma_g = 10^7$	R'_1	1,470	L'_1	0,740
$Z_C = r - j\omega l$	R'_2	2,354	L'_2	0,120
$C = 11,11 \text{ nF}/\text{km}$	R'_3	20,149	L'_3	0,100
$G = 0,556 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$	R'_4	111,111	L'_4	0,050



(a)



(b)

Figura 4.17 (a) Resistência unitária da linha sintetizada com os elementos da Tabela 4.1.

(b) Indutância unitária da linha sintetizada com os elementos da Tabela 4.1.

O raio do condutor é considerado de 2,54 cm e sua altura em relação ao solo de 18,9 cm.

Foi aplicada uma tensão dupla exponencial no início da linha (posição $x = 0$), dada da seguinte forma:

$$V(t) = V_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (5.1)$$

sendo $V_0 = 4100$ kV, $a = 0,1 \cdot 10^7$ e $b = 0,331 \cdot 10^6$.

A Figura 4.18 mostra a resposta da linha com efeito corona – utilizando o modelo de Skilling-Umoto, considerando as matrizes de espaço de estados dependentes da frequência. São mostradas as tensões em quatro posições da linha. As curvas de tensões são traçadas deslocando a ordem de seu curso, atrasando o eixo central do tempo.

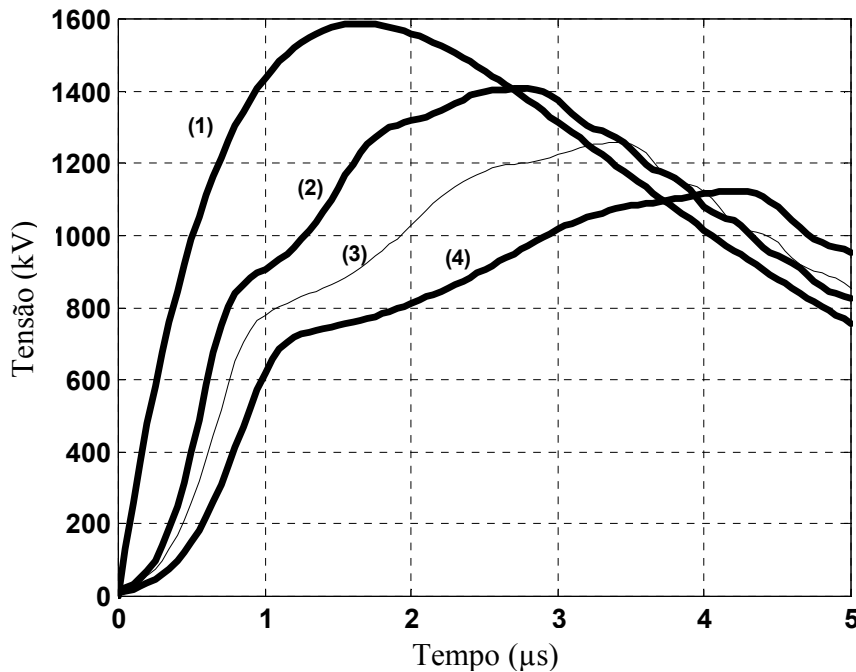


Figura 4.18: Resposta da simulação da linha com efeito corona (modelo de Skilling-Umoto) e parâmetros dependentes da frequência na posição $x = 0$ m (curva 1), $x = 655,6$ m (curva 2), $x = 1291,4$ m (curva 3) e $x = 2185,4$ m (curva 4).

Desta forma, na Figura 4.18 verifica-se a resposta de uma linha monofásica com efeito corona e parâmetros dependentes da frequência que pode ser comparada com o resultado obtido por Wagner *et al.* [25], sendo observado uma boa coerência entre as curvas obtidas pela técnica de espaço de estado (usando o modelo de Skilling-Umoto) e Wagner *et al.* [25], de acordo com a

Figura 4.19, que mostra a resposta de uma linha monofásica obtida em um procedimento experimental. Portanto, conclui-se que o modelo proposto dependente da frequência é coerente e está correto, podendo ainda ser adequado para representar uma linha durante a simulação de transitórios eletromagnéticos.

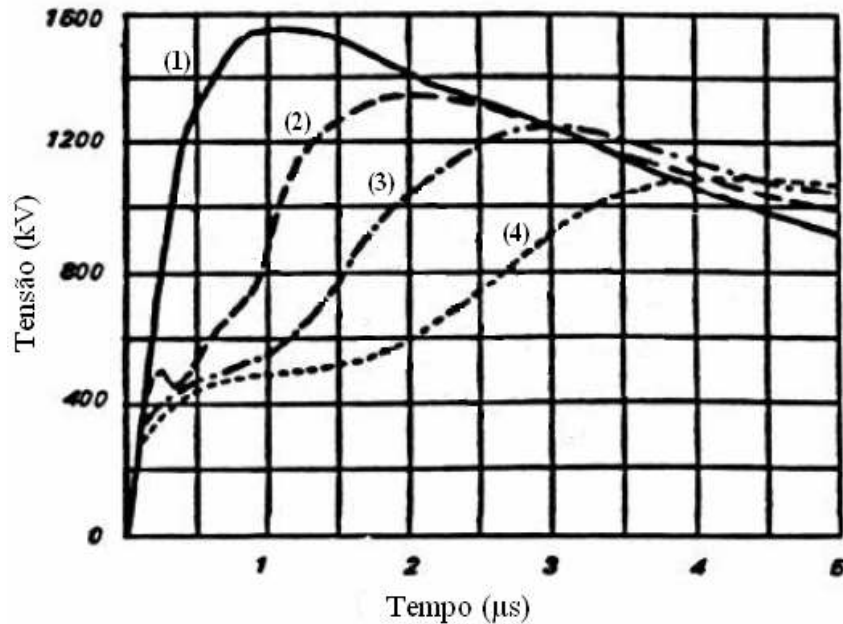


Figura 4.19: Resposta da simulação da tensão ao longo da linha com efeito corona na posição $x = 0$ m (curva 1), $x = 658,4$ m (curva 2), $x = 1295,5$ m (curva 3) e $x = 2185,4$ m (curva 4) [25].

4.5 Conclusões:

Este trabalho mostrou um modelo criado para representar uma linha de transmissão monofásica através de uma cascata de circuitos π , cujos parâmetros longitudinais são dependentes da frequência, considerando o efeito corona.

O modelo proposto para representar uma linha dependente da frequência é bem conhecido e já tem sido usado como um modelo nos programas do tipo EMTP [18]. Entretanto, em programas do tipo EMTP é muito difícil incluir um modelo analítico do efeito corona. Devido a esta dificuldade, as tensões e correntes ao longo da cascata de circuitos π foram descritas pela técnica de variáveis de estados. Esta representação é útil porque pode ser usada para simular transitórios eletromagnéticos, considerando os parâmetros da linha de transmissão dependentes da frequência, diretamente no domínio do tempo sem utilizar transformada inversa de Fourier.

Os resultados da simulação obtidos da equação de estado para a linha de transmissão sem a representação do efeito corona, mas com a correta representação da dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência, são praticamente idênticos aos resultados obtidos com um programa do tipo EMTP, como o Microtran. Entretanto, após o primeiro valor de pico da tensão, há um pequeno atraso (*delay*) entre a referência e o obtido com o modelo proposto. O atraso apresentado poderia ser devido ao pequeno comprimento da linha analisada e aos erros arredondados. Este atraso ocorre provavelmente porque Microtran limita a quantidade de números significativos durante a edição da rede que representa a dependência da frequência dos parâmetros longitudinais. O mesmo não ocorre quando os espaços de estado são validados com MatLab. Entretanto, o atraso de tempo ainda necessita ser analisado com cuidado.

O efeito corona foi representado pelos modelos de Gary e de Skilling-Umoto. O modelo proposto para uma linha dependente da frequência com o efeito corona foi usado para simular os transitórios resultantes da energização de uma linha monofásica. Os resultados obtidos mostram que as sobretensões, resultado do processo de energização, são atenuadas e distorcidas pelo efeito corona. Estes resultados concordam com aqueles mostrados em [9, 20]. Conseqüentemente, pode-se concluir que o modelo proposto para a linha dependente da frequência com o efeito corona está correto e pode ser considerado adequado para representar a linha durante simulações de transitórios.

O modelo foi usado para representar uma linha monofásica, mas pode facilmente ser estendido a uma linha trifásica não idealmente transposta com um plano de simetria vertical se a matriz de Clarke for usada como sendo a matriz de transformação modal [3].

Acredita-se que a maior contribuição deste trabalho é propor um modelo amigável para representar uma linha de transmissão dependente da frequência com efeito corona que pode ser implementado diretamente no domínio do tempo sem o uso de programas do tipo EMTP. O modelo pode ser usado para ensinar conceitos básicos sobre propagações da onda em linhas de transmissão, analisar distribuições transitórias de tensões e correntes em linhas de transmissão e calcular transitórios eletromagnéticos. O modelo proposto pode ser facilmente implementado em um computador pessoal [16].

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho de dissertação teve por objetivo a inclusão do efeito corona em uma linha de transmissão dependente da frequência, representada através de uma cascata de circuitos π . Os parâmetros longitudinais da linha são dependentes da frequência e sintetizados por meio de uma associação série paralela de resistores e indutores, considerando o uso da técnica de variáveis de estados para calcular as correntes e tensões ao longo da linha. Foi demonstrada a exatidão e a validade da linha dependente da frequência proposta, comparada com os resultados obtidos na literatura no domínio do tempo e os modelos de Gary e Skilling-Umoto para representar o efeito corona. Assim, foram feitas análises das perdas e da variação dinâmica dos parâmetros do efeito corona.

As conclusões e análises críticas em relação ao trabalho desenvolvido são apresentadas a seguir.

O modelo proposto da linha dependente da frequência é bem conhecido e esta linha já está sendo usada como uma linha modelo em programas do tipo EMTP. Entretanto, em programas do tipo EMTP é muito difícil incluir um modelo analítico de corona. Devido a esta dificuldade, neste trabalho as correntes e tensões ao longo da cascata de circuitos π foram descritos através da técnica de espaço de estados. Esta representação é útil e interessante, porque pode ser utilizada para simular transitórios eletromagnéticos, considerando os parâmetros da linha de transmissão dependentes da frequência, diretamente no domínio do tempo sem o uso da transformada inversa

de Fourier. Ou seja, a grande vantagem em utilizar a técnica de variáveis de estado, considerando os parâmetros longitudinais da linha de transmissão variáveis com a frequência, é que a mesma permite que a resposta seja obtida diretamente no domínio do tempo, sem a necessidade de se utilizar integrais de convolução e/ou transformadas rápidas de Fourier. Uma outra vantagem da utilização da técnica de variáveis de estado é que a mesma permite a obtenção da distribuição das ondas de correntes e tensões ao longo da linha, como foi descrito por Umoto *et al.* [28].

Foi observada uma boa concordância entre as curvas obtidas neste trabalho com o modelo proposto comparados com os resultados experimentais verificados na literatura [3, 6, 9, 10, 21, 22, 23 e 25].

Observando os resultados, verificou-se que o modelo de Skilling-Umoto utilizado para representar o efeito corona em uma linha dependente da frequência apresentou distorções e atenuações nas sobreensões ao longo da linha menos acentuadas do que o modelo de Gary. Portanto, conclui-se que o modelo de corona de Skilling-Umoto é mais satisfatório se comparado com o modelo de Gary, pois o primeiro apresenta menos reflexões de tensão na linha, o que significa uma perda de energia por efeito corona um pouco menor, conforme mencionado por Mamis em [9]. O resultado de Skilling-Umoto seria a melhor representação do efeito corona, pois tem uma menor perda de energia. Como eficiência significa menor perda de energia elétrica, então significa que uma linha com menor perda de energia é mais eficiente.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, podem ser sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Estender o modelo utilizado para representar uma linha de transmissão trifásica não idealmente transposta com um plano de simetria vertical, usando a matriz de Clarke como sendo uma matriz de transformação modal de acordo com Tavares *et al.*[3];
- Estudo detalhado do impacto do efeito corona em linhas de transmissão mais extensas, maiores de 100 km, por exemplo, verificando a importância do comprimento da linha neste caso;

- Estudar o caso em que se tem um número maior de circuitos π em cascata representando a linha de transmissão, analisando o impacto da inserção do efeito corona cujos parâmetros são dependentes da frequência e considerar no terminal desta linha um banco de capacitores, de forma a analisar a ocorrência de sobretensões no sistema. Neste caso seria interessante verificar a importância da quantidade de circuitos tipo π em cascata, observando quanto maior o número de circuitos π melhor.

Referências Bibliográficas

- [1] Alvarado, F.L., “Parallel solution of transient problems by trapezoidal integration,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98 (3), págs. 1080-1090, 1979.
- [2] Araújo, Antonio E. A., “Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia”, 261 págs., Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [3] Tavares, M. C., J. Pissolato e C. M. Portela, “Mode domain multiphase line model - Use in transients studies”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, nº 4, págs. 1533-1544, Estados Unidos, Outubro 1999.
- [4] Martins, Thiago de Faria Rocha Dourado, “Análise da Resposta de Linhas de Transmissão em Coordenadas de Fase Usando Funções Racionais”, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 92 págs., COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2005.
- [5] Nguyen, T. T. e H. Y. Chan, “Evolution of modal transformation matrices for overhead transmission lines and underground cables by optimization method”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, nº 1, págs. 200-209, Jan. 2002.
- [6] Macías, J. A. R., A. G. Expósito e A. Alfonso, “A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº 2, págs. 894-903, Abril 2005.
- [7] Ametani, A., “The Application of the Fast Fourier Transform to Electrical Transients Phenomena”, *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 10, nº 4, págs. 277-281, 1973.
- [8] Dommel, H. W., “Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP theory book)”, Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1986.

- [9] Mamis, M. S., “State-space transient analysis of single-phase transmission lines with corona”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST'2003)*, New Orleans, 2003.
- [10] Dommel, H. W., “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, págs. 388-399, Abril 1969.
- [11] Tavares, M. C., “Modelo de Linha de Transmissão Polifásico Utilizando Quase-Modos”, *Tese de Doutorado*, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1998.
- [12] Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica, <http://www.aneel.gov.br>, acessado em 01/04/2005.
- [13] Neves, W. L. A., “Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência”, curso ministrado no *XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2002.
- [14] Fuchs, R. D., “Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; Teoria das Linhas em Regime Permanente”, 2a edição, Editora livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 1979.
- [15] Kurokawa, S., F. N. R. Yamanaka, A. J. Prado, L. F. Bovolato e J. Pissolato, “Representação de linhas de transmissão por meio de variáveis de estado levando em consideração o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais”, *Revista SBA Controle & Automação*, 2006.
- [16] Nelms, R. M., G. B. Sheble, S. R. Newton e L. L. Grigsby, “Using a personal computer to teach power system transients”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 4, nº 3, págs. 1293-1297, Agosto 1989.
- [17] Mamis, M. S. e A. Nacaroglu, “Transient voltage and current distributions on transmission lines”, *IEE Proc. Gener. Transm. and Distrib.*, vol. 149, nº 6, págs. 705-712, Novembro 2002.

- [18] Sarto, M. S, A. Scarlatti e C. L. Holloway, “On the use of fitting models for the time-domain analysis on problems with frequency-dependent parameters”, *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, págs. 588-593, 2002.
- [19] Li, X. R., O. P. Malik e Z. D. Zhao, “Computation of transmission line transients including corona effects”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, nº 3, págs. 1816-1822, Julho 1989.
- [20] Naredo, J. L., A. C. Soudack e J. R. Marti, “Simulation of transients on transmission lines with corona via the method of characteristics”, *IEE Proc. Gener. Transm. and Distrib.*, vol. 142 (1), págs. 81-87, Janeiro 1995.
- [21] Ramírez, A., J. L. Naredo, P. Moreno e L. Guardado, “Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics”, *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23 (3), págs. 179-188, 2001.
- [22] Carneiro, S., H. W. Dommel, J. R. Marti e H. M. Barros, “An efficient procedure for the implementation of corona models in electromagnetic transients programs”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, nº 2, págs. 849-855, Abril 1994.
- [23] Gary, C., A. Timotin e D. Cristescu, “Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect”, *IEE Proceedings*, vol. 130-A (5), págs. 264-272, 1983.
- [24] Khalifa, M., “High-voltage Engineering: Theory and Practice”, Marcel Dekker Inc., New York, 1990.
- [25] Wagner, C.F., I.W. Gross e B.L. Lloyd, “High-voltage impulse tests on transmission lines,” *AIEE Transactions*, vol. 73, III, págs. 196-210, 1954.
- [26] Kurokawa, S., “Parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão calculados a partir das correntes e tensões de fase”, *Tese de Doutorado*, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2003.

[27] Martinez, J. A., B. Gustavsen e D. Durbak, “Parameters determination for modeling system transients – Part I: Overhead lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº 3, págs. 2038-2044, Julho 2005.

[28] Umoto, J. e T. Hara, “Numerical analysis of surge propagation on single-conductor systems considering corona losses”, *Electr. Eng. Japan*, vol. 89 (5), págs. 21-28, 1969.

Anexo 1:

Exemplos de Ensaios Laboratoriais de Efeito Corona



Feixe expandido 2 x 230 kV CHESF Banabuiú – Fortaleza/CE

Fonte: <http://www.eln.gov.br/setel/dados/arquivos/AUDIT%C3%93RIO/69>, acesso em: 14 de junho de 2006.



espaçadores
para
feixe expandido
CHESF 500 kV
ensaios no
CEPEL



feixe expandido
CHESF 500 kV
teste de
corona visual
no CEPEL



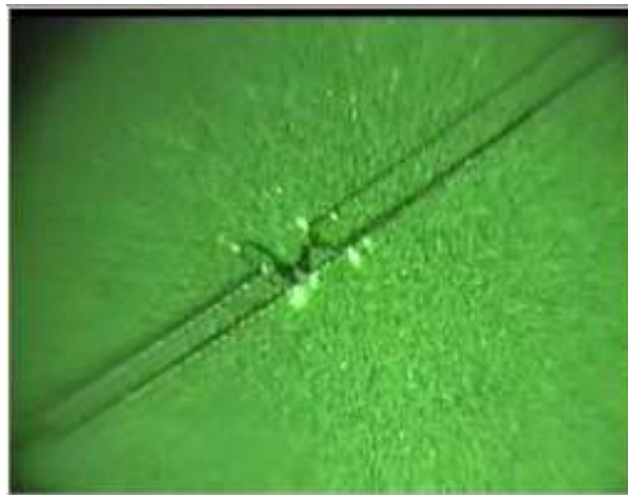
As Figuras anteriores mostram ensaios laboratoriais realizados pela CHESF de teste de efeito corona visual.

A seguir, temos o efeito corona em SEE de 500kV da CEMIG:





A seguir, visualização da ocorrência de corona nas sapatas dos grampos de ancoragem:



Anexo 2:

Câmeras Detectoras de Efeito Corona

1. DayCor II

O DayCor II é hoje a mais avançada e sensível câmera de inspeção por ultra-violeta em tempo real em linhas de transmissão e distribuição. As grandes vantagens do aparelho são as detecções do efeito corona através da UV-C, possibilitando a inspeção durante o dia e localização exata do ponto onde está ocorrendo o mesmo. Essa localização ocorre porque o aparelho é composto por uma câmera de imagem visível e outra de imagem UV, combinando-as eletronicamente.

É uma câmera de fácil utilização, sendo possível manuseá-la tanto no solo como em inspeções aéreas.





A tecnologia UV é complementar à existente tecnologia infravermelha. Agora é possível detectar componentes defeituosos no começo da degradação sem a necessidade de carga na linha, pois a inspeção por UV é completamente dependente da tensão. Onde o infravermelho é excelente para localizar conexões de alta resistência, a detecção por UV pode localizar outras condições problemáticas como isoladores defeituosos, contaminação ou até mesmo componentes impróprios; fios quebrados; perda de espaços e capacidade; poluição; pequenos isoladores; instalações impróprias de sinais de corona; isoladores quebrados e danificados.



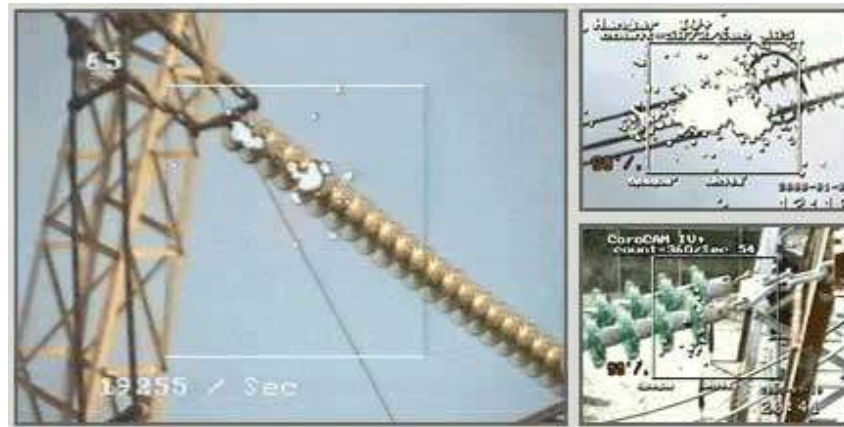
Fonte: <http://www.rem.ind.br/industrial/daycor.asp>, acesso em: 20/09/2006.

2. COROCAM IV+

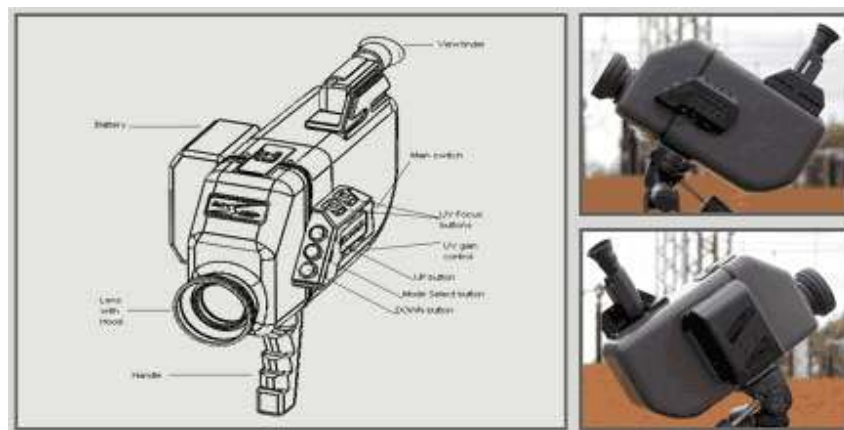
As câmeras de detecção de corona além de detectar produzem imagens das ondas de luz geradas pelo efeito corona. Desta maneira, a visibilidade ajuda ao engenheiro a aplicar a ferramenta apropriada para solucionar o problema.

O uso do helicóptero para percorrer as linhas de transmissão permite detectar a presença incipiente do efeito corona. A proximidade e baixa velocidade de vôo favorecem a detecção. Sem

ser necessária a utilização de plataformas giro-estabilizadas, os vôos são estacionários em cada torre, o qual permite obter imagens de excelente qualidade.



O equipamento “COROCAM IV+” é a câmara mais avançada em seu tipo. Este equipamento permite a medição à distância de campos elétricos focalizados, a partir de tecnologias de detecção em tempo real de ondas ultravioleta.



Fonte: <http://www.hangarservicios.com/efecto%20corona%20PORT.htm>, acesso: em 20/04/2007.