

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

# COMPARAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA INCLUSÃO DO EFEITO DO SOLO NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Aluno: Rodolfo Antônio Ribeiro de MouraOrientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira SchroederCo-orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos do Nascimento

SÃO JOÃO DEL-REI, FEVEREIRO DE 2014



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

# COMPARAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA INCLUSÃO DO EFEITO DO SOLO NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

por

## Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Linha de pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos do Nascimento

### SÃO JOÃO DEL-REI, FEVEREIRO DE 2014



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura

COMPARAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA INCLUSÃO DO EFEITO DO SOLO NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

### SÃO JOÃO DEL-REI, FEVEREIRO DE 2014

"O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano." – Isaac Newton.

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos." – Albert Einstein.

### AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a meus pais, Antônio e Cleta, que sempre me apoiaram e me ajudaram nas escolhas que fiz durante toda minha vida. A formação de meu caráter devo única e exclusivamente a forma como meus pais me criaram.

Agradeço também ao Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, que desde o começo vem modelando meu perfil acadêmico. É de praxe no mundo acadêmico chamar orientador como "pai", acredito que o mesmo não tenha sido nada diferente disso para mim desde quando entrei na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), sempre dedicado e um exemplo de profissionalismo.

Agradeço aos meus irmãos e minha sobrinha, pois os mesmos sempre me trazem motivos para manter-me firme nas batalhas da vida.

Agradeço também aos meus amigos pela paciência e presença em minha vida, especialmente aqueles que tive oportunidade de vivenciar mais tempo.

Agradeço meus companheiros do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da UFSJ, onde pude fazer parte do corpo docente do mesmo nesses últimos meses.

Aos professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL) da UFSJ.

À Capes pelo apoio financeiro.

# Sumário

Re	sumo			iii
Ab	stract			iv
Lis	ta de	Figu	iras	v
Lis	ta de	Tab	ela	xii
1.	Intro	oduç	ão	2
	1.1.	Rele	evância do Tema sob Investigação	2
	1.2.	Cor	ntextualização da Dissertação	3
	1.3.	Obj	etivos do Trabalho	5
	1.3.	1.	Objetivo Geral	5
	1.3.	2.	Objetivos específicos	5
	1.4.	Met	odologia	5
	1.5.	Pub	licações decorrentes deste trabalho	6
	1.6.	Org	anização do texto	7
2.	Par	âmet	tros de Linhas de Transmissão: Uma Visão Eletromagnética	7
2	2.1.	Intro	odução	7
	2.1.	1.	Premissas e Simplificações	7
2	2.2.	Incl	usão do Efeito do Solo nos Parâmetros Longitudinais	9
	2.2.	1.	Metodologia de J. R. Carson	10
	2.2.2.		Metodologia de M. Nakagawa	12
	2.2.3.		Metodologia de A. Deri e outros	13
	2.2.	4.	Método de T. Noda	15
2	2.3.	Incl	usão do Efeito do Solo nos Parâmetros Transversais	16
	2.3.1.		Método de M. Nakagawa	. 16
	2.3.2.		Método Aproximado de F. Tesche	17
2 r	2.4. nos pa	Incl arâm	usão da variação das características elétricas do solo com a frequência etros Longitudinais e Transversais	ו 18
	2.4.	1.	Correção Segundo H. Scott	18
	2.4.	2.	Correção Segundo L. Longmire e K. Smith	. 19
	2.4.	3.	Correção Segundo S. Visacro	20
	2.4.	4.	Correção Segundo C. Portela	20
	2.4.	5.	Correção Segundo R. Alípio	21
2	2.5.	Sínt	tese do Capítulo	21
3.	Res	ultad	dos e Análises	. 45

3.1.	Intr	odução4	5			
3.2.	Linł	nas monofásicas4	5			
3.2	.1.	Impedância Longitudinal2	3			
3.2	.2.	Impedância Transversal 3	3			
3.3.	Linł	nas Trifásicas3	6			
3.3.1.		Impedância Longitudinal	8			
3.3	.2.	Susceptância Transversal4	.5			
3.3	.3.	Parâmetros de Propagação de Onda4	8			
3.4.	Aná	álise Preliminar de Sobretensões Atmosféricas6	4			
3.5.	Sín	tese do Capítulo7	0			
4. Coi	Conclusões e Propostas de Continuidade					
4.1.	Intr	odução	3			
4.2.	Prir	ncipais resultados8	3			
4.3.	Pro	postas de continuidade8	5			
5. Apé	èndic	е А	6			
5.1. Trans	5.1. Dinâmica de Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Linhas de Fransmissão aéreas					
5.1	.1.	Propagação de Ondas em Linhas Monofásicas8	6			
5.1	.2.	Propagação de Ondas em Linhas Polifásicas8	8			
5.2. Trans	5.2. Introdução aos Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Considerando o Solo como um Condutor Elétrico Perfeito					
5.2	.1.	Parâmetros Longitudinais	2			
5.2	.2.	Parâmetros Transversais	8			
5.3.	Cál	culo da Matriz de Indutância Longitudinal Externa	0			
5.4.	Cál	culo da Matriz de Capacitância Transversal10	12			
6. Apé	èndic	e B	12			
6.1.	Eliminação dos Cabos Para-Raios1					
6.2.	Tra	nsposição de Linhas de Transmissão10	)4			
6.3.	Rep	presentação Modal10	6			
Referên	Referências Bibliográficas107					

### Resumo

Esta dissertação apresenta uma análise de sensibilidade do efeito do solo e da variação com a frequência nos parâmetros de linhas de transmissão (impedância longitudinal e admitância transversal), parâmetros de propagação de ondas eletromagnéticas (constantes de atenuação e de defasamento, impedância característica, velocidade de propagação, constante de espaço e fator de atenuação) e sobretensões atmosféricas. São consideradas linhas aéreas, monofásicas e trifásicas. O efeito do solo é levado em consideração por meio da utilização de quatro metodologias amplamente divulgadas na literatura, sendo que duas envolvem integrais impróprias e duas aproximações assintóticas destas integrais. O efeito da variação com a frequência é computado mediante cinco formulações também amplamente difundidas na literatura. Estas formulações são decorrentes de trabalhos experimentais, onde quatro foram realizados em ambiente laboratorial e um direto em campo. Diversas análises de sensibilidade são realizadas, considerando solos com baixas e altas resistividades medidas em baixas frequências. Os resultados ilustram a inconsistência física de modelagem do solo como um condutor elétrico perfeito, a importância dos efeitos do solo e da frequência e a necessidade, em estudos mais aprofundados de transitórios eletromagnéticos, da inclusão das matrizes de impedância longitudinal para cada frequência do espectro característico do sinal que representa o impulso atmosférico.

## Abstract

This dissertation presents sensitivity analyses of the effect of the soil and frequency in the transmission lines parameters (longitudinal impedance and transversal admittance), wave propagation parameters (attenuation and phase constants, characteristic impedance, velocity of propagation, space constant and attenuation factor) and atmospheric overvoltage. It is considered overhead lines, single-phase and three-phase. The effect of the soil is regarded by using four methodologies widely published in literature, where two use improper integrals and the other two obtain there results by an asymptotic approximation of these integrals. The effect of the frequency variation is computed by five formulations also widely widespread in literature. These formulations are derived of experimental work where four of them were accomplished in laboratorial environment and only one was performed at locus. Several analyses are presented, considering soils with high and low resistivity measured at low frequency. The results illustrate that there is a physical inconsistency of modeling the soil as an electrical perfect conductor, the importance of the soil and frequency and the necessity, in a deeply study on electromagnetics transients, of the inclusion of the longitudinal impedance matrixes for each of the characteristic frequency spectrum of the signal representing the lightning impulse.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modo de propagação TEM do campo eletromagnético estabelecido em Figura 2.2 - Representação de condutores condutores genéricos (i e k) de uma linha de transmissão polifásica para utilização do método de Carson......11 Figura 2.3 – Sistema físico equivalente (ao sistema físico real da Figura 2.2) para o Figura 2.4 - Representação do duplo plano complexo, que corresponde ao sistema equivalente proposto por T. Noda. .....15 Figura 2.5 - Parâmetros Concentrados do circuito de Transmissão segundo Tesche. 17 Figura 2.6 – Rede equivalente proposta por Longmire e Smith. Adaptado de [22]...... 19 Figura 3.1 – Representação esquemática da linha monofásica utilizada na obtenção dos resultados monofásicos (MRT, tensão de 19,92 kV, vãos típicos de 150 m e altura de 14 m; condutor fase do tipo CAA Quail de raio externo igual a 5,05 mm)......23 Figura 3.2 - Comparação entre resistências interna, do solo e total (resistividade do solo em baixa frequência de 100  $\Omega$ .m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do solo......24 Figura 3.3 - Comparação entre resistências interna, do solo e total (resistividade do solo em baixa frequência igual a 10.000  $\Omega$ .m). Condutividade do solo considerada Figura 3.4 - Comparação entre indutâncias externa, interna, do solo e total (solo com resistividade em baixa frequência igual a 100  $\Omega$ .m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do Figura 3.5 - Comparação entre indutâncias externa, interna, do solo e total (solo com resistividade em baixa frequência igual a 10.000  $\Omega$ .m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do Figura 3.6 – Resistência do solo considerando ou não a corrente de deslocamento, para solo com alto valor de resistividade em baixa frequência (10.000  $\Omega$ .m). Condutividade e permissividade relativa do solo considerada constante e metodologia Figura 3.7 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros Figura 3.8 - Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 10.000 Ω.m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros Figura 3.9 - Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em

que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros Figura 3.10 - Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 10.000  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros Figura 3.11 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \varepsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada Figura 3.12 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \varepsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada Figura 3.13 – Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \varepsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada Figura 3.14 – Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \varepsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 10.000 Ω.m. Metodologia de Carson utilizada Figura 3.15 - Comparação entre as parcelas de capacitância (solo com resistividade em baixa frequênica de 100  $\Omega$ .m). Comparação entre as metodologias que corrigem os parâmetros transversais de linhas de transmissão. Consideração do solo como um Figura 3.16 – Comparação entre as parcelas de capacitância (solo com resistividade em baixa frequênica de 10.000  $\Omega$ .m). Comparação entre as metodologias que corrigem os parâmetros transversais de linhas de transmissão. Consideração do solo Figura 3.17 – Comparação entre parcelas de capacitância considerando os efeitos do solo e da frequência (solo com resistividade de 100 Ω.m). Comparação entre a consideração do solo como um meio dispersivo. Metodologia considerada para Figura 3.18 – Comparação entre parcelas de capacitância considerando os efeitos do solo e da frequência (solo com resistividade de 10.000  $\Omega$ .m). Comparação entre a consideração do solo como um meio dispersivo. Metodologia considerada para Figura 3.19 – Configuração geométrica da linha de transmissão utilizada para o levantamento dos resultados de caso trifásico: fases A, B e C (compostas por 2 subcondutores) e dois cabos para-raios (P<sub>R1</sub> e P<sub>R2</sub>); nível de tensão igual a 345 kV...37 Figura 3.20 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não  Figura 3.21 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não Figura 3.22 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétricas do solo com a frequência. Metodologia de Carson utilizada para cômputo dos parâmetros do solo. Modo homopolar. (Matriz de Figura 3.23 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m (Matriz de transformação de Figura 3.24 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Figura 3.25 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de Figura 3.26 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue)......44 Figura 3.27 – Reatância Longitudinal. Comparação entre solos de baixa e alta resistividade. Cálculo do cômputo de  $\sigma \in \varepsilon$  do solo por meio da metodologia proposta Figura 3.28 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue)......45 Figura 3.29 – Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m (Matriz de Figura 3.30 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 100 Ω.m (Matriz de Figura 3.31 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo não-homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m (Matriz de Figura 3.32 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Metodologia de Nakagawa para cômputo dos parâmetros eletrícos do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m (Matriz de transformação de Fortescue). 

Figura 3.33 – Constante de atenuação (Np/km). Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas freguências de 10.000  $\Omega$ .m. Solo modelado como um meio não dispersivo. ...... 50 Figura 3.34 - Constante de defasagem (rad/km). Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Solo modelado como um meio não dispersivo. ...... 50 Figura 3.35 – Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......51 Figura 3.36 – Variação percentual da constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros Figura 3.37 – Constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para Figura 3.38 – Variação percentual da constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros Figura 3.39 – Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo não-homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......54 Figura 3.40 - Constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo não-homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......54 Figura 3.41 - Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Clarke). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......55 Figura 3.42 – Módulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de  Figura 3.43 – Ângulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de Figura 3.44 – Módulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Figura 3.45 – Ângulo da Impedância Característica. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......58 Figura 3.46 – Velocidade de Propagação. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Figura 3.47 – Velocidade de Propagação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Figura 3.48 – Velocidade de Propagação. Comparação entre modo homopolar e nãohomopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Solo modelado como meio não-dispersivo......60 Figura 3.49 – Constante de Espaço. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......61 Figura 3.50 – Constante de Espaço. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal......62 Figura 3.51 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 421 metros......62 Figura 3.52 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m.

Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 421 metros......63 Figura 3.53 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 600 metros......63 Figura 3.54 – Fluxograma da rotina desenvolvida nesta dissertação para acoplamento entre o Matlab<sup>®</sup> e o ATP para cálculo de sobretensões atmosféricas......65 Figura 3.55 – Sistema de transmissão trifásico utilizado para derterminação das sobretensões atmosféricas via rotina de acoplamento entre Matlab<sup>®</sup> e ATP......66 Figura 3.56 – Tensão de entrada, v(t). Comparação entre a dupla rampa existente no ATP e a soma das diversas senoides que foram utilizadas para reproduzir tal função. 66 Figura 3.57 – Tensão de saída. Comparação entre utilização da dupla rampa existente no ATP e dupla rampa utilizando a soma de diversas senoides. Caso para resistividade do solo igual a 10.000 Ω.m. Considera-se somente o efeito do solo...... 67 Figura 3.58 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma frequência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela. Resistividade do solo de 100 Ω.m. Sobretensão no terminal da fase Figura 3.59 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma frequência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela. Resistividade do solo de 10.000 Ω.m. Sobretensão no terminal da fase A conectado à carga de alta impedância......69 Figura 3.60 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma freguência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela. Resistividade do solo de 10.000  $\Omega$ .m. Sobretensão induzida no terminal da fase B conectado à carga de alta impedância......70 Figura 5.1 – Representação de um comprimento infinitesimal ( $\Delta x$ ) de uma linha de transmissão monofásica com parâmetros resistivo, indutivo e capacitivo por unidade Figura 5.2 - Representação esquemática de uma linha de transmissão aérea monofásica. A e B são dois pontos quaisquer no interior do condutor......90 Figura 5.3 - Ilustração da queda de potencial associada ao fluxo ordenado da cargas elétricas (corrente elétrica) no condutor da linha de transmissão monofásica representada na Figura 2.3.....93 Figura 5.4 - Ilustração do fenômeno de indução magnética no condutor da linha de transmissão monofásica representa na Figura 2.3......95 Figura 5.5 – Sistema físico equivalente decorrente da aplicação do método das Figura 5.6 – Ilustração do campo elétrico de natureza divergente produzido pelas 

Figura 5.7 - Sistema físico real que representa dois condutores (i e k) genéricos d sistema polifásico e que auxilia na determinação de suas matrizes de indutância e capacitância.	e um e de 101
Figura 5.8 - Sistema físico equivalente, ao sistema físico real da Figura 5.7,	
determinado por meio da aplicação do método das imagens	101
Figura 6.1 – Representação de um sistema trifásico, com dois cabos para-raios, p determinação, via lei de Kirchhoff, do sistema matricial que relaciona tensões e	ara
correntes com impedâncias próprias e mútuas	103
Figura 6.2 – Esquema de transposição de uma linha de transmissão trifásica.	
Adaptado de [38].	105

# Lista de Tabela

Tabela 2.1 - Coeficientes para solo universal propostos por L. Longmire e K. Smith	
[22]	20
Tabela 3.1 – Resistência interna, do solo e total	26
Tabela 3.2 – Informações do Linha de Transmissão [10]	38
Tabela 5.1 – Equações de Maxwell nas formas integral e diferencial, no domínio do	
tempo	91

# 1.Introdução

#### 1.1. Relevância do Tema sob Investigação

Para o planejamento de sistemas elétricos de potência, um dos itens levados em questão é a confiabilidade do mesmo. Para a análise de confiabilidade de sistemas elétricos de potência, principalmente em relação aos equipamentos de transmissão, levam-se em consideração os desligamentos não programados devido a surtos eletromagnéticos em linhas de transmissão. Com esse planejamento, é possível obter uma caracterização estatística que permite prever com dado nível de confiança o número de desligamentos causados por surtos eletromagnéticos por ano.

A extensão de linhas de transmissão aéreas típicas, geralmente, situa-se numa faixa de dezenas a centenas de quilômetros. Dessa maneira, tais linhas, que fazem a interligação desde a geração aos grandes centros consumidores, passam por regiões com características geográficas diversas. Dessa maneira, as linhas de transmissão estão, naturalmente, susceptíveis a diversos fenômenos transitórios, tais como, descargas atmosféricas.

De um modo geral, esse fenômeno supracitado causa um desequilíbrio nas linhas de transmissão, fazendo com que a mesma seja submetida a surtos eletromagnéticos com características típicas de um espectro de frequência elevado, contemplando desde o espectro inferior (por volta de 100 Hz) a um espectro superior de frequência (por volta de 2 MHz). O campo elétrico estabelecido por tal surto pode ser suficiente para produzir um arco elétrico entre os terminais das cadeias de isoladores, fornecendo, desta forma, um caminho de baixa impedância, ou seja, um curto-circuito entre fase-terra. Esse curto-circuito pode então comprometer o desempenho da linha de transmissão e, assim, sua confiabilidade.

Sabe-se, ainda, que a principal causa de desligamento não programado do sistema de transmissão são as descargas atmosféricas. Dados da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) indicam que de 40 a 60% das interrupções são devidas a descargas que interagem com linhas de transmissão, [1], [2] e [3].

Ademais, as características do solo mineiro são peculiares, pois o mesmo apresenta resistividade bastante elevada, tendo como valor médio em torno de 2400  $\Omega$ .m alcançando, em certas regiões, valores superiores a 10.000  $\Omega$ .m, [4] e [5]. Adicionalmente, segundo [6], deve-se ainda considerar a característica dispersiva do solo, principalmente para solos de valores de resistividade elevada, caso do solo mineiro. Vale destacar, também, que o estado de Minas Gerais possui uma das maiores taxas de incidências de descargas atmosféricas, [7].

Diante do exposto, verifica-se, prontamente, a relevância de pesquisas associadas à temática "interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão". Dentro desta temática, um dos principais estudos refere-se ao levantamento do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Tal estudo envolve diversas pesquisas, tais como a modelagem eletromagnética do canal de descarga atmosférica e linhas de transmissão (cabos fase e para-raios, torres e cadeias de isoladores e aterramentos elétricos) para determinação de sobretensões nas cadeias de isoladores.

Um importante estudo, situado dentro da relevância estabelecida acima, corresponde à determinação da influência do solo nas sobretensões estabelecidas em linhas de transmissão frente a fenômenos transitórios, tendo como fonte principal as descargas atmosféricas. O estudo em questão é justamente o objeto de pesquisa desta dissertação.

#### 1.2. Contextualização da Dissertação

Inicialmente, são definidos alguns conceitos que são utilizados no decorrer desta dissertação:

- i) Transitório Eletromagnético ⇒ refere-se ao estabelecimento de surtos de tensão/corrente em linhas de transmissão que sofrem incidência direta de descargas atmosféricas (daí o espectro de frequência de 100 Hz a 2 MHz)<sup>1</sup>;
- ii) Efeito do solo ⇒ refere-se à contribuição do solo no caminho de retorno de corrente (realizado pelo solo), em uma linha de transmissão, na ocorrência de um transitório eletromagnético;
- iii) Parâmetros do solo  $\Rightarrow$  referem-se aos parâmetros elétricos do solo, nomeadamente, sua resistividade (ou condutividade<sup>2</sup>) e permivissivade elétricas<sup>3</sup>;
- iv) Variação com a Frequência ⇒ entendida como o comportamento dos parâmetros elétricos do solo dependentes do espectro de frequência que caracteriza o sinal eletromagnético que solicita uma linha de transmissão;

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>É oportuno frisar que este espectro de frequência abrange as frequências típicas dos principais fenômenos transitórios que solicitam as linhas de transmissão, como por exemplo: curto-circuito (baixas frequências); operação de chaveamento/manobra (frequências intermediárias); descargas atmosféricas (altas frequências).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Condutividade ( $\sigma$  - S/m) é o inverso da resistividade ( $\rho$  -  $\Omega$ .m), ou seja,  $\sigma$  = 1/ $\rho$ .

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> É oportuno destacar que a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) é, em geral, praticamente igual à permeabilidade magnética do vácuo ( $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ )

- v) Parâmetros de linha de transmissão ⇒ referem-se aos parâmetros longitudinais<sup>4</sup> (efeitos resistivo e indutivo) e transversais<sup>5</sup> (capacitivo e condutivo) <sup>6</sup>;
- vi) Parâmetros de propagação de ondas  $\Rightarrow$  referem-se a combinações físicomatemáticas dos parâmetros de linhas de transmissão, dentre os quais são destacados os seguintes: impedância característica (Z<sub>C</sub>)<sup>7</sup>, constante de propagação ( $\gamma$ )<sup>8</sup>, constante de espaço (C<sub>E</sub>)<sup>9</sup>, velocidade de propagação (v)<sup>10</sup> e fator de atenuação (F<sub>A</sub>)<sup>11</sup>.

Em seguida, é importante destacar que um aspecto essencial no estudo e simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão é a modelagem adequada dos parâmetros da linha (longitudinais e transversais) e do solo<sup>12</sup>.

As considerações feitas pela maior parte dos procedimentos e metodologias de cálculo, apesar de computar o efeito do solo nos parâmetros de linha de transmissão, não estima o efeito da variação da condutividade e da permissividade do solo com a frequência. Tais considerações não condizem com a realidade e podem originar um modelo impróprio do solo para as mais diversas aplicações, principalmente para fenômenos transitórios (rápidos e altas frequências), como no caso de ocorrência de descargas atmosféricas.

Diante do exposto, este trabalho está inserido no contexto de avaliação do efeito do solo, com seus parâmetros variáveis com a frequência, em transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão.

Considera-se que as principais contribuições desta dissertação referem-se à:

a) Estudo e comparação de diversas metodologias, existentes na literatura técnica especializada, referentes à inclusão do efeito do solo e da variação com a frequência nos cálculos dos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão aéreas, com uma série de análises de sensibilidade.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Traduzem os efeitos dos campos elétricos longitudinais.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Traduzem os efeitos do campo elétrico transversal.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Os parâmetros longitudinais são expressos por meio da impedância longitudinal (Z<sub>L</sub> - Ω/m), onde Z<sub>L</sub> = R + j ω L; R (Ω/m) e L (H/m) são, respectivamente, a resistência e a indutância longitudinais e  $\omega = 2 \pi f (rad/s)$  é a frequência angular (sendo f, em Hz, a frequência cíclica). Os parâmetros transversais são traduzidos mediante a admitância transversal (Y<sub>T</sub>- S/m), onde Y<sub>T</sub> = G + j  $\omega$  C; G (S/m) e C (F/m) são, respectivamente, a condutância e a capacitância transversais.

 $<sup>^{7}</sup> Z_{C} = [Z_{L}/Y_{T}]^{1/2} (\Omega).$ 

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>  $\gamma = [Z_L Y_T]^{1/2} = (\alpha + j \beta) (1/m)$ , sendo  $\alpha$  a constante de atenuação (Np/m) e  $\beta$  a de fase (rad/m).

 $<sup>^{9}</sup>$  C<sub>E</sub> = 1/ $\alpha$  (m).

 $<sup>^{10}</sup>$  v =  $\omega$ /Im( $\gamma$ ) =  $\omega$ / $\beta$  (m/s).

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>  $F_A = e^{-\alpha z}$  (adimensional), supondo que a linha de transmissão está situada ao longo do eixo z.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Bem como a influência do solo subjacente à linha de transmissão na distribuição do campo eletromagnético estabelecido na mesma, pela onda de corrente característica da descarga atmosférica.

b) Utilização do Alternative Transients Program (ATP) para determinação das sobrentensões atmosféricas considerando o efeito do solo e da variação com a frequência.

Como é mostrado ao longo do texto, a literatura carece de uma comparação entre os resultados gerados por estas diversas metodologias.

#### 1.3. Objetivos do Trabalho

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência dos parâmetros do solo (constantes e variáveis com a frequência) nos níveis de sobretensões estabelecidas nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão aéreas.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Modelagem eletromagnética/computacional da influência da condutividade e permissividade do solo nos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão monofásica e polifásica;
- ii) Modelagem eletromagnética/computacional da variação dos parâmetros do solo com a frequência e sua influência nos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão monofásica e polifásica;
- iii) Modelagem eletromagnética/computacional da influência do efeito do solo e da variação com a frequência nos parâmetros de propagação de ondas;
- iv) Modelagem eletromagnética/computacional da influência do efeito do solo e da variação com a frequência nos transitórios eletromagnéticos estabelecidos nas linhas de transmissão.

#### 1.4. Metodologia

A Metodologia adotada neste trabalho de pesquisa inclui os seguintes estudos e realizações:

 Revisão Bibliográfica (Estudo do Estado da Arte) para levantamento das modelagens eletromagnéticas: a) de linhas de transmissão, operando em regime transitório; b) dos parâmetros transversais e longitudinais de linhas de transmissão;
 c) do comportamento do solo como um meio dispersivo<sup>13</sup>;

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Mas, homogêneo, linear e isotrópico.

- ii) Desenvolvimento de programas no Matlab<sup>®</sup> para cálculos de todos os parâmetros de linhas de transmissão considerando os efeitos do solo e da variação com a frequência;
- iii) Comparação dos resultados oriundos dos programas desenvolvidos com outros trabalhos presentes na literatura;
- iv) Desenvolvimento de uma rotina computacional, mediante acoplamento entre o Matlab<sup>®</sup> e o Alternative Transients Program (ATP), para cálculos de sobretensões atmosféricas;
- v) Análises de sensibilidade em relação às resistividades dos solos medidas em baixa frequência<sup>14</sup>.

#### 1.5. Publicações decorrentes deste trabalho

As seguintes publicações têm origem neste trabalho de dissertação:

- T. Lobato, M. A. O. Schroeder e R. A. R. MOURA. Analysis of the Cumulative Probability Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Three-Phase Overhead Transmission Lines. International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Belo Horizonte, Outubro de 2013.
- R. A. R. MOURA e M. A. O. Schroeder Simulação do Efeito do Solo e da Frequência nos transitórios Eletromagnéticos Estabelecidos em Linhas de Transmissão. XII CONEMI - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica Industrial, São João del-Rei, Outubro de 2012.
- R. A. R. MOURA, M. A. O. Schroeder, A. T. Lobato, L. C. Nascimento Estudo dos Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão Polifásicas Considerando o Solo como Meio Dispersivo. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Abril 2014
- A. T. Lobato, M. A. O. Schroeder, D. E. Cruz, M. R. Reis, R. A. R. Moura, W. S. Sales, L. C. Nascimento *Cumulative Probability Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Transmission Lines.* CIGRÉ International Colloquium on Lightning and Power Systems, Lyon, France, Maio 2014.
- R. A. R. MOURA, M. A. O. Schroeder, P. H. L. Menezes, A. T. Lobato, L. C. Nascimento Influence of the Soil and Frequency Effects to Evaluate Atmospheric Overvoltages in Overhead Transmission Lines Part I: The Influence of the Soil in the Transmission Lines Parameters. ICAE International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, OK, USA, Junho 2014

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Medições realizadas com terrômetro e determinadas mediante o Método de Frank Wenner.

R. A. R. MOURA, M. A. O. Schroeder, P. H. L. Menezes, A. T. Lobato, L. C. Nascimento Influence of the Soil and Frequency Effects to Evaluate Atmospheric Overvoltages in Overhead Transmission Lines – Part II: The Influence of the Soil in Atmospheric Overvoltages. ICAE - International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, OK, USA, Junho 2014

#### 1.6. Organização do texto

O presente texto está organizado em 4 capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos relacionados a essa pesquisa e toda a modelagem eletromagnética de propagação de ondas em linhas de transmissão. Nesse capítulo é descrito desde o equacionamento de propagação de ondas até a modelagem dos parâmetros do sistema sob estudo (parâmetros de linha de transmissão e de propagação de onda), considerando os efeitos do solo e da variação com a frequência.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações matemáticas/computacionais e as devidas análises de sensibilidade para o caso de linhas de transmissão aéreas monofásicas e trifásicas. Nesse mesmo capítulo são avaliadas as influências do solo e da frequência, tanto nos parâmetros de linhas de transmissão, quanto nos parâmetros de propagação de ondas (mediante utilização do *Matlab*<sup>®</sup>). Além disso, no capítulo em questão é analisada a influência do solo e da frequência em transitórios eletromagnéticos com auxílio do pacote computacional ATP.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta algumas conclusões pertinentes provenientes do estudo realizado durante a pesquisa e as respectivas propostas de continuidade.

# 2. Parâmetros de Linhas de Transmissão: Uma Visão Eletromagnética

#### 2.1. Introdução

O presente capítulo apresenta uma visão eletromagnética dos seguintes aspectos físicos: introdução de como a condutividade, a permissividade e a permeabilidade do solo podem influenciar na resistência e indutância longitudinais e na capacitância transversal. Para uma interpretação fisicamente consistente do que será apresentado nesse capítulo, indica-se que o leitor faça uma revisão dos itens: propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão e obtenção dos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão que segue no Apêndice A dessa dissertação.

Contudo, antes de apresentar a dinâmica de propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão, considera-se de extrema importância apresentar alguns limites de validade e simplificações feitas para o caso em questão. Assim sendo, após apresentadas as premissas, segue-se no Apêndice A desse trabalho um texto apresentando a dinâmica de propagação de ondas para casos monofásicos e polifásicos considerando o solo como sendo um condutor elétrico perfeito (CEP).

Em seguida, nos itens 2.2, 2.3 e 2.4 são apresentados os cálculos dos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de um ponto de vista eletromagnético, considerando a condutividade finita do solo e sua variação com a frequência.

#### 2.1.1. Premissas e Simplificações

Para a modelagem do efeito eletromagnético sob estudo, existem algumas premissas e simplificações que devem ser feitas para a obtenção do equacionamento do modelo resultante.

As primeiras simplificações referem-se ao meio onde estão imersos os condutores e os meios próximos aos condutores (no caso, o solo). Para utilizar as equações de Maxwell da forma apresentada na Tabela 5.1 o solo deve ser modelado como sendo:

- Homogêneo: propriedades eletromagnéticas (condutividade, permissividade e permeabilidade) são independentes da posição espacial na qual o campo eletromagnético é aplicado;
- Isotrópico: propriedades eletromagnéticas são independentes da orientação (direção e sentido) do campo eletromagnético aplicado;
- Linear: propriedades eletromagnéticas são independentes da amplitude do campo eletromagnético aplicado;
- Não dispersivo: propriedades eletromagnéticas são independentes da frequência do campo eletromagnético aplicado;

Contudo, é sabido que o solo é um meio com alta dispersividade e ao longo desse texto será apresentada uma maneira de computar tal problema, onde essa característica é considerada no domínio da frequência<sup>15</sup>.

Segundo [8], existe uma suposição fundamental em que o campo eletromagnético em torno do condutor tenha modo de propagação Transverso Eletromagnético (TEM). Essa simplificação garante que os campos eletromagnéticos sejam perpendiculares entre si e por sua vez perpendiculares a um terceiro vetor conhecido como vetor de Poynting (vetor que indica a direção de propagação da energia eletromagnética), conforme ilustrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Modo de propagação TEM do campo eletromagnético estabelecido em uma linha de transmissão.

Além disso, existem aproximações relacionadas às dimensões geométricas da linha de transmissão. O solo é sempre considerado paralelo à linha e o valor da altura da linha é sempre uniforme, fornecido pela Equação (2.1). E ainda, para a modelagem

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Entretanto, as outras características (homogeneidade, linearidade e isotropia) serão mantidas ao longo do trabalho.

eletromagnética em questão a linha é considerada muito grande quando comparada com as outras dimensões (distância entre os condutores, altura da linha, flecha etc.).

$$H_{m\acute{e}dio} = H_{torre} - \frac{2}{3}Flecha \tag{2.1}$$

onde:  $H_{médio}$  é a altura média dos condutores (fase e para-raios),  $H_{torre}$  é a altura do condutor no topo da torre e *Flecha* corresponde à flecha dos condutores.

Os efeitos das estruturas, aterramentos e eventuais cabos contrapesos não influenciam na distorção dos campos eletromagnéticos que propagam na linha de transmissão.

Além disso, para análises numéricas e aplicação coerente da transformada do sistema de transmissão no domínio das fases para o domínio modal a linha é considerada idealmente transposta, ou seja, o maior comprimento em que cada fase permanece em uma determinada posição é bem menor que o comprimento de onda do campo eletromagnético na frequência sob consideração.

Na literatura técnica são apresentadas diversas outras premissas que estabelecem os limites de validade da modelagem eletromagnética aplicada no estudo apresentado nesta dissertação. Contudo, tais premissas não são descritas de forma organizada em uma única referência. Todavia, as referências [9], [10] e [11] apresentam de maneira organizada as principais premissas e simplificações de forma detalhada<sup>16</sup>.

#### 2.2. Inclusão do Efeito do Solo nos Parâmetros Longitudinais<sup>17</sup>

As formulações apresentadas no Apêndice A consideram o solo como um condutor elétrico perfeito. Em consequência, o campo eletromagnético não penetra no solo e, assim, o retorno de corrente é processado na superfície do solo e não penetra no mesmo. Esta aproximação carece de consistência física, tendo em vista os valores práticos de resistividade de algumas regiões do mundo, como por exemplo, na Europa (valor médio menor que 100  $\Omega$ .m, [4]) e no Brasil (o solo de Minas Gerais, por suas

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Premissas associadas à linha de transmissão (regime de operação e componentes – cabos fase e pararaios, comprimento do vão, estruturas metálicas e dielétricas etc.), aos meios (ar e solo), ao modo de propagação do campo eletromagnético ("quase TEM"), às propagações de ondas nas direções axial e ortogonal (em relação ao eixo da linha), ao domínio de cálculo (frequência e tempo) etc.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Quando no texto for utilizado o termo "influência do solo" considere a utilização das metodologias que computam a condutividade, permissividade e permeabilidade do solo no cálculo dos parâmetros eletromagnéticos das linhas de transmissão; assim devem ser analisadas as influências das metodologias citadas nas seções 2.2 e 2.3.

características bastante peculiares, possui resistividades que podem variar de 100  $\Omega$ .m à 10.000  $\Omega$ .m, com valor médio em torno de 2.400  $\Omega$ .m, [4])<sup>18</sup>.

Desta forma, vê-se a necessidade de se modelar o solo não mais como um condutor elétrico perfeito, mas sim com suas características eletromagnéticas próprias: condutividade ( $\sigma$ ), permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ).

Para a inclusão dos parâmetros eletromagnéticos do solo nos parâmetros longitudinais, existem diversas metodologias na literatura. Para o trabalho em questão, são consideradas as metodologias propostas por J. R. Carson (1926), [12], Nakagawa (1981), [13] e [14], A. Deri e outros (1981), [15], e T. Noda (2006), [16].

#### 2.2.1. Metodologia de J. R. Carson

Das metodologias abordadas nesse trabalho, a de Carson foi, em termos cronológicos, o primeiro método introduzido na literatura sobre inclusão do efeito do solo nos parâmetros de linhas de transmissão.

Segundo Carson, é impossível obter uma solução completa do problema em questão pelo fato de que a condutividade do solo não é homogênea e o solo não é um meio semi-infinito. Contudo, em uma perspectiva de engenharia, podem-se fazer algumas aproximações para obtenção de valores numéricos confiáveis em termos práticos.

Em seguida, para solução do problema ele ainda levantou a hipótese da inexistência da corrente de deslocamento no solo e que a altura H da linha de transmissão é muito maior que o raio interno do próprio condutor. Após as devidas aproximações, Carson utilizou as equações de Maxwell e obteve uma integral imprópria complexa como solução.

As equações apresentadas no trabalho original de Carson, foram escritas com os valores no sistema de unidades c.g.s. (centímetro, grama e segundo). Transformando para o sistema internacional de unidades (metro, quilograma, segundo e coulomb/ampère), tem-se a integral imprópria, representada na Equação (2.2) - a ser resolvida para obtenção das impedâncias longitudinal externa e do solo. A Figura 2.2 ilustra os parâmetros geométricos envolvidos.

$$Z_{ext} + Z_{solo} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) + 2\int_0^\infty \frac{e^{-(H_i + H_k)\xi}}{\xi + \sqrt{\xi^2 + \gamma_{solo}^2}} \cos(dl_{ik}\xi) \, d\xi \right]$$
(2.2)

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Nos resultados apresentados no Capítulo 3 verifica-se que no caso de valores reduzidos de resistividade, em alguns casos, geram resultados próximos da consideração de solo como condutor elétrico perfeito. Por outro lado, para resistividades mais elevadas, os resultados mostram diferenças significativas.

onde:  $\xi$  é a variavel de integração; D<sub>i,k</sub> é a distância entre o condutor i e a imagem do condutor k (elementos mútuos) - quando i = k (elementos próprios), D<sub>i,k</sub> = 2 h<sub>i</sub>, ; d<sub>i,k</sub> é o raio do condutor (no caso de elementos próprios) e a distância entre os condutores i e k para elementos mútuos; dl i k é a distância horizontal entre os condutores i e k (elementos mútuos);  $dl_{i,i}$  = 0 (elementos próprios);  $\mu$  =  $\mu_0$  é a permissividade magnética do vácuo; y<sub>solo</sub> é a constante de propagação de ondas eletromagnéticas no solo. Nas formulações originais de Carson, não foi considerado a corrente de deslocamento no solo, aproximação aceitável para análises para o espectro inferior de informações frequência (mais no capítulo de resultados); assim,  $\gamma_{solo} = \sqrt{j\omega\mu_{solo}\sigma_{solo}}.$ 



Figura 2.2 – Representação de condutores condutores genéricos (i e k) de uma linha de transmissão polifásica para utilização do método de Carson.

Para o fenômeno descarga atmosférica a constante de propagação no solo, principalmente para o espectro superior de frequência, deve incluir a parcela associada à densidade de corrente de deslocamento. Por meio das equações de Maxwell e respeitando as premissas e os limites de validade, pode-se incluir tal parcela:  $\gamma_{solo} = \sqrt{j \omega \mu_{solo} (\sigma_{solo} + j \omega \varepsilon_{solo})}$ , onde:  $\sigma_{solo}$  é a condutividade elétrica,  $\varepsilon_{solo}$  a permissividade elétrica e  $\mu_{solo} = \mu_0$  é a permeabilidade magnética do solo.

Naturalmente, a Equação (2.3) representa a contribuição unicamente do solo segundo Carson (Z<sub>solo-C</sub>), denominada impedância longitudinal do solo.

$$Z_{solo-C} = \frac{j\omega\mu}{\pi} \left[ \int_0^\infty \frac{e^{-(H_i + H_k)\xi}}{\xi + \sqrt{\xi^2 + \gamma_{solo}^2}} \cos(dl_{ik}\xi) \, d\xi \right]$$
(2.3)

Evidentemente, a impedância do solo é um número complexo. A parte real corresponde à resistência do solo ( $R_{solo-C}$ ), Equação (2.4), e a imaginária dividida por  $\omega$  à indutância do solo ( $L_{solo-C}$ ), Equação (2.5).

$$R_{solo-C} = Real(Z_{solo-C}) \tag{2.4}$$

$$L_{solo-C} = \frac{Imag(Z_{solo-C})}{\omega}$$
(2.5)

#### 2.2.2. Metodologia de M. Nakagawa

Carson fez diversas suposições para obter a Equação (2.2). Essas suposições foram discutidas por diversos grupos de estudo, para dedução de formulações menos aproximadas. Essa foi a motivação que incentivou W. H. Wise, [17], a apresentar uma nova formulação para a equação de Carson, com as seguintes características: i) derivou suas ideias a partir do conceito do vetor potencial de Hertz e ii) eliminou uma importante limitação das expressões de Carson, qual seja, a simplificação de baixas e intermediárias frequências.

Com base no documento apresentado por Wise, M. Nakagawa reduziu as suposições feitas por Carson, onde: i) utilizou o conceito do vetor potencial de Hertz, [18], para derivar suas expressões, considerando o solo como um meio com perdas e ii) apesar de ter sido mostrado experimentalmente que a permeabilidade magnética do solo ser aproximadamente igual à do vácuo, [19], considerou a permeabilidade relativa do solo como podendo ter qualquer valor. Contudo, ainda manteve a limitação da distância entre os condutores e alturas dos condutores em relação ao solo serem muito maiores que o raio externo do condutor.

Da mesma maneira que o método de Carson, Nagakawa têm expressões dependentes de integrais complexas impróprias, Equação (2.6).

$$Z_{ext} + Z_{solo} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) + 2\int_0^\infty \frac{e^{-(H_i + H_k)\xi}}{\xi + \frac{\mu}{\mu_{solo}}a_1} \cos(dl_{ik}\xi) \, d\xi \right]$$
(2.6)

onde:  $a_1 = \sqrt{\xi^2 + \gamma_{solo}^2 - \gamma_0^2}$ ;  $\gamma_{solo}^2 = j\omega\mu_{solo}(\sigma_{solo} + j\omega\varepsilon_{solo})$  e  $\gamma_0^2 = -\omega^2\mu_0\varepsilon_0$ . Os parâmetros geométricos estão definidos na Figura 2.2.

A Equação (2.2) representa a contribuição unicamente do solo (Z<sub>solo-N</sub>), enquanto as Equações (2.8) e (2.9) ilustram, respectivamente, a resistência (R<sub>solo-N</sub>) e a indutância (L<sub>solo-N</sub>) do solo, segundo Nakagawa.

$$Z_{solo-N} = \frac{j\omega\mu}{\pi} \left[ \int_0^\infty \frac{e^{-(H_i + H_k)\xi}}{\xi + \frac{\mu}{\mu_{solo}} a_1} \cos(dl_{ik}\xi) \, d\xi \right]$$
(2.7)

$$R_{solo-N} = Real(Z_{solo-N}) \tag{2.8}$$

$$L_{solo-N} = \frac{Imag(Z_{solo-N})}{\omega}$$
(2.9)

#### 2.2.3. Metodologia de A. Deri e outros

A. Deri e outros [15], diferentemente de Carson e Nakagawa, apresentaram uma formulação "fechada e aproximada" para as integrais impróprias de Carson. Assim, suas equações não dependem de resoluções de integrais complexas impróprias. Apesar dos computadores atuais serem capazes de resolver integrais de tal complexidade, para o caso onde se devem simular diversos pontos, as equações proposta por Deri aumenta a velocidade de processamento por não utilizar métodos de resoluções numéricas. Deri introduziu um novo conceito, conhecido como plano complexo de retorno de corrente pelo solo, inserindo uma profundidade de penetração complexa de corrente no método das imagens ideais proposta por Lord Kelvin. Assim como no método das imagens ideais, pode-se substituir o sistema real por um sistema equivalente infinito em todas as direções, levando apenas em consideração que o condutor imagem não está a uma distância H da interface, mas sim a uma distância H + 2 p, onde "p" é definido como a profundidade complexa proposta por Deri. A Figura 2.3 ilustra a aplicação do método proposto por Deri.



Figura 2.3 – Sistema físico equivalente (ao sistema físico real da Figura 2.2) para o método proposto por A. Deri.

Em seu trabalho original, Deri não considera a corrente de deslocamento no cálculo da profundidade complexa (p), conforme Equação (2.10).

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_{solo}\sigma_{solo}}}$$
(2.10)

Da mesma forma que apresentado para o trabalho de Carson, pode-se corrigir a expressão de p inserindo a parcela de deslocamento. Dessa maneira, a profundidade complexa modificada de Deri é dada pela Equação (2.11).

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_{solo}(\sigma_{solo} + j\omega\varepsilon_{solo})}}$$
(2.11)

Vale ainda ressaltar que o trabalho proposto por Deri tem uma informação interessante em que se o solo for considerado como um condutor elétrico perfeito ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) a profundidade p vai ser zero, e têm-se o caso tradicional do método das imagens ideais.

Com o auxílio da Figura 2.3 pode-se determinar a expressão para a impedância externa e a do solo, segundo Deri, Equação (2.12).

$$Z_{ext} + Z_{solo-D} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \ln\left(\frac{D_{ik\prime}}{d_{ik}}\right)$$
(2.12)

onde: a) para os elementos próprios (i = k),  $d_{ii}$  = raio externo do condutor e  $D_{ii'} = 2(H_i + P)$  e b) para os elementos mútuos (i  $\neq$  k),  $d_{ik}$  = distância entre os condutores i e k e  $D_{ik'} = \sqrt{(dl_{ik})^2 + (H_i + H_k + 2p)^2}$ .

Assim, a impedância unicamente do solo, segundo Deri ( $Z_{solo-D}$ ), é fornecida pela Equação (2.13), onde  $Z_{ext}$  é dada pela multiplicação de j $\omega$  pela Equação (5.23)<sup>19</sup>.

$$Z_{solo-D} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \ln\left(\frac{D_{ik\prime}}{d_{ik}}\right) - Z_{ext}$$
(2.13)

Finalmente, as Equações (2.14) e (2.15) fornecem, respectivamente, a resistência ( $R_{solo-D}$ ) e indutância ( $L_{solo-D}$ ) do solo, segundo Deri.

$$R_{solo-D} = Real(Z_{solo-D}) \tag{2.14}$$

$$L_{solo-D} = \frac{Imag(Z_{solo-D})}{j\omega}$$
(2.15)

Como visto esse método não necessita da aplicação de nenhuma solução numérica, sendo um grande ganho computacional nas simulações, principalmente aquelas que necessitam de gerar diversos valores de parâmetros eletromagnéticos.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Impedância externa considerando o solo como um condutor elétrico perfeito.

#### 2.2.4. Método de T. Noda

T. Noda, em 2006, apresentou um trabalho similar ao proposto por Deri para aproximar as equações de Carson. O trabalho proposto por Noda tende a aumentar a precisão dos trabalhos apresentados por Deri, principalmente para o acoplamento mútuo entre condutores. Essa aproximação, dupla-logarítmica, é feita com o intuito de levar em consideração, diretamente, o ângulo entre os condutores a serem considerados. Para obter resultados mais precisos, Noda utiliza dois planos complexos em vez de apenas um como Deri, e leva em consideração os valores das distâncias entre os condutores para fazer o cálculo da pertinência de cada plano complexo no resultado final da impedância longitudinal do solo.

Segundo Noda, para obter um resultado mais preciso, é necessário considerar a circulação de duas correntes de retorno pelo solo, equivalentes a dois planos complexos, sendo que um plano tem profundidade complexa igual a  $\alpha p$  e outro  $\beta p$  (onde  $\alpha e \beta$  são parâmetros descritos a seguir). A Figura 2.4 ilustra o sistema equivalente proposto por Noda.





A partir do duplo plano complexo representado na Figura 2.4, Noda obteve a Equação (2.16) para a impedância longitudinal externa e do solo.

7

$$Z_{ext} + Z_{solo-N}$$

$$= \frac{\mu_0}{2.\pi} \left[ A \ln\left(\frac{\sqrt{(H+2\alpha p)^2 + x^2}}{D}\right)$$

$$+ B \ln\left(\frac{\sqrt{(H+2\beta p)^2 + x^2}}{D}\right) \right]$$
(2.16)

onde:  $A = \begin{cases} 0,07360 & (\theta \le 50,45^{\circ}) \\ 0,00247.\theta - 0,05127(\theta \ge 50,45^{\circ}) \end{cases}; \alpha = \begin{cases} 0,1500 & (\theta \le 50,45^{\circ}) \\ 0,004726.\theta - 0,08852(\theta \ge 50,45^{\circ}) \end{cases}; \alpha = \begin{cases} 0,1500 & (\theta \le 50,45^{\circ}) \\ 0,004726.\theta - 0,08852(\theta \ge 50,45^{\circ}) \end{cases}; \alpha = \begin{cases} 0,1500 & (\theta \le 50,45^{\circ}) \\ 0,004726.\theta - 0,08852(\theta \ge 50,45^{\circ}) \\ 0,004726.\theta - 0,08852(\theta \ge 50,45^{\circ}) \end{cases}; \alpha = \begin{cases} 0,1500 & (\theta \le 50,45^{\circ}) \\ 0,004726.\theta - 0,08852(\theta \ge 50,45^{\circ}) \\ 0,00472$ 

B = 1 - A;  $\beta = \frac{1 - A\alpha}{1 - A}$  e p é a mesma profundidade complexa apresentada por Deri.

As Equações (2.17) e (2.18) expressam, respectivamente, a resistência (R<sub>solo-TN</sub>) e indutância (L<sub>solo-TN</sub>) do solo, segundo Noda. Novamente, Z<sub>ext</sub> é dada pela multiplicação de jω pela Equação (2.2).

$$R_{solo-TN} = Real(Z_{solo-TN} - Z_{ext})$$
(2.17)

$$L_{solo-TN} = \frac{Imag(Z_{solo-TN} - Z_{ext})}{\omega}$$
(2.18)

#### 2.3. Inclusão do Efeito do Solo nos Parâmetros Transversais

Para a inclusão dos parâmetros eletromagnéticos do solo nos parâmetros transversais, as seguintes metodologias são consideradas: M. Nakagawa (1981), [13] e [14], e F. Tesche (1992), [20].

#### 2.3.1. Método de M. Nakagawa

M. Nakagawa, em 1981, apresentou o primeiro trabalho com resultados para cálculo das integrais de Carson com correções simultâneas tanto para a impedância longitudinal quanto para impedância transversal. No seu trabalho, Nakagawa resolveu as integrais de Wise tanto para obtenção dos parâmetros longitudinais quanto para os parâmetros transversais. Nakagawa montou a matriz de coeficientes de potencial ([P]) diretamente no sistema internacional de unidades. Evidentemente,  $[C] = [P]^{-1}$ .

Assim como as integrais de Nakagawa para os parâmetros longitudinais, existe a necessidade de se resolver uma integral complexa imprópria para os parâmetros transversais. A resolução de tal integral pode ser de alto custo computacional e consumir muito tempo de simulação. Devido a esses inconvenientes, surge a necessidade da apresentação de um método aproximado do cálculo da admitância transversal da mesma maneira que para o caso longitudinal. As Equações (2.19) e (2.20)determinam as expressões para o cálculo da matriz [P]<sup>20</sup>.

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left[ \ln\left(\frac{D'_{ik}}{d_{ik}}\right) + M + jN \right]$$
(2.19)

$$M + jN = 2 \int_0^\infty \frac{(l + \frac{\mu_1}{\mu_0} a_1) e^{-(h_l + h_k)l}}{(l + \frac{\mu_0}{\mu_1} a_1)(l/\tau^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} a_1)} \cos(yl) \, dl \tag{2.20}$$

onde:  $a_1 = \sqrt{l^2 + \gamma_1^2 - \gamma_0^2}$ ;  $\gamma_0^2 = -\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0$ ;  $\gamma_1^2 = j\omega \mu_1 (j\omega \varepsilon_1 + \sigma)$ ;  $\tau^2 = \frac{\gamma_0^2}{\gamma_1^2}$  e y é a

distância horizontal entre os condutores i e k. Os parâmetros geométricos, associados aos elementos próprios e mútuos são exatamente os mesmos definidos na seção 2.6.

#### 2.3.2. Método Aproximado de F. Tesche

Segundo F. Tesche é possível obter uma aproximação do valor da matriz de admitância transversal do solo ( $[Y_{solo}]$ ) utilizando a impedância longitudinal do solo (calculada na seção 2.6 para quatro metodologias, conforme Equações (2.2), (2.6), (2.12) e (2.16). Para isso, basta ter em mãos o valor da impedância longitudinal do solo e da constante de propagação de ondas eletromagnéticas no solo, como mostrado na Equação (2.21)<sup>21</sup> [20].

$$[Y_{solo}] = [(\gamma_{solo})]^2 [Z_{solo}]^{-1}$$
(2.21)

É sabido ainda que a admitância transversal total das linhas de transmissão pode ser dada pela composição série da parcela do solo com a parcela onde o solo é considerado como um condutor elétrico perfeito, conforme ilustrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Parâmetros Concentrados do circuito de Transmissão segundo Tesche.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> As grandezas com subscrito "1" referem-se ao solo.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Nessa dissertação, o método de Tesche para cálculo da admitância transversal toma como base para o cálculo da matriz de impedância longitudinal do solo os trabalhos propostos por A. Deri e T. Noda (devido a motivos de ordem computacional).

# 2.4. Inclusão da variação das características elétricas do solo com a frequência nos parâmetros Longitudinais e Transversais<sup>22</sup>

Em uma perspectiva macroscópica, as características eletromagnéticas de todo meio material, associadas às capacidades de armazenar energia nas formas de campos magnético e elétrico e de dissipar potência (efeito Joule), são descritas pelos parâmetros permeabilidade magnética ( $\mu$ ), permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) (ou resistividade,  $\rho$ ).

O solo, assim como qualquer outro material, tem seus valores de condutividade, permissividade e permeabilidade próprios. Segundo medições, [19], a permeabilidade magnética do solo é aproximadamente igual à do vácuo em, aproximadamente, todos os casos. Enquanto isso, os diversos solos apresentam permissividade e condutividade típicas de cada região. Para os estudos propostos nesta dissertação, o campo elétrico no solo não é tão intenso de modo a ionizar o meio; dessa maneira, pode-se trabalhar como se fosse linear. Além disso, assume-se que o solo é isotrópico. Contudo, possui características heterogêneas, devido as suas diversas camadas. Todavia, neste trabalho, é considerado com um meio homogêneo. Somente suas características dispersivas são consideradas.

Para corrigir os parâmetros do solo quanto a sua dispersividade (variação com a frequência) são utilizadas cinco metodologias, amplamente divulgadas na literatura, a saber: H. Scott, [21], C. Longmire e K. Smith, [22], S. Visacro, [23], C. Portela, [24], e R. Alípio, [25]. Cada metodologia tem suas características próprias e logicamente suas formulações.

#### 2.4.1. Correção Segundo H. Scott

O primeiro trabalho abordado nessa dissertação de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo quanto a sua característica dispersiva é o método de H. Scott. Ele desenvolveu seu trabalho em 1967, onde estimou a variação da resistividade e permissividade elétrica do solo de acordo com a variação da frequência do sinal injetado. Essa variação é estimada na faixa de frequência entre 100 Hz e 1 MHz. Utilizando técnicas avançadas de estatística, ele mostra em suas equações que apenas com valores de resistividade medidas em campo a 100 Hz e a frequência de interesse é possível calcular os valores de  $\sigma$  e  $\epsilon$  para quaisquer frequências. Para obter tais equações ele utilizou valores medidos em campo e fez diversos experimentos em laboratório para obter as Equações (2.22) e (2.23).

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Quando no texto for utilizado o termo variação com a frequência, considere como sendo a influência da característica dispersiva do solo na condutividade, permeabilidade e permissividade do solo; assim, dever ser analisada a influência das metodologias citadas na seção 2.4.

$$K = 0.028 + 1.098K_{100} - 0.068F + 0.036K_{100}^2 - 0.046FK_{100} + 0.018$$
(2.22)

$$D = 5,491 + 0,946K_{100} - 1,097F + 0,069K_{100}^2 - 0,114FK_{100} + 0,067$$
(2.23)

onde: *F* é o logaritmo da frequência na base 10 ( $F = \log_{10} f$ );  $K_{100}$  é o logaritmo da condutividade medida a 100 Hz, em mS/m, na base 10 ( $K_{100} = \log_{10} \sigma_{100} * 10^3$ ); *K* é o logaritmo da condutividade corrigida, em mS/m, na base 10 ( $K = \log_{10} \sigma * 10^3$ ); *D* é o logaritmo da constante dielétrica corrigida na base 10 ( $D = \log_{10} \varepsilon$ ).

#### 2.4.2. Correção Segundo L. Longmire e K. Smith

Em 1975, Longmire e Smith, com base nas medições realizadas por Scott, propuseram uma formulação universal para a correção dos parâmetros do solo, na faixa de frequência entre 100 e 1 MHz, assim como na metodologia de Scott. Eles basearam suas formulações na ideia de que os elementos de volume do solo podem ser modelados como redes de resistores e capacitores diferenciais, conforme ilustrado na Figura 2.6 [22].



Figura 2.6 – Rede equivalente proposta por Longmire e Smith. Adaptado de [22].

Com o efeito traduzido pela rede equivalente mostrada na Figura 2.6, eles puderam obter as formulações apresentas nas Equações (2.24) e (2.25) para o cálculo dos valores corrigidos de condutividade e permissividade do solo ( $\varepsilon_r = \sigma$  são, respectivamente, a permissividade relativa e a condutividade para quaisquer frequências cíclicas f).

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \tag{2.24}$$

$$\sigma = \sigma_i + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{n=1}^{N} \frac{a_n f_n \left(\frac{f}{f_n}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_n}\right)^2}$$
(2.25)

onde:  $\sigma_i$  é a condutividade do solo medida em baixa frequência;  $f_n = \left(\frac{P}{10}\right)^{1,28} x 10^{n-1} Hz$ ,  $a_n$  é dado na Tabela 2.1 e *P* é o percentual de água na amostra do solo e pode ser dado pela Equação (2.26), a partir de informações obtidas em [22].

$$P = ((\sigma_i) \cdot \left(\frac{1}{8}\right) \cdot 10^3)^{\left(\frac{1}{1,54}\right)} \cdot 10$$
(2.26)
n	an	n	an	n	an
1	3,4×10 <sup>6</sup>	6	1,33×10 <sup>2</sup>	11	9,8×10 <sup>-1</sup>
2	2,74×10 <sup>5</sup>	7	2,72×10	12	3,92×10 <sup>-1</sup>
3	2,58×10 <sup>4</sup>	8	1,25×10	13	1,73×10 <sup>-1</sup>
4	3,38×10 <sup>3</sup>	9	4,8		
5	5,26×10 <sup>2</sup>	10	2,17		

Tabela 2.1 - Coeficientes para solo universal propostos por L. Longmire e K. Smith [22].

# 2.4.3. Correção Segundo S. Visacro

Com base nos trabalhos apresentados por Scott e Longmire, S. Visacro e C. Portela apresentaram uma metodologia para correção da condutividade e permissividade do solo com a variação da frequência do sinal injetado. Para obtenção de suas formulações, eles levaram em consideração a condutividade do solo medida em baixa frequência (como de praxe, 100 Hz), o teor de umidade do solo e a frequência de excitação. Assim como nos outros dois trabalhos apresentados anteriormente, o espectro de frequência da formulação é de 100 Hz a 1 MHz. As formulações são apresentadas nas Equações (2.27) e (2.28), onde  $\rho_0$  é a resistividade medida em baixa frequência, f é a frequência cíclica e  $\rho$  e  $\varepsilon_r$  são, respectivamente, a resistividade e a permissividade relativa em função da frequência.

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{100}{f}\right)^{0.072} \tag{2.27}$$

$$\varepsilon_r = 2,34x10^6 (\rho_0)^{-0.535} f^{-0.597}$$
(2.28)

Uma informação interessante e pertinente é que para o trabalho proposto por Visacro as amostras foram obtidas no Brasil, mais especificamente no quadrilátero ferrífero (MG).

#### 2.4.4. Correção Segundo C. Portela

Ainda com a intenção de estudar e modelar o solo frente a fenômenos de alta frequência, C. Portela desenvolveu outra metodologia de cálculo dos parâmetros do solo. Assim como o trabalho anterior, ele foi desenvolvido no domínio da frequência e abrange espectro entre 100 Hz e 2 MHz. A Equação (2.29) apresenta sua formulação ( $\varepsilon \ e \ \sigma \ s$ ão, respectivamente, a permissividade e a condutividade para quaisquer frequências angulares  $\omega$ ).

$$\sigma \mp j\omega\varepsilon = \sigma_0 + \Delta i \left[ \cot g \left( \frac{\pi}{2} \alpha_m \right) \pm j \right] \left( \frac{\omega}{2\pi x 10^6} \right)^{\alpha_m}$$
(2.29)

Os parâmetros  $\Delta i$  e  $\alpha_m$  alteram as informações da condutividade e permissividade elétricas do solo. Para o trabalho em questão são utilizados os valores

razoavelmente seguros [24], próximos dos valores medianos das distribuições estatísticas medidas, onde eles são:  $\Delta i = 11,71 \text{ (mS/m)}$  e  $\alpha_m = 0,706$ .

#### 2.4.5. Correção Segundo R. Alípio

R. Alípio e S. Visacro desenvolveram uma metodologia para corrigir os parâmetros  $\sigma$  e  $\varepsilon$  do solo baseado em resultados experimentais. Suas equações são capazes de prever a variação com a frequência (f) dos parâmetros resistividade ( $\rho$ ) e permissividade relativa ( $\varepsilon_r$ ) conforme Equações (2.30) e (2.31).

$$\rho = \rho_0 \{1 + [1.2x10^{-6}\rho_0^{0.73}] \cdot [(f - 100)^{0.65}]\}^{-1}$$
(2.30)

$$\varepsilon_{\rm r} = 7.6 {\rm x} 10^{-3} {\rm f}^{-0.4} + 1.3 \tag{2.31}$$

A Equação (2.30) é válida em uma faixa de 100 Hz à 4 MHz, enquanto que a (2.31) na faixa de 10 kHz à 4 MHz. Abaixo de 10 kHz utiliza-se a permissividade elétrica do solo para o caso onde a frequência é igual a 10 kHz.

A proposta de R. Alípio tem um interesse particular, pois as medições foram feitas em solo nacional. Além disso, o mesmo fez as medições "in loco" (diretamente no campo), diminuindo sensivelmente alguns erros inseridos quando a amostra do solo é retirada e levada para o laboratório (como é o caso das metodologias anteriores).

#### 2.5. Síntese do Capítulo

Este capítulo apresenta uma abordagem eletromagnética da propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão e cálculos de seus parâmetros longitudinais e transversais (nos domínios das fases e dos modos, para linhas idealmente transpostas), tendo em vista aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos.

São apresentadas diversas metodologias para a inclusão dos parâmetros eletromagnéticos do solo nos parâmetros da linha (efeito do solo), além de metodologias que corrigem tais parâmetros com a variação da frequência do sinal injetado (variação com a frequência).

O Capítulo 3 apresenta e analisa os resultados obtidos computacionalmente para a consideração de cada metodologia e a influência dos mesmos na propagação de surtos eletromagnéticos, principalmente do ponto de vista de ondas rápidas, típicas de descargas atmosféricas.

# 3. Resultados e Análises

# 3.1. Introdução

O presente capítulo está subdividido de forma a facilitar a compreensão dos resultados e respectivas análises. São apresentados resultados de linhas de transmissão monofásicas e trifásicas. As primeiras subdivisões apresentam a influência da condutividade finita do solo no cálculo dos parâmetros da linha de transmissão. Essa informação é crucial para a interpretação de transitórios eletromagnéticos. Após essa análise minuciosa, existe uma subdivisão que trabalha com as constantes de propagação e com as impedâncias características de linhas de transmissão. Tais parâmetros são a base para a seção final, onde é estudada a influência da condutividade finita do solo em transitórios eletromagnéticos (mediante sobretensões atmosféricas em sistemas trifásicos). Para essa última etapa, é utilizada uma interface, desenvolvida nesta dissertação, entre o Matlab<sup>®</sup> e o pacote computacional ATP/EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) que simula transitórios eletromagnéticos de características diversas.

Para os casos onde há a necessidade de resolução de integrais numéricas, é utilizado o método de Gauss-Legendre. O mesmo foi comparado com o método trapezoidal, mas ambos apresentaram os mesmos valores. Por outro lado, o primeiro método citado obteve resultados mais rápidos do ponto de vista computacional.

É importante ressaltar que os resultados apresentados nesta dissertação correspondem a uma continuação, com aprofundamento, do estudo apresentado em [10].

#### 3.2. Linhas monofásicas

Para a obtenção dos resultados monofásicos, utiliza-se como base uma linha rural com retorno pela terra (MRT), do sistema Cemig, com nível de tensão de 19,92 kV, vãos típicos de 150 m e altura de 14 m. O condutor fase utilizado é do tipo CAA *Quail* de raio externo igual a 5,05 mm. A Figura 3.1 ilustra a linha em questão.



Figura 3.1 – Representação esquemática da linha monofásica utilizada na obtenção dos resultados monofásicos (MRT, tensão de 19,92 kV, vãos típicos de 150 m e altura de 14 m; condutor fase do tipo CAA Quail de raio externo igual a 5,05 mm).

#### 3.2.1. Impedância Longitudinal

A impedância longitudinal é separada em três parcelas: impedância interna do condutor ( $Z_{interno}$ ), corrigida pelo efeito pelicular, impedância externa ( $Z_{externa}$ ), obtida considerando o solo como um condutor elétrico perfeito e, por último, impedância do solo ( $Z_{solo}$ ), existente devido aos parâmetros finitos do solo ( $\sigma$ , $\epsilon e \mu$ ). Mais detalhes podem ser vistos na seção 5.2.1.

A resistência longitudinal é dividida em duas parcelas: resistência interna  $(R_{interna})$  e resistência do solo  $(R_{solo})$ . A Figura 3.2 e a Figura 3.3 comparam as resistências interna, do solo e total considerando a resistividade do solo invariante com a frequência, com o auxílio da metodologia de Carson, em função da frequência. Nos resultados apresentados na Figura 3.2 considera-se um solo com reduzido valor de resistividade em baixa frequência (100  $\Omega$ .m), enquanto na Figura 3.3 um alto valor (10.000  $\Omega$ .m).

Em contra partida, a indutância longitudinal possui três naturezas: indutância interna ( $L_{interno}$ ), devido ao fluxo magnético concatenado dentro do condutor, indutância considerando o solo como um condutor elétrico perfeito ( $L_{externo}$ ) e a parcela referente à influência de  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  e  $\mu$  do solo ( $L_{solo}$ ). Para comparar o comportamento de cada parcela, em função da frequência, são apresentadas as Figuras 3.4 e 3.5, considerando, respectivamente, solo com baixo e alto valor de resistividade medida em baixa frequência. Em ambas as situações também são utilizadas a metodologia de Carson.



Figura 3.2 - Comparação entre resistências interna, do solo e total (resistividade do solo em baixa frequência de 100 Ω.m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do solo.



Figura 3.3 - Comparação entre resistências interna, do solo e total (resistividade do solo em baixa frequência igual a 10.000 Ω.m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do solo.



Figura 3.4 - Comparação entre indutâncias externa, interna, do solo e total (solo com resistividade em baixa frequência igual a 100 Ω.m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do solo.



Figura 3.5 - Comparação entre indutâncias externa, interna, do solo e total (solo com resistividade em baixa frequência igual a 10.000 Ω.m). Condutividade do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores do solo.

Com base nas Figuras 3.2 a 3.5 pode-se verificar que:

 R<sub>interna</sub> aumenta com o aumeto da frequência, enquanto L<sub>interno</sub> diminui. Tal comportamento, evidentemente, é atribuído ao efeito pelicular, pois, como destacado no Capítulo 2, a área de condução de corrente diminui à medida que a frequência aumenta;

- R<sub>solo</sub> aumenta com a frequência, ao passo que L<sub>solo</sub> diminui, pois à medida que a frequência aumenta o caminho de retorno pelo solo tende a superfície de separação ar-solo;
- R<sub>interna</sub> é maior que R<sub>solo</sub> somente para faixa de baixas frequências (até aproximadamente 0,4 kHz). A partir deste ponto R<sub>solo</sub> predomina e na acima de frequências intermediárias (de 10 KHz em diante), R<sub>interna</sub> torna-se desprezível em relação a R<sub>solo</sub>;
- L<sub>interna</sub> é, em torno o espectro de frequência, inferior a L<sub>solo</sub>;
- L<sub>externo</sub>, naturalmente, indepedente da frequência, e sempre é superior a L<sub>interna</sub> e a L<sub>solo</sub>. A partir de 100 kHz predomina amplamente;
- Como é de se esperar, R<sub>solo</sub> é maior para solos com maiores valores de resistividades medidas em baixa frequência e, logicamente, R<sub>int</sub> não depende desta grandeza.
- O solo influencia, de forma significa, no cálculo dos parâmetros longitudinais, principalmente, na resistência por unidade de comprimento. Quanto maior o valor de resistividade medida em baixa frequência, maior é a influência do solo no comportamento de R<sub>solo</sub> e, assim, no de R<sub>total</sub> (= R<sub>interna</sub> + R<sub>solo</sub>). Logo, para valores elevados de resistência do solo e no espectro superior de frequência a resistência total tem, aproximadamente, maior parte da sua parcela referente apenas a parcela do solo. Para evidenciar tal fato, a Tabela 3.1 mostra quão significante é a consideração do solo no cálculo da resistência longitudinal e, ainda, ilustra a diferença numérica para solos de baixa e alta resistividade. Estes resultados ilustram, também, a inconsistência física associada à consideração do solo como um condutor elétrico perfeito.

Frequência	Resistência	Resistência do solo [Ω]		Resistência Total [Ω]	
requerieu	Interna [Ω]	100 Ω.m	10.000 Ω.m	100 Ω.m	10.000 Ω.m
100 Hz	0,00021	0,00009	0,00010	0,00031	0,00031
1 kHz	0,00031	0,00086	0,00097	0,00118	0,00128
500 kHz	0,00586	0,12475	0,44497	0,13061	0,45082
2 MHz	0,01167	0,28320	1,78027	0,29487	1,79194

Tabela 3.1 – Resistência interna, do solo e total.

Os resultados ilustrados nas Figuras 3.2 a 3.5 são decorrentes da aplicação da metodologia original de Carson para a consideração do efeito do solo. Assim, considera-se somente a densidade de corrente de condução no solo. Para verificação

de tal aproximação, fez-se a inclusão da densidade de corrente de deslocamento no solo na metodologia de Carson. A Figura 3.6 ilustra tal verificação, considerando um solo de 10.000  $\Omega$ .m, nos resultados de R<sub>solo</sub> em função da frequência. Pode-se perceber que, principalmente para o espectro superior de frequência, a inclusão da corrente de deslocamento, em solos de alta resistividade, altera de forma significativa os valores de R<sub>solo</sub><sup>23</sup>.



Figura 3.6 – Resistência do solo considerando ou não a corrente de deslocamento, para solo com alto valor de resistividade em baixa frequência (10.000 Ω.m). Condutividade e permissividade relativa do solo considerada constante e metodologia de Carson utilizada para cálculo dos valores.

A Figura 3.6 ilustra que no espectro superior de frequência, onde a parcela referente a corrente de deslocamento, introduzida por Maxwell em seu trabalho, começa a influenciar significativamente o valor final da resistência do solo. Com o intuito de apresentar valores mais contudentes com o fenômeno físico, as próximas figuras dessa dissertação levam em consideração a corrente de deslocamento.

Como apresentado no Capítulo 2 dessa dissertação, existem diversas metodologias que computam os parâmetros eletromagnéticos do solo no cálculo de parâmetros de linhas de transmissão. Desta forma, é importante avaliar o impacto destas metodologias nos resultados de interesse. As Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 mostram o comportamento de R<sub>solo</sub> (Figuras 3.7 e 3.8) e L<sub>solo</sub> (Figuras 3.9 e 3.10), em função da frequência, considerando todas as metodologias de inclusão do efeito do solo.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Devido a este fato, todos os resultados a seguir levam em consideração a inclusão da corrente de deslocamento, onde para parâmetros constantes o valor de  $\varepsilon_r = 1$ .

Para essa análise, foram considerados os parâmetros do solo como sendo não dispersivo, ou seja, não variantes com a frequência de excitação.



Figura 3.7 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros constantes.



Figura 3.8 - Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 10.000  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros constantes.



Figura 3.9 - Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que computam  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros constantes.



Figura 3.10 - Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que computam σ e ε do solo nos parâmetros longitudinais da linha monofásica. Caso em que a resistividade do solo medida em baixas frequências é de 10.000 Ω.m. Consideração da condutividade e permissividade do solo como parâmetros constantes.

Tendo em vista os resultados esboçados nas Figuras 3.7 a 3.10 conclui-se que as metodologias de consideração do efeito do solo, independentemente da faixa de frequência e do valor de resistividade em baixa frequência, não promovem diferenças significativas nos valores de L<sub>solo</sub>. Por outro lado, em relação ao comportamento de R<sub>solo</sub>, somente a metodologia de Nakagawa promove diferenças, quando comparada

às demais, em solos que possuem altos valores de resistividade e na faixa superior do espectro.

A conclusão descrita acima, em que os métodos que utilizam integrais numéricas (Carson e Nakagawa) apresentam resultados próximos dos que não utilizam (Deri e Noda), mostra um importante fato, pouco explorado na literatura, qual seja: do ponto de vista de esforço computacional é preferível utilizar os métodos que possuem soluções analíticas.

Esse esforço computacional é caracterizado pela necessidade de rodar programas de solução númericas de alto custo computacional, enquanto que as metodologias com equações sem integrais necessitam apenas da solução de uma expressão algébrica.

Os resultados apresentados até este ponto são decorrentes da consideração do solo com um meio não dispersivo. Considera-se, em seguida, a influência da característica dispersiva do solo nos parâmetros de linhas de transmissão. Para isso, na seção 2.4, são apresentadas diversas metodologias que corrigem, na frequência, a condutividade e a permissividade elétricas do solo (efeito da variação com a frequência).

Assim sendo, as Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 ilustram a influência de cada metodologia de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  com a frequência (Scott, Longmire, Visacro, Portela e Alípio) no cálculo final dos parâmetros longitudinais da linha monofásica ilustrada nas Figura 3.11 e 3.13, para solos que possuem baixos (100  $\Omega$ .m) e nas Figuras 3.12 e 3.14 para solos que possuem altos (10.000  $\Omega$ .m) valores de resistividade em baixa frequência. As Figuras 3.11 e 3.12 correspondem ao comportamento de R<sub>solo</sub> em função da frequência, enquanto as Figuras 3.13 e 3.14 aos de L<sub>solo</sub>. O efeito do solo é incluído mediante a metodologia de Carson.



Figura 3.11 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \epsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada para cômputo da condutividade e permissividade do solo.



Figura 3.12 – Comparação, no cálculo da resistência do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma \in \epsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada para cômputo da condutividade e permissividade do solo.



Figura 3.13 – Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 100  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada para cômputo da condutividade e permissividade do solo.



Figura 3.14 – Comparação, no cálculo da indutância do solo, entre as metodologias que corrigem  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo com a frequência. Caso em que a resistividade do solo mensurada em baixas frequências é de 10.000  $\Omega$ .m. Metodologia de Carson utilizada para cômputo da condutividade e permissividade do solo.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.11 a 3.14 mostram os seguintes importantes aspectos:

 Para solos com baixos valores de resistividade medida em baixa frequência a consideração do efeito da variação com a frequência, tanto em R<sub>solo</sub> quanto em L<sub>solo</sub>, não acarretam diferenças significativas quando comparados com os resultados decorrentes de parâmetros do solo constantes com a frequência (à exceção do comportamento de R<sub>solo</sub> com metodologia de Visacro no espectro superior de frequência que pode apresentar um valor percentual máximo aproximado de 16 % a menos que as demais metodologias);

- Para solos com altos valores de resistividade, o efeito da variação com a frequência é bastante significativo para altas frequências. Percebe-se, claramente, que os resultados decorrentes da consideração da metodologia de Portela distoam dos demais e que a variação com a frequência promove uma redução nos valores de R<sub>solo</sub> e L<sub>solo</sub> em relação aos respectivos valores com parâmetros constantes.
- Ainda para solos com altos valores de resistividade, no espectro superior de frequência, a metodologia de Portela pode apresentar uma variação percentual de até 300 % na resistência do solo se comparado com a consideração do solo como um meio não dispersivo.

# 3.2.2. Impedância Transversal

A capacitância transversal pode ser dividida em duas parcelas, a saber: capacitância considerando o solo como um condutor elétrico perfeito e capacitância levando em consideração os parâmetros finitos do solo ( $\sigma$ ,  $\epsilon$  e  $\mu$ ).

Inicialmente, são apresentados os resultados oriundos da aplicação das metodologias de cálculo da capacitância transversal corrigida por Tesche e Nakagawa e, em seguida, a inclusão do efeito da variação com a frequência.

As Figuras 3.15 (solo com baixa resistividade) e 3.16 (solo com alta resistividade) ilustram o comportamento das parcelas de capacitância, ao longo do espectro de frequência, considerando o solo como um meio não dispersivo, onde o efeito do solo é incluído as metodologias de Nakagawa, Tesche-Deri<sup>24</sup> e Tesche-Taku Noda<sup>25</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Tesche-Deri corresponde à metodologia de Tesche para avaliação da capacitância transversal considerando a de Deri nos parâmetros longitudinais.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Tesche-Taku Noda corresponde à metodologia de Tesche para avaliação da capacitância transversal considerando a de Taku Noda nos parâmetros longitudinais.



Figura 3.15 – Comparação entre as parcelas de capacitância (solo com resistividade em baixa frequênica de 100 Ω.m). Comparação entre as metodologias que corrigem os parâmetros transversais de linhas de transmissão. Consideração do solo como um meio não dispersivo.



Figura 3.16 – Comparação entre as parcelas de capacitância (solo com resistividade em baixa frequênica de 10.000  $\Omega$ .m). Comparação entre as metodologias que corrigem os parâmetros transversais de linhas de transmissão. Consideração do solo como um meio não dispersivo.

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram que:

- Evidentemente o comportamento da capacitância transversal via solo com condutividade infinita não varia ao longo do espectro de frequência;
- Para solos com baixas resistividades o efeito do solo é desprezível, em termos práticos, no comportamento da capacitância (pior caso tem variação percentual próxima 1%);

 Para solos com altas resistividades o efeito do solo, apesar de moderado, impõe diferenças em relação aos de solo ideal, principalmente para frequências acima de 10 kHz. A aplicação das metodologias de Tesche-Deri e Tesche-Taku Noda, naturalmente, geram resultados muito próximos, mas destoam dos de Nakagawa. Mais uma vez, verifica-se a inconsistência de solo ideal. Contudo, a variação percentual para o pior caso chega a ser menor que 17 %.

Em seguida, são analisados os comportamentos das parcelas de capacitância com a inclusão da variação com a frequência. Tais comportamentos estão esboçados nas Figuras 3.17 e 3.18. O efeito do solo é modelado por meio do modelo de Nakagawa.



Figura 3.17 – Comparação entre parcelas de capacitância considerando os efeitos do solo e da frequência (solo com resistividade de 100 Ω.m). Comparação entre a consideração do solo como um meio dispersivo. Metodologia considerada para computo de σ e ε do solo é a de Nakagawa.



Figura 3.18 – Comparação entre parcelas de capacitância considerando os efeitos do solo e da frequência (solo com resistividade de 10.000  $\Omega$ .m). Comparação entre a consideração do solo como um meio dispersivo. Metodologia considerada para computo de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo é a de Nakagawa.

Com base nas Figuras 3.17 e 3.18 verifica-se que:

- O efeito da variação com a frequência é pouco pronunciado no caso de solo com reduzidos valores de resistividade, pois as curvas são próximas à de parâmetros constantes. Por outro lado, no caso de altas resistividades, as diferenças são maiores. Verifica-se que os resultados que mais distoam dos associados a parâmetros constantes referem-se aos de Portela, seguido pelos de Alípio, Longmire, Scott e Visacro;
- O efeito da variação com a frequência aproxima os resultados dos decorrentes da consideração do solo como um condutor elétrico perfeito, enquanto a desconsideração deste efeito (parâmetros constantes) distancia. Sabendo-se que tal desconsideração é fisicamente inconsistente, pode-se então perceber que a capacitância transversal sofre pouca influência do efeito do solo, como amplamente divulgado na literatura. Desta forma, seu cálculo pode ser realizado considerando o solo como um condutor elétrico perfeito sem erro apreciável (independente do valor de resistividade do solo em baixas frequências).

#### 3.3. Linhas Trifásicas

Para os resultados polifásicos a configuração da linha de transmissão utilizada nas simulações corresponde àquela apresentada na Figura 3.19. Trata-se de uma linha trifásica, de nível de tensão de 345 kV, com dois cabos para-raios e com dois

subcondutores por fase, pertencente ao sistema de transmissão da Cemig, [26] e [27]. Considera-se que esta linha de transmissão é idealmente transposta.

A técnica para eliminação dos cabos para-raios, transposição de linhas de transmissão e da representação modal segue no Apêndice B desse trabalho e tais ténicas foram utilizadas para facilitar a forma de apresentação dos resultados nessa dissertação.



Figura 3.19 – Configuração geométrica da linha de transmissão utilizada para o levantamento dos resultados de caso trifásico: fases A, B e C (compostas por 2 subcondutores) e dois cabos para-raios (P<sub>R1</sub> e P<sub>R2</sub>); nível de tensão igual a 345 kV.

Na

Tabela **3.2**, são descritos os valores numéricos das grandezas geométricas presentes na Figura 3.19 e outras informações de interesse aplicado.

Com o intuito de obter resultados pertinentes e de facil intepretação, as informações apresentadas nesse capítulo são realizadas no domínio modal. Foi utilizado esse domínio, pois o mesmo é bem conhecido na literatura e é amplamente utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos devido a suas características úteis e peculiares (apresentadas a seguir). Para os resultados em questão são utilizadas as matrizes de transformação de Fortescue ( $T_{fc}$ ) e de Clarke ( $T_{cl}$ ), cujas representações matemáticas são expressas, respectivamente, abaixo (onde  $\alpha = e^{\frac{j2\pi}{3}}$ ):

$$T_{fc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} e T_{cl} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{6} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Características linhas 345 kV – Cemig					
Tensão de operação	345 kV				
N° de condutores/fase	2				
Tipo de condutores fase	CAA				
Código dos condutores fase	Ruddy				
N° de cabos para-raios	2				
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado				
Código dos condutores para-raios	3/8 EHS				
Distância entre subcondutores	0,457 m				
Altura média fase A	14,29 m				
Altura média fase B	14,29 m				
Altura média fase C	14,29 m				
Altura média cabos para-raios	27,89 m				
Diâmetro cabos fase	28,74 mm				
Diâmetro cabos para-raios	9,52 mm				
Vão Médio	421 m				
Μ	9,5 m				
Ν	6,85 m				

Tabela 3.2 – Informações do Linha de Transmissão [10].

A necessidade de apresentar o resultado no domínio modal, como amplamente divulgado na literatura, é que essa técnica de transformação é capaz de desacoplar grupos de equações (representadas no domínio das fases). Devido à natureza do fenômeno eletromagnético, correntes em uma fase geram tensões induzidas em outras fases. Assim, a mudança de base vetorial utilizada para o desacoplamento em questão elimina essa "interdependência" entre corrente e tensão.

Nesse novo domínio, a matriz de impedância modal, desde que o sistema seja idealmente transposto, apresenta três componentes desacoplados exatos, quais sejam:

(i) Um modo homopolar (ou também conhecido como sequência zero);

(ii) Dois modos não homopolares, o modo não homopolar 1 (ou sequência positiva) e o modo não homoplar 2 (ou sequência negativa). Cada modo apresenta impedância característica própria e velocidades de propagação distintas, [10].

#### 3.3.1. Impedância Longitudinal

A presente subseção apresenta os resultados para a impedância longitudinal da linha de transmissão trifásica representada na Figura 3.19. Como apresentado na introdução, os resultados são considerados no domínio modal. Dessa maneira, todas as figuras a seguir apresentam resultados referentes aos seguintes modos: Modo 0 (ou modo homopolar) e Modo 1 (ou modo não-homopolar). Ademais, na maior parte das as figuras, as linhas tracejadas correspondem ao solo de alta resistividade, enquanto as contínuas ao de baixa resistividade. Para facilitar a interpretação dos resultados, os mesmos são subdivididos em duas secções: resistência longitudinal e indutância longitudinal.

### 3.3.1.1. Resistência Longitudinal

A Figura 3.20 e a Figura 3.21 apresentam a resistência longitudinal para o Modo 0 e para o Modo 1, respectivamente, considerando solos de baixa e alta resistividade. Utiliza-se a matriz de transformação de Fortescue. O efeito da variação com a frequência não é considerado.



Figura 3.20 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo homopolar. (Matriz de transformação de Fourtescue).



Figura 3.21 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo não-homopolar. (Matriz de transformação de Fourtescue).

A Figura 3.20 e a Figura 3.21 permitem concluir que:

- Naturalmente, a resistência de Modo 0 é superior à de Modo 1;
- Para solos de baixa resistividade, as metodologias que consideram o efeito do solo (Carson, Nakagawa, Deri e Noda) geram os mesmos resultados de resistência (para os dois modos). Situação similar ocorre para solos de alta resistividade, à exceção da metodologia de Nakagawa.

Analisa-se, em seguida, o efeito da variação com a frequência na resistência longitudinal. A Figura 3.22 esboça o comportamento da resistência do modo homopolar, ao longo do espectro de frequência, considerando o efeito da variação com a frequência. Para a confecção da Figura 3.22, utilizou-se a metodologia de Carson para o efeito do solo.



Figura 3.22 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétricas do solo com a frequência. Metodologia de Carson utilizada para cômputo dos parâmetros do solo. Modo homopolar. (Matriz de transformação de Fourtescue).

Como pode ser visto na Figura 3.22, para solos com baixos valores de resistividade, o efeito da variação com a frequência gera resultados muito próximos daqueles oriundos da desconsideração deste efeito (parâmetros do solo constantes com a frequência). Por outro lado (resistividades elevadas), as metodologias, principalmente, de Portela e de Alípio geram valores de resistência de modo homopolar (em altas frequências) bastante distintos dos associados a parâmetros constantes.

A Figura 3.20 e a Figura 3.22 mostram resultados similares, respectivamente, aos da Figura 3.23 e da Figura 3.24, utilizando, contudo, a matriz de transformação de Clarke. Percebe-se que as mesmas tendências são observadas. Todavia, as resistências via Clarke são menores que aquelas mediante Fortescue.

Em todos os resultados, verifica-se que a resistência longitudinal é superior para solos com maiores valores de resistividade, principalmente, na faixa superior do espectro de frequência.



Figura 3.23 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de cômputo da condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Clarke).



Figura 3.24 - Resistência Longitudinal. Comparação entre metodologias de corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Clarke).

As informações contidas na Figura 3.20 e nas Figuras 3.22 a 3.24 mostram que, independentemente da matriz de transformação que for utilizada, que as metodologias de cômputo dos parâmetros do solo (efeito do solo) não influenciam tão sensívelmente no cálculo final da resistência quanto as metodologias de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  (efeito da variação com a frequência). Ademais, ilustram, também, que a

consideração do solo com parâmetros constantes corresponde a um caso conservador no cálculo da resistencia longitudinal.

## 3.3.1.2. Reatância Longitudinal

Da mesma maneira que na subseção anterior, seguem nesta os resultados para a reatância (indutiva) longitudinal.

As Figura 3.25 e Figura 3.26 fornecem, respectivamente, o comportamento na frequência da reatância longitudinal (modo homopolar) para solos com baixas e altas resistividades. Considera-se somente o efeito do solo. Verifica-se que, nos dois casos, as metodologias de inclusão do efeito do solo geram exatamente os mesmos resultados, inclusive a de Nakagawa. Tal comportamento está associado à característica de que a maior parte da reatância longitudinal é caracterizada pela indutância externa.



Figura 3.25 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 100 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue).



Figura 3.26 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Solo considerado como meio não dispersivo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue).

Constata-se, adicionalmente, que as reatâncias de modo homopolar apresentam, diferentemente do caso de resistência, valores razoavelmente próximos, tanto para solos com altas resistividades, quanto para com baixas. A Figura 3.27 realça tal constatação, onde o efeito do solo é incluído via Carson.

O efeito da variação com a frequência gera resultados de reatância relativamente próximos aos gerados com a consideração de parâmetros do solo constantes com a frequência, uma vez que, como já frisado, a maior parte da indutância total é dada pela parcela externa (ou seja, aquela considerando o solo como um condutor elétrico perfeito). Tal afirmação pode ser compravada pelos comportamentos representados na Figura 3.28, onde o efeito do solo é incluído mediante a modelagem de Carson.

As Figuras 3.25 a 3.28 constatam que para o efeito indutivo da linha de transmissão, a desconsideração do efeito do solo é uma aproximação plausível, pois a parcela mais influente da mesma está relacionada a indutância externa da própria linha de transmissão.



Figura 3.27 – Reatância Longitudinal. Comparação entre solos de baixa e alta resistividade. Cálculo do cômputo de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo por meio da metodologia proposta por Carson. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue).



Figura 3.28 - Reatância Longitudinal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000  $\Omega$ .m (Matriz de transformação de Fortescue).

## 3.3.2. Susceptância Transversal

Para os resultados transversais, duas metodologias de cálculo são levadas em consideração: (i) integral numérica proposta por Nakagawa e (ii) aproximação proposta por Tesche. Além disso, os diversos métodos abordados anteriormente para correção da condutividade e permissividade elétrica do solo são considerados na próxima seção

de resultados. Ademais, os resultados apresentam a variação percentual da suceptância transversal (X), com efeito do solo e/ou com efeito da variação com a frequência, em relação à oriunda do solo considerado como um condutor elétrico perfeito, conforme Equação (3.1). Todos os cálculos desta subseção são realizados mediante a matriz de transformação de Fortescue.

$$Variação \% = \frac{X_{cep}}{X_{corrigido}} x \ 100$$
(3.1)

A Figura 3.29 mostra o comportamento da susceptância, modo homopolar, ao longo do espectro de frequência, considerando o solo com um meio não dispersivo (com alto valor de resistividade). Os valores apresentados nessa figura mostram que<sup>26</sup>:

- Os valores de susceptância dependem de forma significativa, acima de 10 kHz, do modelo adotado para o efeito do solo. O modelo da Nakagawa gera resultados bastante superiores ao do modelo de Tesche;
- A consideração do efeito do solo gera resultados superiores máximos em torno de 23 % (Nakagawa) e 15 % (Tesche) em relação aos decorrentes do solo como um condutor elétrico perfeito.





Por outro lado, o modo não homopolar da susceptância é praticamente insensível em relação ao efeito do solo (independente de seus valores de resistividade elétrica), mostrando que neste caso a consideração de solo ideal conduz a resultados satisfatórios. Adicionalmente, os dois modelos do efeito do solo geram resultados

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Vale ressaltar que os valores plotados na Figura 3.29 levam em consideração o pior caso, ou seja, solo de alta resistividade e modo homopolar.

bastante próximos. Tais comportamentos são ilustrados nas Figura 3.30 (solo com 100  $\Omega$ .m) e Figura 3.31 (10.000  $\Omega$ .m).

A Figura 3.32 introduz o efeito da variação com a frequência nos resultados de susceptância de modo homopolar e solo com alta resistividade. O efeito do solo é considerado via Nakagawa. Verifica-se que o efeito da variação com a frequência, para todas as metodologias, aproxima os resultados dos associados ao solo modelado como um condutor elétrico perfeito. Tal aproximação é mais significativa para a metodologia de Portela, seguida pela de Alípio, enquanto a que menos se aproxima é a de Visacro.



Figura 3.30 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 100 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue).



Figura 3.31 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e permissividade elétrica do solo. Modo não-homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue).



Figura 3.32 - Suceptância Transversal. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e permissividade elétrica do solo. Metodologia de Nakagawa para cômputo dos parâmetros eletrícos do solo. Modo homopolar. Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m (Matriz de transformação de Fortescue).

De acordo com as informações supracitadas e levando em conta a física do sistema, a consideração do efeito do solo nos parâmetros pode ser um desperdício do ponto de vista computacional, pois: (i) o pior caso é para o solo modelado como um meio não dispersivo e (ii) os resultados presentes na Figura 3.32 são para a metodologia de Nakagawa, que é a metodologia que apresenta maior variação percentual e ainda tem alto custo computacional devido a necessidade de resolução de integrais numéricas.

Além disso, sabendo que a metodologia de Alípio foi experimentalmente testada diretamente em campo (e não no laboratório), a mesma pode ser considerada como metodologia referência e utilizando a mesma para o caso analisado, a variação percentual, no pior caso, chega a ser em torno de 2,5 %.

#### 3.3.3. Parâmetros de Propagação de Onda

Os parâmetros mais utilizados para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão são:

i. Constante de Propagação ( $\gamma$ ): é a medida das alterações sofridas por uma onda eletromagnética que se propaga em uma determinada direção. A parte real ( $\alpha$ ) quantifica quanto a amplitude da onda é atenuada, enquanto que a imaginária ( $\beta$ ) indica quanto é defasada, ambas por unidade de comprimento. A Equação (3.2) mostra a expressão de  $\gamma$  (k é o modo de propagação), onde  $Z_k$  e  $Y_k$  correspondem, respectivamente, à impedâncial longitudinal e à admitância transversal.

$$\gamma_k = \sqrt{Z_k Y_k} = \alpha + j\beta \tag{3.2}$$

 ii. Impedância caractrerística (Z<sub>c</sub>): é a relação entre as ondas de corrente e de tensão que propagam em uma direção. Para cada modo de propagação k, a impedância característica é fornecida pela Equação (3.3).

$$Z_c = \sqrt{Z_k/Y_k} = |Z_c| < \theta_{Zc} \tag{3.3}$$

 iii. Velocidade de Propagação (v): é a velocidade em que a onda eletromagnética se propaga na linha. Para cada modo de propagação k, a velocidade de propagação pode ser dada pela Equação (3.4).

$$\nu = \omega/\beta \tag{3.4}$$

 iv. Constante de Espaço (C<sub>E</sub>): quantifica qual a distância necessária para a onda sofrer uma atenuação para 37 % de sua amplitude inicial. A constante de espaço é dada pelo inverso da constante de atenuação, conforme Equação (3.5).

$$C_E = 1/\alpha \tag{3.5}$$

v. Fator de Atenuação (F<sub>A</sub>): é quanto uma onda vai atenuar após percorrer um espaço específico (distância propagada na linha - z), conforme Equação (3.6).

$$F_A = e^{-\alpha z} \tag{3.6}$$

É importante deixar estabelecido que a inclusão do efeito do solo, em todos os resultados gráficos apresentados nesta subseção 3.3.3, é processada de duas formas, a saber: i) curvas denominadas "Deri" correspondem aos parâmetros longitudinais calculados pela metodologia aproximada de Deri e aos parâmetros transversais pelo método aproximado de Tesche juntamente com o de Deri e ii) curvas denominadas "Nakagawa" são decorrentes da utilização das integrais numéricas representativas do método de Nakagawa (tanto para os longitudinais quanto para os transversais). Além disso, como mostrado nas seções 3.3.1 e 3.3.2, os resultados de impedância longitudinal e admitância transversal são, praticamente, insensíveis às metodologias adotadas para os efeitos do solo e da variação com a frequência para solos de baixa resistividade. Situação semelhante ocorre para o modo não homopolar. Logo, considera-se na maior parte das situações: i) modo homopolar; ii) matriz de transformação de Fortescue e iii) solo de alta resistividade (10.000  $\Omega$ .m).

#### 3.3.3.1. Constante de Propagação

Os resultados de constante de propagação são divididos em duas parcelas: constante de atenuação e constante de defasagem. A Figura 3.33 e a Figura 3.34 mostram, respectivamente, os comportamentos na frequência de  $\alpha$  e de  $\beta$ . O solo é considerado como um meio não dispersivo.



Figura 3.33 – Constante de atenuação (Np/km). Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Solo modelado como um meio não dispersivo.



Figura 3.34 - Constante de defasagem (rad/km). Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Solo modelado como um meio não dispersivo.

Os resultados mostram que  $\alpha$  e  $\beta$ , naturalmente, aumentam com a frequência e que  $\alpha$  é sensível à metodologia de consideração do efeito do solo, enquanto  $\beta$  não.

A maior diferença está no espectro superior de frequência, pois é nessa faixa que tem-se, concomitantemente, a maior diferença nos parâmetros transversais e longitudinais da linha. Para a constante de atenuação tem-se uma variação consideravél de até 60 % no espectro superior de frequência.

A Figura 3.35 ilustra a influência do efeito da variação com a frequência no comportamento de  $\alpha$ , enquanto a Figura 3.36 mostra a variação percentual tomando como base os valores de  $\alpha$  oriundos de solo modelado como um meio não dispersivo. Como visto nos comportamentos de impedância e de admitância, as metodologias de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  influenciam sensivelmente nos resultados, onde a metodologia proposta por Portela apresenta a maior variação muito grande quando comparada com o solo sendo modelado como um meio não dispersivo, onde sua variação vai de um máximo de aproximadamente 2,2 vezes o valor da base à 0,2. Além disso, a metodologia de Alípio apresenta forma de onda parecida; contudo, com sua faixa de máximo e mínimo variando entre 1,8 e 0,6.

As Figuras 3.37 e 3.38 ilustram resultados semelhantes aos das Figuras 3.35 e 3.36, porém para o comportamento de  $\beta$ . De acordo com a Figura 3.38, mesmo para casos mais severos, os valores de  $\beta$  não apresentam variação percentual considerável (diferentemente de  $\alpha$ ).



Figura 3.35 – Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.36 – Variação percentual da constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.37 – Constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.38 – Variação percentual da constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.

A título de curiosidade, para o modo não homopolar,  $\alpha$  apresenta valores bem abaixo dos do modo homopolar. Isto é natural, pois o modo não homopolar é um modo aéreo, enquanto o homopolar envolve o solo.  $\beta$  apresenta variação ainda menor entre as metodologias, tendo as curvas praticamente sobrepostas. A Figura 3.39 e a Figura 3.40 apresentam essas informações, respectivamente.

A consideração da matriz de transformação de Clarke gera resultados, em termos comportamentais, similares aos oriundos da matriz de Fortescue. Contudo, em termos quantitativos, os resultados de  $\alpha$ , por exemplo, decorrentes da utilização de Clarke, apresentam valores numéricos menores que os associados à Fortescue, conforme ilustrado na

Figura 3.41 (vide também a Figura 3.35).



Figura 3.39 – Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo não-homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.40 – Constante de defasagem. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo não-homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.41 - Constante de atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Clarke). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.

#### 3.3.3.2. Impedância Característica

Para a apresentação dos resultados, a impedância característica é dividida em duas parcelas: módulo e ângulo.

Espera-se que com o aumento da frequência, devido aos comportamentos dos parâmetros longitudinais e dos transversais, o módulo da impedância característica diminua. A Figura 3.42 mostra exatamente tal comportamento (modo homopolar). Vale destacar que há um pequeno aumento do módulo da impedância característica no espectro superior de frequência. Isso ocorre exatamento no ponto onde existe o maior decréscimo da capacitância transversal (ver Figura 3.16, que apesar de ser referente ao caso monofásico traduz o comportamento deste parâmetro em linhas trifásicas, tanto para o elemento próprio, quanto para o mútuo). Verifica-se, também, uma moderada discrepância entre os resultados representados pelas curvas "Deri" e "Nakagawa" (a partir de aproximadamente 30 kHz). Essa pequena variação de impedância alcança um valor absoluto máximo menor que 15  $\Omega$ , que corresponde a uma variação percentual menor que 3%.

A Figura 3.43 ilustra os resultados para o ângulo da impedância característica, cujo comportamento é bastante similar ao do módulo. Contudo, para o ângulo da impedância característica, percebe-se que a variação percentual chega a ser da ordem de 80%.


Figura 3.42 – Módulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Solo modelado como um meio não dispersivo.



Figura 3.43 – Ângulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que computam a condutividade finita do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Solo modelado como um meio não dispersivo.

A Figura 3.44 e a Figura 3.45 mostram resultados similares, respectivamente, aos das Figuras 3.42 e 3.43, porém com a inclusão do efeito da variação com a frequência. Verifica-se que há diferença no comportamento com a frequênica, tanto para o módulo quanto para o ângulo, decorrente da inclusão do efeito da variação com a frequência quando comparado com o comportamento mediante somente o efeito do

solo. Nesse caso, para o módulo pode-se observar uma variação percentual de até 10% e 120% no ângulo para a metodologia de Portela.

Novamente, as maiores diferenças são associadas à metodologia de Portela, que promove uma redução do módulo para frequências elevadas. A alteração no comportamento do ângulo também é evidente, promovendo aumento deste parâmetro em altas frequências. Vale destacar que em frequências reduzidas (abaixo aproximadamente de 10 kHz para o módulo e 1 kHz para o ângulo) os valores são, em termos práticos, os mesmos, considerando ou não o efeito da variação com a frequência.



Figura 3.44 – Módulo da impedância característica. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.45 – Ângulo da Impedância Característica. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.

### 3.3.3.3. Velocidade de Propagação

A Figura 3.46 e a Figura 3.47 mostram a velocidade em função da frequência, considerando, respectivamente, somente o efeito do solo e além deste efeito o da variação com a frequência. Naturalmente, ao longo de todo o espectro, as velocidades são inferiores à da luz no vácuo (3 x  $10^8$  m/s). Ademais, a velocidade aumenta com a frequência (conforme pode ser observado por meio de sua definição matemática). O efeito da variação com a frequência promove um aumento na velocidade de propagação. Comportamento este ditado pelo de  $\beta$ .



Figura 3.46 – Velocidade de Propagação. Comparação entre metodologias que cômputam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.47 – Velocidade de Propagação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.

Além disso, como citado no texto, pode haver velocidades de propagação diferentes em modos de propagação distintos. Desta forma, é oportuno apresentar uma comparação entre tais velocidades. A Figura 3.48 ilustra exatamente essa informação. Percebe-se que o modo não homopolar tem velocidade de propagação maior que o homopolar, em todo o espectro de frequência. Isso é esperado, pois a parcela de propagação do solo é apenas computada, em termos práticos, na

componente de sequência zero. Dessa maneira, as componentes não homopolares propagam-se basicamente no ar e tem uma velocidade de propagação mais próxima da velocidade da luz no vácuo, pois as perdas para este modo aéreo são relativamente reduzidas. Por outro lado, a parcela homopolar contempla, também, o retorno pelo solo, fazendo com que sua propagação seja mais lenta (devido às maiores perdas no solo).



Figura 3.48 – Velocidade de Propagação. Comparação entre modo homopolar e nãohomopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Solo modelado como meio não-dispersivo.

### 3.3.3.4. Constante de Espaço

Os resultados desta seção apresentam o comportamento de C<sub>E</sub> apenas a partir de 100 kHz, pois seus valores, para o espectro inferior de frequência, são muito elevados (em decorrência dos reduzidos valores de  $\alpha$ ), mascarando, assim, a situação mais interessante para o estudo de transitórios eletromagnéticos que são os casos onde o espectro de frequência é elevado.

A Figura 3.49 ilustra o comportamento de  $C_E$  somente com o efeito do solo, enquanto a Figura 3.50 mostra tal comportamento com a inclusão adicional da variação com a frequência. Pode-se perceber, inclusive, que para frequências maiores que 1 MHz,  $C_E$  chega a ser menor que 2 km. Isso ocorre pois para frequências elevadas a tendência é que as ondas guiadas sejem atenuadas mais rapidamente. Apenas para o caso onde leva-se em consideração a metodologia de Portela que a constante de espaço é maior que 2 km em todo o espectro superior de frequência. Naturalmente, o comportamento de  $C_E$  é ditado pelo de  $\alpha$ .

### 3.3.3.5. Fator de Atenuação

Para a determinação do comportamento de  $F_A$  é utilizada como distância propogada (z) o valor do vão da linha de transmissão trifásica sob estudo (421 m). Assim como no caso de C<sub>E</sub>, o comportamento de F<sub>A</sub> é apresentado a partir de 100 kHz, pois apenas em altas frequências  $\alpha$  começa a ser suficiente para expressar atenuação considerável da onda eletromagnética guiada.

Os resultados são apresentados na Figura 3.51 (somente efeito do solo) e na Figura 3.52 (inclusão da variação com a frequência). Evidentemente, F<sub>A</sub> diminui com a frequência. Vale destacar o comportamento de F<sub>A</sub> com a consideração da metodologia de Portela, que se distancia bastante das demais.



Figura 3.49 – Constante de Espaço. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.50 – Constante de Espaço. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal.



Figura 3.51 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que computam a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 421 metros.



Figura 3.52 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medida em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 421 metros.

A Figura 3.53 exibe o comportamento de  $F_A$  considerando um aumento na distância de 421 para 600 m. Como esperado, as curvas de  $F_A$  mantêm o mesmo comportamento qualitativo, mas, evidentemente, sofrem maior decaimento. Novamente, é oportuno destacar a reduzida diminuição de  $F_A$  segundo Portela em comparação com as demais. Naturalmente, tal situação é ditada pelo comportamento de  $\alpha$ .



Figura 3.53 – Fator de Atenuação. Comparação entre metodologias que corrigem a condutividade e a permissividade do solo. Modo homopolar (Matriz de transformação de Fortescue). Resistividade do solo medido em baixas frequências de 10.000 Ω.m. Metodologia

de Deri para cálculo dos parâmetros longitudinais e Tesche-Deri para susceptância transversal. Vão de 600 metros.

### 3.4. Análise Preliminar de Sobretensões Atmosféricas

Os parâmetros calculados anteriormente são de extrema importância para o cálculo de transtitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão frente a fenômenos transitórios. Os *softwares* da familia ATP/EMTP possuem, em suas subrotinas, técnicas para cálculo de tais parâmetros, que auxiliam na análise de transitorios eletromagnéticos. Para isso, são criadas bibliotecas que recebem informações da linha de transmissão, tais como, velocidade de propagação, comprimento, impedância característica, entre outras. Essa modealgem pode ser feita por meio do pacote LCC, que inclui as tradicionais rotinas LINE CONSTANTS e CABLES CONSTANTS, [28]. Nela, o usuário deve informar a disposição dos cabos (fase e para-raios) e suas características geométricas e eletromagnéticas, além da resistividade do solo, dentre outros. Em seguida, o ATP gera um arquivo de biblioteca (*lib-file*), que contém as informações elétricas da linha de transmissão.

Dos modelos suportados pela LCC para cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão os tradicionalmente utilizados para avaliação de transitórios eletromagnéticos são os modelos de Bergeron e J. Marti. A diferença básica entre os modelos é que o de Bergeron não inclui variação das perdas com a frequência e quantifica os parâmetros em uma única frequência, enquanto que o de J. Marti considera os parâmetros da linha continuamente distribuídos e tem em conta a variação das perdas com a frequência.

Uma proposta feita nessa dissertação é, sabendo que o sistema é linear, utilizar a transformada de Fourier e fazer diversas simulações para cada frequência de interesse (calculando e incluindo nos estudos de transitórios as matrizes de parâmetros de linha e de propagação de ondas para cada frequência do espectro). Em cada frequência, é calculada uma biblioteca de mídia específica, de acordo com o modelo de Bergeron, e então são coletados os dados da saída.

Os parâmetros da linha de transmissão são calculados da seguinte forma: i) impedância longitudinal - metodologia de J. R. Carson e ii) admitância transversal – solo modelado como um condutor elétrico perfeito, tendo em vista que os resultados ilustram que tal parâmetro não sofre influência significativa do efeito do solo e que a inclusão do efeito da variação com a frequência aproxima dos resultados oriundos de solo ideal.

Para tal, é desenvolvida uma rotina no Matlab<sup>®</sup> acoplada ao ATP, cujo fluxograma é ilustrado na Figura 3.54. Inicialmente, no Matlab<sup>®</sup>, aplica-se a

transformada de Fourier no sinal temporal que representa a descarga atmosférica (tensão, v(t), ou corrente, i(t)). Em seguida, ainda no Matlab<sup>®</sup>, calculam-se as matrizes de parâmetros de linha de transmissão e de propagação de ondas, para cada frequência do espectro de interesse. Posteriormente, mediante um acoplamento desta rotina do Matlab<sup>®</sup> com o ATP, utiliza-se o modelo de linha de Bergeron para determinar as saídas de cada sinal senoidal decorrente da aplicação de Fourier, utilizando as matrizes de parâmetros calculadas para cada frequência. Finalmente, de volta ao Matlab<sup>®</sup>, as saídas senoidais são somadas (no tempo) para obtenção das sobretensões em pontos específicos. Estas saídas são comparadas com as obtidas pelo ATP por meio da aplicação dos métodos tradicionais de Bergeron e J. Marti existentes no mesmo.



Figura 3.54 – Fluxograma da rotina desenvolvida nesta dissertação para acoplamento entre o Matlab<sup>®</sup> e o ATP para cálculo de sobretensões atmosféricas.

O sistema utilizado nesta dissertação, para a obtenção dos resultados de distribuições temporais de sobretensões atmosféricas, é aquele representado na Figura 3.55. Este sistema corresponde à linha trifásica ilustrada na Figura 3.19, onde os cabos para-raios são representados de forma implícita, cujo comprimento médio do vão é de 400 metros. Considera-se que a fase A é solicitada, em uma extremidade, por uma descarga atmosférica, representada por um sinal de tensão v(t), [29], enquanto a outra extremidade é conectada a uma carga de alta impedância. As outras fases, B e C, são ligadas, em ambas as extremidades, pela carga de alta impedância em questão. Trata-se de um sistema em que os níveis de sobretensão são bastante severos, conforme descrito em [30].

De acordo com [29], uma representação adequada de v(t), para estudos desta natureza, corresponde a uma função do tipo dupla rampa, com tempo de frente de 1 µs e de cauda igual a 50 µs. Este sinal é ilustrado pela curva azul na Figura 3.56 (que pode ser obtida diretamente no ATP), com valor máximo de tensão igual a 1 p.u. Nesta mesma figura, curva em preto, é exibido o sinal de tensão correspondente a 136 senoides após utilizar a transformada de Fourier em uma função do tipo dupla rampa. Este sinal corresponde ao utilizado nas simulações realizadas na rotina do Matlab<sup>®</sup>. Pode-se perceber que esta função de entrada possui algumas oscilações (devido ao número relativamente reduzido de hârmonicas analisadas) e uma sobretensão no valor de pico, característico da transformada de Fourier em descontinuidades.



Figura 3.55 – Sistema de transmissão trifásico utilizado para derterminação das sobretensões atmosféricas via rotina de acoplamento entre Matlab<sup>®</sup> e ATP.



Figura 3.56 – Tensão de entrada, v(t). Comparação entre a dupla rampa existente no ATP e a soma das diversas senoides que foram utilizadas para reproduzir tal função.

Para verificar a sensibilidade do sinal de saída em relação às entradas mostradas na Figura 3.56, na Figura 3.57 são apresentadas as sobretensões, no terminal da fase A conectado à carga de alta impedância. Considera-se solo com alto valor de resistividade (10.000  $\Omega$ .m) e somente o efeito do solo é considerado. O modelo para a linha é o de J. Marti [28]. Percebe-se que existe uma pequena diferença nos resultados, principalmente nos instantes iniciais, pois quando é gerado o sinal de entrada, a partir das somas das senoides, existe um sobressinal típico de descontinuidade, fruto da utilização da transformada de Fourier<sup>27</sup>. Considera-se que tais diferenças são, em termos práticos, pouco pronunciadas, o que permite considerar a adequada representatividade da curva preta da Figura 3.56.



Figura 3.57 – Tensão de saída. Comparação entre utilização da dupla rampa existente no ATP e dupla rampa utilizando a soma de diversas senoides. Caso para resistividade do solo igual a 10.000 Ω.m. Considera-se somente o efeito do solo.

Em seguida, são realizadas diversas análises de sensibilidade de sobretensões, considerando os modelos de Bergeron e de J. Marti (ATP), bem como a rotina numérica elaborada nesta dissertação. As curvas oriundas desta rotina numérica são representadas pelas seguintes legendas: i) N. M. Constante, considerando somente o efeito do solo; ii) N. M. Alípio, considerando a inclusão do

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Os valores dos coeficientes das senoides foram obtidos por meio do *toolbox* existente no MATLAB<sup>®</sup>, conhecido como FFT (*Fast Fourier Transformer*).

efeito da variação segundo metodologia de Alípio e iii) N. M. Portela, considerando a inclusão do efeito da variação segundo metodologia de Portela<sup>28</sup>.

As Figura 3.58 e Figura 3.59 apresentam as sobretensões no terminal da fase A conectado à carga de alta impedância, respectivamente, para solos de baixa (100  $\Omega$ .m) e alta resistividade (10.000  $\Omega$ .m). Estas distribuições temporais de sobretensão mostram que:

- Para solo de baixa resistividade os resultados oriundos de J. Marti, N. M. Constante, N. M. Alípio e N. M. Portela são muito próximos. Por outro lado, os resultados associados a Bergeron distoam dos demais, principalmente, a partir de 0,7 μs. Percebe-se, também, que à medida que o tempo aumenta as metodologias N. M. Constante, N. M. Alípio e N. M. Portela (cujos resultados são sempre próximos) geram resultados distintos dos de J. Marti. Os maiores níveis de sobretensão são aqueles associados à J. Marti;
- Para solo de alta resistividade todas as metodologias promovem resultados distintos. Os menores níveis de sobretensão correspondem à Bergeron, enquanto os maiores, à J. Marti, seguido por N. M. Constante. Os valores associados a N. M. Alípio e N. M. Portela são próximos e estão entre os de J. Marti e Bergeron, mas se distaciam à medida que o tempo passa.



Figura 3.58 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma frequência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela.
 Resistividade do solo de 100 Ω.m. Sobretensão no terminal da fase A conectado à carga de alta impedância.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> A consideração das metodologias de Alípio e Portela, para a inclusão do efeito da variação com a frequência, é decorrente do fato das mesmas gerar resultados de parâmetros de linha e de propagação de onda que mais se distanciam dos associados à consideração de solo como um meio não dispersivo.



Figura 3.59 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma frequência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela.
 Resistividade do solo de 10.000 Ω.m. Sobretensão no terminal da fase A conectado à carga de alta impedância.

Outra análise que deve ser levada em consideração é o valor da sobretensão induzida nas outras fases (B e C), para se avaliar o efeito mútuo de tal fenômeno. A Figura 3.60 exibe o comportamento temporal da sobretensão induzida na fase B, para solo de alta resistividade (10.000  $\Omega$ .m). Naturalmente, os níveis são menores que os da fase A (que recebe a ação direta da descarga atmosférica). Por outro lado, os maiores valores de sobretensão induzida são os decorrentes de N. M. Constante. Os menores continuam sendo os de Bergeron.

Os resultados presentes nessa dissertação são capazes de induzir o autor a fazer algumas considerações quanto aos resultados para o caso teste desse trabalho:

- A desconsideração da dispersividade do solo pode ser considerado como um caso conservativo para análise de sobretensões atmosféricas frente a descargas atmosféricas.
- Para análises mais criteriosas a metodologia presente nesse trabalho mostra algumas variações nas formas de onda e nos valores de pico (parâmetro importante para análise de rompimento da cadeia de isoladores).
- Para modelagens que levam em sua natureza outras simplificações mais "críticas" que as presentes nesse trabalho, a consideração de tal ferramenta computacional

pode ser cara de um ponto de vista computacional e não inserir variação, de um ponto de vista prático, nos resultados finais.



Figura 3.60 – Tensão de saída. Comparação entre Bergeron para uma frequência específica (frequência típica do sinal), modelo de J.Marti e rotina numérica desta dissertação, considerando os parâmetros do solo constantes ou variando segundo Alípio ou Portela. Resistividade do solo de 10.000 Ω.m. Sobretensão induzida no terminal da fase B conectado à carga de alta impedância.

### 3.5. Síntese do Capítulo

Nesta seção são resumidas algumas informações adquiridas durante as análises de sensibilidades feitas ao longo desse capítulo.

A primeira análise que pode ser feita quanto aos resultados é que na maior parte dos casos, seja para parâmetros da linha, quanto para os parâmetros de propagação de onda, a metodologia de correção de  $\sigma$  e  $\varepsilon$  do solo que apresenta maior divergência numérica é aquela proposta por Portela (apesar das formulações de Alípio apresentar características similares).

Para os parâmetros longitudinais, os métodos de cômputo da condutividade, permissividade e permeabilidade do solo, em termos práticos, apresentam diferenças insignificantes. Vale frisar que, os resultados ainda mostram que a metodologia proposta por Deri apresenta valores numéricos aproximadamente iguais à por Carson (mesmo para casos onde o solo tem valores com alta resistividade e no espectro superior de frequência.). Essa constatação é importante, pois custo computacional pode ser decisivo.

Contudo, isso não é realidade para os parâmetros transversais, onde o método aproximado de Tesche e a resolução das integrais numéricas de Nakagawa acarretam

um pequeno desvio numérico. Todavia, esse desvio é mascarado quando se leva em consideração a correção dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência. Essa variação dos parâmetros transversais são os principais causadores de pequenas divergências numéricas, entre os métodos de Tesche e Nakagawa, nos parâmetros de propagação de onda, visto que tais informações dependem da admitância transversal. Além disso, as metodologias de correção da capacitância transversal mostraram que os valores considerando o solo como um meio de resistividade finita ou como um condutor elétrico perfeito apresentam valores, aproximadamente, próximos.

Para as análises de sobretensões, tanto na fase que sofre a incidência direta, quanto nas fases que são solicitados via indução, os resultados mostram que: i) o modelo do solo como um meio não dispersivo, apresentam valores próximos aos decorrentes da utilização de J. Marti e ii) a inclusão do efeito da variação com a frequência reduz os níveis de sobrentensão. Desta forma, a consideração de solo com parâmetros invariantes com a frequência (consideração somente do efeito do solo) promove valores conservadores para os níveis de sobretensão.

Ainda para as análises de sobretensões, mesmo o caso levando em conta a formulação de Portela apresenta valores similares aos de outras metodologias. Isso implica que nos resultados finais as metodologias de correção da condutividade do solo avizinham os mesmos valores finais, que corresponde a um valor máximo menor que a consideração do solo como um CEP.

# 4. Conclusões e Propostas de Continuidade

### 4.1. Introdução

Nessa dissertação é apresentado um estudo do cálculo de parâmetros de linhas de transmissão aéreas, monofásicas e trifásica, e qual a influência da condutividade e permissividade do solo levando em conta a variação dos mesmos com a frequência.

Para o cálculo dos parâmetros longitudinais os resultados comparam quatro metodologias: J. R. Carson, M. Nakagawa, Taku Noda e A. Deri, onde as duas primeiras são obtidas por meio de solução de integrais numéricas e as duas últimas por aproximações assintóticas das integrais impróprias de Carson. Para o cálculo dos parâmetros transversais são utilizadas duas metodologias, uma que necessita de resolução numérica de integrais impróprias, também proposta por M. Nakagawa e um método aproximado elaborado por F. Tesche. Para a inclusão da variação com a frequência, são utilizadas cinco metodologias conhecidas na literatura que corrigem σ e ε do solo no domínio da frequência. Essas metodologias são as propostas por: H. Scott, L. Longmire, C. Portela, S. Visacro e R. Alípio. Em seguida, são estabelecidas diversas análises de sensibilidade dos parâmetros de linhas de transmissão e de propagação de ondas para solos de resistividades medidas em baixas frequências de valores reduzidos e elevados. Considera-se que tais análises constituem uma importante contribuição deste trabalho.

Finalmente, é então apresentada a influência dos parâmetros descritos acima nos níveis de sobretensões atmosféricas estabelecidas em um sistema de transmissão trifásica específico. Para o cálculo destas sobretensões é elaborada uma rotina computacional no Matlab<sup>®</sup> acoplada ao ATP. Considera-se que esta rotina é a maior contribuição desta dissertação. Algumas análises de sensibilidade são realizadas mediante comparação das sobretensões geradas por esta rotina com as obtidas por meio da aplicação direta do ATP, considerando solos de baixas e altas resistividades.

### 4.2. Principais resultados

Como observado no capítulo de resultados, os valores obtidos para a impedância longitudinal segundo integração numérica da formulação de Carson e da formulação de Nakagawa apresentam, aproximadamente, os mesmos valores. Isso ocorre devido ao fato da formulação proposta por Nakagawa ser derivada da de Carson.

Os métodos aproximados para o cálculo da impedância longitudinal apresentam, ainda, valores muito próximos aos que utilizam integrais numéricas. Adicionalmente, possuem a vantagem de possuir custo computacional inferior. Mesmos para solos de alta resistividade, pior caso, os valores entre as metodologias que utilizam integrais numéricas e métodos aproximados apresentam valores muito próximos. Assim sendo, sugere-se a utilização de tais métodos.

A consideração do solo como meio dispersivo no cálculo da impedância longitudinal mostra que a metodologia proposta por Portela, em solos onde a resisitivade mensurada em baixas frequências é elevada e na faixa superior do espectro, apresenta resultados numéricos mais discrepantes que as demais metodologias propostas. Além disso, pode-se perceber que a variação da indutância longitudinal é pouco sensível, mas devido a forte influência do solo na resistência longitudinal, a impedância sofre influência significativa.

Por sua vez, os métodos que incluem a correção da admitância transversal mostram que a consideração do efeito do solo pode ser desnecessária, uma vez que os resultados, mesmo incluindo o efeito da variação com a frequência, aproximam da consideração de solo condutor elétrico perfeito.

Nas distribuições temporais de sobretensões atmosféricas, onde é levada em consideração a influência dos parâmetros do solo, pode-se perceber que a rotina numérica elaborada nesta dissertação gera resultados, para solo como um meio não dispersivo, similares aos oriundos da utilização de J. Marti do ATP. A inclusão do efeito da variação com a frequência, mediante Portela e Alípio, gera valores máximos de sobretensão próximos, mas por outro lado distribuições temporais distintas. Naturalmente, esta conclusão tem como limite de validade o sistema trifásico específico utilizado nas simulações.

Ademais, os resultados presentes nessa dissertação mostram que as curvas utilizando a metodologia de Alípio apresentam caractéristicas similares às de Portela. Contudo, seus valores são mais próximos das outras metodologias. Além disso, como dito por Alípio em seus trabalhos, suas formulações foram testadas *in locu* dando, assim, maior credibilidade às mesmas.

Dado as informações presentes nesse trabalho e o trecho supracitado, o autor mostrou que: (i) o cômputo da condutividade finita do solo nos parâmetros transversais da LT tem alto custo computacional e não apresenta melhora significativa nos resultados finais; (ii) as metodologias de cálculo dos parâmetros longitudinais tendem a apresentar valores numericamente próximos, onde as formulações com integrais impróprias tem um maior consumo computacional e (iii) a maior diferença entre os resultados está na correção da condutividade e permissividade do solo, sendo que para o trabalho de Alípio deve ser o utilizado, pois é o único com validação das medições (realizadas em solos brasileiros).

### 4.3. Propostas de continuidade.

Ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa, foram abertas diversas discussões e necessidade de trabalhos futuros, onde podem ser citados os seguintes temas:

- Aplicar os resultados obtidos nesta dissertação para o cálculo de parâmetros de diversas outras linhas do sistema de transmissão nacional (configurações geométricas diversas).
- Inserir outras formas de onda de sinais de entrada e a consideração de mais harmônicos na avaliação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão.
- Calcular a influência de tais parâmetros levando em conta um sinal viajando nos cabos para-raios.
- Construir um modelo de sistema de transmissão completo, lenvando em consideração os diversos componentes de linhas de transmissão (por exemplo, torres, cabos, cadeia de isoladores, malhas de aterramentos) e verificar a influência de cada elemento no resultado final.
- Utilizar os modelos apresentados nessa dissertação para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Para esse objetivo pode-se ainda utilizar uma abordagem estocástica para melhor efetuar o valor do desempenho da LT.
- Construir modelos físicos em escala reduzida para validação dos resultados a aproximações numéricas.
- Considerar linhas de transmissão não idealmente transpostas e a influência nos resultados oriundos da aproximação de transposição.
- Utilizar os princípios apresentados nessa dissertação para o cálculo de sobretensões utilizando a correção da frequência na metodologia de J. Marti.

## 5. Apêndice A

### 5.1. Dinâmica de Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Linhas de Transmissão aéreas

A interpretação dos fenômenos dinâmicos de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão é de fundamental importância para a interpretação física do problema em questão. Dessa maneira, vê-se a necessidade de compreensão do assunto de forma mais aprofundada do ponto de vista de teoria de campo, pois tal visão permite a devida compreensão dos aspectos físicos diretamente associados à teoria de circuitos que são amplamente utilizados nos estudos de transitórios em linhas de transmissão.

De forma mais didática, dividiu-se esse capítulo em dois tópicos, onde o primeiro aborda o caso monofásico, caso mais fácil de obter interpretação física do sistema, e situação polifásica, caso geral.

### 5.1.1. Propagação de Ondas em Linhas Monofásicas

Os efeitos de armazenamento de energia na forma de campo magnético e elétrico e a perda de energia por efeito joule são representados, respectivamente, por efeitos indutivo, capacitivo e resistivo em parâmetros distribuídos (por unidade de comprimento da linha). Esses "indutores", "capacitores" e "resistores" são representados por unidade de comprimento e apesar de serem conhecidos na literatura por serem parâmetros concentrados, para o caso de linhas de transmissão podem também modelar parâmetros distribuídos, considerando a existência de um circuito equivalente para cada infinitésimo de linha, conforme representado na Figura 5.1<sup>29</sup>.



Figura 5.1 – Representação de um comprimento infinitesimal ( $\Delta x$ ) de uma linha de transmissão monofásica com parâmetros resistivo, indutivo e capacitivo por unidade de comprimento.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> É importante realçar que, devido ao fato da linha ser aérea, o efeito resistivo transversal (normalmente representado por uma condutância transversal) é tipicamente desconsiderado. Este efeito é considerado para inclusão do efeito corona, que quantifica as perdas de potência/energia transversais.

O equacionamento mostrado a seguir pode ser encontrado na literatura em diversas referências, podendo ser citadas [8], [31] e [32].

Utilizando as leis de Kirchoff das correntes e das tensões (LKC e LKT, respectivamente) em cada infinitéssimo  $\Delta x$  da linha<sup>30</sup>, pode-se obter as equações diferenciais que permitem determinar as distribuições espaciais e temporais de tensão e corrente ao longo da linha de transmissão.

Assim, da Figura 5.1, têm-se que a variação de tensão para cada intervalo de espaço  $\Delta x$  pode ser expressa pela Equação (2.2).

$$v(x,t) - v(x + \Delta x, t) = R\Delta x. i(x,t) + L\Delta x. \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$
(5.1)

Da mesma forma, obtém-se a variação de corrente no mesmo intervalo  $\Delta x$ , dado pela Equação (2.3).

$$i(x,t) - i(x + \Delta x, t) = C\Delta x. \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$
(5.2)

Como se pode notar nas Equações (5.1) e (5.2), o problema resume-se à resolução de uma equação diferencial. Dessa maneira, utiliza-se a transformada de Laplace considerando as condições iniciais como sendo nulas.

Supondo condições iniciais quiescentes tem-se que as Equações (5.1) e (5.2) podem ser representas no domínio de Laplace pelas Equações (5.3) e (5.4).

$$V(x + \Delta x, s) - V(x, s) = -(R\Delta x. I(x, s) + L\Delta x. sI(x, s))$$
(5.3)

$$I(x + \Delta x, s) - I(x, s) = -C\Delta x. s. v(x + \Delta x, s)$$
(5.4)

Sabendo que para a aplicação da LCK e da LTK o intervalo ( $\Delta x$ ) deve ser muito pequeno, obtêm-se as Equações (5.5) e (5.6) quando  $\Delta x \rightarrow 0$ .

$$\lim_{\Delta x \to 0} \left( V(x + \Delta x, s) - V(x, s) \right) = -\lim_{\Delta x \to 0} \left( R \Delta x. I(x, s) + L \Delta x. sI(x, s) \right)$$
(5.5)

$$\lim_{\Delta x \to 0} (I(x + \Delta x, s) - I(x, s)) = -\lim_{\Delta x \to 0} C\Delta x. s. v(x + \Delta x, s)$$
(5.6)

Utilizando o cálculo diferencial e integral, tem-se que as Equações (5.5) e (5.6), resumem-se às Equações (5.7) e (5.8).

$$\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = -(R+L,s)I(x,s)$$
(5.7)

$$\frac{\partial I(x,s)}{\partial x} = -C.s.v(x,s)$$
(5.8)

Fazendo as devidas substituições matemáticas nas Equações (5.7) e (5.8)<sup>31</sup>, têm-se as Equações (5.9) e (5.10).

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Evidemente, estas leis de circuito podem ser aplicadas porque  $\Delta x$  é muito menor que qualquer comprimento de onda do espectro de frequência associado aos transitórios eletromagnéticos de interesse.

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> A principal manipulação matemática corresponde ao desacoplamento das Equações (5.5) e (5.6).

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = (R+s.L).s.C.V(x,s)$$
(5.9)

$$\frac{\partial^2 I(x,s)}{\partial x^2} = (R+s.L).s.C.I(x,s)$$
(5.10)

Resolvendo as equações diferenciais acima, obtêm-se as respectivas soluções no domínio do tempo, Equações (5.11) e (5.12).

$$v(x,t) = v^{+}(0,t) \cdot e^{-\gamma x} + v^{-}(0,t) \cdot e^{+\gamma x}$$
(5.11)

$$i(x,t) = i^{+}(0,t) \cdot e^{-\gamma x} + i^{-}(0,t) \cdot e^{+\gamma x}$$
(5.12)

onde:  $\gamma = \sqrt{(R + sL)(sC)}$ ;  $i^+ = \frac{v^+}{z_c}$ ;  $i^- = -\frac{v^-}{z_c}$  e  $Z_c = \sqrt{\frac{(R+sL)}{(sC)}}$ .  $\gamma$  é conhecido como constante de propagação e  $Z_c$  como impedância característica. Como se pode perceber, para cada frequência têm-se um valor diferente de s (considerando que se trabalha com funções senoidais) e, assim, os valores de  $\gamma$  e de  $Z_c$  dependem diretamente dessa variação com a frequência. As grandezas  $v^+$  e *i*<sup>+</sup> correspondem às ondas de tensão e corrente que propagam no sentido de crescimento da variável espacial (x), enquanto  $v \in i$  no sentido de decrescimento e são determinadas pelas condições de contorno (ou de fronteira).

Como analisado, a função no tempo pode ter diversas impedâncias de surto e diversas constantes de propagação, pois qualquer fonte de distúrbio que interaja com o sistema pode ser representada por séries infinitas de senos e cossenos utilizando a transformada de Fourier. Contudo, pode ser muito custoso do ponto de vista computacional fazer tais cálculos; assim, muitos trabalhos utilizam apenas a impedância de surto<sup>32</sup> ( $Z_0 = \sqrt{L/C}$ ) ou em alguns casos utiliza-se a impedância característica na frequência de maior representatividade da excitação.

### 5.1.2. Propagação de Ondas em Linhas Polifásicas

A propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão polifásicas pode ser compreendida estendendo os conceitos desenvolvidos para o caso monofásico apresentado no item 5.1.1, [31].

Contudo, antes de interpretar a situação polifásica, deve-se ter em mente que em linhas de transmissão que atravessam países de proporções continentais deve haver proteções contra descargas atmosféricas, [31]. Para essa proteção, utilizam-se os conhecidos cabos para-raios <sup>33</sup>. A ideia principal dos cabos-guarda é, estatisticamente, ser o elemento mais atingido pelas descargas atmosféricas, blindando, assim, os cabos-fase.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup>  $Z_0 = \lim_{s \to \infty} Z_C$ .

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Também conhecidos por "cabos-guardas".

A presença dos cabos para-raios caracteriza um novo problema no cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, que corresponde à eliminação dos mesmos de forma numérica. Para isso, utiliza-se a técnica de eliminação dos cabos-guardas, onde na verdade eles estão implícitos após a aplicação de tal técnica.

Após a eliminação dos cabos-guarda, para obtenção da propagação de ondas eletromagnéticas em linhas polifásicas, basta ampliar o equacionamento apresentado para o caso monofásico, utilizando, contudo, um equacionamento matricial.

Da mesma maneira que para o caso monofásico, tem-se a necessidade de se resolver um grupo de equações diferenciais matriciais. A resolução é similar às Equações (5.5) e (5.6), sendo representadas pelas Equações (5.13) e (5.14) no domínio de Laplace.

$$[V(x,s)] = e^{-[\gamma_{\nu}(s)]x}[V^{+}(0,s)] + e^{[\gamma_{\nu}(s)]x}[V^{-}(0,s)]$$
(5.13)

$$[I(x,s)] = e^{-[\gamma_i(s)]x}[I^+(0,s)] + e^{[\gamma_i(s)]x}[I^-(0,s)]$$
(5.14)

onde:  $[V^+(0,s)]$ ,  $[I^+(0,s)]$ ,  $[V^-(0,s)]$  e  $[I^-(0,s)]$  são definidos pelas condições de contorno;  $[Z_f] = [R] + s[L]$ ;  $[Y_f] = s[C]$ ;  $[\gamma_v(s)] = ([Z_f] [Y_f])^{1/2}$  e  $\gamma_i(s) = ([Y_f] [Z_f])^{1/2}$ . Evidentemente, [R], [L] e [C] são matrizes e, assim,  $[Z_f]$ ,  $[Y_i]$ ,  $[\gamma_v]$  e  $[\gamma_i]$  também o são. Vale frisar que: i) os elementos das diagonais principais das matrizes [R], [L] e [C] traduzem os acoplamentos próprios (elementos próprios) de cada fase e de cada cabo para-raios da linha, enquanto os demais, os acoplamentos mútuos (elementos mútuos) de uma fase com outra, de cada fase com cada cabo para-raios e de um para-raios com outro; ii)  $[\gamma_v] e [\gamma_i]$  são as matrizes de constantes de propagação das ondas de tensão e de corrente, respectivamente; naturalmente, são diferentes e iii)  $[I^+(0,s)] = \frac{[V^+(0,s)]}{[Z_c]} e [I^-(0,s)] = -\frac{[V^-(0,s)]}{[Z_c]}$ , sendo  $[Z_c]$  a matriz de impedância característica.

As análises feitas para o caso monofásico também são válidas para o caso polifásico; entretanto, atenção especial deve ser destinada ao sistema matricial envolvido, pois, por exemplo, as matrizes de funções de propagação de onda para equação da corrente são diferentes da matriz de propagação de onda para equação de tensão. Para solução desse problema existe uma análise que é abordada posteriormente nessa dissertação, conhecida como análise modal.

## 5.2. Introdução aos Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Considerando o Solo como um Condutor Elétrico Perfeito

Primeiramente, para obter qualquer informação referente aos parâmetros de linhas de transmissão, deve-se considerar que os campos  $\vec{E}$  (campo vetorial intensidade de campo elétrico) e  $\vec{H}$  (campo vetorial intensidade de campo magnético) são mutualmente ortogonais (modo de propagação TEM), [8].

A Figura 5.2 representa uma linha de transmissão monofásica, imersa no ar, cilíndrica de raio "r", de comprimento I, situada a uma altura "h" acima de um solo plano, alimentada por uma tensão v(t) e percorrida por uma corrente i(t). Esta linha alimentada uma carga representada por uma impedância Z. Para o espectro de frequência considerado, associado aos sinais v(t) e i(t), I é muito menor que o comprimento de onda ( $\lambda$ ).



Figura 5.2 - Representação esquemática de uma linha de transmissão aérea monofásica. A e B são dois pontos quaisquer no interior do condutor.

Além disso, em termos práticos, pode-se considerar que:

$$\varepsilon_{condutor} \approx \varepsilon_{ar} \approx \varepsilon_{v\acute{a}cuo} = \varepsilon_0^{34}$$

$$\mu_{condutor} \approx \mu_{ar} \approx \mu_{solo} \approx \mu_{vacuo} = \mu_0^{35}$$

Para a modelagem de um sistema elétrico qualquer, o mesmo deve obedecer simultaneamente às quatro equações de Maxwell (que regem todos os fenômenos eletromagnéticos analisados em uma perspectiva macroscópica), expressas na Tabela 5.1, nas formas integral e diferencial, no domínio do tempo. As interpretações físicas destas equações são extensivamente encontradas na literatura. Esta tabela inclui também as equações constitutivas.

 $<sup>^{34}</sup>$   $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m.

 $<sup>^{35}</sup>$  µ<sub>0</sub> = 4 $\pi$  x 10<sup>-7</sup> H/m.

Nas equações apresentadas na Tabela 5.1, tem-se:

- $\vec{E}$  é o campo vetorial intensidade de campo elétrico (V/m);
- $\vec{B}$  é o campo vetorial densidade de fluxo magnético (T = Wb/ m<sup>2</sup>);
- t é o tempo (s);
- C é o caminho fechado que delimita a superfície aberta S;
- $d\overline{\ell}$  é o elemento vetorial de comprimento infitessimal (m) ao longo de C;
- $d\vec{S}$  é o elemento vetorial de superfície infitessimal (m<sup>2</sup>) perpendicular a S;
- $\vec{H}$  é o campo vetorial intensidade de campo magnético (A/m);
- $\vec{J}$  é o campo vetorial densidade de corrente (A/m<sup>2</sup>);
- $\vec{J}_{c}$  é o campo vetorial densidade de corrente de condução (A/m<sup>2</sup>);
- $\vec{J}_{D}$  é o campo vetorial densidade de corrente de deslocamento (A/m<sup>2</sup>);
- D é o campo vetorial densidade de fluxo elétrico (C/m<sup>2</sup>);
- ρ<sub>v</sub> é a densidade volumétrica de carga (C/m<sup>3</sup>);
- S é a superfície fechada (denominada "superfície gaussiana") que encerra o volume v (m<sup>3</sup>);
- $q_{enc}$  é a carga encerrada pela "superfície gaussiana" (C) ou contida no volume v;
- *dv* é o elemento (escalar) de volume diferencial (*m*<sup>3</sup>).

Tabela 5.1 – Equações de Maxwell nas formas integral e diferencial, no domínio do tempo.

Forma Diferencial	Forma Integral	Lei de
$\vec{\nabla} X \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \bullet d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \bullet d\vec{S}$	Faraday-Lenz
$\vec{\nabla} X \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{H} \bullet d\vec{\ell} = \int_S \vec{J}_C \bullet d\vec{S} + \int_S \vec{J}_D \bullet d\vec{S}$	Ampère-Maxwell
$\vec{\nabla} \bullet \vec{D} = \rho_v$	$\oint_{S} \vec{D} \bullet d\vec{S} = \int_{V} \rho_{V}  dV = q_{enc}$	Gauss da Eletricidade
$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0$	$\oint_{S} \vec{B} \bullet d\vec{S} = 0$	Gauss do Magnetismo
Equações constitutivas	$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} ; \vec{B} = \mu \vec{H} ; \vec{J}_c = \sigma \vec{E}$	

De posse das equações de Maxwell e da Figura 5.2, tem-se então a possibilidade de modelar o sistema em questão, levando em consideração algumas premissas e simplificações. Essas premissas e simplificações são as mesmas presentes no item 2.1.1 e descritas em detalhes na referência [10].

#### 5.2.1. Parâmetros Longitudinais

As inúmeras cargas livres do condutor da linha de transmissão monofásica são submetidas à ação do campo vetorial intensidade de campo elétrico longitudinal  $(\vec{E}_{LC})^{36}$  (produzido pela fonte que alimenta a linha). Este campo elétrico<sup>37</sup>, então, faz com que estas cargas entrem em movimento ordenado, originando, consequentemente, uma corrente elétrica (I<sub>LC</sub>). O caráter vetorial desta corrente é fornecido pelo campo vetorial densidade de corrente longitudinal  $(\vec{J}_{IC})^{38}$ . Neste ponto, é oportuno destacar a natureza de  $\vec{J}_{LC}$  <sup>39</sup>. A tangente de perdas, Equação (5.15), no material que compõe a linha, para todo o espectro de frequência de interesse neste trabalho, é muito superior à unidade, indicando que a corrente de condução é muito maior que a de deslocamento, ilustrando, assim, que o material é predominantemente condutor, [10].

$$\frac{\left|\vec{J}_{LCondução}\right|}{\left|\vec{J}_{LDeslocamento}\right|} = \frac{\sigma_{condutor} \left|\vec{E}_{LC}\right|}{\left|\frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_{condutor} \vec{E}_{LC}\right)\right|} >>1$$
(5.15)

A interpretação da Equação (5.15) fica mais simples no domínio fasorial, Equação (5.15)<sup>40</sup>.

$$\frac{\left|\vec{J}_{S\,LConducão}\right|}{\left|\vec{J}_{S\,LDeslocamento}\right|} = \frac{\sigma_{condutor}\left|\vec{E}_{S\,LC}\right|}{\left|j\,\omega\left(\varepsilon_{condutor}\vec{E}_{S\,LC}\right)\right|} = \frac{\sigma_{condutor}}{\omega\varepsilon_{condutor}} >>1$$
(5.16)

Para exemplificar quão mais intensa é a densidade de corrente de condução, basta substituir os valores de algum condutor comumente utilizado em linhas de transmissão, como o alumínio<sup>41</sup>.

Assim sendo,  $\vec{J}_{LC} \approx \sigma_{\text{condutor}} \vec{E}_{LC}$ . Desta forma, as cargas livres ao se deslocarem entre dois pontos quaisquer (A e B, vide Figura 5.3), em um material "puramente" condutivo, sob a ação de  $\vec{E}_{LC}$  (mesma direção e sentido), "sentirão" uma

```
<sup>40</sup> O subscrito "S" indica grandeza fasorial.
```

$${}^{41}\frac{\sigma_{Al}}{\omega(\varepsilon_{Al})} = \frac{3.5 \times 10^7}{\omega(\varepsilon_0)} \approx \frac{6.3 \times 10^{17}}{f}$$

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> O subscrito "L" indica grandeza longitudinal ao condutor (C).

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Definido por força elétrica por unidade de carga de prova (convencionalmente positiva).

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup>  $I_{LC} = \int_{S} \vec{J}_{LC} \bullet d\vec{S}$ , onde S corresponde a uma seção transversal do condutor e  $d\vec{S}$  ao seu

correspondente elemento vetorial de superfície infitessimal, perpendicular a S.

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Teoricamente, composta por uma parcela de corrente de condução e uma de deslocamento ( $\vec{J}_{LC} = \vec{J}_{LCondução} + \vec{J}_{LDeslocamento}$ ).

queda de potencial de natureza condutiva ( $\Delta V$ )<sup>42</sup>. Esta queda de potencial<sup>43</sup> é expressa pela Equação (5.17).



Figura 5.3 - Ilustração da queda de potencial associada ao fluxo ordenado da cargas elétricas (corrente elétrica) no condutor da linha de transmissão monofásica representada na Figura 2.3.

$$\Delta V = V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}_{LC} \bullet d\vec{\ell}$$
(5.17)

A relação entre  $\Delta V$  (efeito integral de  $\vec{E}_{LC}$ ) e I<sub>LC</sub> (efeito integral de  $\vec{J}_{LC}$ ) é definida como a resistência elétrica longitudinal interna (do condutor), R, um parâmetro (longitudinal) que auxilia na quantificação das perdas por efeito Joule (transformação de energia elétrica em térmica), fruto do atrito associado ao fluxo ordenado de cargas livres na estrutura do material condutor. A expressão de R é ilustrada na Equação (5.5)<sup>44</sup>.

$$R = \frac{\Delta V}{I_{LC}} = \frac{-\int\limits_{A}^{B} \vec{E}_{LC} \bullet d\vec{\ell}}{\int\limits_{S} \vec{J}_{LC} \bullet d\vec{S}} = \frac{-\int\limits_{A}^{B} \vec{E}_{LC} \bullet d\vec{\ell}}{\sigma_{condutor} \int\limits_{S} \vec{E}_{LC} \bullet d\vec{S}}$$
(5.18)<sup>45</sup>

A Equação (5.18) tem fácil resolução numérica para o caso onde a excitação tem frequência baixa, ou seja, distribuição aproximadamente uniforme de corrente. Como o trabalho em questão apresenta resultados para frequências relativamente elevadas, existe a necessidade de computar o aumento da resistência interna do condutor com a frequência. Esse efeito é conhecido na literatura como "efeito pelicular".

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> As cargas de prova "sentem" uma diminiução de potencial quando se deslocam no mesmo sentido do campo elétrico.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Definida como o trabalho necessário para deslocar a carga de prova de um ponto a outro (na região onde existe um campo elétrico aplicado) por unidade de carga de prova.

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> A aplicação desta definição no caso de um condutor de comprimento L e de área de seção transversal S (uniforme), alimentado por corrente contínua (c.c.), direciona à conhecida relação R =  $\rho_{condutor}L/S$ , onde  $\rho_{condutor} = 1/\sigma_{condutor}$ .

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> É facilmente perceptível que R é um número puramente real, uma vez que  $\vec{J}_{LC} e \vec{E}_{LC}$  estão em fase no tempo e, portanto,  $\Delta V$  e l<sub>LC</sub> também estão em fase.

O efeito peculiar é bem conhecido desde 1918 e sua formulação foi apresentada pelo pesquisador H. B. Dwight, [33]. Segundo ele, o fluxo magnético em volta do eixo de um condutor, em todo condutor percorrido por uma corrente alternada, produz variação na densidade de corrente elétrica ( $\vec{J}_{LC}$ ). Em condutores percorridos por corrente continua, a tendência é que a densidade de corrente seja o mais uniforme possível, enquanto que em correntes alternadas o fluxo de corrente tende a ser maior nas periferias. O efeito é ainda mais pronunciado quanto maior for a frequência de excitação ou quanto maior for a secção transversal do condutor em questão. Pela característica da densidade de corrente ser maior nas periferias foi dado o nome efeito pelicular (ou "skin", em inglês).

Com o aumento de densidade de corrente nas periferias e a abrupta diminuição de corrente no interior do condutor, é fácil perceber que haverá uma diminuição na área efetiva de circulação de corrente. Dessa maneira é esperado que a resistência do condutor aumente com a diminuição dessa área. Tal comportamento é explorado no Capítulo 3.

A formulação matemática para o cômputo do efeito pelicular, em condutores tubulares, é apresentada na Equação (5.19), cujos detalhes da dedução podem ser verificados em [33]<sup>46</sup>.

$$Z_{int} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_{condutor}}{\sigma_{condutor}}} * \frac{1}{2\pi R_1} * \frac{(I_0(\rho_1)K_1(\rho_0)) + (K_0(\rho_1)I_1(\rho_0))}{(I_1(\rho_1)K_1(\rho_0)) - (I_1(\rho_0)K_1(\rho_1))}$$
(5.19)

onde:  $\rho_0 = R_0 \sqrt{j\omega\mu_{condutor}\sigma_{condutor}}$ ;  $\rho_1 = R_1 \sqrt{j\omega\mu_{condutor}\sigma_{condutor}}$ ;  $\omega$  é a frequência angular;  $\sigma_{condutor}$  é a condutividade do condutor;  $R_0$  é o raio interno do condutor;  $R_1$  é o raio externo do condutor;  $\mu_{condutor}$  é a permeabilidade magnética do condutor;  $I_0(.)$ ,  $I_1(.)$  e  $K_0(.)$  e  $K_1(.)$  são, respectivamente, função modificada de Bessel de primeira espécie e ordem 0, função modificada de Bessel de primeira espécie e ordem 1, função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem 0 e função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem 1.

 $\vec{J}_{LC}$  varia no tempo e, assim, pela aplicação da lei de Ampère<sup>47</sup>, gera um campo magnético de natureza rotacional ( $\vec{H}$ ), cujas linhas de ação fecham-se sobre si mesmas ao redor das linhas de  $\vec{J}_{LC}$ , conforme ilustrado na Figura 2.5. Utilizando a lei de Faraday, pode-se observar que  $\vec{H}$ , variável no tempo, induz um campo elétrico de

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Z<sub>int</sub> tem uma parte real, {Re(Z<sub>int</sub>)}, e uma imaginária, {Im(Z<sub>int</sub>)}. Naturalmente, R = {Re(Z<sub>int</sub>)}, enquanto {Im(Z<sub>int</sub>)} corresponde à reatância indutiva interna (discutida a seguir).

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> A lei de Ampère é um caso particular da lei de Ampère-Maxwell quando a densidade de corrente de deslocamento é desprezível face à de condução.

natureza rotacional e longitudinal ao condutor  $(\vec{E}_{LNC})^{48}$ , conforme também esboçado na Figura 2.5<sup>49</sup>. A lei de Faraday na forma integral ilustra que a variação temporal do fluxo magnético (=  $-\frac{d}{dt} \int_{S} \vec{B} \cdot d\vec{S}$ ), que atravessa a superfície S aberta (área retangular que compreende o condutor e o solo), induz uma força eletromotriz induzida  $(V_{femL} = \oint_{C} \vec{E}_{LNC} \cdot d\vec{\ell})^{50}$  ao longo do caminho (circuito) fechado C formado pelo condutor

e solo.





Figura 5.4 - Ilustração do fenômeno de indução magnética no condutor da linha de transmissão monofásica representa na Figura 2.3.

No domínio fasorial, a relação entre V<sub>SfemL</sub> (efeito integral de  $\vec{E}_{SLNC}$ ) e I<sub>SLC</sub> (efeito integral de  $\vec{J}_{LC}$ ) é definida como a impedância longitudinal (do condutor), Z, um parâmetro (longitudinal) que auxilia na quantificação energia armazenada na forma de campo magnético. A expressão de Z é ilustrada na Equação (5.20).

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> O subscrito "NC" significa grandeza "não conservativa".

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> As linhas de  $\vec{E}_{LNC}$  são fechadas cujo caminho fechado compreende o condutor (linha de transmissão)

e o solo. Ademais, suas linhas circulam as linhas fechadas de  $ar{H}$  .

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Também denominada "tensão induzida".

$$Z = \frac{V_{S femL}}{I_{SLC}} = \frac{\oint_{C} \vec{E}_{LNC} \bullet d\vec{\ell}}{I_{SLC}} = -j\omega \frac{\int_{S} \vec{B}_{S} \bullet d\vec{S}}{\sigma_{condutor} \int_{S} \vec{E}_{LC} \bullet d\vec{S}} \therefore$$
$$Z = -j\omega\mu \frac{\int_{S} \vec{B}_{S} \bullet d\vec{S}}{\int_{S} (\vec{\nabla} X \vec{B}_{S}) \bullet d\vec{S}} \qquad (5.20)^{51}$$

Vale destacar que:

1) O termo 
$$\left(-\mu \frac{\int_{S} \vec{B}_{s} \cdot d\vec{S}}{\int_{S} (\vec{\nabla} X \vec{B}_{s}) \cdot d\vec{S}}\right)$$
 é conhecido como indutância (L) da linha de

transmissão monofásica, definido a partir da relação entre o enlace de fluxo magnético e a corrente;

2) O termo  $\omega$ L corresponde à reatância indutiva de linha (X<sub>L</sub>) e, assim, Z = j X<sub>L</sub>;

3) Pelos conceitos associados a Z, percebe-se que o fluxo magnético apresenta os seguintes componentes<sup>52</sup>: a) interno ao condutor e b) externo ao condutor. Desta forma, L pode ser dividida entre indutância interna (L<sub>int</sub>) e externa (L<sub>ext</sub>), ou seja, L = L<sub>int</sub> + L<sub>ext</sub>. L<sub>int</sub> = {Im(Z<sub>int</sub>)/ $\omega$ }, Equação (5.19), cujo cálculo corresponde ao efeito integral do campo magnético no interior do condutor. Em função do efeito pelicular, onde a área de transporte do fluxo ordenado de cargas elétricas diminui com o aumento da frequência, o fluxo magnético no interior do condutor. L<sub>ext</sub>, que traduz o efeito de integração do campo magnético entre a superfície externa do condutor e a interface ar-solo, calculada a seguir, não depende da frequência;

4) Em função da presença da derivada temporal na lei de Faraday, Z é um número imaginário puro, acarretando, em consequência, em uma defasagem de 90<sup>o</sup> entre  $V_{SfemL}$  e  $I_{SLC}^{53}$ .

Para o cálculo de L<sub>ext</sub> é necessário considerar a interface (plana) entre o ar e o solo, pois a presença do solo altera a distribuição espacial das linhas de campo magnético. A técnica utilizada para tal foi idealizada em 1848 por Lord Kelvin, que

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Evidentemente, a superfície do numerador corresponde à retangular descrita anteriormente, enquanto a do denominador à seção transversal do condutor.

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Quando o solo for modelado como um meio de condutividade finita, seção 2.6, uma terceira parcela deve ser incluída na expressão de L, que corresponde justamente à contribuição do solo no retorno de corrente. Naturalmente, por enquanto, onde o solo é considerado um condutor elétrico perfeito, esta parcela é nula.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Quando o efeito do solo com condutividade finita é considerado, Z passa a ser um número complexo, cuja parte real corresponde sua contribuição na indutância de linha e a parte imaginária na resistência da mesma.

introduziu o método das imagens, estabelecendo que: "uma dada configuração de carga próxima a um plano infinito condutor perfeito aterrado pode ser substituída pela própria configuração de carga, por sua imagem e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor"<sup>54</sup>, [34]. A aplicação do método das imagens ao sistema físico real da Figura 5.2 permite transformá-lo em um sistema físico equivalente, como o apresentado na Figura 5.5. Observe que:

1) No sistema físico equivalente existe um único meio, que corresponde àquele onde no sistema físico real a fonte está imersa (neste caso, o ar);

2) A superfície equipotencial está situada, no sistema físico equivalente, exatamente na mesma posição da interface plana ar-solo, do sistema físico real;

3) A carga imagem é posicionada, no sistema físico equivalente, de forma simétrica à carga fonte, onde o plano de simetria é justamente a superfície equipotencial;

4) O posicionamento e sinal da carga imagem são estabelecidos de tal forma que as condições de interface para o campo eletromagnético sejam, evidentemente, as mesmas, tanto no sistema físico real, quanto no equivalente;

5) O fluxo ordenado de cargas elétricas da fonte (corrente fonte) em um sentido estabelece, via método das imagens, um fluxo ordenado de cargas elétricas imagem (corrente imagem) em sentido contrário.





Utilizando o sistema físico equivalente apresentado na Figura 5.5, pode-se então calcular a indutância externa da linha de transmissão monofásica, por unidade

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Como a carga fonte do campo está imersa no ar, a carga imagem tem sinal contrário (e mesma intensidade).

de comprimento. Apesar de este cálculo ser amplamente divulgado na literatura, a seguir são apresentados seus principais passos.

Por meio da lei de Ampère, tem-se que o campo vetorial densidade de campo magnético total gerado pelas correntes dos condutores real e imagem pode ser dado pela função espacial representada na Equação (5.21)<sup>55</sup>.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I_{LC}}{2\pi} \left( \frac{1}{\rho} + \frac{1}{2h - \rho} \right) \hat{a}_{\phi}$$
(5.21)

Em seguida, é calculado o fluxo concatenado no sistema físico real considerando uma distância incremental de comprimento do condutor ( $\Delta z$ ), cuja expressão matemática é mostrada na Equação (5.22).

$$\psi = \int_0^{\Delta z} \int_r^H \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{\rho} + \frac{1}{2H - \rho} \right) d\rho dz = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \Delta z \left( \frac{\ln(2H - r)}{\ln(r)} \right)$$
(5.22)

Finalmente, sabendo que em termos práticos, h >> r, determina-se a expressão final para a indutância externa da linha de transmissão monofásica, por unidade de comprimento, Equação (5.23).

$$L_{ext} = \lim_{\Delta z \to 0} \frac{\psi}{I.\Delta z} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{\ln (2h)}{\ln (r)} \right]$$
(5.23)

A determinação dos parâmetros longitudinais envolve a aplicação das leis de Faraday, Ampère-Maxwell e Gauss do magnetismo. Resta, por conseguinte, a aplicação da lei de Gauss da eletricidade, que determina os parâmetros transversais.

### 5.2.2. Parâmetros Transversais

A distribuição de cargas elétricas no condutor, mediante a lei de Gauss da eletricidade, gera um campo elétrico de natureza divergente ao longo do condutor, conforme mostrado na Figura 5.6. Considerando uma distribuição positiva de carga no condutor, que induz uma quantidade de carga de mesma intensidade e de sinal contrário na superfície do solo<sup>56</sup>, o campo elétrico originado diverge das cargas positivas e converge para as negativas. Supondo que o comprimento do condutor seja muito maior que sua altura ( $\ell >> h$ ) as linhas deste campo<sup>57</sup> são, em termos práticos, paralelas<sup>58</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Considera-se aqui o sistema de coordenadas cilíndricas circulares, com o eixo z coinicidente com o eixo axial do condutor, com  $\rho$  sendo a coordenada radial e  $\phi$  a azimutal.

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Em função da condutividade infinita do solo, estas cargas ficam distribuídas na interface ar- solo e não penetram no mesmo.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Denominadas "linhas de força".

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Efeito de bordas pode ser desprezado.



Figura 5.6 – Ilustração do campo elétrico de natureza divergente produzido pelas cargas elétricas distribuídas no condutor.

O efeito integral deste campo elétrico (transversal), no ar, entre a superfície do condutor e o solo, estabelece uma tensão (transversal). A relação entre esta tensão transversal e a corrente no ar<sup>59</sup> é definida como a impedância transversal da linha de transmissão monofásica. Esta impedância possui natureza predominantemente capacitiva, dado o reduzido valor de corrente de condução no ar<sup>60</sup>. A análise desta impedância (ou admitância<sup>61</sup>) permite verificar a definição de capacitância como a carga (distribuída linearmente em um condutor<sup>62</sup>) por unidade de tensão transversal (V<sub>T</sub>, entre o condutor e a superfície do solo), Equação (5.24).

$$C = \frac{q_{enc}}{V_T} \tag{5.24}$$

O cálculo da capacitância, por unidade de comprimento, para linhas monofásicas é facilmente encontrado na literatura técnica e, assim, somente as expressões intermediárias principais são apresentadas a seguir.

A aplicação da lei de Gauss, na forma integral, possibilita determinar o campo elétrico de natureza divergente, Equação (5.25) – onde, novamente, o sistema de coordenadas cilindrícas circulares é utilizado.

$$\oint_{S} \vec{D} \bullet d\vec{S} = \int_{0}^{2\pi\Delta z} \int_{0}^{2\pi\Delta z} D\rho \, dz \, d\phi = q_{enc} :$$

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> De natureza predominantemente de deslocamento, pois  $σ_{ar} ≈ 0$ . Em função da presença da derivada temporal na expressão da densidade de corrente de deslocamento, a impedância transversal é um número imaginário puro, acarretando, em consequência, em uma defasagem de 90<sup>0</sup> entre a tensão transversal e a corrente no ar.

<sup>&</sup>lt;sup>60</sup> Por este motivo, o efeito resistivo transversal é normalmente desconsiderado em linhas de transmissão aéreas (resistência transversal infinita). Desta forma, a condutância transversal é praticamente nula.

 $<sup>^{61}</sup>$  A consideração de solo condutor elétrico perfeito faz com que esta admitância seja um número imaginário puro (Y<sub>T</sub> = j ω C), ao passo que uma condutividade finita atribuída ao solo (seção 2.6) acarreta a admitância como um número complexo, sendo que: a parte imaginária está associada com a capacitância e a real corresponde à condutância.

 $<sup>^{62}</sup>$  Densidade linear de carga elétrica (C/m), representada por  $\,
ho_{\ell}$  .

$$\vec{E} = \frac{q_{enc}}{2\pi\varepsilon_0 \,\Delta z \,\rho} \hat{a}_{\rho} \tag{5.25}$$

Em seguida, a aplicação do método das imagens possibilita a obtenção de  $V_{T,}$ Equação (5.26).

$$V_T = \frac{q_{enc}}{2\pi\varepsilon_0 \Delta z} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)$$
(5.26)

Por fim, utiliza-se a Equação (5.26) para determinar a capacitância transversal, por unidade de comprimento, de um condutor monofásico, Equação (5.27).

$$C = \lim_{\Delta z \to 0} \frac{q_{enc}}{V_T \, \Delta z} = \frac{2.\pi.\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$$
(5.27)

A formulação apresentada até esse momento (linhas monofásicas) pode ser estendida para linhas polifásicas. Contudo, nos casos polifásicos trabalha-se com matriz de impedância longitudinal e matriz de admitância transversal.

### 5.3. Cálculo da Matriz de Indutância Longitudinal Externa

Naturalmente, para sistemas polifásicos a indutância longitudinal externa corresponde a uma matriz, onde seus elementos próprios e mútuos são calculados de forma similar ao procedimento adotado para obtenção da Equação (5.23). Os componentes próprios (L<sub>ii</sub>), que traduzem o acoplamento magnético próprio, correspondem à relação entre o enlace de fluxo no i-ésimo circuito e a corrente deste circuito. Por outro lado, os mútuos (L<sub>ik</sub>), acoplamento magnético mútuo entre dois condutores, entre o enlace de fluxo no k-ésimo circuito e a corrente do i-ésimo circuito<sup>63</sup>. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram, respectivamente, os sistemas físicos real e equivalente que auxiliam nos cálculos em questão, com todas as grandezas geométricas de interesse devidamente representadas.

Com base no exposto acima, as expressões que possibilitam os cálculos de L<sub>ii</sub> e L<sub>ik</sub> são representadas nas Equações (5.28) e (5.29), [35].

$$L_{ii} = \frac{\Psi_i}{I_i} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \ln\left(2.\frac{H_i}{r}\right)$$
(5.28)

$$L_{ik} = \frac{\Psi_i}{I_k} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \ln\left(\frac{D_{ik'}}{d_{ik}}\right)$$
(5.29)

onde:  $\mu_0$ é a permeabilidade magnética do vácuo;  $H_i$  é a altura do i-ésimo condutor em relação ao solo; r é o raio externo do condutor;  $D_{ik'}$  é a distância entre o i-ésimo

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Em decorrência do Teorema da Reciprocidade, tem-se que:  $L_{ik} = L_{ki}$ .

condutor i e a imagem do k-ésimo condutor (k)' e  $d_{ik}$  é a distância entre os i-ésimo e k-ésimo condutores.

Desta forma, tem-se a seguinte matriz de indutância do sistema polifásico:



Figura 5.7 - Sistema físico real que representa dois condutores (i e k) genéricos de um sistema polifásico e que auxilia na determinação de suas matrizes de indutância e de capacitância.



Figura 5.8 - Sistema físico equivalente, ao sistema físico real da Figura 5.7, determinado por meio da aplicação do método das imagens.

#### 5.4. Cálculo da Matriz de Capacitância Transversal

O cálculo da admitância transversal também pode ser feito de forma análoga a apresentada no caso monofásico (e utilizando os conceitos apresentados na subseção 2.3.2). Contudo, da mesma forma que para a indutância polifásica, trabalha-se com uma matriz de capacitâncias [C]. De posse do modelo apresentado nesse documento e utilizando o método das imagens, pode-se facilmente obter as equações que preenchem a matriz de potenciais. Infelizmente, não existe um grupo de equações que representam a capacitância transversal de uma linha polifásica (como no caso da indutância), sendo necessário utilizar um passo anterior que é a criação da matriz de potenciais de Maxwell ([P]), [31], [36], [37].

Após a obtenção da matriz de potenciais, inverte-se a mesma e, assim, tem-se os valores das capacitâncias transversais, ou seja,  $[C] = [P]^{-1} (F/m)$ . A matriz de P é da seguinte forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

Os componentes próprios e mútuos de [P] são representados nas Equações (5.30) e (5.31), respectivamente.

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{2H_i}{r}\right) \tag{5.30}$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ik\prime}}{d_{ik}}\right)$$
(5.31)

onde:  $\varepsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo; as outras grandezas geométricas estão definidas nas Figuras 2.8 e 2.9.

## 6. Apêndice B

#### 6.1. Eliminação dos Cabos Para-Raios

Como dito anteriormente, as linhas de transmissão, na maior parte dos casos, tem cabos para proteção da mesma contra descargas atmosféricas. Esses condutores são conhecidos na literatura como cabos para-raios (ou cabos-guarda). Quando levados em consideração, os mesmos entram no cálculo das matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal de linhas de transmissão. Em alguns casos, para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, existe a
necessidade de trabalhar apenas com uma matriz que contemple apenas as fases, mas que inclua as contribuições dos cabos-guarda, [38] [39].

Essa seção apresenta uma técnica de eliminação dos cabos guardas, onde os mesmos são considerados indiretamente na matriz equivalente<sup>64</sup>. O procedimento utilizado nessa dissertação pode ser aplicado para qualquer linha de transmissão independentemente do número de cabos para-raios, desde que se possa considerar que os mesmos estejam aterrados por meio de impedâncias impulsivas baixas o suficiente para que seus potenciais sejam aproximadamente nulos.

Como de praxe, a solução apresentada é feita no domínio fasorial, ou seja, trabalha-se com impedâncias/admitâncias e grandezas fasoriais. O método de eliminação é, basicamente, o mesmo, tanto para a impedância longitudinal quanto para a admitância transversal. Dessa maneira, é apresentado o equacionamento detalhado apenas para a impedância longitudinal.

Considerando o caso de uma linha trifásica (fases A, B e C) com dois cabos para-raios ( $P_{R1} e P_{R2}$ ), conforme representado na Figura 6.1, tem-se o sistema matricial representado na Equação (6.1)<sup>65</sup>.



Figura 6.1 – Representação de um sistema trifásico, com dois cabos para-raios, para determinação, via lei de Kirchhoff, do sistema matricial que relaciona tensões e correntes com impedâncias próprias e mútuas.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_{pr1} \\ V_{pr2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{apr1} & Z_{apr2} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bpr1} & Z_{bpr2} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cpr1} & Z_{cpr2} \\ Z_{pr1a} & Z_{aa} & Z_{pr1c} & Z_{pr1pr1} & Z_{pr1pr2} \\ Z_{pr2a} & Z_{pr2b} & Z_{pr2c} & Z_{pr2pr1} & Z_{pr2pr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{pr1} \\ I_{pr2} \end{bmatrix}$$
(6.1)

<sup>64</sup> Denominada "representação implícita dos cabos para-raios".

 $^{65} V_{A} = V_{a} - V_{a'}; V_{B} = V_{b} - V_{b'}; V_{C} = V_{c} - V_{c'}; V_{pr1} = V_{d} - V_{d'}; V_{pr2} = V_{e} - V_{e'}; I_{pr1} = I_{d}; I_{pr2} = I_{e}.$ 

onde:  $Z_{ii}$  é a impedância própria por unidade de comprimento do i-ésimo condutor (cabo fase ou para-raios) e  $Z_{ik} = Z_{ki}$  é a impedância mútua entre o i-ésimo e o késimo condutores (fase-fase e fase-para-raios), ambas por unidade de comprimento.

Considerando a natureza matricial da Equação (6.1), pode-se compactar a mesma em submatrizes, conforme Equação (6.2).

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B \\ Z_C & Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{pr} \end{bmatrix}$$
(6.2)

onde:  $Z_A$  representa a matriz dos acoplamentos próprios e mútuos das fases, sem a influência dos cabos para-raios,  $Z_B e Z_C$  representam as matrizes dos acoplamentos mútuos entre as fases e os cabos-guarda e  $Z_D$  representa a matriz dos acoplamentos próprios e mútuos dos cabos-guarda, sem a influência dos cabos fase;  $V_{abc}$  e  $V_{pr}$  são os vetores de tensões das fases e dos para-raios, respectivamente;  $I_{abc}$  e  $I_{pr}$  são os vetores de correntes nas fases e nos para-raios, respectivamente.

Como dito anteriormente, os cabos-guarda estão ligados diretamente na terra, assim seu potencial é nulo ( $V_{pr} = 0$ ). Dessa maneira a Equação (6.2) pode ser reduzida para o conjunto de expressões representadas nas Equações (6.3) e (6.4).

$$V_{abc} = Z_A I_{abc} + Z_B I_{pr} \tag{6.3}$$

$$0 = Z_C I_{abc} + Z_D I_{pr} \tag{6.4}$$

Resolvendo a Equação (6.4) para a corrente dos para-raios ( $I_{pr}$ ) tem-se a Equação (6.4).

$$I_{pr} = -Z_D^{-1} Z_C I_{abc} (6.5)$$

Substituindo a Equação (6.5) na Equação (6.3), obtém-se a Equação (6.6).

$$V_{abc} = (Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C) (I_{abc})$$
(6.6)

Dessa maneira é possível reduzir o sistema inicial levando em consideração os cabos-guarda<sup>66</sup>.

## 6.2. Transposição de Linhas de Transmissão

Naturalmente, as matrizes de impedâncias e admitâncias de linhas de transmissão práticas, apesar de simétricas, não são balanceadas. Assim sendo, apesar das tensões das fases serem equilibradas, as correntes não o são. Tal situação promove, por exemplo, interferência eletromagnética significativa em circuitos eventualmente presentes nas proximidades das linhas de transmissão<sup>67</sup>. Uma forma

 $<sup>^{66}</sup>$  Vale destacar que a matriz  $(Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C)$  tem dimensão 3 X 3, enquanto a da Equação (2.29) 5 X 5.

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> Como por exemplo, linhas de telecomunicações, dutos metálicos etc.

de reduzir tais acoplamentos e, em consequência, fazer com as matrizes em questão se tornem balanceadas refere-se à técnica denominada transposição.

A transposição da linha consiste, basicamente, em fazer com que cada fase ocupe cada uma das posições (Seções S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>) ilustradas na Figura 6.2, [26], [28] e [40], ao longo de um comprimento S de transposição.



Figura 6.2 – Esquema de transposição de uma linha de transmissão trifásica. Adaptado de **[38]**.

Considerando que em intervalos iguais cada fase ocupa as mesmas posições, tem-se que a impedância no fim da seção S corresponde à média das três impedâncias parciais, Equação (6.7), onde i, k e m representem cada trecho (seção) do ciclo completo de transposição.

$$[Z] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ik} & Z_{im} \\ Z_{ki} & Z_{kk} & Z_{km} \\ Z_{mi} & Z_{mk} & Z_{mm} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{kk} & Z_{km} & Z_{ki} \\ Z_{mk} & Z_{mm} & Z_{mi} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{mm} & Z_{mi} & Z_{mk} \\ Z_{im} & Z_{ii} & Z_{ik} \\ Z_{im} & Z_{ii} & Z_{ik} \end{bmatrix}$$
(6.7)

Desta forma, as impedâncias mútua e própria de uma linha de transmissão transposta são àquelas das Equações (6.8) e (6.9), respectivamente.

$$Z_{próprio} = \frac{1}{3}(Z_{ii} + Z_{mm} + Z_{kk})$$
(6.8)

$$Z_{m\acute{u}tuo} = \frac{1}{3} (Z_{ik} + Z_{km} + Z_{mi})$$
(6.9)

Portanto, a matriz de impedância longitudinal (balanceada após a transposição) corresponde à representada na Equação (6.10).

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{pr\acute{o}prio} & Z_{m\acute{u}tuo} & Z_{m\acute{u}tuo} \\ Z_{m\acute{u}tuo} & Z_{pr\acute{o}prio} & Z_{m\acute{u}tuo} \\ Z_{m\acute{u}tuo} & Z_{m\acute{u}tuo} & Z_{pr\acute{o}prio} \end{bmatrix}$$
(6.10)

Essa representação, apresentada nessa seção, somente é válida para o caso onde o comprimento de onda (tensão e corrente) é muito maior que o intervalo de transposição, ou seja, considera-se a hipótese de uma linha idealmente transposta, [26].

## 6.3. Representação Modal

Como apresentado na Seção 5.1.2, a matriz da constante de propagação de ondas, em linhas de transmissão polifásicas, da tensão é diferente da de corrente. Esse fato dificulta a obtenção das soluções das equações de tensão e de corrente. Contudo, os autovalores das matrizes ZY e YZ são iguais, [39] [28] [40] [39]. Portanto, pode-se assim reescrever uma matriz do tipo diagonal ( $\lambda$ ) com os autovalores das matrizes ZY e YZ como expressos nas Equações (6.11) e (6.12).

$$\lambda = T_v^{-1}.ZY.T_v \tag{6.11}$$

$$\lambda = T_i^{-1}. YZ. T_i \tag{6.12}$$

onde:  $T_v \in T_i^{68}$  são as matrizes cujas colunas são os autovetores associados aos produtos ZY e YZ, respectivamente.

As tensões e correntes modais ( $V_m$  e  $I_m$ ) são relacionadas com seus valores de fases ( $V_f$  e  $I_f$ ) pelas Equações (6.13) e (6.14), respectivamente.

$$V_m = T_v^{-1} V_f (6.13)$$

$$T_m = T_i^{-1} I_f$$
 (6.14)

Além disso, as matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal no domínio dos modos ( $Z_m$  e  $Y_m$ ) podem ser obtidas a partir Equações (6.15) e (6.16), respectivamente, onde  $Z_l$  e  $Y_t$  correspondem, respectivamente, às matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal no domínio das fases.

$$Z_m = T_v^{-1} Z_l T_l (6.15)$$

$$Y_m = T_i^{-1} Y_t T_v (6.16)$$

Com a utilização de representações modais, pode-se trabalhar com sistemas polifásicos considerando cada modo independente dos outros, ou seja, cada modo "m" da linha tem uma impedância e a resolução do sistema é simplesmente a solução de "m" sistemas monofásicos independentes. Dessa maneira, para cada modo de propagação têm-se as constantes de propagação e impedâncias características representadas pelas Equações (6.17) e (6.18), respectivamente<sup>69</sup>.

$$\gamma_{mk} = \sqrt{Z_{mk} \cdot Y_{mk}} \tag{6.17}$$

$$Z_{mk} = \sqrt{\frac{Z_{mk}}{Y_{mk}}} \tag{6.18}$$

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> Estas matrizes são denominadas "matrizes de transformação". Na literatura são encontradas diferentes matrizes de transformação. Nesta dissertação são utilizadas duas delas, amplamente divulgadas, a de *Fortescue* e a de *Edith Clarke*.

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> "k" assume os valores 0, 1 e 2, referentes, por exemplo, aos componentes de sequências zero, positiva e negativa, no caso de componentes simétricas (transformação de *Fortescue*).

## **Referências Bibliográficas**

- [1] M. Schroeder, Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo, Belo Horizonte: Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 2001.
- [2] A. S. Júnio, Modelagem de Linhas de Transmissão Para Avaliação de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas, Belo Horizonte: Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 2001.
- [3] L. Cherchiglia, A. Carvalho, J. Diniz e V. Souza, "Lightning Program Carried out by Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG," *International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'98)*, 12 a 16 Abril 1998.
- [4] S. V. Filho, Aterramentos Elétricos, Artliber, 2002.
- [5] M. Schroeder, S. Visacro e P. Drummond, "Avaliação da Propagação de Surtos em Linhas de Transmissão: Efeito do Solo," *Symposium sobre Linhas de Transmissão,* Outubro 1995.
- [6] R. S. Alipio, Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos, Belo Horizonte: Tese de Doutorado
   - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 2013.
- [7] S. V. Filho, Descargas Atmosféricas Uma Abordagem de Engenharia, São Paulo: Artliber, 2005.
- [8] C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, IEEE Press, 2008.
- [9] M. G. d. Santos, ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE E DUTOS METÁLICOS AÉREOS, São João del-rei: Dissertação de Mestrado - PPGEL - Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica - UFSJ/CEFET, 2011.
- [10] S. M. M. Lúcio, PARÂMETROS LONGITUDINAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE DOS EFEITOS DO SOLO E DA FREQUÊNCIA PARA APLICAÇÃO EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS, São João del-Rei, 2012.
- [11] H. R. Vieira, ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE E DUTOS METÁLICOS AÉREOS, São João del-rei: Dissertação de Mestrado - PPGEL - Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica - UFSJ/CEFET, 2013.
- [12] J. R. CARSON, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell System Technical Journal*, vol. 05, pp. 539-554, 1926..

- [13] M. NAKAGAWA, "Admittance Correction Effects of a Single Overhead Line," IEEE Power Apparatus and Systems, Vols. %1 de %2100, no. 3, pp. 1154-1161, 1981.
- [14] M. NAKAGAWA, "Further Studies on Wave Propagation Along Overhead Transmission Lines: Effects of Admittance Correction," *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vols. %1 de %2PAS-100, no. 7, pp. 3626-3633, 1981.
- [15] A. DERI, G. TEVA, A. SEMLYEN e A. CASTANHEIRA, "The Complex Ground Return Plane A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return," *IEEE Power Apparatus* and Systems, pp. 3686 - 3693, 1981.
- [16] T. NODA, "A Double Logarithmic Approximation of Carson's Ground-Return Impedance," IEEE Transaction on Power Delivery, Vols. %1 de %221, no. 1, pp. 472-479, 2006.
- [17] W. H. Wise, "Effect of Ground Permeability on Ground Return Circuits," Bell System Technical Journal, vol. 10, pp. 472 - 484, 1931.
- [18] E. C. JORDAN e K. G. BALMAIN, Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Prentice-Hall, 1968.
- [19] J. H. Scott, "Electrical and Magnetic Proprieties of Rock and Soil," *United States Departament of the Interior Geological Survey*, 1966.
- [20] F. M. TESCHE, "Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables," *IEEE Trans. Electromagn. Compatibility*, vol. 34, Maio 1992.
- [21] H. S. SCOTT, "Dieletric Constant and Electrical Conductivity Measurements of Moist Rocks: A New Laboratory Method," J. Geophys. Res., Vols. %1 de %272, no. 20, pp. 5101-5115, 1967.
- [22] C. L. LONGMIRE e K. S. SMITH, "Universal Impedance for Soil," *Defense Nuclear Agency*, 1975.
- [23] S. VISACRO e C. M. PORTELA, "Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems.," *Proceedings of Sym, High Voltage Engineering, Braunschweing, Alemanha*, 1987.
- [24] C. M. PORTELA, "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior," Proceedings of the IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Society, pp. 1004-1009, 1999.
- [25] R. ALÍPIO e S. Visacro, "Frequency Dependence of Soil Parameter: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, pp. 132-139, 2013.

- [26] A. V. E. Flores, ANÁLISE DA CORRETA MODELAGEM DA TRANSPOSIÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO NO DOMÍNIO DA FREQÜÊNCIA, Campinas: Dissertação de Mestrado, 2006.
- [27] S. KURUKAWA, R. S. DALTIN, A. J. PRADO e L. F. BOVOLATO, "Decomposição Modal de Linhas de Transmissão a partir do Uso de Duas Matrizes de Transformação," *Revista Controle & Automação*, vol. 18, nº 3, 2007.
- [28] ATP Alternative Transients Program Rule Book, Leuven: K. U. Leuven EMTP Center, 1987.
- [29] I. 60060-1, High-Voltage test techniques Part 1: general definitions and test requirements, Ed. 3, 2010.
- [30] S. Kurokawa, E. C. M. Costa, A. J. G. Pinto e J. P. Filho., "Análise das Características Elétricas Associadas aos Trechos de Altura Elevada da Interligação Tucuruí-Macapá-Manaus.".SBA - Sociedade Brasileira de Automática.
- [31] L. C. ZANETTA, Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, São Paulo: USP, 2003.
- [32] P. A. Mariotto, Ondas e Linhas, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- [33] H. B. Dwight, "Skin Effect in Tubular and Flat Conductors," AIEE, vol. 19, pp. 1379 1403, 1918.
- [34] M. N. O. Sadiku, Elementos de Eletromagnetismo, 3ª ed., Bookman, 2004.
- [35] R. E. PLONSEY e R. E. COLLIN, Principles and Applications of Electromagnetic Fields., McGraw-Hill, 1976.
- [36] C. M. PORTELA, Sobretensões e Coordenação de Isolamento. Volumes I, II e III, COPPE/UFRJ, 1983.
- [37] M. C. TAVARES, Modelo de linha de transmissão polifásico utilizando quase-modos, Tese de Doutorado, Campinas: UNICAMP, 1998.
- [38] H. Umarji, Cálculo de Parâmetros de Linhas Aéreas para Redes de Distribuição, Lisboa: Dissertação de Mestrado.
- [39] R. C. MONZANI, ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO REAIS – SISTEMAS TRIFÁSICOS COM A PRESENÇA DE CABOS PÁRA-RAIOS, Ilha Solteira: Dissertação de Mestrado, 2013.
- [40] EMTP, Eletromagnetic Transients Program: Theory Book, Tsu-Huei Liu; W. Scott Meyer, 1986.