



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Características dos Parâmetros do Condutor Equivalente a um Feixe de Subcondutores de Linhas de Transmissão: Análise Inicial”

CAROLINA GOULART DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Kurokawa

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica – Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência.

Ilha Solteira – SP
novembro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira

C331c Carvalho, Carolina Goulart de.
Características dos parâmetros do condutor equivalente a um feixe de subcondutores de linhas de transmissão: análise inicial / Carolina Goulart de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2007
149 f. : il., fots. (Algumas color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência, 2007

Orientador: Sérgio Kurokawa
Bibliografia: p. 147-149

1. Energia elétrica – Transmissão. 2. Condutores elétricos. 3. Sistemas de parâmetros distribuídos. 4. Análise modal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: *CARACTERÍSTICAS DOS PARÂMETROS DO CONDUTOR EQUIVALENTE A UM FEIXE DE SUBCONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE INICIAL*

AUTORA: **CAROLINA GOULART DE CARVALHO**

ORIENTADOR: Prof. Dr. SÉRGIO KUROKAWA

DATA DA REALIZAÇÃO: 30 de novembro de 2007

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Dr. Sérgio Kurokawa - Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dra. Mariangela Carvalho Bovolato

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. Humberto Mendes Mazzini

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de São João Del Rei

Dedico esse trabalho aos meus pais, Francisco Carlos Goulart de Carvalho e Rosângela Q. B. G. de Carvalho, as minhas irmãs Cristiane Queiroz de Carvalho e Gabriela Queiroz de Carvalho e à Leandro Santana. Sou-lhes grato por toda paciência, carinho e apoio.

Agradecimentos

Todo ser humano possui sonhos! Sonhos grandes, sonhos pequenos, sonhos...

Sonhos nascem a cada dia, a cada hora, a cada minuto. Sem percebermos, um sonho nasce dentro do nosso coração. Sonhos nos motivam a viver, a continuarmos caminhando. Vivemos, na verdade, na busca da realização dos nossos sonhos. A vontade de se tornar algo melhor a cada dia é o que faz do ser humano uma máquina de sonhar. Projetar idéias e desejos e lutar para transformar o que um dia foi um simples pensamento em uma situação real. Nunca desistir de algo que se deseja muito e que se almeja fazer parte da vida. O ser humano sonha! Mas se apenas sonhássemos nunca saberíamos do que somos capazes, é preciso conquistar os sonhos.

Durante toda minha vida muitas pessoas compartilharam comigo muitos dos meus sonhos. A todas pessoas que estiveram comigo e as que permanecem ao meu lado, o meu agradecimento do fundo do coração.

Especialmente que agradecer e dedicar o resultado do trabalho:

- *Aos meus pais Francisco e Rosângela, às minhas irmãs Gabriela e Cristiane, ao meu companheiro Leandro, por todo amor que dedicam a mim e por todo apoio e paciência que tiveram durante esta trajetória.*
- *A toda minha família, pelo incentivo, amor, carinho e tolerância, meus avós maternos Aurení e Valfrides, minha avó paterna Maria, aos meus tios Edmilson, Vando, Eduardo, José Roberto, Roger, Silvia e Roseli, a todos os primos, minha afilhada e meus cunhados. As minhas tias Lea e Rosilande, confidentes e amigas.*
- *Em especial, quero agradecer meu padrinho e tio Valter, tia Selma, Jéssica, Gabriel, tia Valda, tio Silva, Leandro e Valquiria, obrigada pela acolhida, pelo apoio e por toda paciência.*
- *Aos meus padrinhos Cláudio e Neide, e a minha madrinha Elza.*
- *A minha companheira e amiga de jornada Denise Charantola. Aos meus amigos Marleide Alves, Lucidalva Bárbara, Gislaine, Susilene Mattos, Paula Emiko, Rangel Guelfi, Marielen, Elisangela Menegasso, Sônia, Luzinete Maria e todos aqueles que não foram citados mais estão guardados em meu coração.*
- *Aos mestres e mentores que contribuíram com minha formação em especial ao meu orientador. O professor Sérgio Kurokawa foi impecável na seriedade e no desempenho das tarefas acadêmicas e seu apoio foi um estímulo e sinal de amizade. Pela compreensão e pelo prazer de trabalharmos juntos.*
- *Aos professores Mariângela Carvalho Bovolato, Humberto Mendes Mazzini, Luiz Fernando Bovolato pela disposição para participar da banca, bem como por seus questionamentos e contribuições na etapa da defesa.*
- *A todos os docentes, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Elétrica em aos colegas de trabalho Fábio e Rodrigo.*

“TUDO POSSO NAQUELE QUE ME FORTALECE.”
(Filipenses 4:13)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para definir um condutor equivalente para um condutor múltiplo. O método baseia-se no fato de que os parâmetros dos subcondutores estão distribuídos ao longo do comprimento dos mesmos e, deste modo, cada subcondutor deve ser tratado como uma linha de transmissão. Inicialmente são obtidas as relações entre as correntes e tensões nos dois terminais de cada subcondutor. Em seguida, considera-se que a corrente no condutor múltiplo deve ser igual à corrente no condutor equivalente. Uma vez que as tensões e correntes nos terminais do condutor equivalente são conhecidas, é possível obter a impedância longitudinal e a admitância transversal deste condutor. O método desenvolvido foi aplicado em um condutor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores. Os resultados obtidos com este método são comparados com o método clássico de obtenção do condutor equivalente, que se baseia no raio médio geométrico dos subcondutores do condutor múltiplo. Para isto foi mostrado que quando o raio médio geométrico é usado para definir um condutor equivalente de um condutor múltiplo, os parâmetros longitudinais e transversais do condutor equivalente são afetados.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, condutores múltiplos, parâmetros distribuídos, domínio modal, análise no domínio da frequência.

ABSTRACT

The objective of this work is to improve a methodology to define an equivalent conductor for a bundled conductor. The proposed methodology takes into account that the longitudinal and transversal parameters are distributed along the subconductors. This way, each subconductor of a bundled conductor needs to be considered as being a transmission line. Initially the relationships among currents and voltages at sending and receiving end of each subconductor are obtained. Then, it is considered that total currents and voltages at sending and receiving end of the bundled conductor is equal to currents and voltages at sending and receiving end of the equivalent conductor. Taking into account that parameters of the equivalent conductor are distributed parameters, it is possible to obtain them from currents and voltages at sending and receiving end. The proposed methodology was applied in a hypothetical bundled conductor constituted by two subconductors. The results were compared with results obtained by using geometric mean radius. It was shown that when geometric mean radius is used to define an equivalent conductor of a bundled conductor, the longitudinal and transversal parameters of the equivalent conductor are severely affected.

Keywords: Lines of Transmission, multiple conductors, distributed parameters, modal domain, frequency domain.

Listas de Figuras

Figura 1.1 – Estrutura básica de um sistema interligado	18
Figura 2.1 - Sistema de Transmissão Interligado Nacional	27
Figura 2.2 – Estrutura para circuito simples com 138kV e circuito duplo com 230kV	28
Figura 2.3 – Estruturas de circuito duplo com 345kV e simples com 440kV	29
Figura 2.4 – Estruturas de circuito simples e circuito duplo triangular com 440kV	30
Figura 2.5 – Estrutura de circuito duplo vertical e circuito simples com 440kV	31
Figura 3.1 – Cabo de alumínio com alma de aço	36
Figura 3.2 – Cabo de alumínio liga 1120	36
Figura 3.3 – Condutor PENGUIN	40
Figura 3.4 - Condutores múltiplos	42
Figura 4.1 – Condutores i e k , sobre um solo ideal, e suas respectivas imagens i' e k'	46
Figura 4.2 – Condutores i e k , sobre um solo não ideal, e suas respectivas imagens i' e k'	53
Figura 4.3 – Condutores i e k , sobre um solo não ideal, e suas respectivas imagens i' e k'	58
Figura 4.4 - Sistema de n condutores	60
Figura 4.5 - Capacitâncias entre condutores e dos condutores ao solo	62
Figura 5.1 – Condutor múltiplo constituído de 4 subcondutores	67
Figura 5.2 – Condutor múltiplo constituído por n subcondutores	68
Figura 5.3 - Sistema de dois condutores múltiplos	69
Figura 5.4 – Condutores i e k de uma linha genérica	70
Figura 5.5 - Condutores múltiplos i e k e suas respectivas imagens i' e k'	76
Figura 5.6 - Sistema de n condutores múltiplos	75
Figura 5.7 - Condutor múltiplo disposto sobre um solo não ideal	77
Figura 5.8 - Linha de transmissão trifásica de circuito simples	79
Figura 5.9 - Resistências próprias da fase 1 devido ao efeito solo	81
Figura 5.10 – Resistências mútuas entre as fases 1 e 2 devido ao efeito solo	81
Figura 5.11 - Resistências próprias da fase 2 devido ao efeito solo	81
Figura 5.12 – Resistências mútuas entre as fases 2 e 1 devido ao efeito solo	82
Figura 5.13 - Indutâncias próprias da fase 1 devido ao efeito solo	83
Figura 5.14 - Indutâncias mútuas entre as fases 1 e 2 devido ao efeito solo	84
Figura 5.15 - Indutâncias próprias da fase 2 devido ao efeito solo	85

Figura 5.16 - Indutâncias mútuas entre as fases 2 e 1 devido ao efeito solo	86
Figura 6.1 - Conductor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores	89
Figura 6.2 - Associação paralela de dois condutores vista de outro ângulo	90
Figura 6.3 - Tensão aplicada no terminal A do sistema	90
Figura 6.4 – Correntes e tensões nos terminais A e B do sistema	91
Figura 6.5 – Conductor equivalente ao sistema de dois subcondutores	92
Figura 6.6 – Processo de obtenção dos parâmetros do conductor equivalente	94
Figura 6.7 – Conductor múltiplo constituído por dois subcondutores	95
Figura 6.8 – Correntes e tensões nos terminais A e B do sistema	96
Figura 6.9 - Modos de propagação do sistema de dois subcondutores	100
Figura 6.10 – Componente real da função γ	110
Figura 6.11 – Componente imaginária da função γ	111
Figura 6.12 – Componente real da função γ obtida a partir da equação (6.72)	112
Figura 6.13 – Componente imaginária da função γ obtida a partir da equação (6.72)	112
Figura 6.14 – Componente imaginária de γ	114
Figura 6.15 – Funções F e F'	115
Figura 6.16 – Função F'	116
Figura 7.1 - Associação paralela de dois subcondutores	119
Figura 7.2 - Associação paralela de dois condutores vista de outro ângulo	119
Figura 7.3 - Resistências próprias dos subcondutores 1 e 2	120
Figura 7.4 - Indutâncias próprias dos subcondutores 1 e 2	121
Figura 7.5 - Resistência mútua entre os subcondutores 1 e 2	122
Figura 7.6 - Indutância mútua entre os subcondutores 1 e 2	122
Figura 7.7 - Conductor equivalente aos condutores 1 e 2	124
Figura 7.8 - Resistência do conductor equivalente obtido a partir do RMG dos subcondutores	124
Figura 7.9 - Indutância do conductor equivalente	125
Figura 7.10 - Resistência do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	127
Figura 7.11 - Indutância do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	127
Figura 7.12 - Condutância do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	128
Figura 7.13 - Capacitância do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	129
Figura 7.14 - Resistência do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	130
Figura 7.15 - Indutância do conductor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	130

Figura 7.16 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	131
Figura 7.17 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	132
Figura 7.18 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	134
Figura 7.19 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	134
Figura 7.20 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	135
Figura 7.21 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	135
Figura 7.22 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	136
Figura 7.23 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	137
Figura 7.24 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	138
Fig. 7.25 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)	138
Figura 7.26 - Resistência do condutor equivalente obtida com o método proposto:	
Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)	139
Figura 7.27 - Indutância do condutor equivalente obtida com o método proposto:	
Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)	140
Figura 7.28 - Condutância do condutor equivalente obtida com o método proposto:	
Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)	140
Figura 7.29 - Capacitância do condutor equivalente obtida com o método proposto:	
Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)	141

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA ELÉTRICO	16
1.2	SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	18
1.3	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
1.4	TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
1.4.1	<i>Linhas de transmissão</i>	20
1.4.2	<i>Linhas de subtransmissão</i>	21
1.4.3	<i>Linhas de distribuição primária</i>	21
1.4.4	<i>Linhas de distribuição secundária</i>	21
1.5	CONCLUSÕES	22
2	LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	23
2.1	INTRODUÇÃO	23
2.2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	24
2.3	SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO	26
2.4	DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	27
2.5	CONCLUSÕES	31

3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CONDUTORES QUE CONSTITUEM AS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO.....	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES	34
3.2.1	<i>Condutores de cobre</i>	37
3.2.2	<i>Condutores de alumínio e alumínio e aço</i>	38
3.2.3	<i>Condutores em ligas de alumínio</i>	40
3.2.4	<i>Condutores alumoweld</i>	41
3.2.5	<i>Condutores expandidos</i>	41
3.2.6	<i>Condutores múltiplos</i>	41
3.3	CONCLUSÕES	43
4	PARÂMETROS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	44
4.1	INTRODUÇÃO	44
4.2	IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO	45
4.2.1	<i>Impedância externa</i>	46
4.2.2	<i>Impedância interna da linha</i>	50
4.2.3	<i>Impedância devido ao retorno de corrente através do solo (efeito solo)</i>	52
4.3	ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO	57
4.3.1	<i>Capacitância da linha</i>	57
4.3.2	<i>Admitância da linha</i>	64
4.5	CONCLUSÕES	64

5	PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO CONSTITUÍDA DE CONDUTORES MÚLTIPLOS.....	66
5.1	INTRODUÇÃO	66
5.2	LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSTITUÍDAS DE CONDUTORES MÚLTIPLOS	67
5.2.1	<i>Condutor equivalente a um condutor múltiplo</i>	67
5.2.2	<i>Distância média geométrica entre dois condutores múltiplos</i>	69
5.3	IMPEDÂNCIA EXTERNA	70
5.4	IMPEDÂNCIA INTERNA	72
5.5	IMPEDÂNCIA DEVIDO AO EFEITO SOLO	73
5.6	ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS	75
5.7	CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO USO DO RMG E DMG	77
5.8	APLICAÇÃO EM UMA LINHA TRIFÁSICA DE 440 KV	79
5.9	CONCLUSÕES	86
6	ASSOCIAÇÃO PARALELA DOS SUBCONDUTORES DE UM CONDUTOR MÚLTIPLO.....	88
6.1	INTRODUÇÃO	88
6.2	REPRESENTAÇÃO DE UM CONDUTOR MÚLTIPLO POR MEIO DE UM ÚNICO CONDUTOR	89
6.2.1	<i>Descrição geral</i>	89
6.2.2	<i>Obtenção dos parâmetros do condutor equivalente em função dos parâmetros dos subcondutores</i>	95
6.3	ANÁLISE DA FUNÇÃO DE PROPAGAÇÃO γ	110

6.3.1	<i>Componente imaginária da função γ</i>	113
6.4	CONCLUSÕES	117
7	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	118
7.1	INTRODUÇÃO	118
7.2	DESCRIÇÃO DOS DOIS SUBCONDUTORES CONECTADOS EM PARALELO	119
7.3	DADOS DO CONDUTOR EQUIVALENTE OBTIDO A PARTIR DO CONCEITO DE RMG	123
7.4	ASSOCIAÇÃO PARALELA DOS DOIS SUBCONDUTORES	125
7.4.1	<i>Análise de um segmento de 100 m</i>	126
7.4.2	<i>Análise de um segmento de 500 m</i>	129
7.4.3	<i>Análise de um segmento de 1 km</i>	133
7.4.4	<i>Análise de um segmento de 10 km</i>	136
7.4.5	<i>Influência do comprimento do condutor múltiplo sobre os parâmetros do condutor equivalente</i>	139
7.5	CONCLUSÕES	141
8	CONCLUSÕES.....	143
	REFERÊNCIAS.....	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA ELÉTRICO

O progresso industrial de uma nação pode ser medido pelo grau de aproveitamento de suas fontes de energia. A descoberta dessas fontes na natureza, o transporte da energia em suas várias formas de um lugar a outro e a conversão dessa energia para formas mais úteis, são partes essenciais de uma economia industrial. Um sistema de potência é uma das ferramentas utilizadas para a conversão e transporte de energia.

A única maneira de transportar a energia sob a forma de eletricidade é usando as linhas de transmissão. O gás é transportado em dutos; ferrovias, navios e oleodutos levam o petróleo a grandes distâncias; o carvão é transportado por via férrea e marítima. Os oleodutos multiplicam-se rapidamente e com isso são os maiores competidores das linhas de transmissão, visto que proporcionam o transporte de energia a baixo custo.

A energia elétrica de origem hidráulica é barata somente no caso em que o custo do seu transporte seja baixo. A economia no transporte de energia em uma forma ou em outra depende de ser sua demanda contínua ou intermitente, da distância considerada e do custo e da possibilidade de armazenamento. O fator determinante é o custo final, incluído o preço do transporte da energia na forma desejada.

Um sistema elétrico de potência é particularmente vantajoso quando a fonte primária é hidráulica. Essa energia deve ser transformada no próprio local em que se encontra e um

sistema elétrico de potência propicia a sua utilização em pontos diferentes. A energia hidráulica é convertida em elétrica na própria origem, sendo então transportada por linhas de transmissão até o ponto em que é convertida na forma desejada, luz, calor, energia mecânica ou química. A linha de transmissão não pode armazenar energia e toda a energia fornecida na estação geradora é convertida simultaneamente à carga, exceto as perdas do sistema.

Um sistema elétrico consiste em três componentes principais: as estações geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição; as linhas de transmissão ligam as estações geradoras aos sistemas de distribuição; um sistema de distribuição liga todas as cargas individuais de uma determinada área às linhas de transmissão. Um sistema de potência bem projetado compreende um grande número de estações geradoras interligadas de modo que a energia total produzida possa ser utilizada em toda a região coberta pelo sistema. A localização das centrais hidroelétricas é fixada pela presença de quedas d'água, porém, a localização das centrais termoelétricas, utilizando combustível fóssil ou nuclear é mais flexível. As centrais termoelétricas são, em geral, distribuídas pelo sistema de tal maneira que haja pelo menos uma próxima de cada grande centro de carga.

Os sistemas de potências devem prever a demanda futura de energia de tal forma que, centrais geradoras adequadamente situadas e sistemas de transmissão bem coordenados, flexíveis e eficazes, possam atender a uma determinada região por meios de sistemas de distribuição prontos a fornecer a potência requerida pela carga (STEVENSON, 1978).

1.2 SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Os modernos sistemas de energia elétrica possuem uma estrutura baseada na organização vertical e numa organização horizontal, conforme mostra a Figura 1.1.

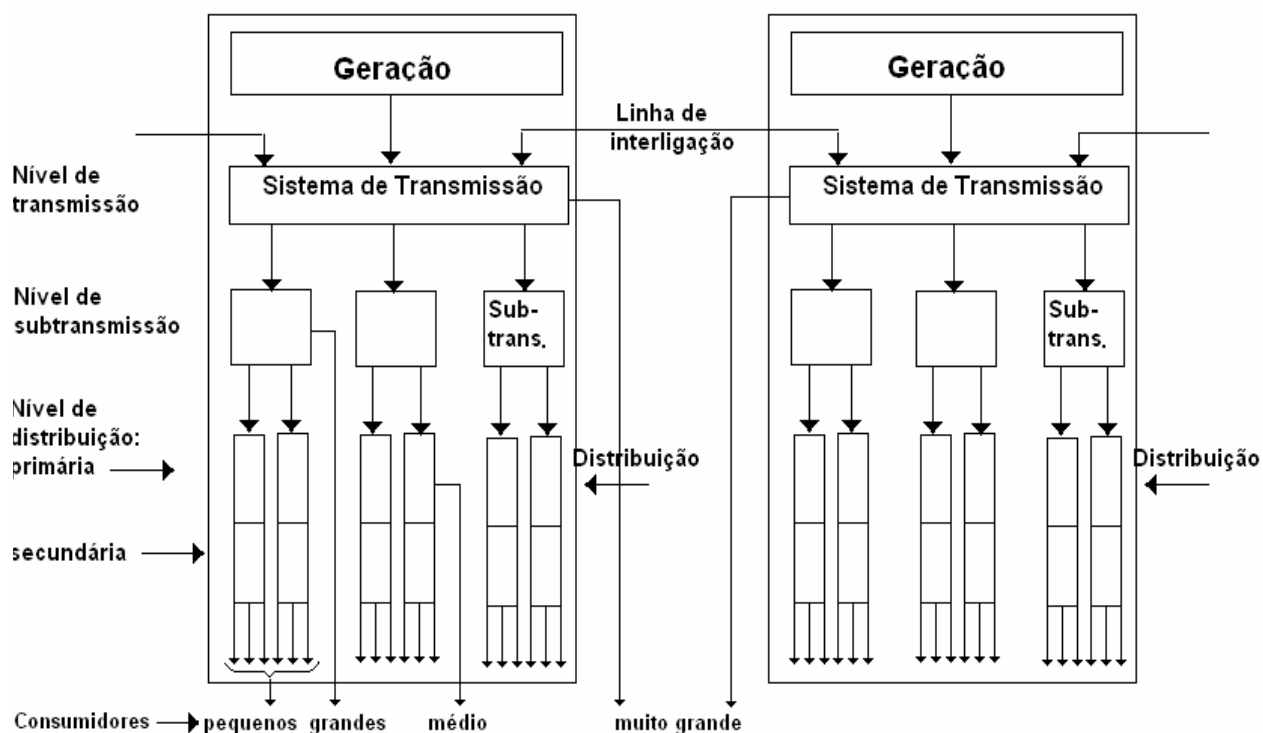


Figura 1.1 – Estrutura básica de um sistema interligado

Na organização vertical de um sistema elétrico distinguem-se, em geral, cinco níveis que recebem a seguinte denominação:

- Sistema de distribuição de energia;
- Sistema de subtransmissão de energia;

- Sistema de transmissão de energia;
- Linhas de interligação;
- Sistema de geração

Horizontalmente, cada camada ou nível se divide em um número de subsistemas que, a princípio, são isolados eletricamente e geograficamente dos subsistemas vizinhos de mesmo nível, sendo ligados entre si apenas através dos sistemas de nível mais elevado.

Essas divisões principais são geralmente identificáveis, apesar de que em alguns casos, as linhas divisórias não resultam muito claras, por peculiaridades locais dos sistemas individuais.

A integração dos sistemas regionais e nacionais, através da interligação dos sistemas isolados, é considerada indispensável devido a diversos fatores, que são:

- a) Possibilidade de intercâmbio de energia entre os diversos sistemas de acordo com as disponibilidades e necessidades diferenciadas;
- b) Possibilidade de se construírem centrais maiores e mais eficientes que seria economicamente inviável em qualquer um dos sistemas isolados;
- c) Aumento da capacidade de reserva global das instalações de gerações para casos de acidentes em alguma central dos sistemas que constituem o sistema interligado;
- d) Aumento da confiabilidade de abastecimento em situações anormais ou de emergência;
- e) Possibilidade de um despacho único e mais eficiente, com alto grau de automatização e otimização;

- f) Possibilidade de manutenção de um órgão de planejamento de alta categoria, em conjunto, com rateio de despesas e, conseqüentemente, menor incidência sobre os custos de cada sistema que constitui o sistema interligado (FUCHS,1979).

1.3 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A produção de energia elétrica no Brasil é realizada por um sistema hidrotérmico de grande porte, com ampla predominância hidrelétrica e múltiplos proprietários, sendo que 96,6% dessa produção integram o Sistema Interligado Nacional (SIN), formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Os 3,4% restantes encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados, principalmente, na região amazônica (CTEEP, 2006).

1.4 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O transporte de energia elétrica é realizado em todos os níveis, diferenciando-se pelas tensões e quantidades de energia que é transportada por cada uma das linhas de transmissão aéreas e/ou cabos (que podem ser subterrâneos ou submarinos).

1.4.1 Linhas de transmissão

Denominam-se linhas de transmissão as linhas que operam com as tensões mais elevadas do sistema e que transportam a energia elétrica entre os centros geradores de energia

e os centros consumidores. Em geral, as linhas de transmissão terminam nas subestações abaixadoras regionais, onde a tensão é reduzida para os níveis de subtransmissão.

1.4.2 Linhas de subtransmissão

São as linhas que operam com níveis de tensão inferiores àqueles dos sistemas de transmissão. Estas linhas têm início nos barramentos das subestações regionais e terminam nas subestações abaixadoras locais. Em um sistema pode haver dois ou mais níveis de tensão de subtransmissão.

1.4.3 Linhas de distribuição primária

São linhas em que a tensão possui um nível suficientemente baixo de modo que estas linhas possam ocupar vias públicas. No entanto, mesmo sendo relativamente baixo, o nível de tensão deve ser elevado o suficiente para assegurar boa regulação.

1.4.4 Linhas de distribuição secundária

São linhas que operam com as tensões mais baixas do sistema e em geral seu comprimento não excede 300 m. Sua tensão é apropriada para uso direto em máquinas elétricas, aparelhos e lâmpadas (FUCHS, 1979).

1.5 CONCLUSÕES

Este capítulo procurou mostrar algo sobre o desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência, bem como algumas descrições das partes que constituem estes sistemas elétricos.

Verificou-se que o sistema de energia elétrica é baseado na organização em níveis verticais e horizontais e o transporte de energia é realizado em todos os níveis. As linhas de transmissão são as responsáveis pelo transporte de energia elétrica e são consideradas uma das componentes principais do sistema, assim como as estações geradoras e os sistemas de distribuição. Por fim, foram analisados outros tipos de linha que realizam o transporte de energia.

2 LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

A transmissão de energia elétrica é talvez a contribuição de maior importância que a engenharia ofereceu à civilização moderna. Entre suas visíveis manifestações, as mais expressivas são as linhas de transmissão de alta tensão sobre elevadas torres de aço que cruzam o país em todas as direções. Transportando milhares de megawatts de energia, estas linhas interligam as estações geradoras distantes dos centros urbanos de carga ou unem, em sistemas cooperativos, as instalações de produção de energia de grandes áreas geográficas (FUCHS, 1979); (CTEEP, 2006); (CHIPMAN, 1976).

O estudo desenvolvido neste capítulo consiste em descrever: a evolução dos sistemas de potência ao longo da história da energia elétrica; a evolução das linhas de transmissão brasileira até chegar aos sistemas utilizados hoje; as características das principais estruturas de sustentação das linhas de transmissão.

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

O desenvolvimento do sistema de transmissão de energia elétrica teve início no final do século XIX quando foi possível, graças aos trabalhos de cientistas como Siemens, Gramme e Pacinotti, a obtenção de energia elétrica em quantidades razoáveis a partir da energia mecânica. Somente em 1879-1880, porém, com a invenção da lâmpada incandescente por Thomas A. Edison, é que a energia elétrica teve seu grande impulso. A partir de 1882, quando foi inaugurada a central elétrica de Pearl, pelo mesmo Edison, fornecendo iluminação pública e energia para motores em parte da cidade de Nova York, começaram a surgir os primeiros sistemas comerciais de eletricidade, em diversos países do mundo. Com eles também tiveram início problemas com o transporte e a distribuição de energia elétrica, então gerada e consumida em tensão contínua. A expansão dos sistemas incipientes e o uso da energia hidráulica eram limitados devido à queda de tensão e ao efeito Joule. Para evitar a utilização de condutores de seções maiores, as centrais elétricas eram construídas relativamente próximas umas das outras. O grande potencial hidroelétrico ficava fora de alcance, pois a energia era consumida na tensão em que era produzida, não havendo solução imediata à vista para os problemas de corrente contínua.

Por volta de 1884/1885 foi inventado o transformador, que permitia elevar e abaixar a tensão alternada com alto grau de rendimento. Destacam-se neste período, duas realizações que podem ser consideradas notáveis para a época: Em 1886 foi construída na Itália uma linha monofásica com 29,5 km, conduzindo 2700 HP para Roma e em 1888 foi construída uma linha trifásica de 11 kV e 180 km na Alemanha.

A invenção, entre 1885 e 1888, dos motores a indução, devida a Ferraris e Tesla, deu novo impulso aos sistemas de tensão alternada em detrimento dos sistemas de tensão

contínua, que foram pouco a pouco sendo substituídos. Mais e mais energia elétrica passou a ser utilizada, crescendo continuamente as potências das centrais elétricas; os novos locais que favoreciam aproveitamentos hidroelétricos tornavam-se cada vez mais remotos, exigindo tensões sempre mais elevadas e linhas mais longas, avolumando-se os problemas. Assim é que, por volta de 1903, a tensão de 60 kV era atingida; em 1910, 150 kV. Por volta de 1922 entrou em operação a primeira linha de 230 kV, em 1936, uma linha de 287 kV. Esta somente foi suplantada em 1950, com a entrada em serviço de uma linha de cerca de 1000 km de comprimento e tensão de 400 kV na Suécia. Por volta de 1955 foram construídas as primeiras linhas em 345 kV nos Estados Unidos, onde se iniciaram estudos e experiências, visando à implantação de linhas de 500 kV. Entre 1964 e 1967, no Canadá, foram projetadas e construídas as primeiras linhas de 735 kV.

A primeira linha de transmissão de que se tem registro no Brasil foi construída por volta de 1883, na cidade de Diamantina, Minas Gerais. Esta linha transportava energia gerada em uma usina hidroelétrica, constituída de duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, a uma distância de 2 km, aproximadamente. Consta que era a linha mais longa do mundo, na época.

Em 1901, com a entrada em serviço da central Hidroelétrica de Santana do Parnaíba, a então The San Paulo Tramway Light and Power Co. Ltd. construiu as primeiras linhas de seus sistemas de 40 kV. Em 1914, com a entrada em serviço da Usina Hidroelétrica de Utupararanga, a mesma empresa introduziu o padrão 88 kV. Esse padrão de tensão foi, em seguida, adotado pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, Estrada de Ferro Sorocabana e, através desta, pela USELPA, que futuramente viria a integrar o sistema CESP. Entre 1945 e 1947 construiu-se a primeira linha de 230 kV no Brasil, com um comprimento aproximado de 330 km. Esta linha, destinada a interligar os sistemas Rio Light e São Paulo Light, operava inicialmente em 170 kV, passando, em 1950, a operar com 230 kV. Foi também a primeira

interligação de dois sistemas importantes realizados no Brasil. Vieram, a partir daí, em rápida sucessão, as linhas de 230 kV do sistema da Cia. Hidroelétrica de São Francisco, 161 e 345 kV da CEMIG e FURNAS, 460 kV da CESP, as linhas de 500 kV de FURNAS e 800 kV do sistema Itaipu. De acordo com dados disponíveis na página do Operador Nacional do Sistema Elétrico, no final de 2002 a rede de transmissão brasileira era formada por mais de 72.000 km de linhas de transmissão em tensões iguais ou superiores a 230 kV (FUCHS, 1979); (KUROKAWA et al., 2003).

2.3 SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO

O Sistema de Transmissão Interligado Nacional, nas tensões de 230 kV a 750 kV, é composto de cerca de 77.640 km de linhas de transmissão e capacidade de transformação acima de 176.000 MVA, instalados em cerca de 320 subestações (CTEEP, 2006) figura 2.1 mostra o Sistema de Transmissão Interligado Nacional.

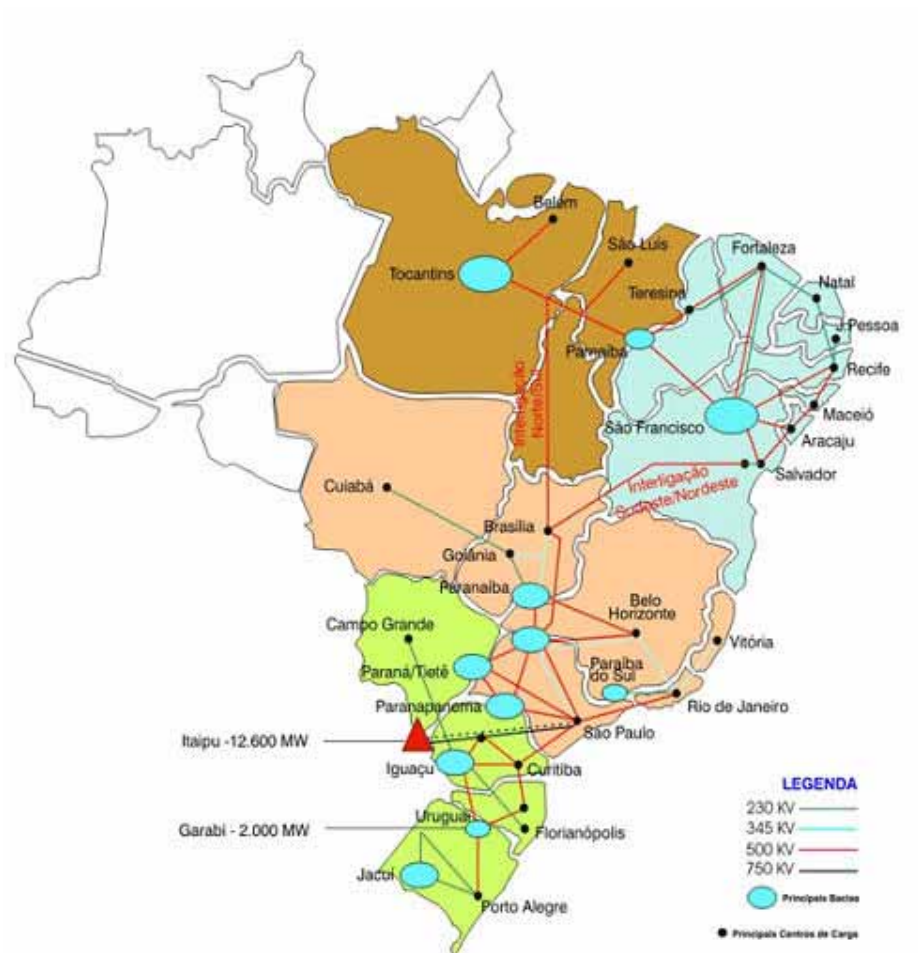


Figura 2.1 - Sistema de Transmissão Interligado Nacional

2.4 DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão aéreas são compostas por cabos metálicos, sustentados por torres através de cadeias de isoladores e ferragens e seguem pelas faixas de segurança. As linhas subterrâneas estão protegidas por valas ou túneis e são compostas por cabos de energia especialmente projetados e construídos para atuarem nesta condição.

As silhuetas típicas das torres de transmissão (metálicas) da companhia de Transmissão Paulista são apresentadas nas figuras 2.2 a 2.5 (CTEEP, 2006).

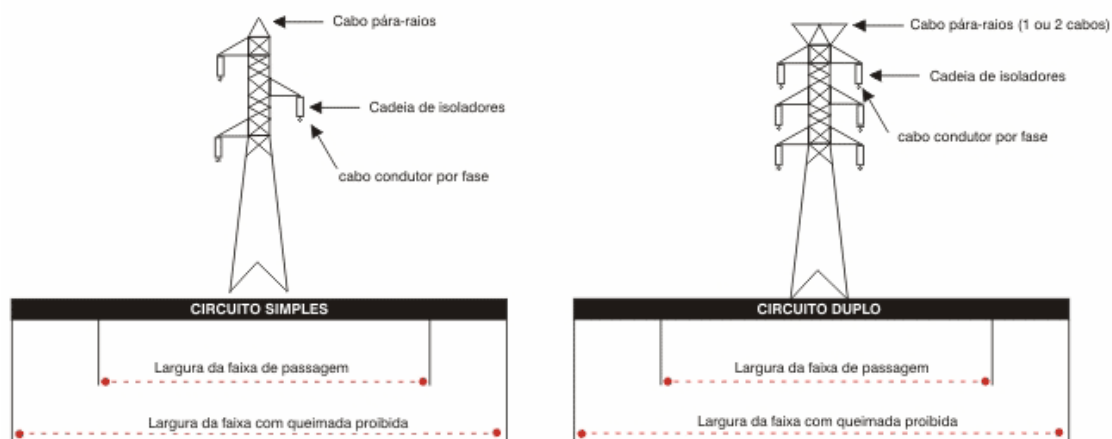


Figura 2.2 – Estrutura para circuito simples e duplo com 138kV e 230kV, respectivamente

A figura 2.2 apresenta a estrutura para circuito simples e circuito duplo, onde a largura da faixa de passagem é de 30 metros e a largura da faixa com queimada proibida é de 60 metros. Para linha de 88 kV a cadeia de isoladores é composta por 6 ou 7 discos, para linha de 138 kV a cadeia de isoladores é composta por 9 ou 10 discos. Para circuito duplo de linhas de 230 kV, a largura da faixa de passagem é de 50 metros, e a largura da faixa com queimada proibida é de 80 metros, tal estrutura possui uma cadeia de isoladores com 15 ou 16 discos, podendo ter dois cabos condutores por fase.

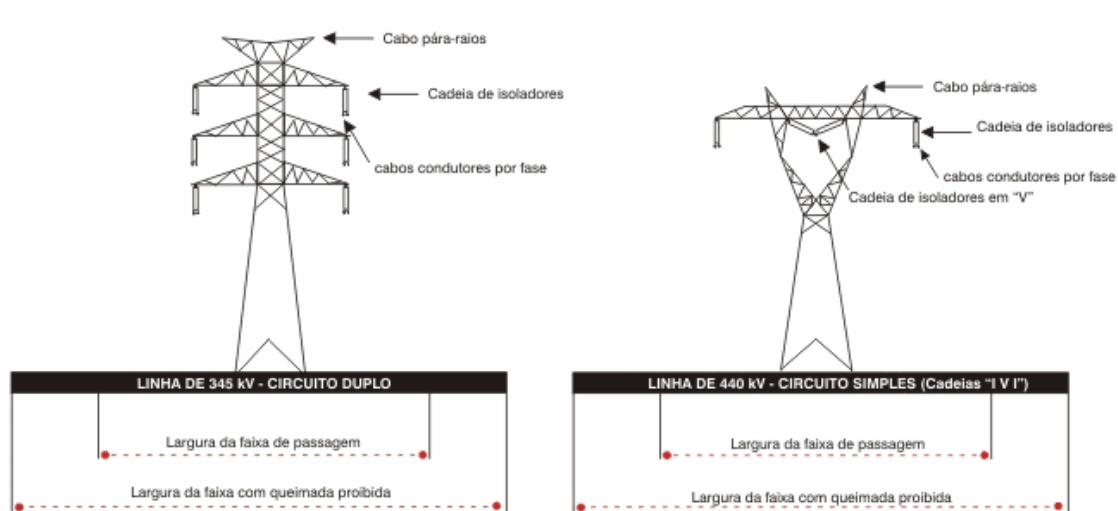


Figura 2.3 – Estruturas de circuito duplo e simples com 345kV e 440kV, respectivamente

A figura 2.3 mostra a estrutura para circuito duplo e circuito simples, para as linhas de 345kV e 440kV, respectivamente. Para os dois tipos de estruturas a largura da faixa de passagem é de 50 metros e a largura da faixa com queimada proibida é de 80 metros. A cadeia de isoladores para o circuito simples é de 24 a 30 discos, já para o circuito duplo a cadeia de isoladores é de 19 ou 20 discos e possui dois ou quatro cabos condutores por fase.

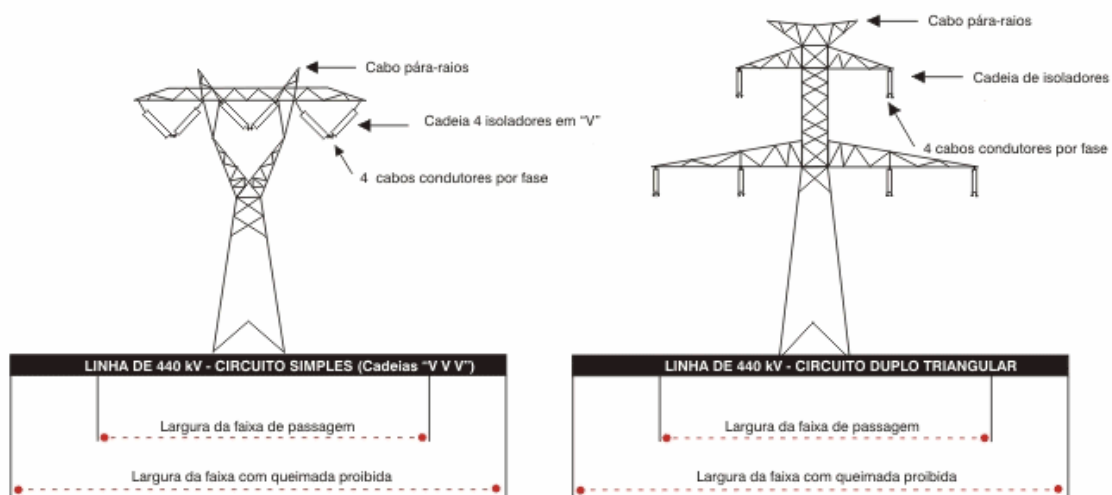


Figura 2.4 – Estruturas de circuito simples e circuito duplo triangular com 440kV

A linha de 440 kv de circuito simples da Figura 2.4 apresenta a largura da faixa de passagem de 40 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 70 metros, as cadeias de isoladores são dispostas em “V” e possuem 24 ou 26 discos em cada uma. Já a linha de 440 kV de circuito duplo, tem a largura da faixa de passagem de 60 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 90 metros, as cadeias de isoladores possuem 24 discos.

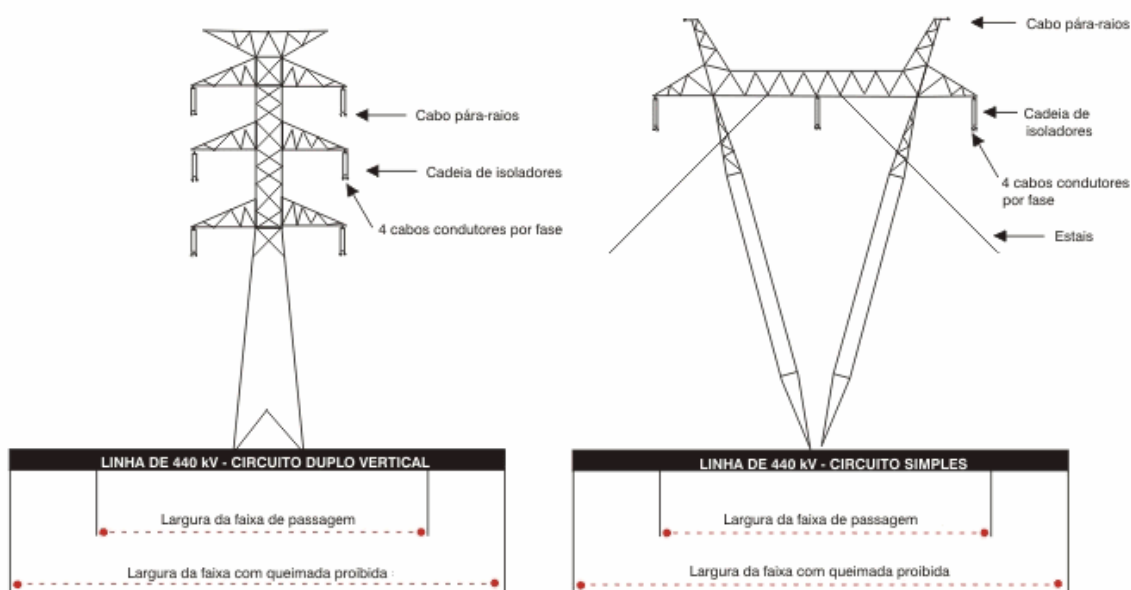


Figura 2.5 – Estrutura de circuito duplo vertical e circuito simples com 440kV

O circuito duplo vertical e o circuito simples da linha de 440kV, da Figura 2.5, apresentam a largura da faixa de passagem de 50 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 80 metros, as cadeias de isoladores possuem 24 discos e cada fase tem 4 cabos condutores.

2.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi feito um estudo referente aos sistemas de transmissão.

Inicialmente este estudo procurou desenvolver um histórico da evolução da energia elétrica apontando os principais fatos ocorridos que contribuíram para o desenvolvimento da transmissão de energia elétrica no mundo. No Brasil, a história da energia elétrica começou pouco tempo depois da descoberta da lâmpada incandescente por Thomas A. Edson, porém acompanhou todos os passos da evolução histórica mundial.

O principal objetivo deste capítulo foi apresentar o sistema de transmissão brasileiro, por isso em seguida, descreveram-se as linhas de transmissão brasileira, apresentando os principais tipos de estruturas de sustentação utilizados, as características destas estruturas e os níveis de tensão utilizados na transmissão.

3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CONDUTORES QUE CONSTITUEM AS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

O desempenho elétrico de uma linha aérea de transmissão depende quase exclusivamente de sua geometria. Suas características físicas não apenas ditam o seu comportamento em regime normal de operação, definindo os seus parâmetros elétricos, como também quando submetidas à sobretensões de qualquer natureza. O conhecimento das características físicas das linhas de transmissão é fundamental antes da análise de seu desempenho elétrico.

Portanto, é conveniente proceder, antes de iniciar o seu estudo elétrico, um estudo das características físicas e os elementos que a compõe (FUCHS, 1979).

Neste capítulo pretende-se descrever as principais características de cabos condutores e dentre esses, quais os mais empregados no mundo.

Em seguida, é definida a padronização de condutores utilizada no Brasil.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES

Os cabos condutores podem ser considerados os principais elementos das linhas de transmissão, devendo, portanto, possuir características especiais. A especificação adequada é muito importante para o dimensionamento da linha, pois não só depende disso o bom desempenho da linha, como tem importantes implicações de natureza econômica. Condutores ideais apresentam as seguintes características:

- a) Alta condutibilidade elétrica – para que as perdas por efeito Joule possam ser mantidas, economicamente, dentro de limites aceitáveis;
- b) Baixo custo – o custo dos cabos condutores absorve parcela do investimento total de uma linha, influenciando, portanto, no custo do transporte da energia;
- c) Boa resistência mecânica – assegurar integridade mecânica à linha, garantindo continuidade de serviço e segurança às propriedades e às vidas;
- d) Baixo peso específico – as estruturas de suporte são dimensionadas para absorver os esforços mecânicos transmitidos pelos condutores, e um desses é seu peso. Por isso, quanto maior for seu peso, mais robustas e caras serão as estruturas;
- e) Alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes - a fim de que não venham a sofrer redução em sua secção com o decorrer do tempo, provocando redução na sua resistência mecânica e eventual ruptura.

As condições mencionadas anteriormente não são atendidas simultaneamente por nenhum material em particular. Dentre os metais que possuem a maior parte dessas propriedades, estão o cobre e o alumínio bem como suas ligas, que são empregadas universalmente.

Durante muito tempo o cobre dominou o mercado, apesar de, já em 1895, terem sido construídas as primeiras linhas em cabo de alumínio (nos Estados Unidos e na França), seguidas de outras em 1898, 1899, 1902, etc. Nesta época, os fatores que limitavam a utilização do alumínio era o preço do mesmo em relação ao cobre, e também sua baixa resistência mecânica.

O problema decorrente da baixa resistência mecânica do alumínio foi superado já em 1908, com a invenção dos cabos de alumínio com alma de aço, CCA (Aluminium Conductor Steel Reinforced – ACSR), que foram utilizados com sucesso em 1913 na linha Big Creek, na Califórnia.

Problemas de custo de produção do alumínio, aliados a certo grau de conservadorismo, mantiveram acirrada a concorrência entre os dois materiais, e somente com a evolução da tecnologia de obtenção do alumínio, no período compreendido entre 1938 e 1945, que reduziu drasticamente seu custo, é que o cobre foi quase que totalmente afastado do campo das linhas de transmissão.

Nas linhas de transmissão, o uso de fios foi virtualmente abandonado em favor de cabos, obtidos por encordoamento de fios elementares (FUCHS,1979).

A figura 3.1 mostra um condutor de alumínio com alma de aço que tem o encordado concêntrico composto de uma ou mais camadas (coroas) e o núcleo de aço. Pode

ser constituído por um único fio de aço ou diversos fios de aço encordoados conforme a dimensão do cabo.

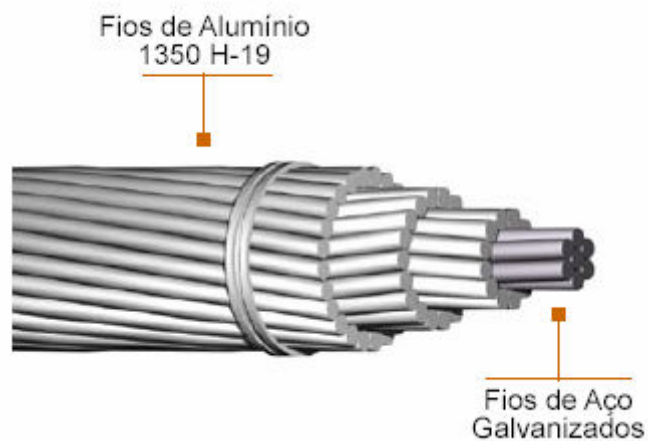


Figura 3.1 – Cabo de alumínio com alma de aço

O cabo ilustrado na Figura 3.1 é utilizado, principalmente, em redes de transmissão aérea.

A Figura 3.2 mostra um cabo de alumínio liga 1120 que é um condutor, com o cabo concêntrico composto, com uma ou mais coroas de fios de alumínio liga 1120 (PDCI, 2006).



Figura 3.2 – Cabo de alumínio liga 1120

A aplicação do cabo de alumínio liga 1120, mostrado na Figura 3.2, ocorre, principalmente, em circuitos aéreos onde seja necessária uma resistência mecânica maior que do cabo de alumínio e uma melhor resistência à corrosão que o cabo de alumínio-aço.

Pode-se construir cabos de uma mesma secção a partir de inúmeras combinações de fios elementares. Deste modo, os fabricantes de condutores padronizaram a fabricação dos mesmos, não somente em função do número de filamentos, mas também em função das secções destes filamentos. Assim, nos Estados Unidos e na Europa surgiram diferentes tabelas de padronização de condutores.

No Brasil, a padronização de condutores é definida pela ABNT, sendo que estas normas especificam as características exigíveis na fabricação e para o recebimento dos condutores destinados a fins elétricos. A padronização brasileira é a mesma adotada pelos Estados Unidos.

3.2.1 Condutores de cobre

Para os condutores de cobre (cabos nus de cobre), utiliza-se a EB-12. De acordo com a ABNT, os condutores de cobre devem ser especificados em função da secção em milímetros quadrados, da composição (ou número de filamentos) e da classe de encordoamento. No Brasil, fabricam-se cabos de cobre nas bitolas de 13 mm² (referência comercial n°. 6) até 645,2 mm² (referência comercial 1000 Mil Circular Mil), nas temperas duras e semiduras. O encordoamento é feito de acordo com as classes A e AA, definidos por normas. Os encordoamentos classe AA são empregados em condutores para linhas aéreas. Os condutores classe A em linhas aéreas são usados quando munidos de capa protetora ou quando se deseja maior flexibilidade.

Os condutores de alumínio e alumínio-aço possuem características especificadas, no Brasil, pela ABNT, descritas a seguir.

3.2.2 Condutores de alumínio e alumínio e aço

Estes condutores são especificados pela ABNT através de EB- 219 (fios de alumínio para fins elétricos), EB-292 (fios de aço zincado para alma do cabo de alumínio) e EB-193 que é referente a cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) para fins elétricos.

A designação destes condutores deve ser feita por meio da área nominal da secção de alumínio expressa em mm², pela formação, pelo tipo (CA ou CAA), pela classe de encordoamento correspondente e pela referência comercial.

Utiliza-se para designação dos cabos o código canadense de referência comercial. Para os cabos CA as palavras-código são nomes de flores e para CAA utilizam-se nomes de aves. As palavras-código são sempre pertencentes à língua inglesa. Como exemplo, é mostrado a descrição de um cabo de alumínio (CA) e de um cabo de alumínio com alma de aço (CAA).

TULIP: Cabo CA de alumínio, composto de 19 filamentos.

diâmetro dos filamentos: 3,381 mm;

diâmetro do cabo (nominal): 16,92 mm;

peso do cabo (nominal): 467,3 kg/km;

carga de ruptura: 2995 kg;

resistência elétrica: 0,168 ohm/km (em corrente contínua a uma temperatura de 20°C).

área da secção do cabo: 170,45 mm².

PENGUIN: Cabo CAA de alumínio, composto de 1 fio de aço e 6 fios de alumínio.

Bitola AWG nº 0000;

diâmetro do fio de aço: 4,77 mm;

diâmetro do fio de alumínio: 14,31 mm;

carga de ruptura: 3820 kg;

resistência elétrica: 0,26719 ohm/km (em corrente contínua a uma temperatura de 20 °C).

área da secção: 107 mm².

A Figura 3.3 mostra a maneira como o cabo PENGUIN é encordoado.

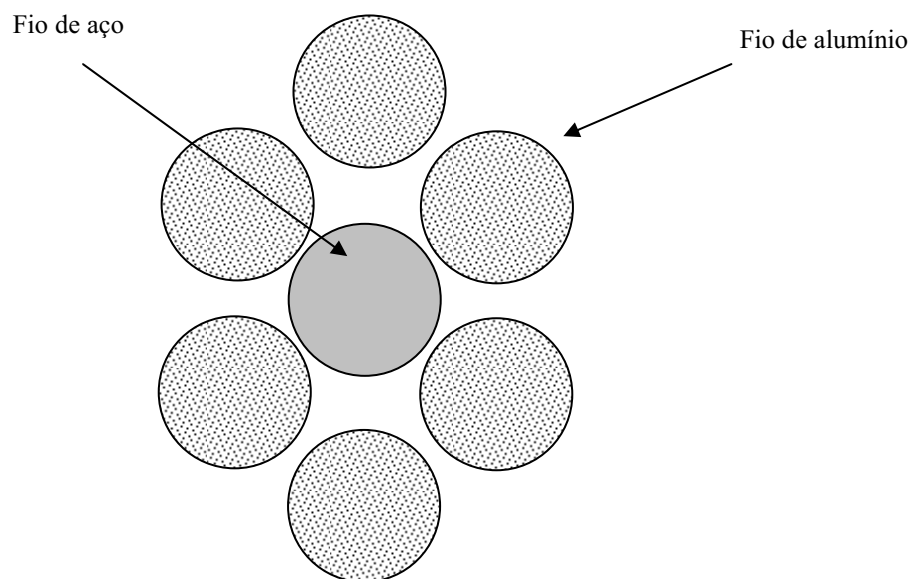


Figura 3.3 – Condutor PENGUIN

3.2.3 Condutores em ligas de alumínio

São cabos em que os fios de alumínio são substituídos por uma liga metálica constituída de alumínio e um outro material. Estes cabos são utilizados em locais sujeitos a um alto índice de poluição e também à beira-mar, pois são mais resistentes à corrosão.

Estas ligas recebem nomes comerciais diversos. Na Europa, o ALDREY é bastante utilizado, enquanto que nos Estados Unidos e Canadá existem dois condutores de ligas de alumínio bastante utilizados. Estes condutores são o AAC (all aluminium alloy cable), que são cabos homogêneos compostos de fios iguais em ligas de alumínio, de diversas composições, e o ACAR (aluminium conductor alloy reinforced), que são cabos de construção idêntica à dos cabos CAA, exceto pela alma, que neste caso será composta de fios de liga de alumínio, ao invés de aço.

3.2.4 Condutores alumoweld

Os filamentos destes cabos são obtidos pela extrusão de uma capa de alumínio sobre um fio de aço de alta resistência. O uso destes cabos, em linhas de transmissão, é limitado a situações especiais em que são necessárias pequenas seções de material condutor aliadas a elevadas resistências mecânicas. Estes condutores são aplicados como cabos pára-raios e também como condutor neutro em sistemas de distribuição, urbanos e rurais.

3.2.5 Condutores expandidos

São condutores constituídos de materiais diversos, designados como expandidos. A finalidade destes condutores é reduzir o gradiente de potencial em suas superfícies e com isso aumentar o valor da tensão crítica de corona (valor mínimo de tensão, a qual o condutor está submetido, para que tenha início a manifestação do efeito Corona).

3.2.6 Condutores múltiplos

O advento, em 1950, das primeiras linhas em tensões extra-elevadas tornou premente o emprego de meios capazes de reduzir os gradientes de potencial nas superfícies dos condutores, sendo que os condutores múltiplos ou enfeixados vieram de encontro a esta necessidade.

A Figura 3.4 mostra 3 exemplos de condutores múltiplos.

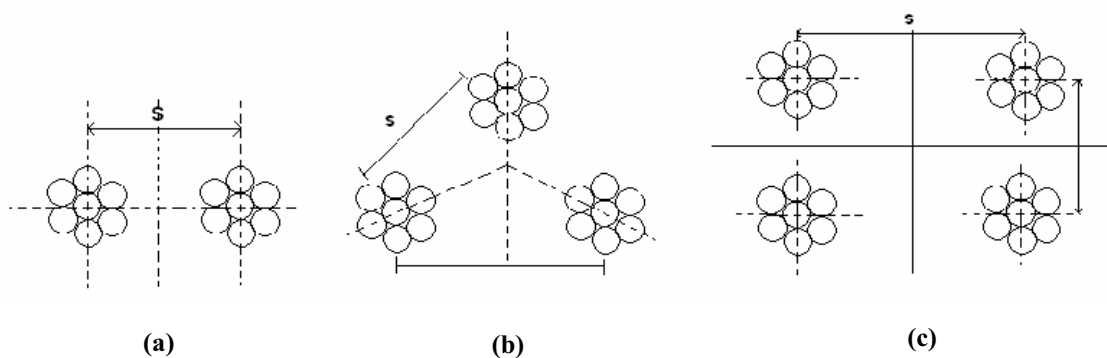


Figura 3.4 - Condutores múltiplos

Na Figura 3.4 (a) mostra-se um condutor múltiplo que é constituído de 2 subcondutores dispostos simetricamente em relação a um eixo vertical. Estes subcondutores são conectados em paralelo resultando em um único condutor. As Figuras 3.4 (b) e 3.4 (c) mostram condutores múltiplos constituídos de 3 e 4 subcondutores, respectivamente.

Nas figuras 3.4 (a), 3.4 (b) e 3.4 (c), s é igual à distância entre os centros dos subcondutores.

A partir de 1979 os condutores múltiplos foram empregados em praticamente todas as linhas cuja tensão nominal estivesse acima de 300 kV.

A quantidade de subcondutores em um condutor múltiplo, bem como o diâmetro dos subcondutores e o espaçamento entre os mesmos, são padronizados (FUCHS, 1979).

3.3 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se um estudo referente às principais características físicas dos cabos condutores. Os cabos condutores são considerados os principais elementos de uma linha de transmissão e por isso suas características devem corresponder ao bom desempenho da linha.

Devido à rigorosa exigência do mercado de energia elétrica mundial, apenas o cobre e o alumínio satisfazem algumas das características exigidas, sendo então, empregados universalmente.

Inicialmente, este capítulo mostrou quais são as características apresentadas por condutores ideais e como se sucedeu o uso do cobre e o alumínio na fabricação de cabos condutores.

No capítulo anterior, viu-se que o sistema de transmissão brasileiro teve grande influência européia e norte-americana, com a padronização dos cabos condutores não foi diferente, no Brasil, a padronização é definida pelas normas da ABNT que seguem as normas adotadas nos Estados Unidos. Com base nestas normas, foram apresentadas, em seguida, as padronizações dos cabos nus de cobre e dos cabos de alumínio.

Por fim, descreveram-se, devido às especificações definidas pela ABNT, os tipos de cabos condutores de alumínio. Dentre eles, estão os condutores múltiplos que terá grande importância no decorrer deste trabalho.

4 PARÂMETROS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 INTRODUÇÃO

Uma linha de transmissão de energia elétrica possui quatro parâmetros que influenciam no seu comportamento como componente de um sistema de potência, são eles: resistência, indutância, capacitância e condutância.

Um dos aspectos mais importantes na representação da linha para estudos de transitórios eletromagnéticos consiste em considerar que os parâmetros da linha são distribuídos ao longo de seu comprimento e que são variáveis em função da frequência.

Modelos em que os parâmetros são considerados constantes não representam adequadamente a linha em toda faixa de frequência presente durante o transitório sendo que, na maioria dos casos, a utilização de parâmetros constantes simplifica as componentes harmônicas dos sinais e provoca distorções nas formas de onda.

O efeito do retorno através do solo e o efeito skin (pelicular), tornam os parâmetros da linha altamente dependentes da frequência, sendo que Carson e Pollaczek desenvolveram modelos matemáticos que representam o efeito do retorno de corrente através do solo (PETTERSSON et al., 1999); (D' AMORE et al., 1997).

No estudo dos parâmetros longitudinais e transversais de uma linha aérea de transmissão, verifica-se também que estes parâmetros são influenciados pela geometria da linha e, em alguns casos, pelo meio a que a linha está imersa.

A seguir, são descritos os parâmetros longitudinais e transversais de uma linha de transmissão genérica.

4.2 IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

As impedâncias, próprias e mútuas, inseridas nas equações de uma linha representada no domínio da frequência podem ser obtidas a partir da solução das equações de Maxwell levando em consideração as condições de contorno de três materiais que são o condutor, propriamente dito, o ar e o solo (HOFMANN et al., 2003). Considerando que estes três materiais podem ser caracterizados por uma resistência, por uma permeabilidade magnética e por uma permissividade dielétrica, pode-se mostrar que as impedâncias da linha podem ser escritas em função das propriedades físicas do sistema (ar, solo e condutor) e da frequência.

Para fins de cálculos, a impedância longitudinal de uma linha de transmissão é dividida em três componentes que são:

Z_{ext}	Impedância externa
Z_{int}	Impedância interna
Z_{solo}	Impedância devido ao retorno da corrente através do solo

A impedância total da linha corresponde à soma das três componentes mencionadas anteriormente.

4.2.1 Impedância externa

Considere os condutores i e k de uma linha de transmissão genérica que está sobre um solo ideal, conforme mostra a Figura 4.1 (FUCHS, 1979); (HOFMANN et al., 2003).

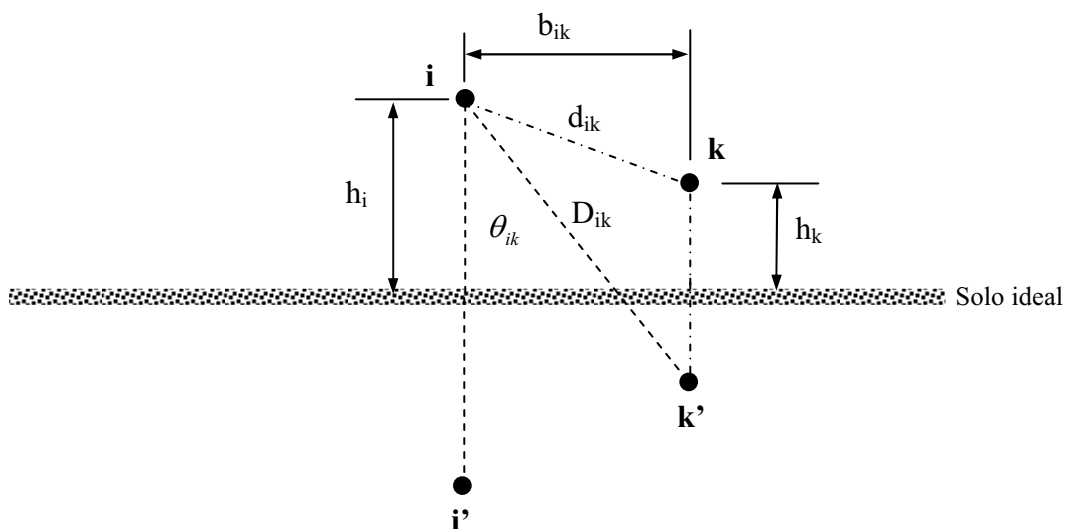


Figura 4.1 – Condutores i e k , sobre um solo ideal, e suas respectivas imagens i' e k'

A impedância externa é resultante da ação do campo magnético no ar, considerando que o condutor e a linha são ideais (sem perdas). Para os condutores i e k , mostrados na Figura 4.1, a impedância externa é dada por:

$$Z_{ext_{ik}} = j X_{ik} \quad (4.1)$$

Considerando R_{ik} nula, as equações das impedâncias externas são dadas por:

$$Z_{ext_{ik}}(\omega) = j\omega \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \text{ (ohm/km)} \quad (4.2)$$

$$Z_{ext_{ii}}(\omega) = j\omega \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{2h_i}{r_i} \right) \text{ (ohm/km)} \quad (4.3)$$

Sendo:

- h_i Altura do condutor i em relação ao solo;
- h_k Altura do condutor k em relação ao solo;
- d_{ik} Distância entre os condutores i e k ;
- D_{ik} Distância entre os condutores i e k' ;
- r_i Raio do condutor i ;
- μ Permeabilidade do meio;
- ω Função variável.

Nas equações (4.2) e (4.3) a função ω depende da variável frequência f e a permeabilidade do meio μ depende do meio em que a linha está imersa. As equações que determinam ω e μ são calculadas como:

$$\omega = 2\pi f(\text{Hz}) \quad (4.4)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r (\text{H/km}) \quad (4.5)$$

Em (4.5) temos:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} (\text{H/km}) \quad \text{Permeabilidade do vácuo;}$$

$$\mu_r \cong 1 \quad \text{Permeabilidade relativa do ar;}$$

Na equação (4.2) $Z_{ext_{ik}}$ é a impedância externa mútua entre os condutores i e k , enquanto que na expressão (4.3) $Z_{ext_{ii}}$ é a impedância externa própria do condutor i .

Nas equações (4.2) e (4.3) a parte imaginária é dada pelas reatâncias indutivas.

Das expressões (4.2) e (4.3) pode-se obter as indutância externas próprias e mútuas como sendo:

$$L_{ext_{ik}} = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad (4.6)$$

$$L_{ext_{ii}} = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{2h_i}{r_i} \right) \quad (4.7)$$

Em que:

$L_{ext_{ik}}$ Indutância externa mútua entre os condutores i e k

$L_{ext_{ii}}$ Indutância externa própria do condutor i

Em (4.6) e (4.7) a indutância externa depende da geometria da linha e do meio a que a linha está imersa.

Deste modo, para uma linha de n fases, considerando que cada fase é constituída de um único condutor, pode-se escrever a matriz de impedâncias externas $[Z_{ext}]$ como sendo:

$$[Z_{ext}] = j\omega \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \ln \frac{D_{n2}}{d_{n2}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \text{ (ohm/km)} \quad (4.8)$$

A matriz de impedância $[Z_{ext}]$ pode ser escrita como sendo:

$$[Z_{ext}] = j\omega [L_{ext}] \quad (4.9)$$

Na equação (4.9) $[L_{ext}]$ é a matriz de indutâncias externas, que pode ser escrita sob a forma:

$$[L_{\text{ext}}] = \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \ln \frac{D_{n2}}{d_{n2}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Observa-se na equação (4.10) que a matriz de indutância externa da linha é função das características geométricas dos condutores e das características do meio que constituem a linha e é independente da frequência.

4.2.2 Impedância interna da linha

A impedância interna ou impedância devido ao efeito pelicular (ou efeito skin) está presente sempre que um condutor é percorrido por uma corrente alternada. Quando percorrido por corrente alternada ocorre uma distribuição não uniforme de corrente elétrica na área da seção transversal do condutor, que causa um aumento na resistência efetiva do condutor e diminuição na indutância interna à medida que a frequência aumenta.

No cálculo da impedância interna de um condutor cilíndrico sólido ou tubular pode se utilizar as funções de Bessel de primeira ordem, ou funções modificadas de Bessel. Deste modo, a impedância interna será expressa como (STEVENSON, 1978):

$$Z_{\text{int}_{ii}} = \frac{m\rho}{2\pi r_i} \frac{\text{ber}(m r_i) + j\text{bei}(m r_i)}{\text{ber}'(m r_i) - j\text{bei}'(m r_i)} \text{ (ohm/km)} \quad (4.11)$$

Sendo:

$$m = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\rho}} \quad (4.12)$$

$$\text{ber}(mx) = 1 - \frac{\left(\frac{mx}{2}\right)^4}{(2!)^2} + \frac{\left(\frac{mx}{2}\right)^8}{(4!)^2} - \dots \quad (4.13)$$

$$\text{bei}(mx) = \left(\frac{mx}{2}\right)^2 - \frac{\left(\frac{mx}{2}\right)^6}{(3!)^2} + \frac{\left(\frac{mx}{2}\right)^{10}}{(5!)^2} - \dots \quad (4.14)$$

Os

termos *ber* e *bei* são abreviações de “*Bessel real*” e “*Bessel imaginário*”, respectivamente.

$$\text{ber}' mx = \frac{1}{m} \frac{d}{dx} (\text{ber } mx) \quad (4.15)$$

$$\text{bei}' mx = \frac{1}{m} \frac{d}{dx} (\text{bei } mx) \quad (4.16)$$

$$x = r_i \cdot \quad (4.17)$$

ρ Resistividade do material condutor

r_i Raio do condutor

Portanto para uma linha de n fases, considerando que cada fase é constituída de um único condutor, pode-se escrever a matriz de impedâncias internas $[Z_{int}]$ como sendo:

$$[Z_{int}] = \begin{bmatrix} Z_{int_{11}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_{int_{22}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_{int_{nn}} \end{bmatrix} \text{ (ohm/m)} \quad (4.18)$$

A matriz de impedância $[Z_{int}]$ pode ser decomposta em uma componente real e outra imaginária, resultando em:

$$[Z_{int}] = [R_{int}(\omega)] + j\omega[L_{int}(\omega)] \quad (4.19)$$

Na equação (4.19) $[R_{int}(\omega)]$ é a matriz de resistências devido ao efeito pelicular enquanto que $[L_{int}(\omega)]$ é a matriz de indutâncias devido ao efeito pelicular.

As matrizes $[R_{int}(\omega)]$ e $[L_{int}(\omega)]$ são variáveis em relação à frequência.

4.2.3 Impedância devido ao retorno de corrente através do solo (efeito solo)

Os parâmetros de uma linha de transmissão são fortemente dependentes da frequência.

Os efeitos do solo sobre os parâmetros longitudinais podem ser calculados por meio das equações de Carson e de Pollaczek. Ambas as equações podem ser aplicadas em linhas aéreas, mas as equações de Pollaczek são mais genéricas, podendo ser aplicadas também em cabos (DOMMEL, 1986); (KUROKAWA et al., 2006).

Considere os condutores i e k dispostos sobre um solo não ideal, conforme mostra a Figura 4.2.

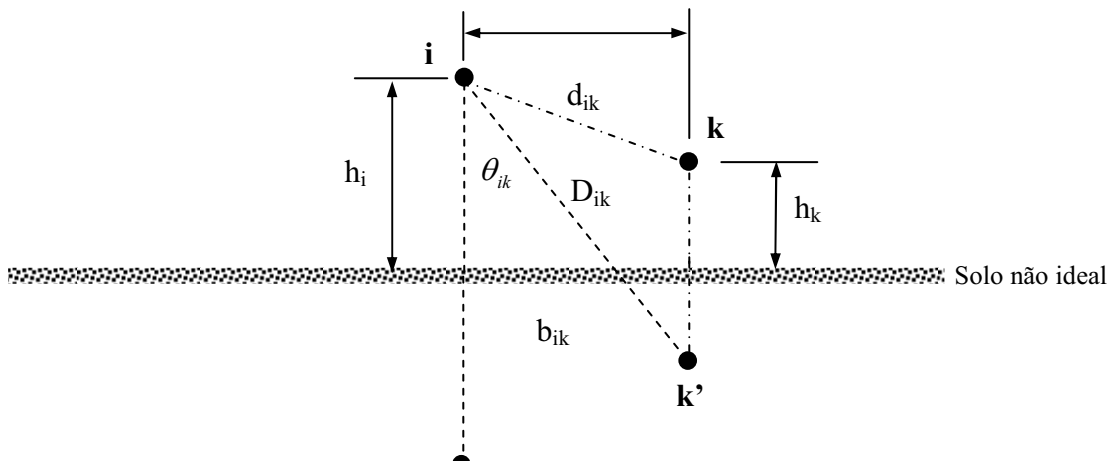


Figura 4.2 – Condutores i e k , sobre um solo não ideal, e suas respectivas imagens i' e k'

Carson considerou condutores paralelos ao solo, admitindo a resistividade como uniforme e tendo extensão infinita. Carson demonstrou que as impedâncias próprias e mútuas de circuitos com retorno pelo solo são iguais às impedâncias para um circuito envolvendo um solo ideal, no qual se pode considerar um condutor imagem à mesma profundidade que a altura do condutor sobre o solo acrescida de um fator de correção aplicável a ambas as impedâncias.

O termo de correção foi então denominado impedância devido ao efeito solo. Deste modo, para os condutores i e k , mostrados na Figura 4.2, as impedâncias próprias e mútuas (devido ao efeito solo) destes condutores podem ser calculadas, respectivamente, da seguinte maneira (FUCHS, 1979); (STEVENSON, 1978); (DERI et al., 1981):

$$Z_{\text{solo}_{ik}} = \Delta R_{ik} + j \Delta X_{ik} \quad (4.20)$$

Sendo:

ΔR correção dos termos de Carson para efeitos com retorno pelo solo;

ΔX correções dos termos de Carson para efeitos com retorno pelo solo.

Os termos de correção de Carson ΔR e ΔX , na equação (4.20), considerando o efeito solo, são funções do ângulo θ ($\theta = 0$ para a impedância própria, $\theta = \theta_{ik}$ para a impedância mútua) e do parâmetro δ :

O termo δ é calculado como:

$$\delta_{ik} = 4\pi\sqrt{5} \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\rho_s}} D_{ik} \quad (4.21)$$

Sendo:

ρ_s Resistividade do solo, em ohm \cdot m .

D_{ik} Distância entre o condutor i e a imagem do condutor k ;

Na equação (4.21) a distância D_{ik} entre os condutores i e sua imagem i' é calculada como:

$$D_{ik} = 2 \cdot h_i \quad (4.22)$$

Sendo h_i a altura do condutor i em relação ao solo.

ΔR e ΔX são iguais a zero quando $\delta \rightarrow \infty$ (no caso da resistividade do solo ser muito pequena). Carson apresentou uma integral infinita para os parâmetros ΔR e ΔX , a qual ele desenvolveu como uma série infinita.

Para $\delta \leq 5$ tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta R_{ik} = & \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 \delta_{ik} \cos \theta_{ik} + b_2 [(\delta_{ik})^2 \cos 2\theta_{ik} (c_2 - \ln \delta_{ik}) + (\delta_{ik})^2 \theta_{ik} \sin 2\theta_{ik}] + b_3 (\delta_{ik})^3 \cos 3\theta_{ik} \right. \\ & - d_4 (\delta_{ik})^4 \cos 4\theta_{ik} - b_5 (\delta_{ik})^5 \cos 5\theta_{ik} + b_6 [(c_6 - \ln \delta_{ik})(\delta_{ik})^6 \cos 6\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^6 \sin 6\theta_{ik}] \\ & \left. + b_7 (\delta_{ik})^7 \cos 7\theta_{ik} - d_8 (\delta_{ik})^8 \cos 8\theta_{ik} - \dots \right\} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{ik} = & 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln \delta_{ik}) + b_1 \delta_{ik} \cos \theta_{ik} - d_2 (\delta_{ik})^2 \cos 2\theta_{ik} + b_3 (\delta_{ik})^3 \cos 3\theta_{ik} \right. \\ & - b_4 [(c_4 - \ln \delta_{ik})(\delta_{ik})^4 \cos 4\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^4 \sin 4\theta_{ik}] + b_5 (\delta_{ik})^5 \cos 5\theta_{ik} - d_6 (\delta_{ik})^6 \cos 6\theta_{ik} \\ & \left. + b_7 (\delta_{ik})^7 \cos 7\theta_{ik} - b_8 [(c_8 - \ln \delta_{ik})(\delta_{ik})^8 \cos 8\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^8 \sin 8\theta_{ik}] + \dots \right\} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Os coeficientes b_i , c_i e d_i são constantes, e podem ser obtidos pelas seguintes relações:

$$b_i = |b_i - 2| \frac{s_i}{i(i+2)}, \quad (4.25)$$

$$\text{a partir de : } b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6} \text{ e } b_2 = \frac{1}{16}.$$

$$c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2} \quad (4.26)$$

a partir de : $c_2 = 1,3659315$.

$$d_i = \frac{\pi}{4} \cdot b_i \quad (4.27)$$

Com

$s_i = \pm 1$ mudando após cada quatro termos sucessivos ($s_i = +1$ para $i = 1, 2, 3, 4$; $s_i = -1$ para $i = 5, 6, 7, 8, \dots$).

Para $\delta > 5$ tem-se:

$$\Delta R_{ik} = \left(\frac{\cos \theta_{ik}}{\delta_{ik}} - \frac{\sqrt{2} \cos 2\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^2} + \frac{\cos 3\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^3} + \frac{3 \cos 5\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^5} - \frac{45 \cos 7\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^7} \right) \cdot \frac{4\omega \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} \quad (4.28)$$

$$\Delta X_{ik} = \left(\frac{\cos \theta_{ik}}{\delta_{ik}} - \frac{\cos 3\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^3} + \frac{3 \cos 5\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^5} - \frac{45 \cos 7\theta_{ik}}{(\delta_{ik})^7} \right) \cdot \frac{4\omega \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} \quad (4.29)$$

Deste modo, a matriz de impedâncias de uma linha em que há o retorno de corrente através do solo é escrita como sendo:

$$[Z_{\text{solo}}] = \begin{bmatrix} Z_{\text{solo}_{11}} & Z_{\text{solo}_{12}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{1n}} \\ Z_{\text{solo}_{21}} & Z_{\text{solo}_{22}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{\text{solo}_{n1}} & Z_{\text{solo}_{n2}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{nn}} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

A matriz de impedância $[Z_{\text{solo}}]$ pode ser decomposta em uma componente real e outra imaginária, resultando em:

$$[Z_{\text{solo}}] = [R_{\text{solo}}(\omega)] + j\omega[L_{\text{solo}}(\omega)] \quad (4.31)$$

Na equação (4.31) $[R_{\text{solo}}(\omega)]$ é a matriz de resistências devido ao efeito solo enquanto que $[L_{\text{solo}}(\omega)]$ é a matriz de indutâncias devido ao efeito solo.

As matrizes $[R_{\text{solo}}(\omega)]$ e $[L_{\text{solo}}(\omega)]$ são variáveis em relação à frequência.

4.3 ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

A diferença de potencial entre os condutores de uma linha de transmissão faz com que se carreguem da mesma maneira que as placas de um capacitor quando entre elas existe uma diferença de potencial. A capacitância entre os condutores é a carga nos condutores por unidade de diferença de potencial entre eles.

Além da capacitância existe também, em uma linha aérea de transmissão, uma condutância entre os condutores e o solo. Esta condutância é denominada condutância de dispersão (FUCHS, 1979); (STEVENSON, 1978).

4.3.1 Capacitância da linha

Considere os condutores i e k , dispostos sobre um solo não ideal, carregados com cargas q_i e q_k , respectivamente, conforme mostra a Figura 4.3 (FUCHS, 1979).

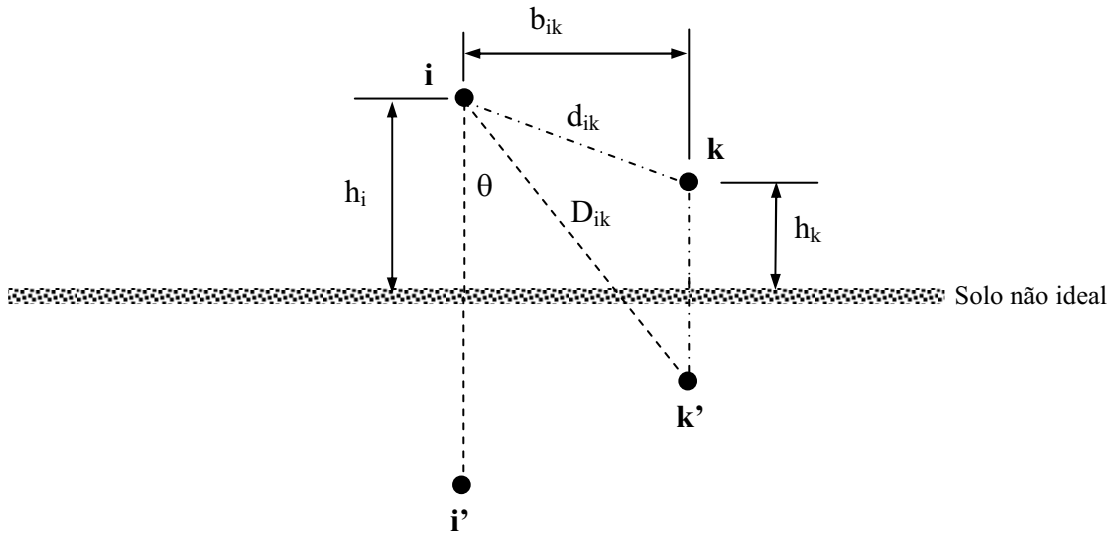


Figura 4.3 – Condutores i e k , sobre um solo não ideal, e suas respectivas imagens i' e k'

Na Figura 4.3 os condutores imagens i' e k' terão, respectivamente, cargas $-q_i$ e $-q_k$.

Sabe-se que o potencial do condutor i , na Figura 4.3, em relação ao solo é dado por:

$$v_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_i \ln \frac{2h_i}{r_i} + q_k \ln \frac{r_k}{d_{ik}} - q_k \ln \frac{r_k}{D_{ik}} \right) \quad (4.32)$$

Na equação (4.32) r_i e r_k são os raios dos condutores i e k , respectivamente. O termo ϵ_0 é a permissividade do vácuo e assume o valor $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-6} \text{ F/km}$ (HAYT, 1983).

A equação (4.32) pode ser escrita como sendo:

$$v_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} q_i \ln \frac{2h_i}{r_i} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} q_k \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad (4.33)$$

Utilizando o mesmo procedimento, pode-se calcular o potencial do condutor k em relação ao solo da seguinte forma:

$$v_k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} q_k \ln \frac{2h_k}{r_k} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} q_i \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad (4.34)$$

Escrevendo as equações (4.33) e (4.34) na forma matricial obtém-se:

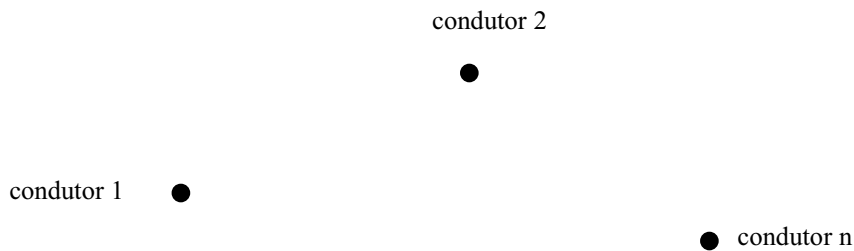
$$[V] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_i}{r_i} & \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \\ \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} & \ln \frac{2h_k}{r_k} \end{bmatrix} [Q] \quad (4.35)$$

Na equação (4.35) os vetores $[V]$ e $[Q]$ são escritos como sendo:

$$[V] = \begin{bmatrix} v_i \\ v_k \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} q_i \\ q_k \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Considere agora, um sistema de n condutores, conforme mostra a Figura 4.4.



Solo

Figura 4.4 - Sistema de n condutores

Com base no raciocínio empregado no cálculo do potencial de cada condutor em uma linha com dois condutores, pode-se afirmar que para o sistema de n condutores, mostrado na Figura 4.4, as equações (4.35)-(4.37) torna-se:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

A equação (4.38) pode ser escrita, de forma simplificada, como:

$$[V] = [A][Q] \quad (4.39)$$

Na equação (4.39) a matriz $[A]$ é denominada matriz dos coeficientes de potencial (ou matriz dos coeficientes de campo elétrico).

A partir da definição de capacitância de um sistema de dois condutores, (HAIT, 1983), pode-se definir a seguinte relação matricial para uma linha de n condutores:

$$[Q] = [C][V] \quad (4.40)$$

Na

expressão (4.40) a matriz $[C]$ é a matriz de capacitâncias de um sistema de n condutores.

Deste modo, a partir das equações (4.39) e (4.40) pode-se escrever a matriz de capacitâncias como sendo:

$$[C] = [A]^{-1} \quad (4.41)$$

Na expressão (4.35) os elementos da matriz $[C]$ são expressos em F/km.

A matriz $[C]$, mostrada na expressão (4.41), pode ser escrita na forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Para entender o significado dos elementos da matriz $[C]$, mostrada na expressão (4.42), considere o sistema de n condutores com todas suas capacitâncias parciais, conforme mostra a figura 4.5.

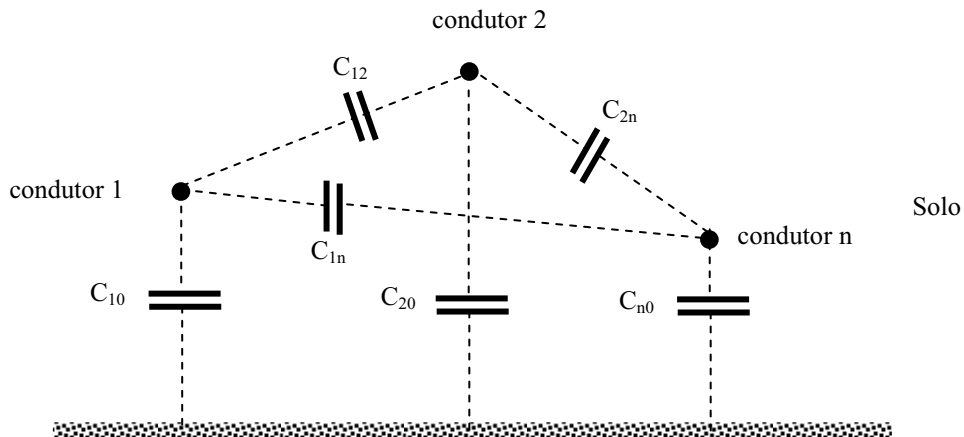


Figura 4.5 - Capacitâncias entre condutores e dos condutores ao solo

Considere, na Figura 4.5, que os condutores 1, 2, ..., n possuem, em relação ao solo, os potenciais v_1, v_2, \dots, v_n , respectivamente. Deste modo, podem-se escrever as seguintes expressões (FUCHS, 1979):

$$q_1 = C_{10}v_1 + C_{12}(v_1 - v_2) + \dots + C_{1n}(v_1 - v_n) \quad (4.43)$$

A equação (4.43) pode ser escrita como sendo:

$$q_1 = (C_{10} + C_{12} + \dots + C_{1n})v_1 - C_{12}v_2 - \dots - C_{1n}v_n \quad (4.44)$$

De modo análogo, para os demais condutores, obtêm-se:

$$q_2 = -C_{12}v_1 + (C_{20} + C_{12} + \dots + C_{2n})v_2 - \dots - C_{2n}v_n \quad (4.45)$$

$$q_n = -C_{1n}v_1 - C_{2n}v_2 \dots + (C_{n0} + C_{1n} + C_{2n} + \dots)v_n \quad (4.46)$$

Escrevendo as expressões (4.44)-(4.46) na forma matricial obtém-se:

$$[Q] = [C][V] \quad (4.47)$$

Onde:

$$[Q] = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (C_{10} + C_{12} + \dots + C_{1n}) & -C_{12} & \dots & -C_{1n} \\ -C_{12} & (C_{20} + C_{12} + \dots + C_{2n}) & \dots & -C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -C_{1n} & -C_{2n} & \dots & (C_{n0} + C_{1n} + C_{2n} + \dots) \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Comparando as expressões (4.42) e (4.50) pode-se afirmar que:

- Um elemento C_{ii} qualquer na expressão (4.42) é constituído pela soma das capacitâncias do condutor i em relação aos demais condutores e também do condutor i em relação ao solo;
- Um elemento C_{ij} na expressão (4.50), para $i \neq j$, é constituído pelo valor negativo da capacitância entre os condutores i e j .

4.3.2 Admitância da linha

Assumindo que a condutância do ar é desprezível, conclui-se que a matriz de admitâncias transversais de uma linha de transmissão é dada por (TAVARES et al., 1998):

$$[Y] = j\omega[C] \quad (4.51)$$

Na expressão (4.51) $[C]$ é a matriz de capacitâncias obtida na equação (4.42).

4.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi feito um estudo dos parâmetros longitudinais e transversais da linha.

Os parâmetros longitudinais e transversais da linha são obtidos a partir do cálculo da impedância longitudinal e admitância transversal, respectivamente.

Inicialmente, foi feito um estudo dos parâmetros longitudinais e verificou-se que estes são constituídos de uma parcela fixa e uma parcela variável. A parcela fixa corresponde à resistência do condutor, esta resistência depende da geometria da linha e da característica do meio; a parcela variável corresponde à indutância e depende da geometria da linha, da

condutividade do condutor e também da resistividade do solo. Esta segunda parcela é variável em relação à frequência.

A impedância longitudinal é determinada a partir da soma de parcelas determinadas pelas impedâncias: externa, interna e impedância devido ao retorno da corrente através do solo. Notou-se que cada uma dessas impedâncias possui características próprias e por isso foram estudadas individualmente.

Quanto aos parâmetros transversais, viu-se que os mesmos são representados por uma capacitância e por uma condutância. Porém, considerando que a condutância do ar é desprezível apresentou-se apenas a expressão que determina a capacitância.

Tanto no cálculo da matriz de impedância longitudinal quanto no cálculo da matriz de admitância transversal, considera-se o cálculo para uma linha composta por dois condutores e partindo da mesma proposta, foram apresentadas as equações para uma linha genérica com n condutores.

5 PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSTITUÍDAS DE CONDUTORES MÚLTIPLOS

5.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi visto os procedimentos utilizados para calcular os parâmetros de uma linha área de transmissão. A partir das equações utilizadas no capítulo anterior e considerando uma linha cujas fases são constituídas de condutores múltiplos, este capítulo apresentará o método utilizado para calcular os parâmetros destas linhas de transmissão.

Para determinar os parâmetros de um condutor múltiplo, considera-se que este pode ser substituído por um condutor equivalente cujo raio é igual à média geométrica das distâncias entre o grupo de subcondutores do condutor múltiplo. Essa média é denominada raio médio geométrico ou, simplesmente, RMG (FUCHS, 1979).

Em seguida, considerando o condutor equivalente ao condutor múltiplo calcula-se a distância média geométrica (DMG) entre cada fase da linha. Nessas condições, o estudo fica resumido na determinação do RMG e da DMG (FUCHS, 1979).

Como ilustrações serão mostradas os parâmetros de uma linha trifásica de 440 kV que foram obtidos a partir das equações estudadas neste trabalho.

5.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSTITUÍDAS DE CONDUTORES MÚLTIPLOS

Linhas de condutores múltiplos são linhas em que cada uma das fases é constituída de um grupo de subcondutores.

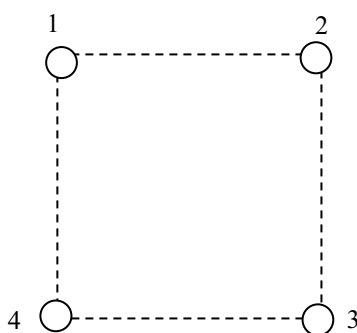


Figura 5.1 – Condutor múltiplo constituído de 4 subcondutores

A Figura 5.1 mostra um condutor múltiplo constituído de 4 subcondutores, que são dispostos na forma de um quadrado. Cada um dos subcondutores pode ser do tipo encordado, ou de qualquer outro tipo definido na padronização (FUCHS, 1979).

5.2.1 Condutor equivalente a um condutor múltiplo

Considere um condutor múltiplo constituído por n subcondutores idênticos, conforme mostra a Figura 5.2.

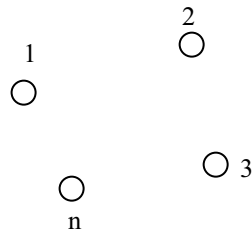


Figura 5.2 – Condutor múltiplo constituído por n subcondutores

O condutor múltiplo mostrado na Figura 5.2 pode ser substituído por um condutor equivalente cujo raio é igual ao RMG (raio médio geométrico dos n subcondutores do condutor múltiplo) que é calculado como sendo (FUCHS, 1979); (SINCLAIR et al., 1996):

$$\text{RMG} = \sqrt[n]{\text{rmg}^n \cdot (d_{12} d_{13} \cdots d_{1n})(d_{21} d_{23} \cdots d_{2n})(d_{31} d_{32} d_{34} \cdots d_{3n}) \cdots (d_{n1} d_{n2} \cdots d_{n(n-1)})} \quad (5.1)$$

Onde:

d_{ik} distância entre o subcondutor i e o subcondutor k ;

rmg raio médio geométrico de um subcondutor do condutor múltiplo que é dado por:

$$\text{rmg} = 0.7788 \cdot r \quad (5.2)$$

Em (5.2) r é o raio do subcondutor.

5.2.2 Distância média geométrica entre dois condutores múltiplos.

Considere um sistema constituído por dois condutores múltiplos, A e B, conforme mostra a Figura 5.3.

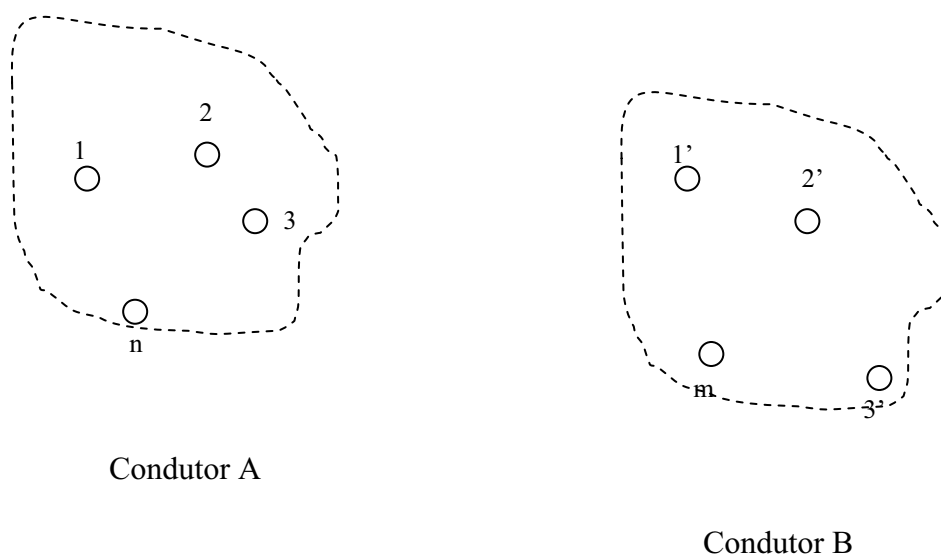


Figura 5.3 - Sistema de dois condutores múltiplos

Nas Figura 5.3, os condutores múltiplos A e B são constituídos, respectivamente, por n e m subcondutores. Define-se como distância média geométrica DMG entre os condutores A e B como a média geométrica da distância do condutor A ao condutor B (FUCHS, 1979); (SINCLAIR et al., 1996).

Sendo assim, considerando a Figura 5.3, podemos escrever a DMG entre A e B como:

$$DMG = \sqrt{d_{AB} \cdot d_{BA}} \quad (5.3)$$

De modo geral, considerando n condutores equivalentes ao condutor múltiplo, pode-se escrever DMG como:

$$\text{DMG} = \sqrt[n]{(d_{12}d_{13} \cdot \dots \cdot d_{1n}) \cdot (d_{21}d_{23} \cdot \dots \cdot d_{2n}) \cdot \dots \cdot (d_{n1}d_{n2} \cdot \dots \cdot d_{nn-1})} \quad (5.4)$$

Na equação (5.4) o termo d_{ij} corresponde à distância entre o condutor equivalente i , condutor equivalente j .

5.3 IMPEDÂNCIA EXTERNA

A Figura 5.4 mostra os condutores múltiplos i e k , de uma linha de transmissão genérica.

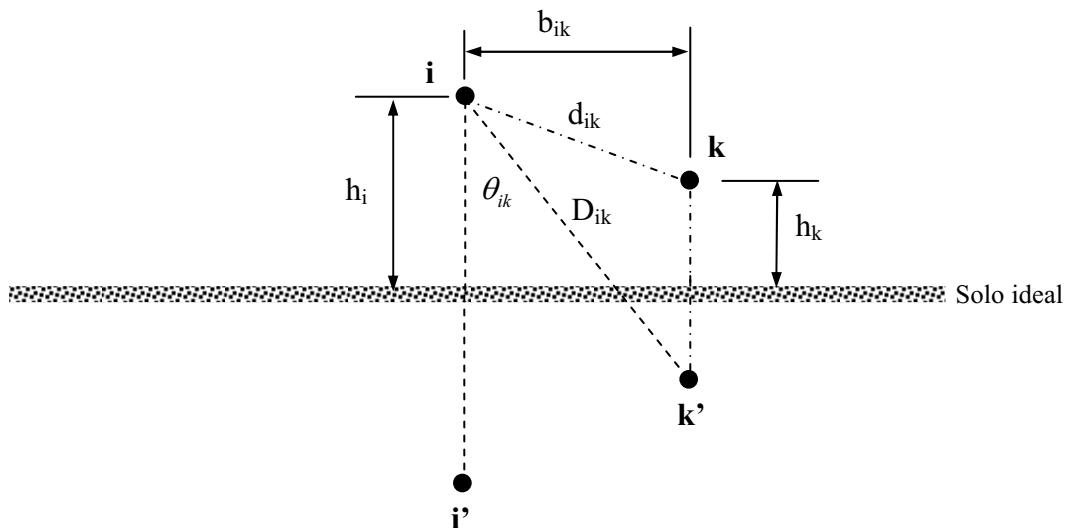


Figura 5.4 – Condutores i e k de uma linha genérica

Sabe-se que a matriz de indutâncias externas da linha mostrada na Figura 5.4 é dada por (FUCHS, 1979):

$$[L_{\text{ext}}] = \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \ln \frac{D_{n2}}{d_{n2}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Na expressão (5.5) têm-se:

D_{ik} Distância média geométrica entre o condutor i e a imagem do condutor k ;

d_{ik} Distância média geométrica entre os condutores i e k ;

r_i Raio médio geométrico do condutor i .

A matriz de impedância externa é dada por:

$$[Z_{\text{ext}}] = j\omega[L_{\text{ext}}] \quad (5.6)$$

5.4 IMPEDÂNCIA INTERNA

Conforme verificado no capítulo 4, a impedância interna do condutor múltiplo i , da linha mostrada na Figura 5.6, pode ser obtida a partir da seguinte expressão (TAVARES, 1998):

$$Z_{int_{ii}} = \frac{m \rho}{2\pi r_i} \frac{\text{ber}(mr) + j\text{bei}(mr)}{\text{ber}'(mr) + j\text{bei}'(mr)} \quad (5.7)$$

Sendo:

r Raio médio geométrico do condutor múltiplo.

Portanto para uma linha de n fases, considerando que cada fase é constituída de um condutor múltiplo, pode-se escrever a matriz de impedâncias internas $[Z_{int}]$ como sendo:

$$[Z_{int}] = \begin{bmatrix} Z_{int_{11}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_{int_{22}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_{int_{mm}} \end{bmatrix} \text{ (ohm/km)} \quad (5.8)$$

A matriz de impedância $[Z_{int}]$ pode ser decomposta em uma componente real e outra imaginária, resultando em:

$$[Z_{int}] = [R_{int}(\omega)] + j\omega[L_{int}(\omega)] \quad (5.9)$$

5.5 IMPEDÂNCIA DEVIDO AO EFEITO SOLO

Considere os condutores múltiplos i e k dispostos sobre um solo não ideal, conforme mostra a Figura 5.5.

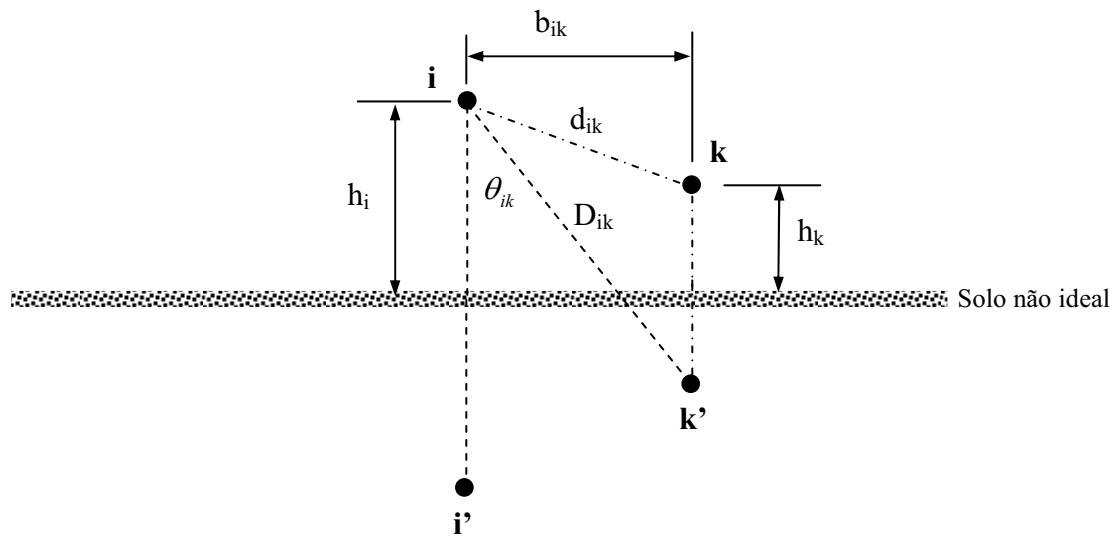


Figura 5.5 - Condutores múltiplos i e k e suas respectivas imagens i' e k'

No capítulo 4, verificou-se que a impedância dos condutores devido ao retorno de corrente através do solo, é dada por (FUCHS, 1979); (TAVARES et al., 1998); (DOMMEL, 1996):

$$Z_{\text{solo}_{ik}} = \Delta R_{ik} + j \Delta X_{ik} \quad (5.10)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \Delta R_{ik} = & \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 \delta_{ik} \cos \theta_{ik} + b_2 [(\delta_{ik})^2 \cos 2\theta_{ik} (c_2 - \ln \delta_{ik}) + (\delta_{ik})^2 \theta_{ik} \sin 2\theta_{ik}] + b_3 (\delta_{ik})^3 \cos 3\theta_{ik} \right. \\ & - d_4 (\delta_{ik})^4 \cos 4\theta_{ik} - b_5 (\delta_{ik})^5 \cos 5\theta_{ik} + b_6 [(c_6 - \ln \delta_{ik}) (\delta_{ik})^6 \cos 6\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^6 \sin 6\theta_{ik}] \\ & \left. + b_7 (\delta_{ik})^7 \cos 7\theta_{ik} - d_8 (\delta_{ik})^8 \cos 8\theta_{ik} - \dots \right\} \quad (\text{ohm / km}) \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{ik} = & 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln \delta_{ik}) + b_1 \delta_{ik} \cos \theta_{ik} - d_2 (\delta_{ik})^2 \cos 2\theta_{ik} + b_3 (\delta_{ik})^3 \cos 3\theta_{ik} \right. \\ & - b_4 [(c_4 - \ln \delta_{ik}) (\delta_{ik})^4 \cos 4\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^4 \sin 4\theta_{ik}] + b_5 (\delta_{ik})^5 \cos 5\theta_{ik} - d_6 (\delta_{ik})^6 \cos 6\theta_{ik} \\ & \left. + b_7 (\delta_{ik})^7 \cos 7\theta_{ik} - b_8 [(c_8 - \ln \delta_{ik}) (\delta_{ik})^8 \cos 8\theta_{ik} + \theta_{ik} (\delta_{ik})^8 \sin 8\theta_{ik}] + \dots \right\} \quad (\text{Henry / km}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Sendo:

$$\delta_{ik} = 4\pi\sqrt{5} \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\rho}} D_{ik} \quad (5.13)$$

D_{ik} Distância média geométrica entre o condutor i e a imagem do condutor k , descrita na Figura 5.7.

Deste modo a matriz de impedâncias de uma linha, com condutores múltiplos, em que há o retorno de corrente através do solo é escrita como sendo:

$$[Z_{\text{solo}}] = \begin{bmatrix} Z_{\text{solo}_{11}} & Z_{\text{solo}_{12}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{1n}} \\ Z_{\text{solo}_{21}} & Z_{\text{solo}_{22}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{\text{solo}_{n1}} & Z_{\text{solo}_{n2}} & \cdots & Z_{\text{solo}_{nn}} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

A matriz de impedância $[Z_{\text{solo}}]$ pode ser decomposta em uma componente real e outra imaginária, resultando em:

$$[Z_{\text{solo}}] = [R_{\text{solo}}(\omega)] + j\omega[L_{\text{solo}}(\omega)] \quad (5.15)$$

Na equação (5.15) $[R_{\text{solo}}(\omega)]$ é a matriz de resistências devido ao efeito solo enquanto que $[L_{\text{solo}}(\omega)]$ é a matriz de indutâncias devido ao efeito solo.

As matrizes $[R_{\text{solo}}(\omega)]$ e $[L_{\text{solo}}(\omega)]$ são variáveis em relação à frequência.

5.6 ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS

Considere um sistema de n condutores múltiplos, representados pelos condutores equivalentes mostrados na Figura 5.6.

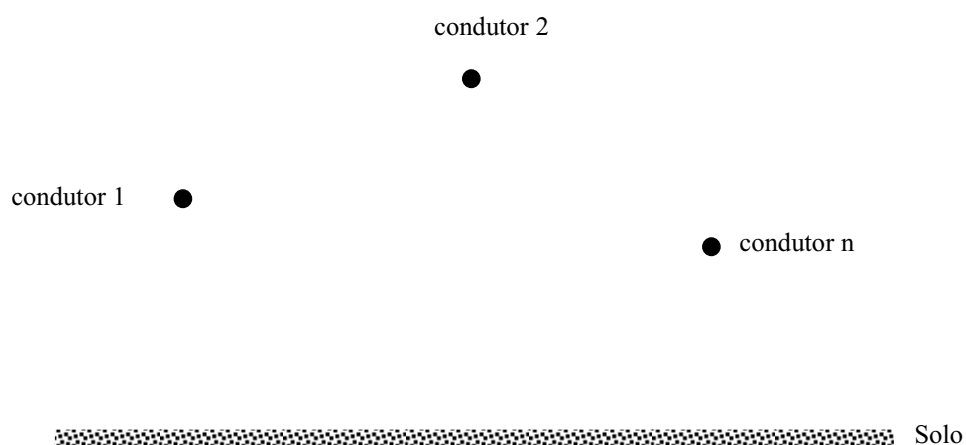


Figura 5.6 - Sistema de n condutores múltiplos

No capítulo 4 foi mostrado que a matriz de potencial do sistema mostrado na Figura 5.6 é dada por:

$$[A] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Na equação (5.16) têm-se:

D_{ik} Distância média geométrica entre o condutor i e a imagem do condutor k ;

d_{ik} Distância média geométrica entre os condutores i e k ;

r_i Raio médio geométrico do condutor i .

A matriz de capacitâncias associada aos condutores múltiplos mostrados na Figura 5.6 é dada por:

$$[C] = [A]^{-1} \quad (5.17)$$

Assumindo que a condutância do ar é desprezível, conclui-se que a matriz de admitâncias transversais de uma linha de transmissão é dada por:

$$[Y] = j\omega[C] \quad (5.18)$$

Na expressão (5.18) $[C]$ é a matriz de capacitâncias obtida a partir da equação (5.17).

5.7 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO USO DO RMG E DMG

Considere um condutor múltiplo disposto sobre um solo não ideal, conforme mostra a Figura 5.7.

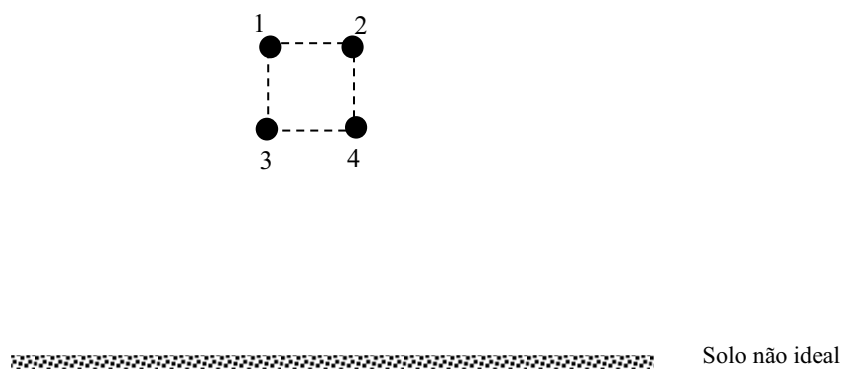


Figura 5.7 - Condutor múltiplo disposto sobre um solo não ideal

Verificou-se neste capítulo que o condutor múltiplo mostrado na Figura 5.7 pode ser representado por um único condutor equivalente com raio igual ao raio médio geométrico do condutor múltiplo. Para chegar a este resultado é necessário considerar que a corrente total no condutor múltiplo mostrado na Figura 5.7 divide-se igualmente entre todos os subcondutores que constituem o condutor múltiplo (FUCHS, 1979).

No entanto, para que a corrente seja dividida igualmente entre todos os subcondutores é necessário que os mesmos possuam impedâncias iguais.

Observando a Figura 5.7 verifica-se que:

- Os condutores não estão todos à mesma altura em relação ao solo;
- Os condutores não estão igualmente espaçados.

As duas observações feitas anteriormente fazem com que as impedâncias destes condutores não sejam exatamente iguais.

No entanto, devido ao fato de que o quadrado que dá sustentação aos subcondutores é de dimensões relativamente pequenas, consideram-se estes subcondutores com impedâncias idênticas, podendo-se considerar a corrente dividida igualmente entre os mesmos.

5.8 APLICAÇÃO EM UMA LINHA TRIFÁSICA DE 440 KV

A figura 5.8 mostra uma linha trifásica, de circuito simples, de 440 kV.

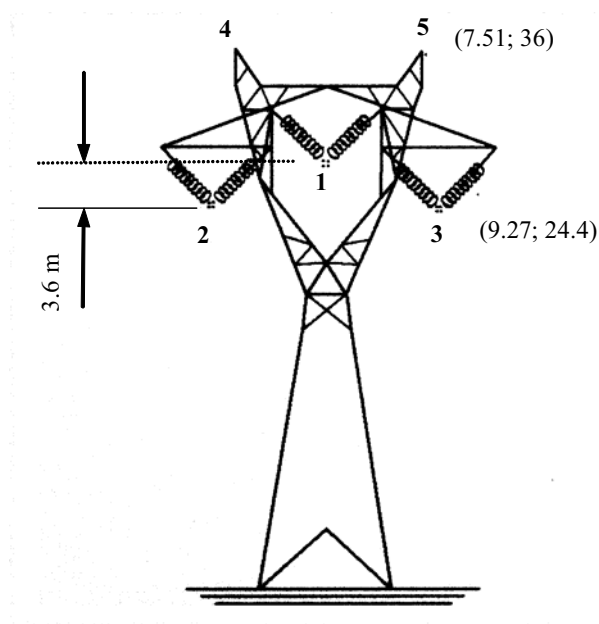


Figura 5.8 - Linha de transmissão trifásica de circuito simples

A linha mostrada na figura 5.8 é uma linha de transmissão trifásica cujas fases 1, 2 e 3 são constituídas de 4 subcondutores do tipo Grosbeak. Os condutores 4 e 5 são os cabos pára-raios do tipo EHS-3/8". Considerou-se que a resistividade do solo em que está a linha é 1000 ohms.m (TAVARES et al., 1998).

Para a linha mostrada na Figura 5.8, foram calculadas as indutâncias externas e as capacitâncias e também as resistências e indutâncias devido ao efeito solo. Os condutores múltiplos foram representados por condutores equivalentes cujos raios são definidos como sendo o raio médio geométrico de cada condutor múltiplo.

Para a implementação dos programas utilizou-se o software Matlab 5.3.

Obtiveram-se os seguintes valores, utilizando a linha mostrada na Figura 5.8, para as indutâncias externas das fases:

$$[L_{\text{ext}}] = \begin{bmatrix} 1.1544 & 0.3355 & 0.3355 \\ 0.3355 & 1.1269 & 0.2070 \\ 0.3355 & 0.2070 & 1.1269 \end{bmatrix} \text{ (H/km)}$$

Obtiveram-se os seguintes valores, utilizando a linha mostrada na Figura 5.8, para as capacitâncias das fases:

$$[C] = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.1343 & -0.0377 & -0.0377 \\ -0.0377 & 0.1282 & -0.0141 \\ -0.0377 & -0.0141 & 0.1282 \end{bmatrix} \text{ (F/km)}$$

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram as resistências próprias e mútuas da linha, devido ao efeito solo.

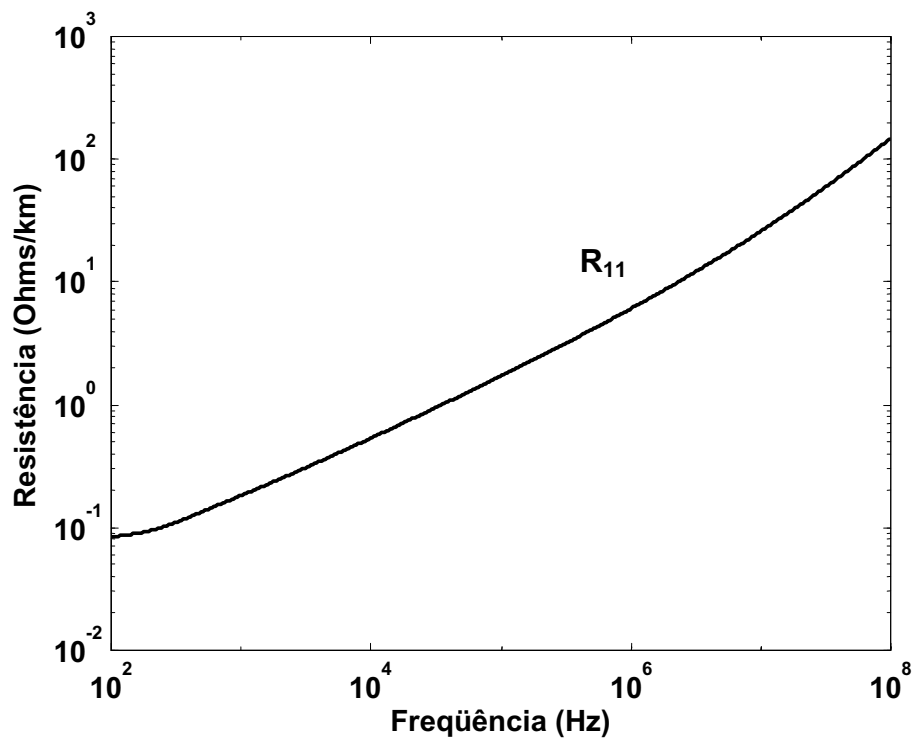


Figura 5.9 - Resistências próprias da fase 1 devido ao efeito solo

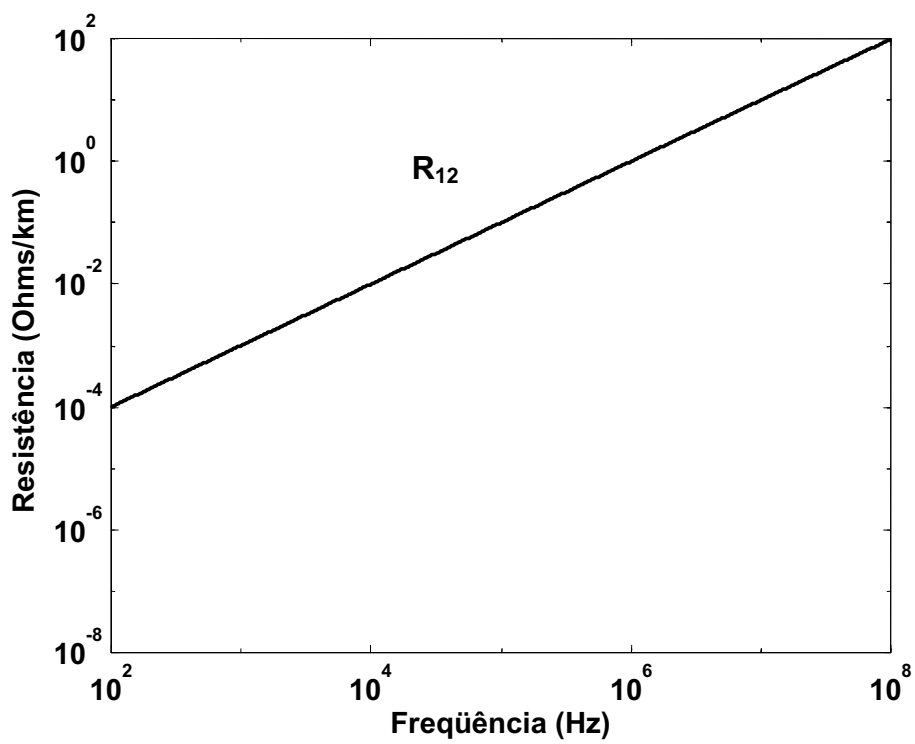


Figura 5.10 – Resistências mútuas entre as fases 1 e 2 devido ao efeito solo

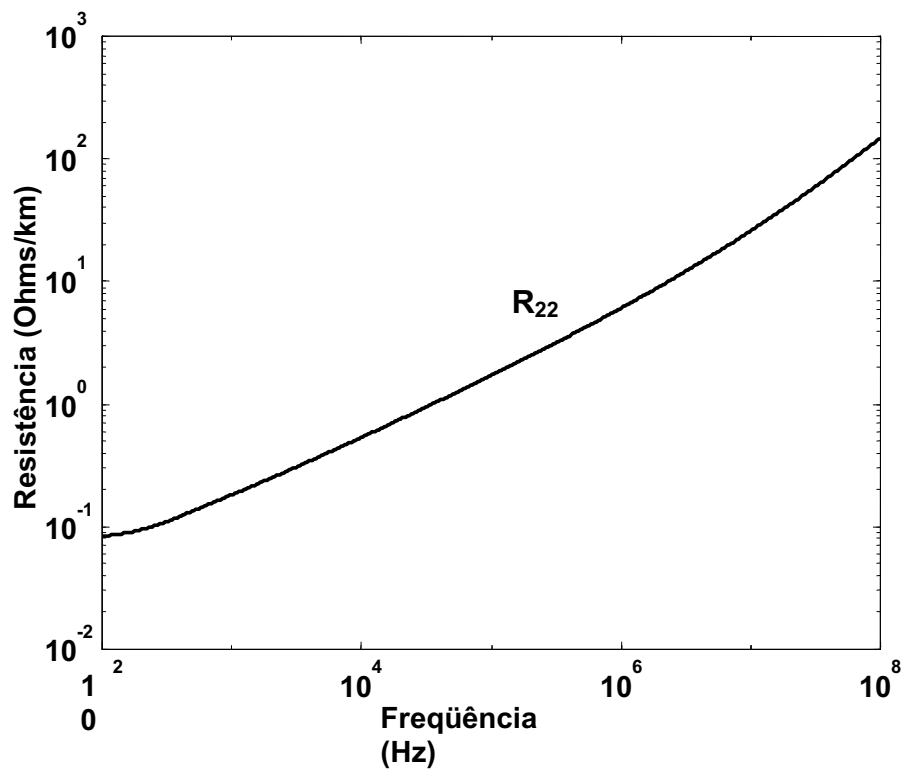


Figura 5.11 - Resistências próprias da fase 2 devido ao efeito solo

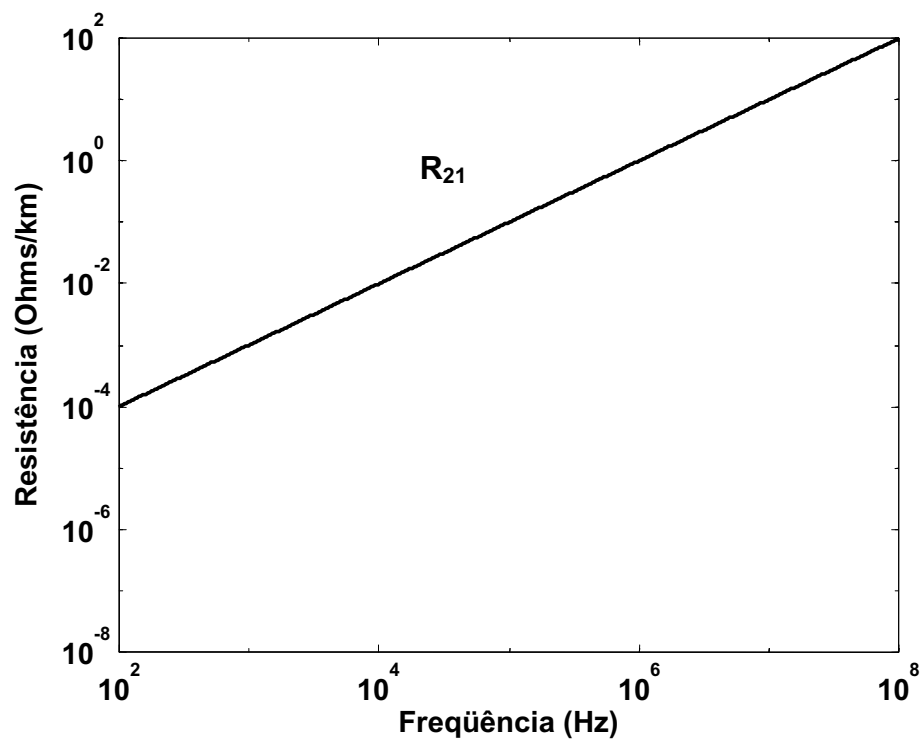


Figura 5.12 – Resistências mútuas entre as fases 2 e 1 devido ao efeito solo

As Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 mostram as indutâncias próprias e mútuas da linha, devido ao efeito solo.

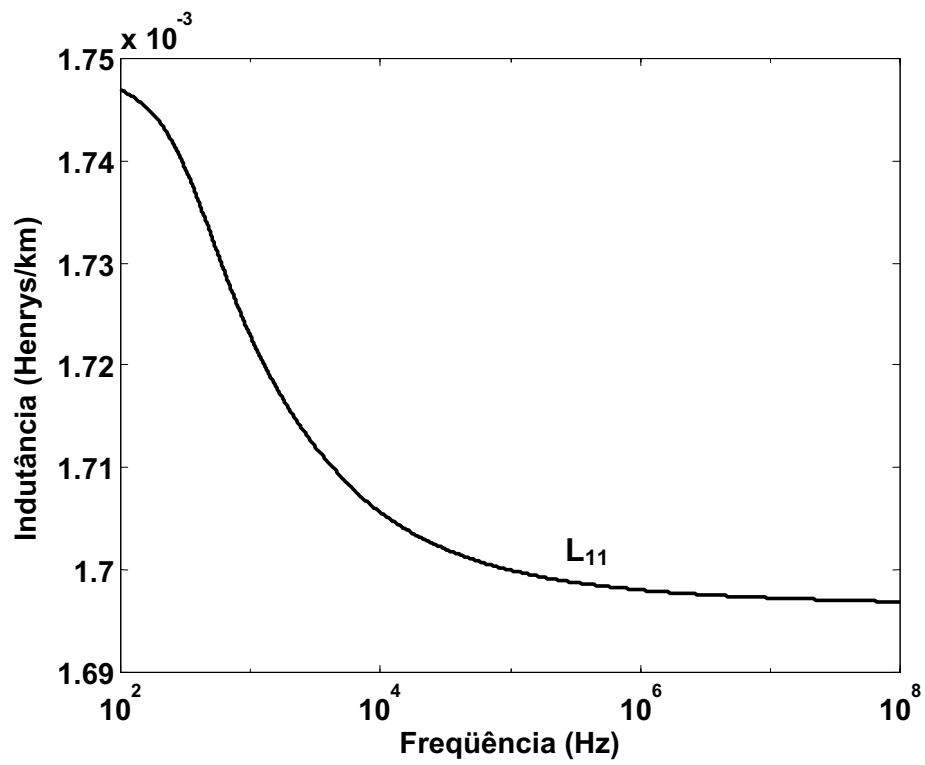


Figura 5.13 - Indutâncias próprias da fase 1 devido ao efeito solo

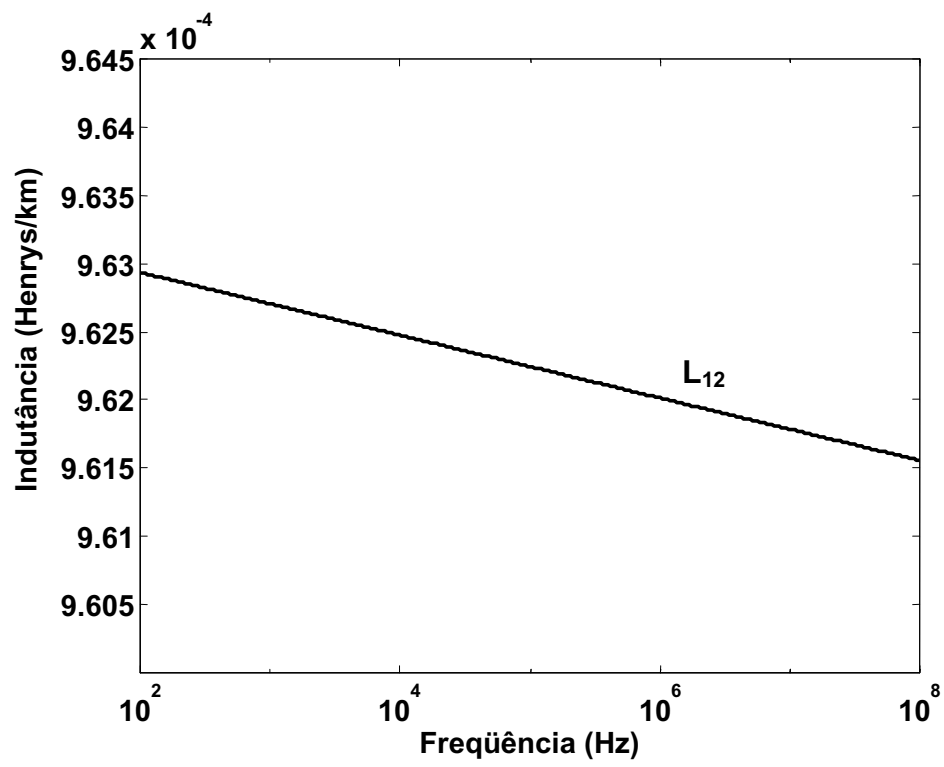


Figura 5.14 - Indutâncias mútuas entre as fases 1 e 2 devido ao efeito solo

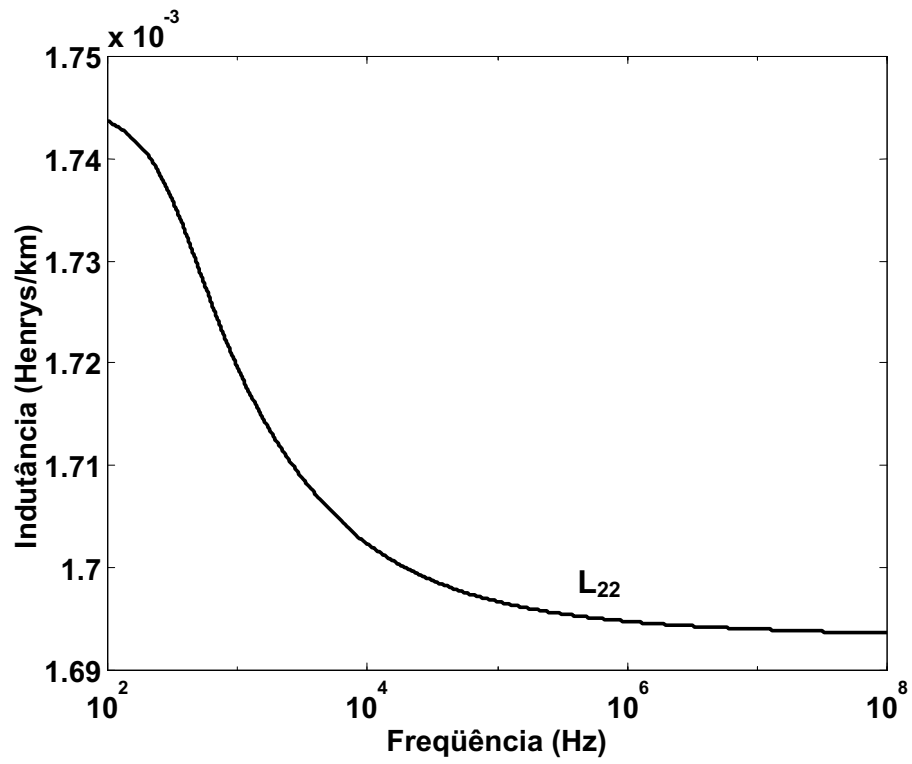


Figura 5.15 - Indutâncias próprias da fase 2 devido ao efeito solo

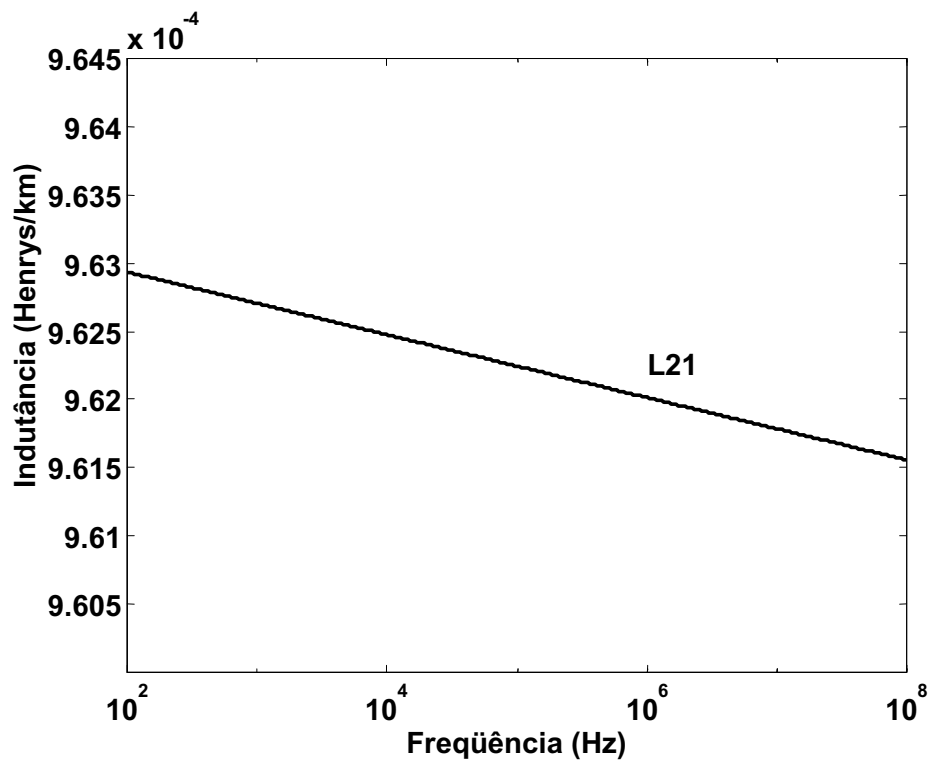


Figura 5.16 - Indutâncias mútuas entre as fases 2 e 1 devido ao efeito solo

5.9 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi feito um estudo dos parâmetros de linhas de transmissão constituídas de condutores múltiplos. Verificou-se que um condutor múltiplo pode ser representado por um único condutor equivalente cujo raio é o raio médio geométrico do grupo de subcondutores.

No cálculo dos parâmetros longitudinais e transversais da linha de transmissão, considerada neste capítulo, os valores do RMG e DMG foram substituídos nas equações que determinam os parâmetros longitudinais e transversais de uma linha de transmissão.

Como exemplo, calculou-se os parâmetros de uma linha trifásica de 440 kV, de circuito simples, considerando o efeito do solo.

6 ASSOCIAÇÃO PARALELA DOS SUBCONDUTORES DE UM CONDUTOR MÚLTIPLO

6.1 INTRODUÇÃO

No capítulo 5 foi mostrado que um condutor múltiplo pode ser representado por um condutor equivalente cujo raio é dado pelo raio médio geométrico RMG dos subcondutores que constituem o condutor múltiplo.

O cálculo do raio médio geométrico de um condutor múltiplo parte da hipótese de que a corrente que percorre o mesmo divide-se igualmente entre todos os subcondutores, ou seja, considera-se que as impedâncias de todos os subcondutores são iguais.

No entanto, esses subcondutores não estão todos a uma mesma altura do solo e também não estão igualmente espaçados. Nestas condições, a corrente não se distribui igualmente entre todos os subcondutores e, teoricamente, não é possível afirmar que o condutor equivalente possua um raio dado pelo raio médio geométrico da associação de subcondutores.

Neste capítulo pretende-se determinar a impedância longitudinal a e admitância transversal resultantes de um condutor múltiplo, levando em consideração as características dos mesmos, ou seja, considerando que os subcondutores não estão todos a uma mesma altura

do solo e também não estão igualmente espaçados. Para isso serão desenvolvidas equações para um condutor múltiplo genérico constituído de dois subcondutores.

6.2 REPRESENTAÇÃO DE UM CONDUTOR MÚLTIPLO POR MEIO DE UM ÚNICO CONDUTOR

6.2.1 Descrição geral

Considere um condutor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores, cujos parâmetros longitudinais e transversais são conhecidos, disposto sobre um solo não ideal conforme mostra a Figura 6.1.

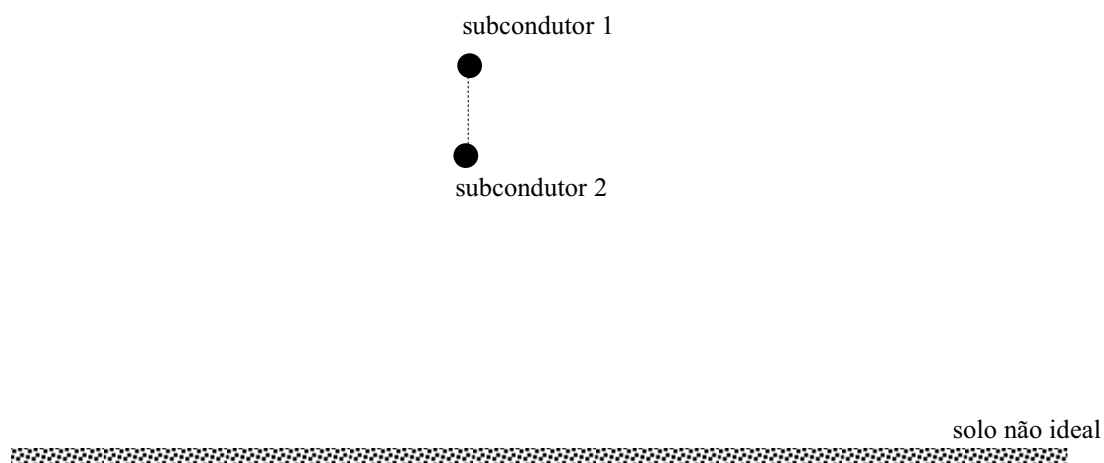


Figura 6.1 - Condutor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores

Na Figura 6.1 os extremos dos subcondutores estão unidos, de modo que os mesmos resultem em uma associação paralela, conforme mostra a Figura 6.2.

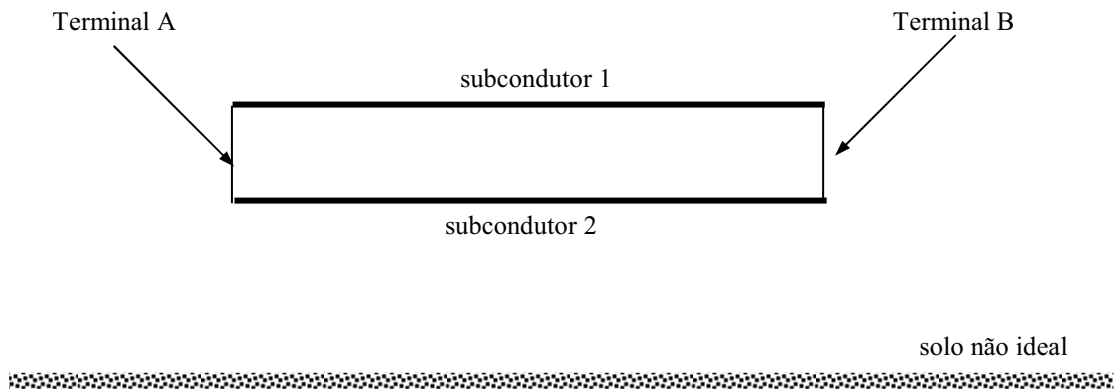


Figura 6.2 - Associação paralela de dois condutores vista de outro ângulo

O sistema mostrado na Figura 6.3 pode ser substituído por um condutor equivalente.

Para se determinar os parâmetros do condutor equivalente ao sistema de subcondutores mostrado nas Figuras 6.2 e 6.3, considere então uma tensão V_A aplicada no terminal A do sistema, considerando o terminal B em aberto, conforme mostra a Figura 6.3.

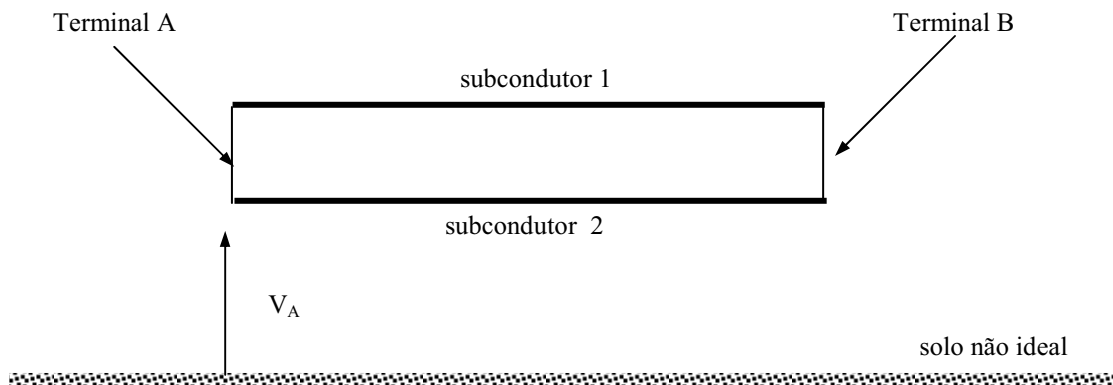


Figura 6.3 - Tensão aplicada no terminal A do sistema

A aplicação de uma tensão V_A no terminal A do sistema resultará em correntes nos terminais A e B dos dois subcondutores e também em uma tensão V_B no terminal B, conforme mostra a Figura 6.4.

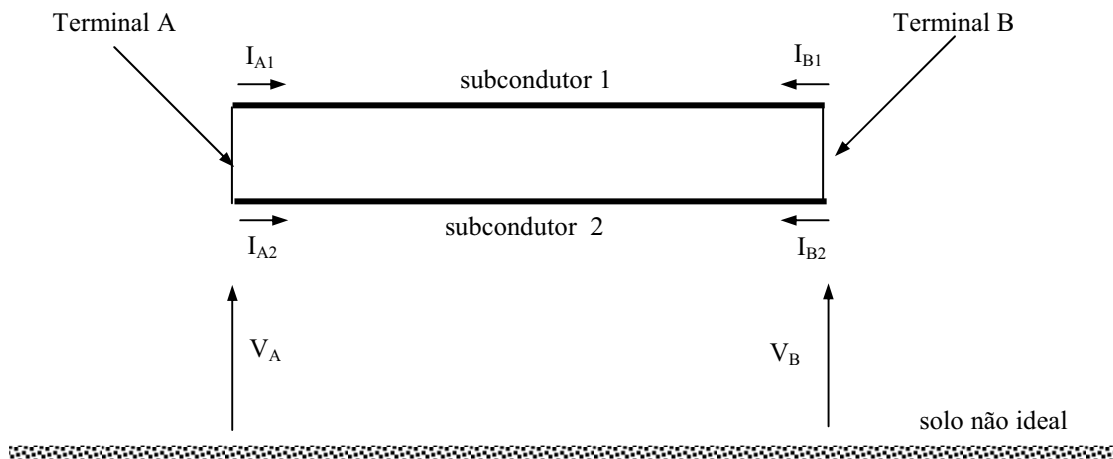


Figura 6.4 – Correntes e tensões nos terminais A e B do sistema

Na Figura 6.4 as grandezas I_{A1} e I_{A2} são as correntes saindo do terminal A nos subcondutores 1 e 2, respectivamente enquanto que I_{B1} e I_{B2} são as correntes dos subcondutores no terminal B. As grandezas V_A e V_B são as tensões nos subcondutores 1 e 2 nos terminais A e B, respectivamente.

Considerando que o terminal B do sistema mostrado na Figura 6.4 está em aberto, pode-se escrever:

$$I_{B1} = -I_{B2} \quad (6.1)$$

A partir da tensão V_A é possível obter as correntes nos terminais A e B dos dois subcondutores e também a tensão V_B . Uma vez conhecidas as correntes e tensões nos terminais A e B do sistema, pode-se substituí-lo por um condutor equivalente, conforme mostra a Figura 6.5.

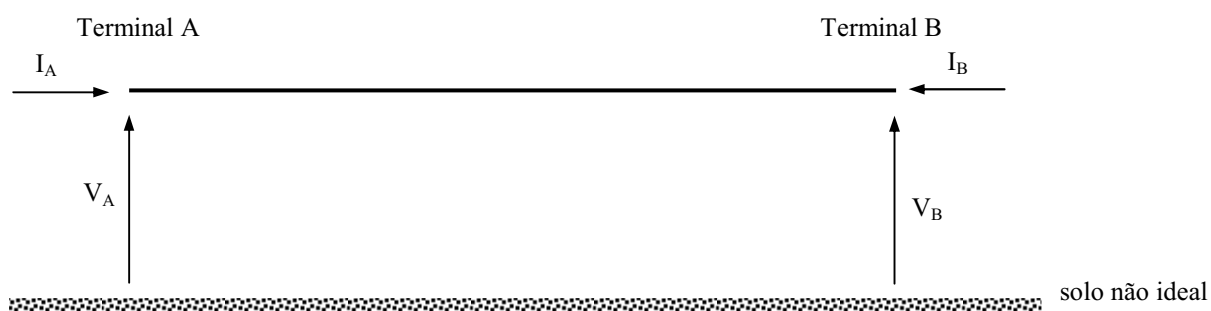


Figura 6.5 – Condutor equivalente ao sistema de dois subcondutores

Para que o condutor mostrado na Figura 6.5 seja equivalente ao sistema de dois subcondutores, mostrada na Figura 6.4, as seguintes relações devem ser obedecidas:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} \quad (6.2)$$

$$I_B = 0 \quad (6.3)$$

Neste trabalho será considerado que os parâmetros dos subcondutores do sistema mostrado na Figura 6.4 estão uniformemente distribuídos ao longo do comprimento dos mesmos. Deste modo, o condutor equivalente terá o comportamento de uma linha de transmissão monofásica cujas correntes e tensões em seus terminais obedecem às seguintes relações (DOMMEL, 1996).

$$V_A = V_B \cosh(\sqrt{ZY} d) - I_B \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh(\sqrt{ZY} d) \quad (6.4)$$

$$I_A = -I_B \cosh(\sqrt{ZY} d) + V_B \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh(\sqrt{ZY} d) \quad (6.5)$$

Substituindo a equação (6.3) nas equações (6.4) e (6.5) as mesmas tornam-se:

$$V_A = V_B \cosh(\sqrt{ZY} d) \quad (6.6)$$

$$I_A = V_B \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh(\sqrt{ZY} d) \quad (6.7)$$

Considerando que nas equações (6.6) e (6.7) as grandezas V_A , V_B e I_A são conhecidos, é possível obter a impedância longitudinal Z e a admitância transversal Y do condutor equivalente ao sistema de dois subcondutores.

O processo de obtenção dos parâmetros deste condutor equivalente pode ser dividido então em 04 etapas, conforme mostra o diagrama da Figura 6.6.

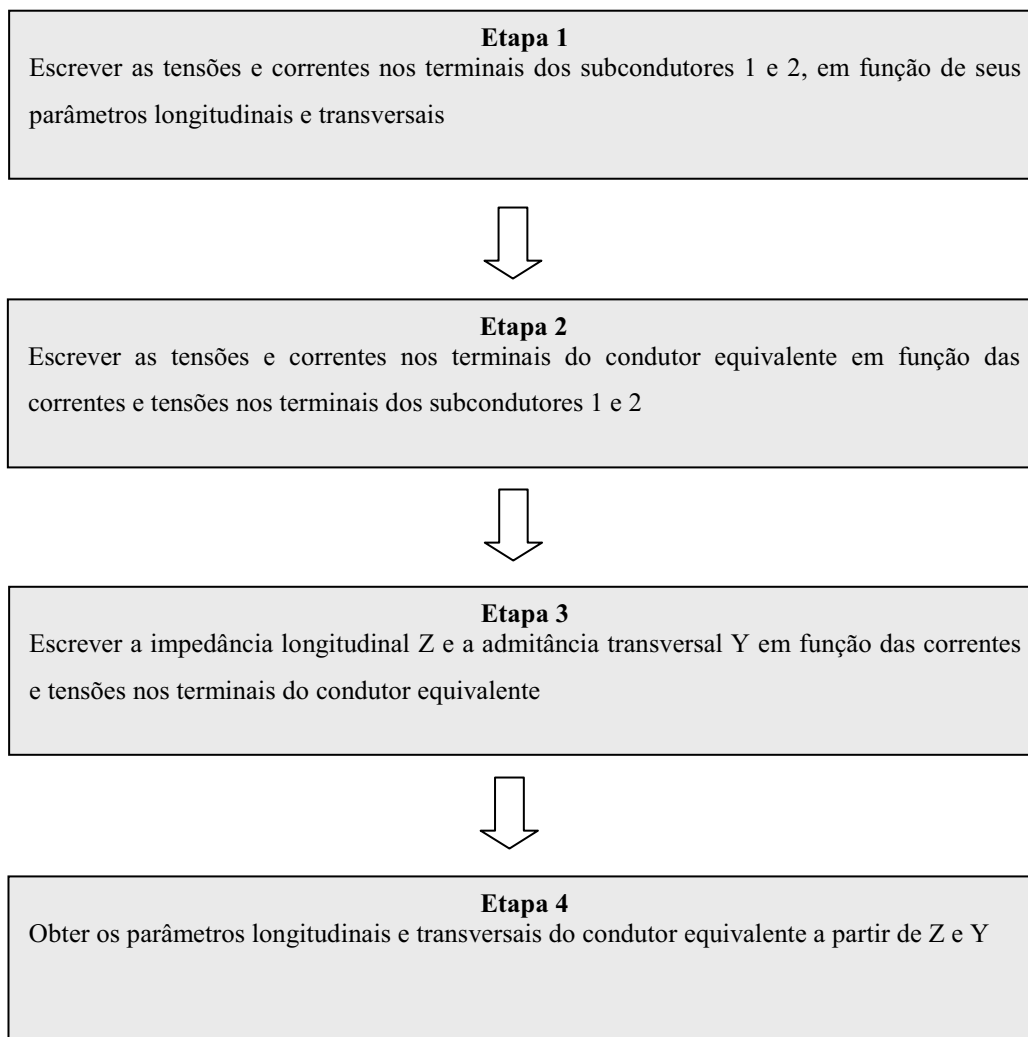


Figura 6.6 – Processo de obtenção dos parâmetros do condutor equivalente

Cada uma das etapas mostradas na Figura 6.6 será descrita detalhadamente em seguida.

6.2.2 Obtenção dos parâmetros do condutor equivalente em função dos parâmetros dos subcondutores

A Figura 6.7 mostra um condutor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores.

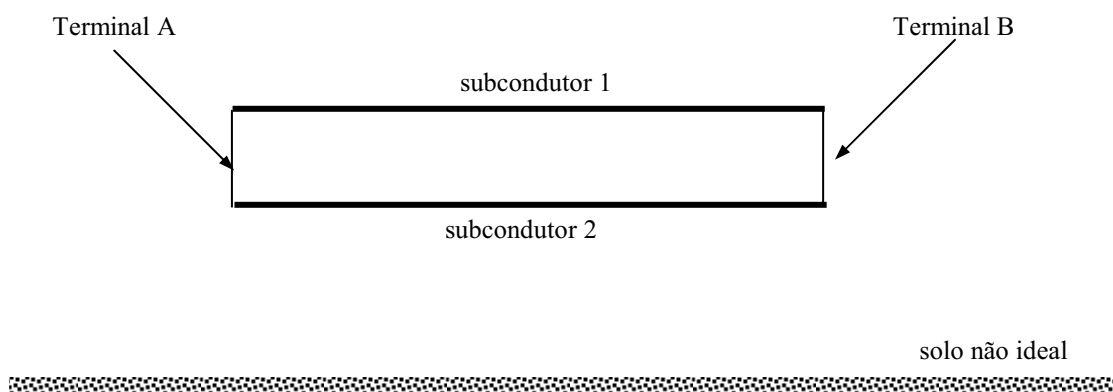


Figura 6.7 – Condutor múltiplo constituído por dois subcondutores

Considerando que em cada um dos dois subcondutores, mostrado na Figura 6.7, os parâmetros longitudinais e transversais estão uniformemente distribuídos ao longo de seus comprimentos, pode-se escrever as matrizes de impedância longitudinais $[Z]$ e de admitância transversais $[Y]$ do sistema como sendo:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Aplicando-se uma tensão V_A no terminal A do sistema mostrado na Figura 6.7, mantendo o terminal B em aberto, irão surgir correntes nos terminais A e B do mesmo, conforme mostra a Figura 6.8.

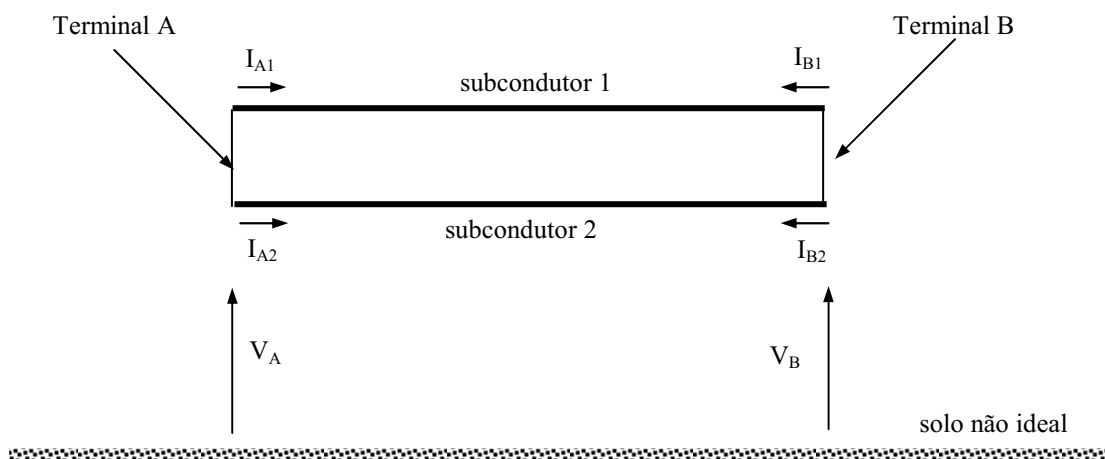


Figura 6.8 – Correntes e tensões nos terminais A e B do sistema

Considerando que o terminal B está aberto, as correntes e tensões nos terminais A e B do sistema mostrado na Figura 6.8 são escritas como sendo:

$$[I_A] = \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} ; [I_B] = \begin{bmatrix} I_{B1} \\ -I_{B1} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$[V_A] = \begin{bmatrix} V_A \\ V_A \end{bmatrix} ; [V_B] = \begin{bmatrix} V_B \\ V_B \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

A relação entre as correntes e tensões nos subcondutores 1 e 2 do sistema, mostrado na Figura 6.8, será obtida a partir da representação da mesma no domínio modal (WEDEPOHL et al., 1996).

O uso do domínio modal neste caso é bastante útil, pois permite representar o sistema de dois subcondutores por meio de seus modos de propagação, sendo que os mesmos comportam-se como dois subcondutores desacoplados um do outro. Nestas condições, podem-se aplicar as equações (6.4) e (6.5) para cada um dos modos e obter, então, a relação entre as correntes e tensões nos terminais dos mesmos.

O sistema mostrado na Figura 6.8 pode ser separado em seus modos de propagação por meio de uma matriz de transformação modal $[T_1]$ escrita como sendo:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Na equação (6.12) as colunas da matriz $[T_1]$ são os autovetores associados aos autovalores do produto $[Y][Z]$ (WEDEPOHL et al., 1996).

Quando um sistema de n condutores acoplados é separado em seus n modos de propagação, cada um destes modos comporta-se como n condutores desacoplados uns dos outros. Neste caso, diz-se que o sistema está representado no domínio modal.

As correntes e tensões nos terminais A e B da linha, no domínio modal, são escritas como sendo (BUDNER et al., 1970):

$$[I_{mA}] = [T_1]^{-1}[I_A] \quad ; \quad [I_{mB}] = [T_1]^{-1}[I_B] \quad (6.13)$$

$$[V_{mA}] = [T_1]^T [V_A] \quad ; \quad [V_{mB}] = [T_1]^T [V_B] \quad (6.14)$$

A equação (6.13) pode-se ser escrita como:

$$[I_A] = [T_1][I_{mA}] \quad ; \quad [I_B] = [T_1][I_{mB}] \quad (6.15)$$

Nas equações (6.13), (6.14) e (6.15) os vetores $[I_{mA}]$ e $[I_{mB}]$ são as correntes nos terminais A e B escritas no domínio modal enquanto que os vetores $[V_{mA}]$ e $[V_{mB}]$ são as tensões nos terminais A e B escritas no domínio modal. A matriz $[T_1]^T$ é a transposta da matriz $[T_1]$ e $[T_1]^{-T}$ é a inversa de $[T_1]^T$.

Substituindo as equações (6.10) e (6.12) na equação (6.15) é possível obter:

$$[I_A] = \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mA1} \\ I_{mA2} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

$$[I_B] = \begin{bmatrix} I_{B1} \\ -I_{B1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mB1} \\ I_{mB2} \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Nas equações (6.16) e (6.17) os termos I_{mA1} e I_{mA2} são as correntes dos modos 1 e 2, respectivamente, no terminal A enquanto que os elementos I_{mB1} e I_{mB2} são as correntes dos modos 1 e 2, respectivamente, no terminal B.

Substituindo as equações (6.11) e (6.12) na equação (6.14) obtém-se:

$$[V_{mA}] = \begin{bmatrix} V_{mA1} \\ V_{mA2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_A \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

$$[V_{mB}] = \begin{bmatrix} V_{mB1} \\ V_{mB2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ V_B \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

No domínio modal, as matrizes de impedâncias longitudinais e de admitâncias transversais da linha mostrada na Figura 6.8 são escritas como sendo (WEDEPOHL, 1996):

$$[Z_m] = [T_1]^T [Z] [T_1] \quad (6.20)$$

$$[Y_m] = [T_1]^{-1} [Y] [T_1]^{-T} \quad (6.21)$$

Nas equações (6.20) e (6.21) as matrizes $[Z_m]$ e $[Y_m]$ são as impedâncias longitudinais e as admitâncias transversais, respectivamente, escritas no domínio modal.

Sabe-se que a partir das equações (6.20) e (6.21) pode-se escrever $[Z_m]$ e $[Y_m]$ como sendo (WEDEPOHL et al., 1996):

$$[Z_m] = \begin{bmatrix} Z_{m1} & 0 \\ 0 & Z_{m2} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

$$[Y_m] = \begin{bmatrix} Y_{m1} & 0 \\ 0 & Y_{m2} \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Observa-se, nas equações (6.22) e (6.23), que $[Z_m]$ e $[Y_m]$ são matrizes diagonais, não existindo assim acoplamento entre os dois modos de propagação. Portanto, os dois modos de propagação comportam-se como dois subcondutores independentes conforme mostra a Figura 6.9.

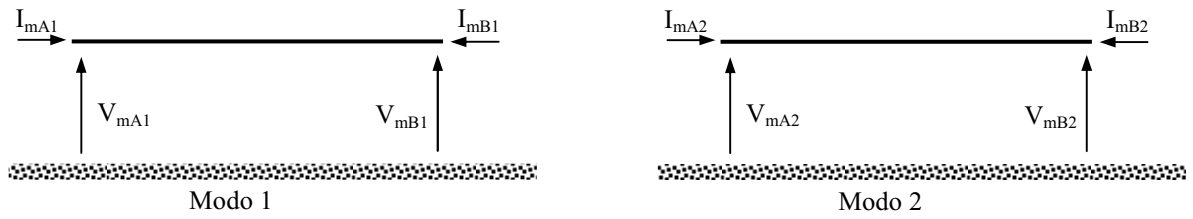


Figura 6.9 - Modos de propagação do sistema de dois subcondutores

Para o modo 1 pode-se escrever (BUDNER et al., 1970):

$$V_{mA1} = V_{mB1} \cosh(\gamma_{m1} d) - I_{mB1} Z_{c_{m1}} \sinh(\gamma_{m1} d) \quad (6.24)$$

$$I_{mA1} = -I_{mB1} \cosh(\gamma_{m1} d) + V_{mB1} \frac{1}{Z_{c_{m1}}} \sinh(\gamma_{m1} d) \quad (6.25)$$

Analogamente, para o modo 2 têm-se:

$$V_{mA2} = V_{mB2} \cosh(\gamma_{m2} d) - I_{mB2} Z_{c_{m2}} \sinh(\gamma_{m2} d) \quad (6.26)$$

$$I_{mA2} = -I_{mB2} \cosh(\gamma_{m2} d) + V_{mB2} \frac{1}{Z_{c_{m2}}} \sinh(\gamma_{m2} d) \quad (6.27)$$

Os termos γ_{m1} e γ_{m2} são as funções de propagação enquanto que os elementos $Z_{c_{m1}}$ e $Z_{c_{m2}}$ são as impedâncias características dos modos 1 e 2, respectivamente, sendo escritos como sendo (DUFOUR et al., 1996):

$$\gamma_{m1} = \sqrt{Z_{m1} Y_{m1}} \quad (6.28)$$

$$\gamma_{m2} = \sqrt{Z_{m2} Y_{m2}} \quad (6.29)$$

$$Z_{c_{m1}} = \sqrt{\frac{Z_{m1}}{Y_{m1}}} \quad (6.30)$$

$$Z_{c_{m2}} = \sqrt{\frac{Z_{m2}}{Y_{m2}}} \quad (6.31)$$

Isolando o termo I_{mB1} na equação (6.24) e, em seguida, substituindo-o na equação (6.25) obtém-se:

$$I_{mA1} = V_{mA1} \left(\frac{\cosh(\gamma_{m1} d)}{Z_{c_{m1}} \sinh(\gamma_{m1} d)} \right) + V_{mB1} \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m1} d)}{Z_{c_{m1}} \sinh(\gamma_{m1} d)} + \frac{1}{Z_{c_{m1}}} \sinh(\gamma_{m1} d) \right) \quad (6.32)$$

Isolando o termo I_{mB2} na equação (6.26) e, em seguida, substituindo-o na equação (6.27) obtém-se:

$$I_{mA2} = V_{mA2} \left(\frac{\cosh(\gamma_{m2} d)}{Z_{c_{m2}} \sinh(\gamma_{m2} d)} \right) + V_{mB2} \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m2} d)}{Z_{c_{m2}} \sinh(\gamma_{m2} d)} + \frac{1}{Z_{c_{m2}}} \sinh(\gamma_{m2} d) \right) \quad (6.33)$$

Desenvolvendo as equações (6.18) e (6.19) pode-se obter:

$$V_{mA1} = (T_{11} + T_{21}) V_A \quad (6.34)$$

$$V_{mA2} = (T_{12} + T_{22}) V_A \quad (6.35)$$

$$V_{mB1} = (T_{11} + T_{21}) V_B \quad (6.36)$$

$$V_{mB2} = (T_{12} + T_{22}) V_B \quad (6.37)$$

Substituindo as equações (6.34) e (6.36) na equação (6.32) obtém-se:

$$I_{mA1} = \alpha_1 V_A + \alpha_2 V_B \quad (6.38)$$

Sendo:

$$\alpha_1 = \left(\frac{\cosh(\gamma_{m1} d)}{Zc_{m1} \sinh(\gamma_{m1} d)} \right) (T_{11} + T_{21}) \quad (6.39)$$

$$\alpha_2 = \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m1} d)}{Zc_{m1} \sinh(\gamma_{m1} d)} + \frac{1}{Zc_{m1}} \sinh(\gamma_{m1} d) \right) (T_{11} + T_{21}) \quad (6.40)$$

Substituindo as equações (6.35) e (6.37) na equação (6.33) obtém-se:

$$I_{mA2} = \alpha_3 V_A + \alpha_4 V_B \quad (6.41)$$

Sendo

$$\alpha_3 = \left(\frac{\cosh(\gamma_{m2} d)}{Zc_{m2} \sinh(\gamma_{m2} d)} \right) (T_{12} + T_{22}) \quad (6.42)$$

$$\alpha_4 = \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m2} d)}{Zc_{m2} \sinh(\gamma_{m2} d)} + \frac{1}{Zc_{m2}} \sinh(\gamma_{m2} d) \right) (T_{12} + T_{22}) \quad (6.43)$$

Desenvolvendo a expressão (6.16) pode-se escrever:

$$I_{A1} = T_{11} I_{mA1} + T_{12} I_{mA2} \quad (6.44)$$

$$I_{A2} = T_{21} I_{mA1} + T_{22} I_{mA2} \quad (6.45)$$

Substituindo as equações (6.38) e (6.41) nas equações (6.44) e (6.45) obtém-se:

$$I_{A1} = (T_{11} \alpha_1 + T_{12} \alpha_3) V_A + (T_{11} \alpha_2 + T_{12} \alpha_4) V_B \quad (6.46)$$

$$I_{A2} = (T_{21} \alpha_1 + T_{22} \alpha_3) V_A + (T_{21} \alpha_2 + T_{22} \alpha_4) V_B \quad (6.47)$$

As equações (6.46) e (6.47) mostram as correntes nos subcondutores 1 e 2, no terminal A do sistema mostrado na Figura 6.8, expressas em função das tensões nos terminais A e B.

A corrente no terminal A do condutor equivalente, mostrado na Figura 6.5, deve ser igual à soma das correntes no terminal A dos subcondutores 1 e 2 mostrados na Figura 6.8. Deste modo, conforme mostrado na equação (6.2), pode-se escrever:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} \quad (6.48)$$

Na equação (6.48) I_A é a corrente no terminal A do condutor equivalente mostrado na Figura 6.5.

Substituindo as equações (6.46) e (6.47) na equação (6.48) obtém-se:

$$I_A = [(T_{11} + T_{21})\alpha_1 + (T_{12} + T_{22})\alpha_3] V_A + [(T_{11} + T_{21})\alpha_2 + (T_{12} + T_{22})\alpha_4] V_B \quad (6.49)$$

Substituindo as equações (6.39), (6.40), (6.42) e (6.43) na equação (6.49), a mesma torna-se:

$$I_A = K_1 V_A + K_2 V_B \quad (6.50)$$

Sendo

$$K_1 = \left(\frac{\cosh(\gamma_{m1} d)}{Zc_{m1} \sinh(\gamma_{m1} d)} \right) (T_{11} + T_{21})^2 + \left(\frac{\cosh(\gamma_{m2} d)}{Zc_{m2} \sinh(\gamma_{m2} d)} \right) (T_{12} + T_{22})^2 \quad (6.51)$$

$$K_2 = \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m1} d)}{Zc_{m1} \sinh(\gamma_{m1} d)} + \frac{1}{Zc_{m1}} \sinh(\gamma_{m1} d) \right) (T_{11} + T_{21})^2 + \left(-\frac{\cosh^2(\gamma_{m2} d)}{Zc_{m2} \sinh(\gamma_{m2} d)} + \frac{1}{Zc_{m2}} \sinh(\gamma_{m2} d) \right) (T_{12} + T_{22})^2 \quad (6.52)$$

Substituindo a equação (6.6) na equação (6.50) obtém-se:

$$I_A = K_1 \cosh(\sqrt{ZY} d) V_B + K_2 V_B \quad (6.53)$$

Igualando as expressões (6.53) e (6.7) obtém-se:

$$K_1 \cosh(\gamma d) - \frac{1}{Zc} \sinh(\gamma d) + K_2 = 0 \quad (6.54)$$

Sendo

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (6.55)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (6.56)$$

Na expressão (6.54) γ e Z_c são, respectivamente, a função de propagação e a impedância característica do condutor equivalente.

Para obter uma outra equação referente aos parâmetros do condutor equivalente, deve-se utilizar a equação que relaciona a corrente no terminal B dos dois subcondutores do sistema mostrado na Figura 6.8. Para isso, pode-se reescrever a equação (6.17), ou seja:

$$[\mathbf{I}_B] = \begin{bmatrix} I_{B1} \\ -I_{B1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mB1} \\ I_{mB2} \end{bmatrix} \quad (6.57)$$

Desenvolvendo a equação (6.57) pode-se obter:

$$I_{B1} = T_{11} I_{mB1} + T_{12} I_{mB2} \quad (6.58)$$

$$-I_{B1} = T_{21} I_{mB1} + T_{22} I_{mB2} \quad (6.59)$$

A soma das equações (6.58) e (6.59) resulta em:

$$T_{11} I_{mB1} + T_{12} I_{mB2} + T_{21} I_{mB1} + T_{22} I_{mB2} = 0 \quad (6.60)$$

Nas equações (6.25) e (6.27) pode-se isolar, em um dos membros destas equações, os termos I_{mB1} e I_{mB2} , respectivamente. Em seguida, substituindo estes termos na equação (6.60) obtém-se:

$$\begin{aligned} & -V_{mB1} (T_{11} + T_{21}) \frac{\cosh(\gamma_{m1} d)}{Zc_{m1}} - V_{mB2} (T_{12} + T_{22}) \frac{\cosh(\gamma_{m2} d)}{Zc_{m2}} \\ & + (T_{11} + T_{21}) \frac{V_{mA1}}{Zc_{m1}} + (T_{12} + T_{22}) \frac{V_{mA2}}{Zc_{m2}} = 0 \end{aligned} \quad (6.61)$$

Substituindo as equações (6.34)-(6.37) na equação (6.61) é possível obter a seguinte expressão:

$$K_3 V_A - K_4 V_B = 0 \quad (6.62)$$

Sendo

$$K_3 = \frac{(T_{11} + T_{12})^2}{Zc_{m1}} + \frac{(T_{12} + T_{22})^2}{Zc_{m2}} \quad (6.63)$$

$$K_4 = \frac{(T_{11} + T_{21})^2}{Zc_{m1}} \cosh(\gamma_{m1} d) + \frac{(T_{12} + T_{22})^2}{Zc_{m2}} \cosh(\gamma_{m2} d) \quad (6.64)$$

A partir da expressão (6.62) pode-se escrever:

$$V_A = \frac{K_4}{K_3} V_B \quad (6.65)$$

Igualando as expressões (6.6) e (6.65) obtém-se:

$$\cosh(\gamma d) = \frac{K_4}{K_3} \quad (6.66)$$

Na expressão (6.66) γ é a função de propagação do condutor equivalente ao condutor múltiplo e sua expressão é mostrada na equação (6.55).

Reescrevendo as equações (6.54) e (6.66) têm-se:

$$K_1 \cosh(\gamma d) - \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) + K_2 = 0 \quad (6.67)$$

$$\cosh(\gamma d) = \frac{K_4}{K_3} \quad (6.68)$$

Os termos K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são escritos em função dos parâmetros dos subcondutores e do comprimento da linha. Estes podem ser obtidos a partir das equações (6.51), (6.52), (6.63) e (6.64), respectivamente.

A partir das equações (6.67) e (6.68) é possível obter os parâmetros γ e Z_c do condutor equivalente.

Sabe-se que (LEITHOLD, 1994):

$$\cosh^2(\gamma d) - \sinh^2(\gamma d) = 1 \quad (6.69)$$

Substituindo a equação (6.68) na equação (6.69) é possível obter a seguinte equação:

$$\sinh(\gamma d) = \sqrt{\left(\frac{K_4}{K_3}\right)^2 - 1} \quad (6.70)$$

Substituindo a equação (6.70) na equação (6.67) obtém-se:

$$Z_c = \frac{1}{K_1 K_4 + K_2 K_3} \sqrt{K_4^2 - K_3^2} \quad (6.71)$$

A equação (6.71) mostra a expressão que permite calcular a impedância característica Z_c do condutor equivalente, a partir dos parâmetros dos dois subcondutores.

Da mesma forma, a equação (6.66) permite calcular o valor da função de propagação γ . De acordo com esta expressão, a função de propagação γ do condutor equivalente pode ser escrita como:

$$\gamma = \frac{1}{d} \left(\cosh^{-1} \left(\frac{K_4}{K_3} \right) \right) \quad (6.72)$$

A equação (6.72) mostra que a função de propagação do condutor equivalente pode ser obtida a partir dos parâmetros dos dois subcondutores. Esta equação mostra também que a função de propagação do condutor equivalente depende do comprimento d da linha.

Uma vez conhecidos γ e Z_c , pode-se obter a impedância longitudinal Z e admitância transversal Y a partir das equações (6.55) e (6.56). Deste modo, têm-se:

$$Z = Z_c \gamma \quad (6.73)$$

$$Y = \frac{\gamma}{Z_c} \quad (6.74)$$

Sendo:

$$Z = R + j\omega L \quad (6.75)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (6.76)$$

Na

equação (6.75) R e L são os parâmetros longitudinais unitários do condutor equivalente, sendo R a resistência e L a indutância. Do mesmo modo, na equação (6.76), G e C são os parâmetros transversais unitários do condutor equivalente, sendo G a condutância e C a capacitância.

Com os resultados obtidos a partir do processo desenvolvido neste capítulo é possível fazer uma comparação dos resultados obtidos por meio do uso do conceito de raio médio geométrico. Essa comparação será feita no capítulo a seguir.

6.3 ANÁLISE DA FUNÇÃO DE PROPAGAÇÃO γ

Como foi visto anteriormente, é possível calcular o valor da função de propagação γ a partir dos parâmetros da linha utilizando a equação (6.72). De acordo com esta expressão, a função γ é expressa a partir da função inversa do co-seno hiperbólico.

Sabe-se que, de maneira genérica, as partes real e imaginária da função de propagação possuem os aspectos mostrados nas Figuras 6.10 e 6.11, respectivamente.

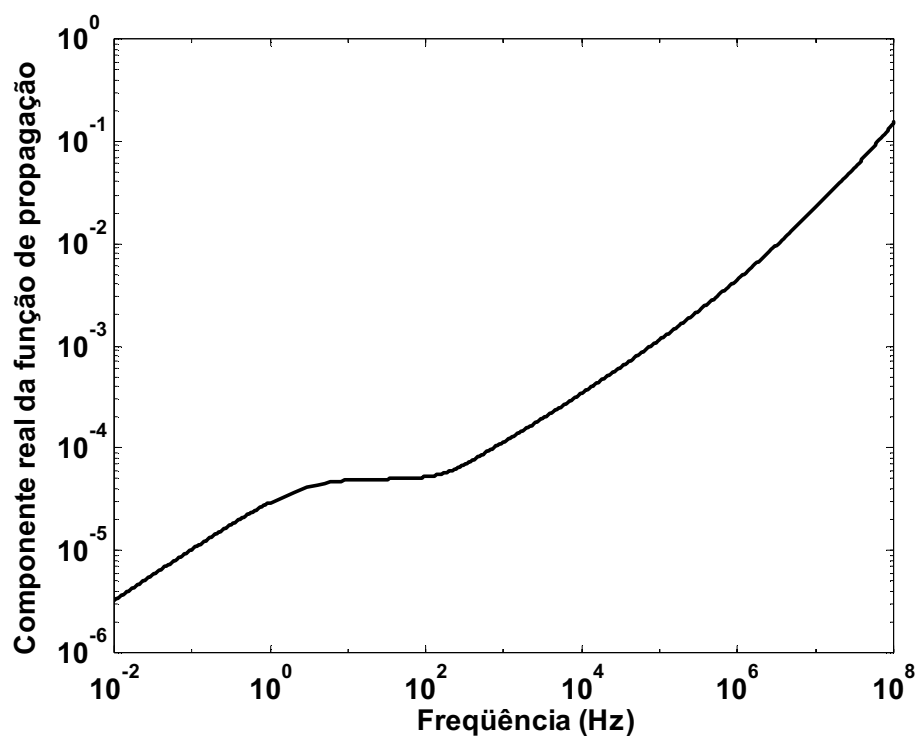


Figura 6.10 – Componente real da função γ

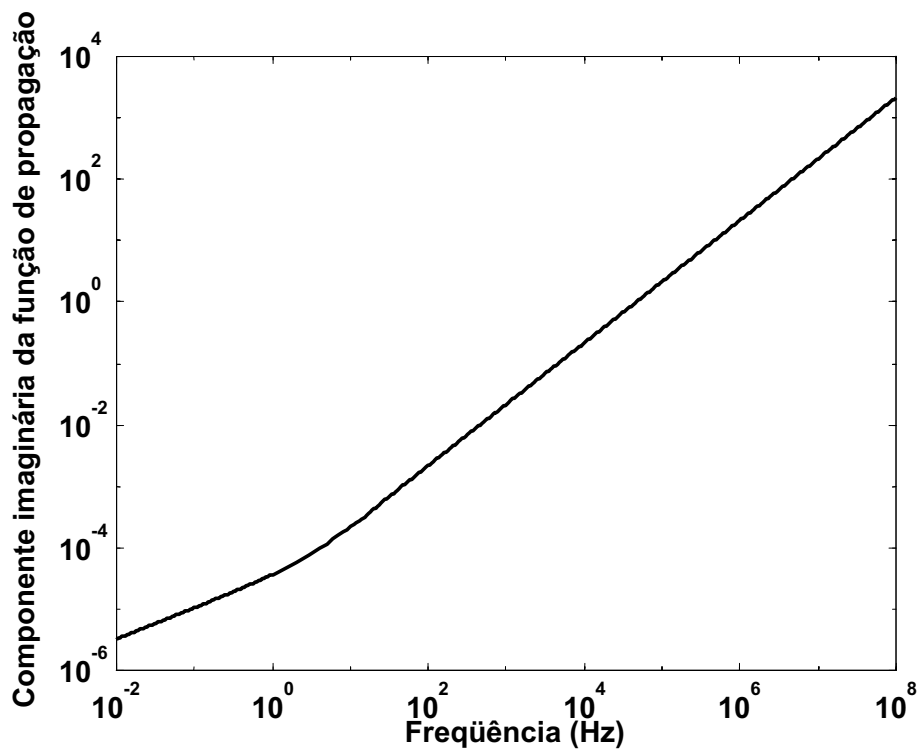


Figura 6.11 – Componente imaginária da função γ

As Figuras 6.10 e 6.11 mostram que a função de propagação de um condutor genérico é contínua.

Caso a função de propagação de um condutor genérico seja obtida a partir da equação (6.72), a componente real e imaginária de γ terá os aspectos mostrados nas Figuras 6.12 e 6.13, respectivamente.

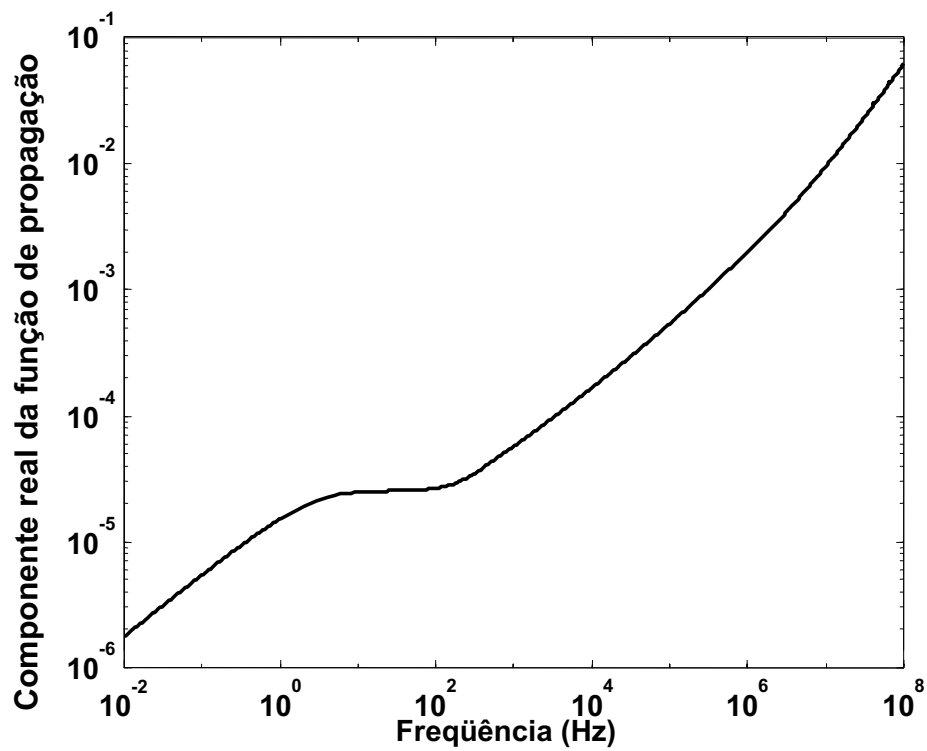


Figura 6.12 – Componente real da função γ obtida a partir da equação (6.72)

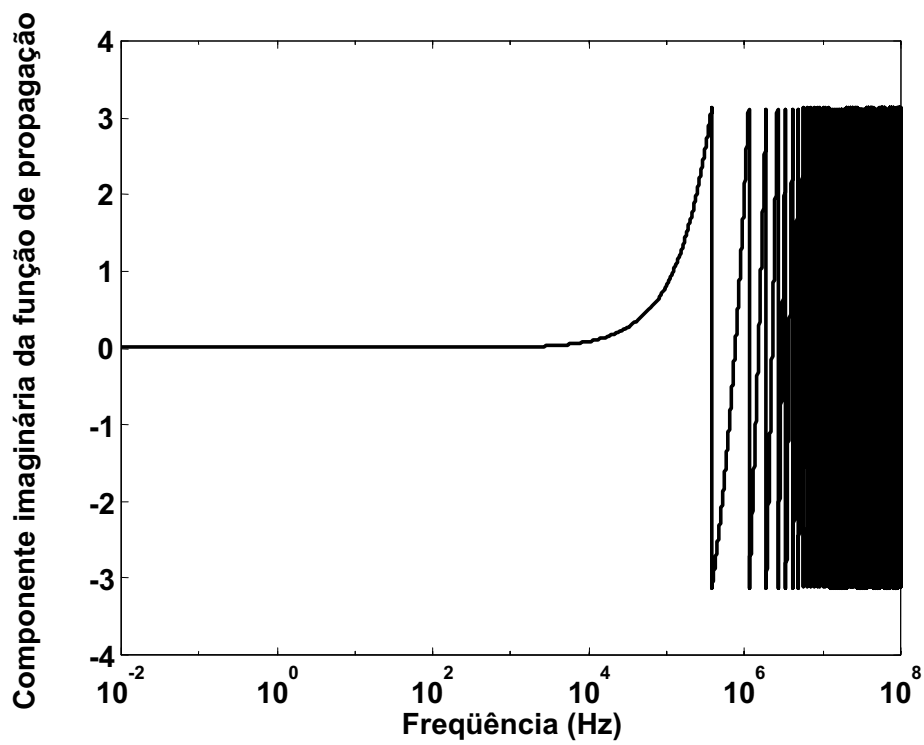


Figura 6.13 – Componente imaginária da função γ obtida a partir da equação (6.72)

Ambas as figuras foram obtidas utilizando a função $\text{acosh}(x)$ do software Matlab 5.3.

A Figura 6.12 mostra que se a função de propagação for calculada a partir da equação (6.72), a componente real da função γ é contínua. No entanto, o mesmo não acontece com a componente imaginária, conforme visto na Figura 6.13.

Deste modo, deve-se desenvolver um método para transformar a componente imaginária de γ , obtida a partir da equação (6.72), em uma função contínua.

6.3.1 Componente imaginária da função γ

Na Figura 6.13 notou-se que o comportamento da componente imaginária da função de propagação γ é descontínuo em certa faixa de frequência. A equação (6.72) possui uma função inversa do co-seno hiperbólico e o cálculo desta função foi desenvolvido numericamente a partir do software Matlab 5.3 com a função $\text{acosh}(x)$.

A Figura 6.14 mostra, graficamente, este comportamento.

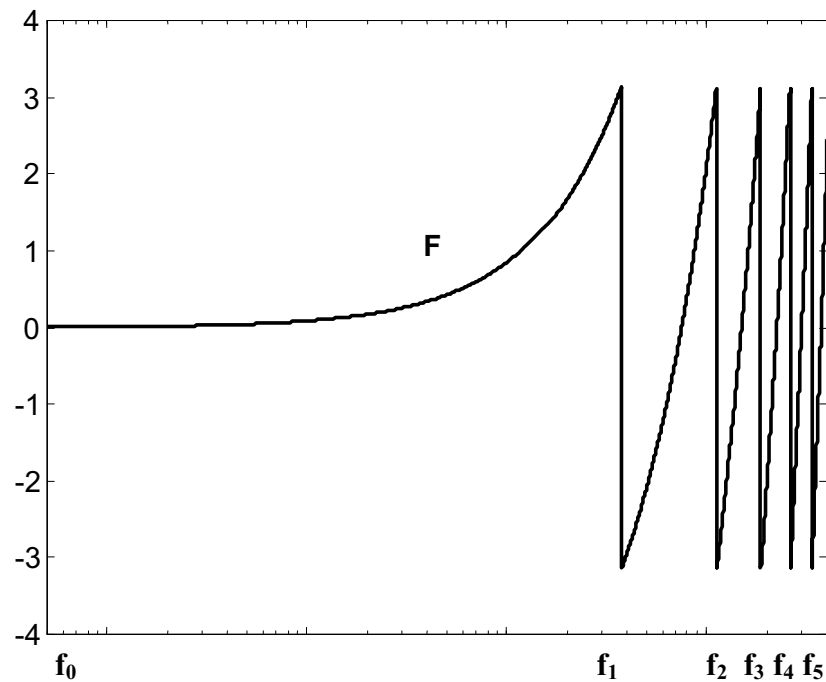


Figura 6.14 – Componente imaginária de γ

Portanto, a componente imaginária da função de propagação γ obtida através da equação (6.72) (curva F) deve ser corrigida de tal modo que para valores de frequências maiores que f_1 seja contínua.

6.3.2 Correção da curva F

Deve-se ajustar F de modo que sua curva descreva um comportamento contínuo para todos os valores da frequência.

Considere F' como sendo a curva ajustada. A Figura 6.15 mostra um trecho genérico das funções F e F'.

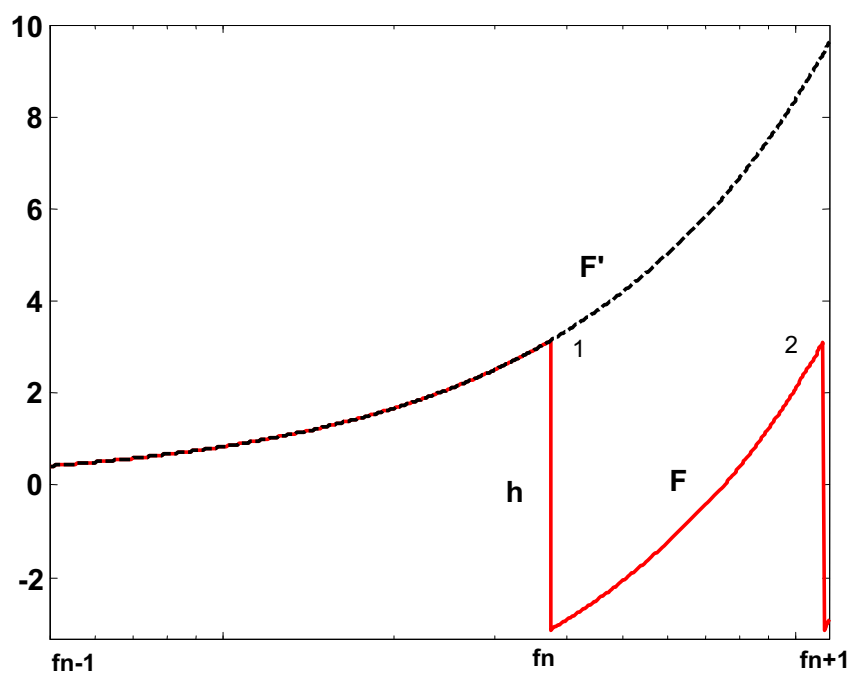


Figura 6.15 – Funções F e F'

Com base nas figuras 6.14 e 6.15 é possível expressar F' em função de F . Deste modo, obtém-se:

$$\text{Para } f \in [f_0, f_1] \Leftrightarrow F' = F \quad (6.77)$$

$$\text{Para } f \in [f_1, f_2] \Leftrightarrow F' = F + h \quad (6.78)$$

$$\text{Para } f \in [f_2, f_3] \Leftrightarrow F' = F + 2h \quad (6.79)$$

$$\text{Para } f \in [f_3, f_4] \Leftrightarrow F' = F + 3h \quad (6.80)$$

$$\text{Para } f \in [f_4, f_5] \Leftrightarrow F' = F + 4h \quad (6.81)$$

De acordo com a Figura 6.15, generalizando as expressões (6.77)-(6.81) pode-se expressar F' em função de F , nos intervalos genéricos $[f_{n-1}, f_n]$ e $[f_n, f_{n+1}]$ como sendo;

$$\text{Para } f \in [f_{n-1}, f_n] \Leftrightarrow F' = F \quad (6.82)$$

$$\text{Para } f \in [f_n, f_{n+1}] \Leftrightarrow F' = F + nh \quad (6.83)$$

Na expressão (6.83) deve-se considerar $n = 1, 2, 3, \dots$. Portanto, a função F pode ser ajustada através das equações (6.82) e (6.83).

A Figura 6.16 mostra a função F' de γ .

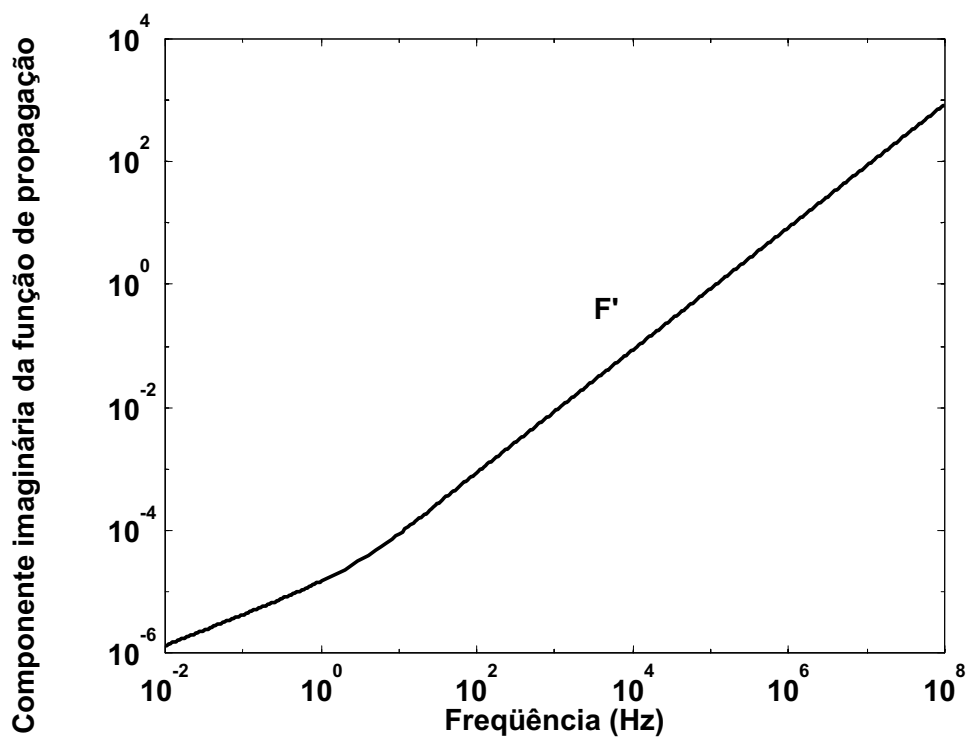


Figura 6.16 – Função F'

A Figura 6.16 mostra que a função F' é contínua.

Sendo assim pode-se afirmar que F' é a componente imaginária da função de propagação que foi calculada a partir da equação (6.72).

6.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi mostrado um processo alternativo para determinar o condutor equivalente a um condutor múltiplo. O condutor múltiplo considerado era constituído de dois subcondutores cujas características e os parâmetros longitudinais e transversais eram conhecidos.

O método baseia-se em equações desenvolvidas para dois subcondutores e verificou-se que existe uma relação entre a impedância característica da linha do condutor equivalente Z_c , e a função de propagação γ com os parâmetros da linha. A partir desta relação foi possível obter os parâmetros longitudinais e transversais do condutor equivalente.

A equação que foi desenvolvida para calcular a função de propagação permite calcular diretamente a componente real dessa função. Quanto à parte imaginária, a mesma pode ser obtida após um ajuste nos resultados obtidos com a equação desenvolvida.

7 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da associação paralela de dois subcondutores.

Considerando que a associação paralela de dois subcondutores pode ser substituída por um único condutor equivalente, serão obtidos os parâmetros longitudinais e transversais do mesmo. Os resultados obtidos serão comparados com o condutor equivalente obtido por meio da aplicação dos conceitos de Raio médio Geométrico (RMG), em que a associação em paralela é substituída por um único condutor cujo raio é idêntico ao RMG da associação dos subcondutores.

Para aplicação do método de cálculo do condutor equivalente, será considerada uma associação paralela de dois subcondutores, localizados sob o mesmo eixo vertical, com alturas diferentes em relação ao solo. O método será aplicado considerando diversos comprimentos dos subcondutores. Também será feita uma análise da influência da frequência sobre os parâmetros do condutor resultante da associação paralela.

7.2 DESCRIÇÃO DOS DOIS SUBCONDUTORES CONECTADOS EM PARALELO

A Figura 7.1 mostra dois subcondutores, do tipo Grosbeak (FUCHS, 1979) conectados em paralelo.

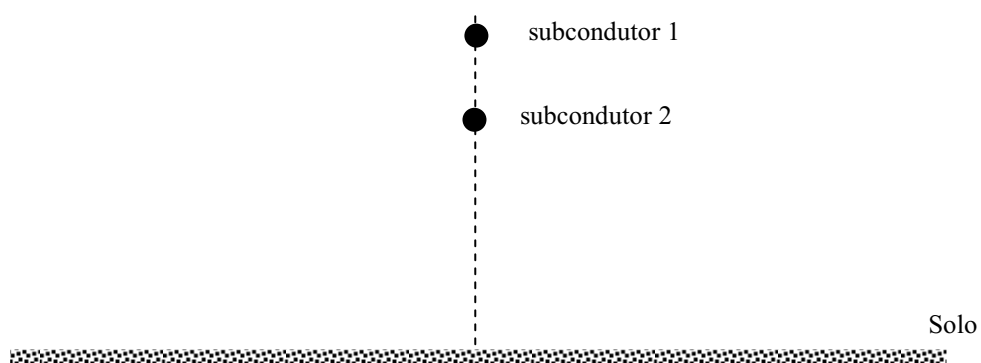


Figura 7.1 - Associação paralela de dois subcondutores

Na Figura 7.1 os extremos dos subcondutores estão unidos, de modo que os mesmos resultem em uma associação paralela, conforme mostra a Figura 7.2.

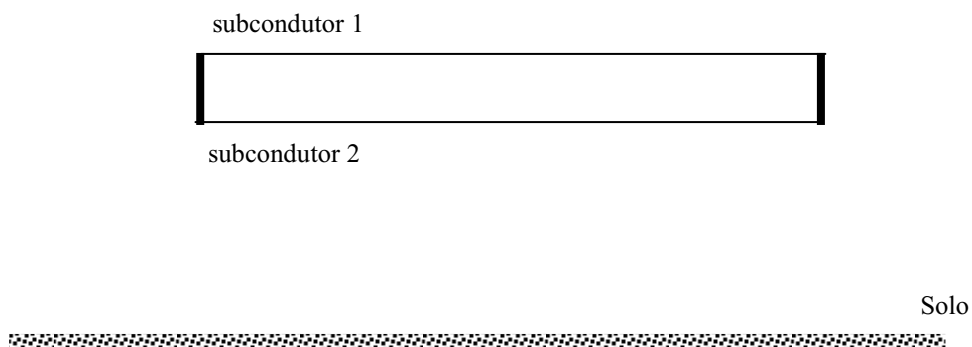


Figura 7.2 - Associação paralela de dois condutores vista de outro ângulo

Os subcondutores 1 e 2 possuem um raio médio geométrico r_1 e r_2 , respectivamente, igual 1,021 cm (FUCHS, 1979) e suas alturas h_1 e h_2 em relação ao solo são, respectivamente 24,6 m e 24,2 m. Considerou-se que o solo sob o qual estão dispostos os subcondutores possui uma resistividade de $1000 \Omega \cdot m$ e que a condutância dos subcondutores é desprezível.

As Figuras 7.3 e 7.4 mostram as resistências e indutâncias próprias dos subcondutores 1 e 2, que foram calculadas levando em consideração os efeitos solo e pelicular.

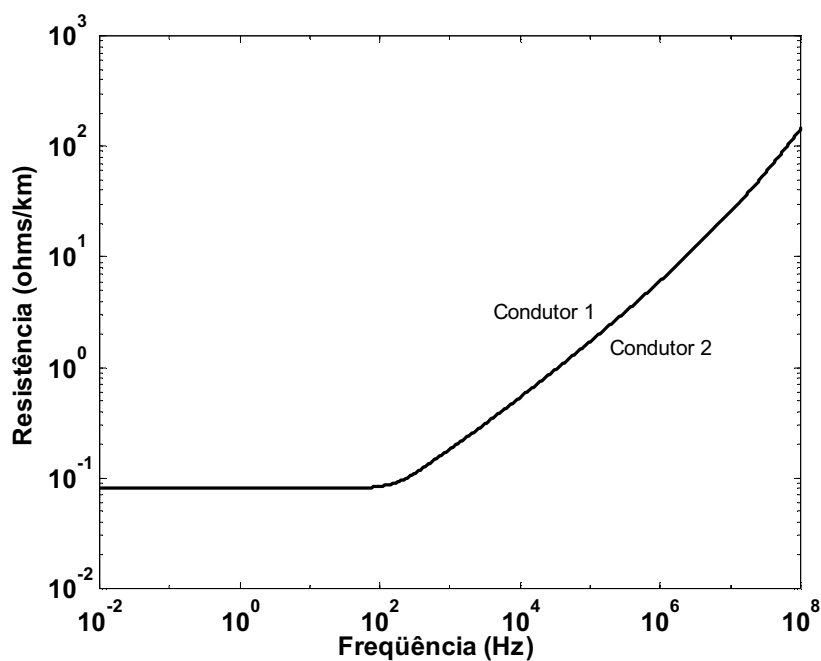


Figura 7.3 - Resistências próprias dos subcondutores 1 e 2

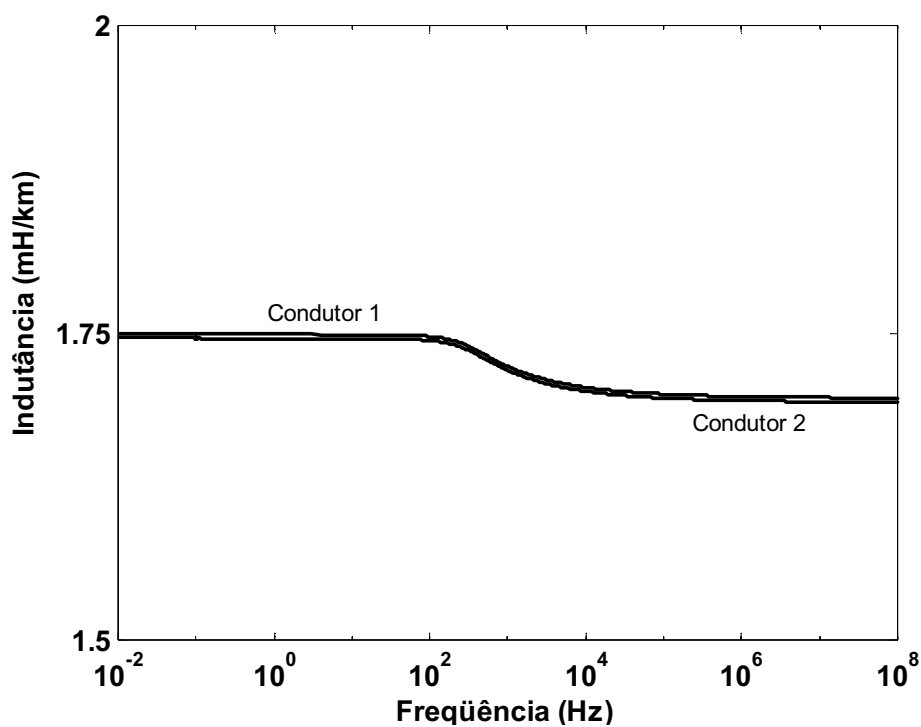


Figura 7.4 - Indutâncias próprias dos subcondutores 1 e 2

As Figuras 7.3 e 7.4 mostram que as resistências e indutâncias próprias dos subcondutores 1 e 2 são praticamente idênticas. Isto ocorre porque os subcondutores estão separados por uma altura de apenas 40 cm.

As Figuras 7.5 e 7.6 mostram as resistências e indutâncias mútuas entre os subcondutores 1 e 2. Sabe-se que a resistência mútua é devido ao efeito do solo (DOMMEL, 1996).

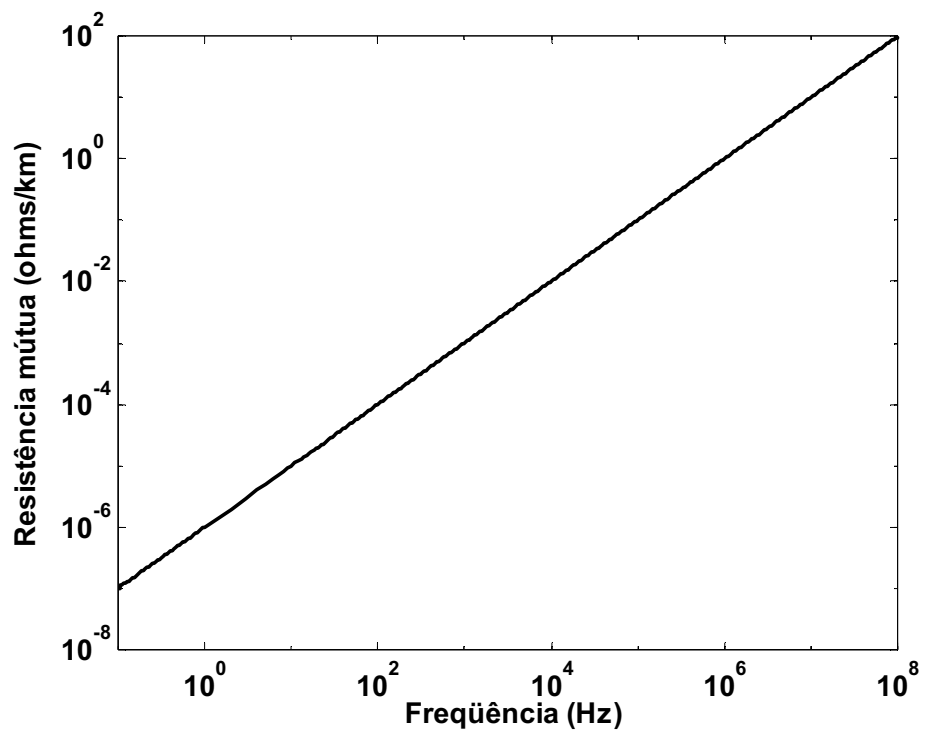


Figura 7.5 - Resistência mútua entre os subcondutores 1 e 2

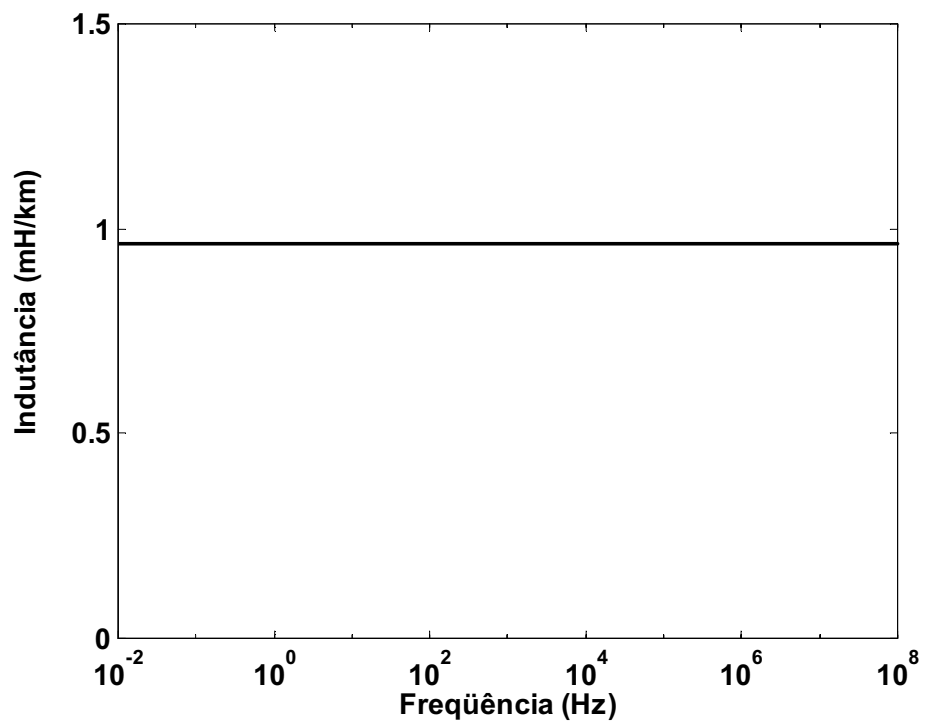


Figura 7.6 - Indutância mútua entre os subcondutores 1 e 2

A Figura 7.6 mostra que a indutância mútua entre os subcondutores 1 e 2 é praticamente constante.

Utilizando as equações (4.38)-(4.41) é possível mostrar que a matriz de capacitâncias para os subcondutores 1 e 2 é dada por:

$$[C] = \begin{bmatrix} 9,656 & -5,48 \\ -5,48 & 9,674 \end{bmatrix} \eta F/km \quad (7.1)$$

7.3 DADOS DO CONDUTOR EQUIVALENTE OBTIDO A PARTIR DO CONCEITO DE RMG

Para o sistema mostrado nas Figuras 7.1 e 7.2, pode-se afirmar que os dois subcondutores podem ser substituídos por um único condutor cujo raio é idêntico ao raio médio geométrico dos dois condutores (FUCHS, 1979). Deste modo, têm-se:

$$r_{equiv} = \sqrt[4]{D_s^2 \times d_{12}^2} \quad (7.2)$$

Na equação (7.2) D_s é o raio médio geométrico do subcondutor 1 (ou condutor 2), que vale 1,021 cm (FUCHS, 1979). Ainda na equação (7.2), d_{12} é a distância entre os subcondutores 1 e 2. Deste modo, o condutor equivalente terá um raio $r_{eq} = 6,39$ cm. Este condutor estará localizado a uma altura de 24,4 m em relação ao solo. A Figura 7.7 ilustra o condutor equivalente aos dois subcondutores mostrados na Figura 1.

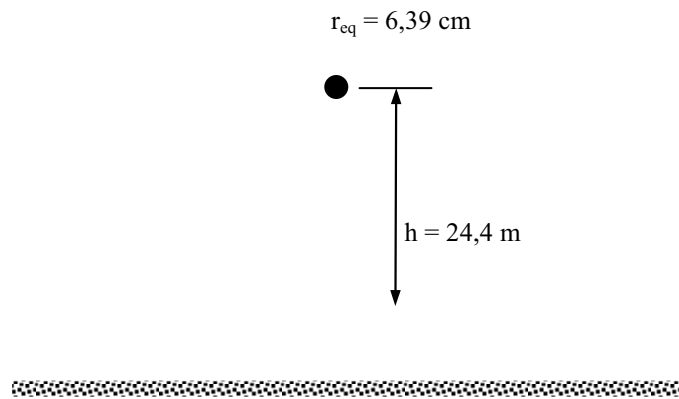


Figura 7.7 - Condutor equivalente aos condutores 1 e 2

Uma vez obtidas o raio e a altura do condutor equivalente, é possível calcular os parâmetros dos mesmos.

As Figuras 7.8 e 7.9 mostram a resistência e a indutância do condutor equivalente, respectivamente.

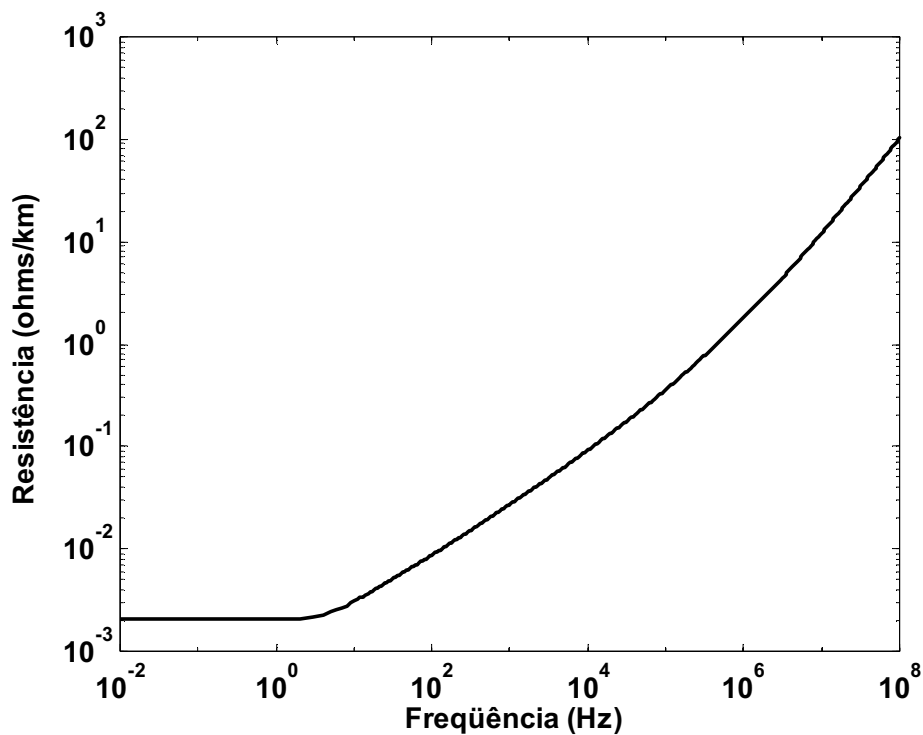


Figura 7.8 - Resistência do condutor equivalente obtido a partir do RMG dos subcondutores

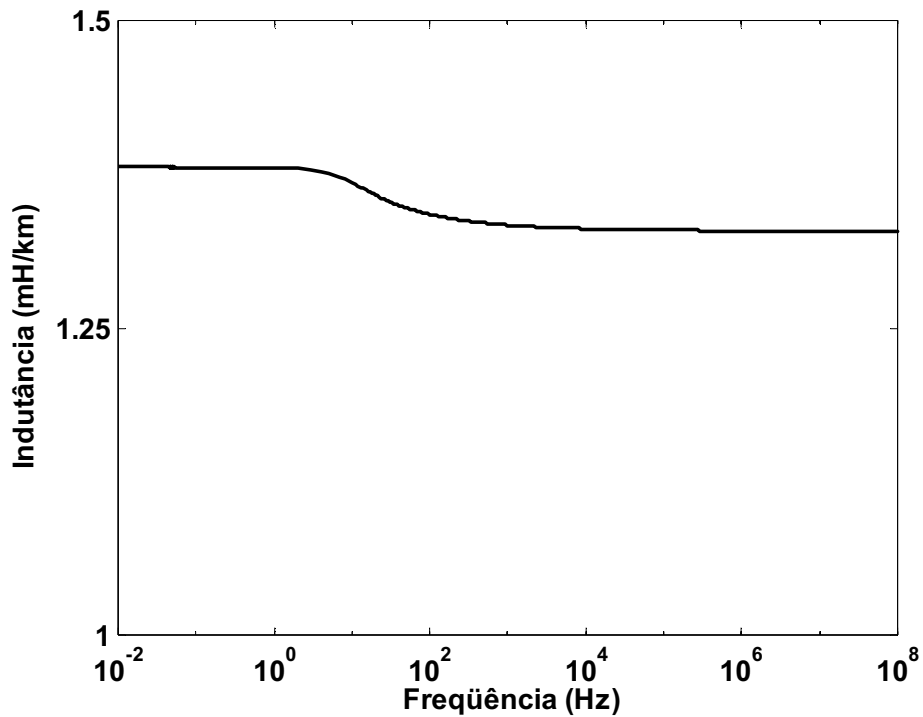


Figura 7.9 - Indutância do condutor equivalente

Utilizando as equações (5.16) e (5.17) é possível obter o valor da capacitância do condutor equivalente. O valor obtido é:

$$C = 6,21 \text{ nF/km} \quad (7.3)$$

7.4 ASSOCIAÇÃO PARALELA DOS DOIS SUBCONDUTORES

Neste item, os parâmetros do condutor equivalente aos dois subcondutores mostrados nas Figuras 1 e 2 serão obtidos por meio das equações mostradas no capítulo 6.

Serão obtidos resultados considerando diversos comprimentos para os subcondutores.

Com a finalidade de simplificar a notação, o método que considera o raio do condutor equivalente igual ao raio médio geométrico dos subcondutores, será denominado método clássico. O método desenvolvido neste trabalho será denominado método proposto.

7.4.1 Análise de um segmento de 100 m

As Figuras 7.10 e 7.11 mostram, respectivamente, a resistência e a indutância próprias do condutor equivalente, considerando que os subcondutores da Figura 1 possuem um comprimento de 100 m. A curva 1 mostra os parâmetros obtidos a partir do método clássico, enquanto que a curva 2 mostra os parâmetros que foram obtidos a partir do método proposto.

A Figura 7.10 mostra que quando se utiliza o método clássico, obtém-se uma resistência longitudinal menor que o valor exato da mesma. No que diz respeito à indutância, a Figura 7.11 mostra que em baixas frequências existe uma pequena diferença entre o valor obtido pelo método proposto e o valor obtido pelo método clássico para a indutância do sistema de dois condutores. Para valores de frequências superiores a 1 kHz praticamente não há diferença entre os valores obtidos por ambos os métodos para as indutâncias.

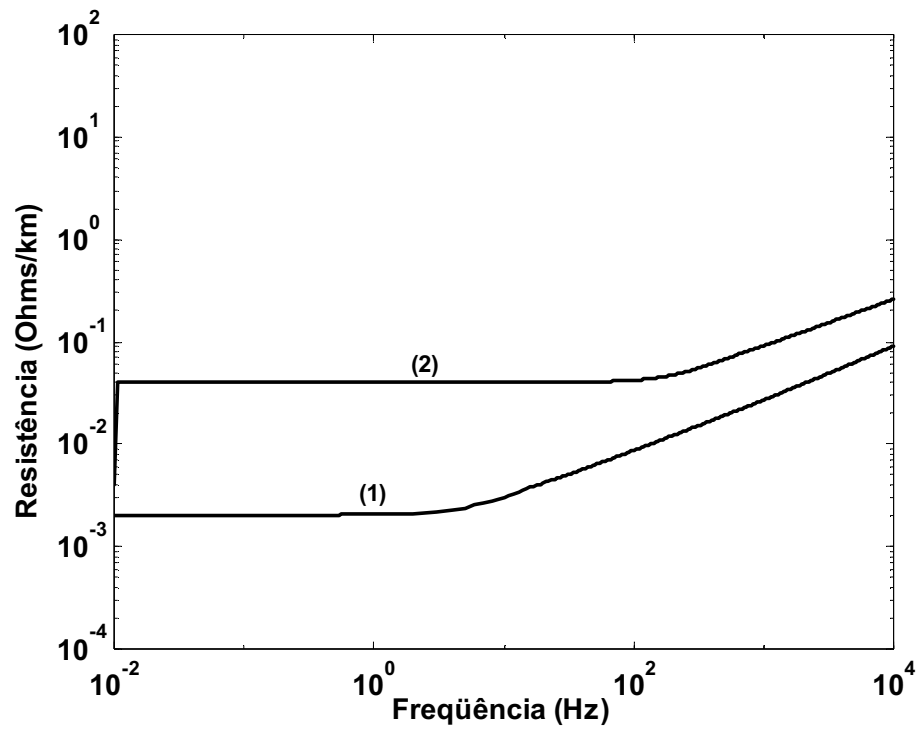


Figura 7.10 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

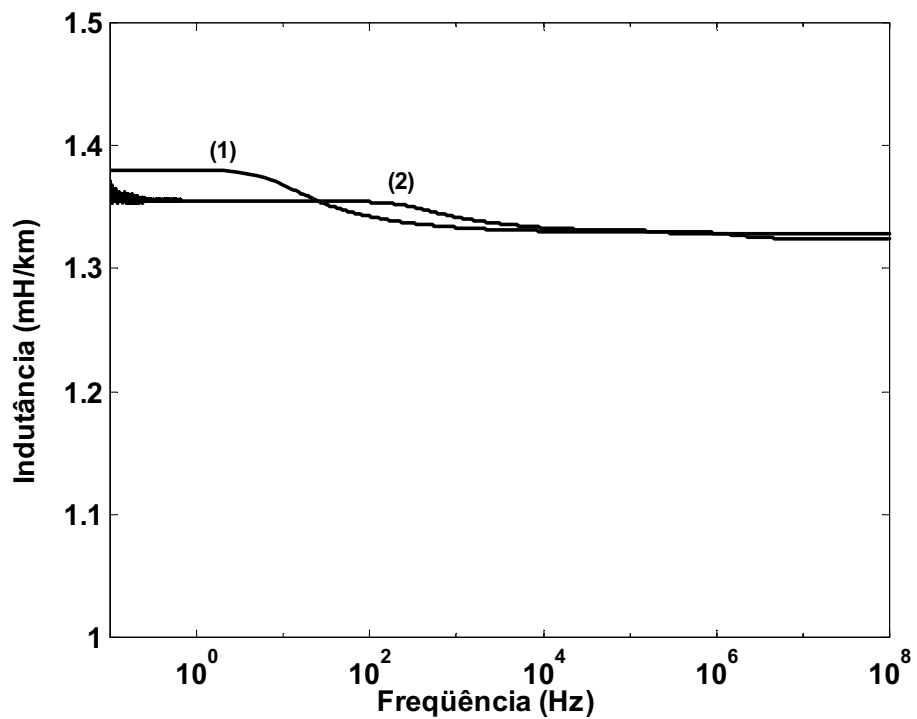


Figura 7.11 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

As Figuras 7.12 e 7.13 mostram a capacitância e a condutância do condutor equivalente. A curva 1 mostra os parâmetros obtidos a partir do método clássico, enquanto que a curva 2 mostra os dados do condutor equivalente obtidos com o método proposto.

A Figura 7.12 mostra que para frequências inferiores a 100 kHz a condutância do condutor equivalente obtida por meio do método clássico é praticamente idêntica ao valor obtido por meio da associação paralela. No entanto, para frequências superiores a 100 kHz, a condutância do condutor equivalente torna-se dependente da frequência e este fenômeno não é detectado quando se utiliza o método clássico.

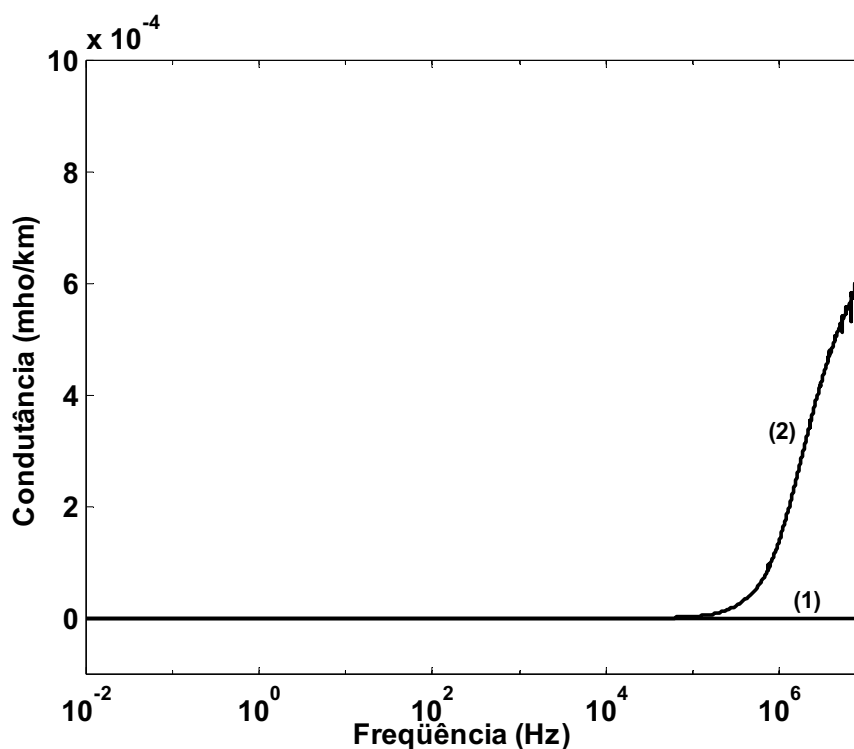


Figura 7.12 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

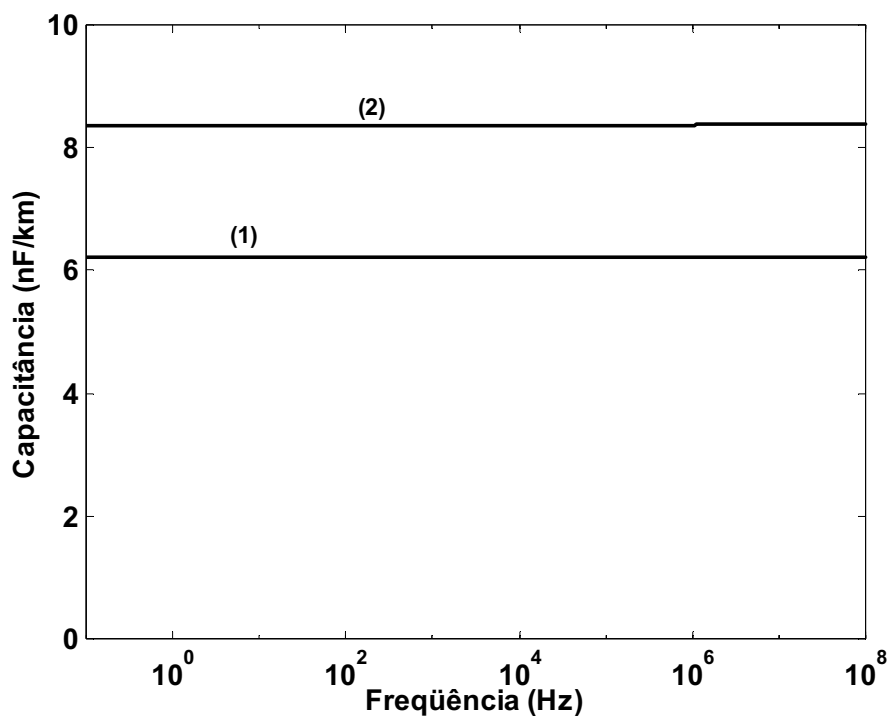


Figura 7.13 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

A Figura 7.13 mostra que a capacitância obtida por meio do método clássico é menor que o valor obtido por meio do método proposto para a capacitância do condutor equivalente.

7.4.2 Análise de um segmento de 500 m

As Figuras 7.14 e 7.15 mostram, respectivamente, a resistência e a indutância do condutor equivalente, considerando que os subcondutores da Figura 1 possuem um comprimento de 500 m. A curva 1 mostra os parâmetros do condutor equivalente obtido a partir do método clássico, enquanto que a curva 2 mostra a resistência obtida a partir do método proposto.

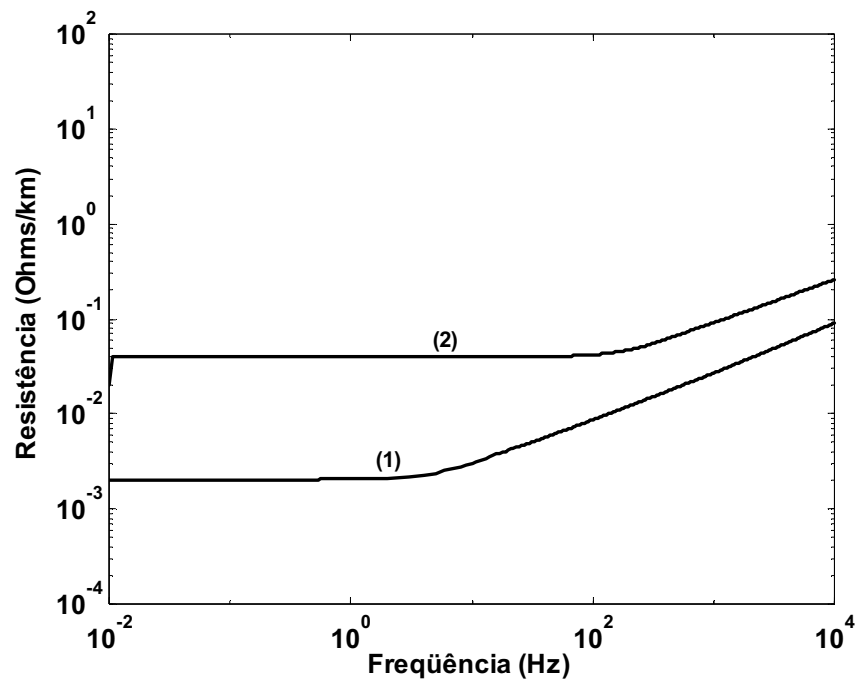


Figura 7.14 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

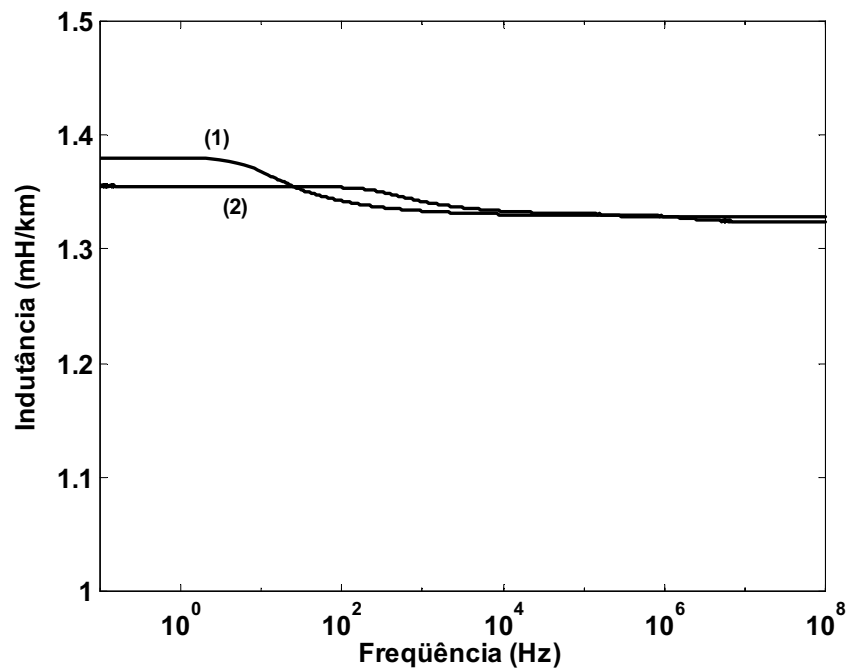


Figura 7.15 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

A Figura 7.14 mostra que a resistência do condutor equivalente obtido por meio do método clássico é menor do que o valor obtido por meio do método proposto para esta resistência. Quanto à indutância, a Figura 7.15 mostra que em baixas frequências existe uma pequena diferença entre a indutância equivalente do sistema de dois condutores e a indutância obtida com base no método clássico. Para valores de frequências superiores a 1 kHz praticamente não há diferença entre os valores obtidos por ambos os métodos para a indutância.

As Figuras 7.16 e 7.17 mostram, respectivamente, a condutância e a capacitância do condutor equivalente obtida por meio do método clássico (curva 1) e por meio do método proposto (curva 2).

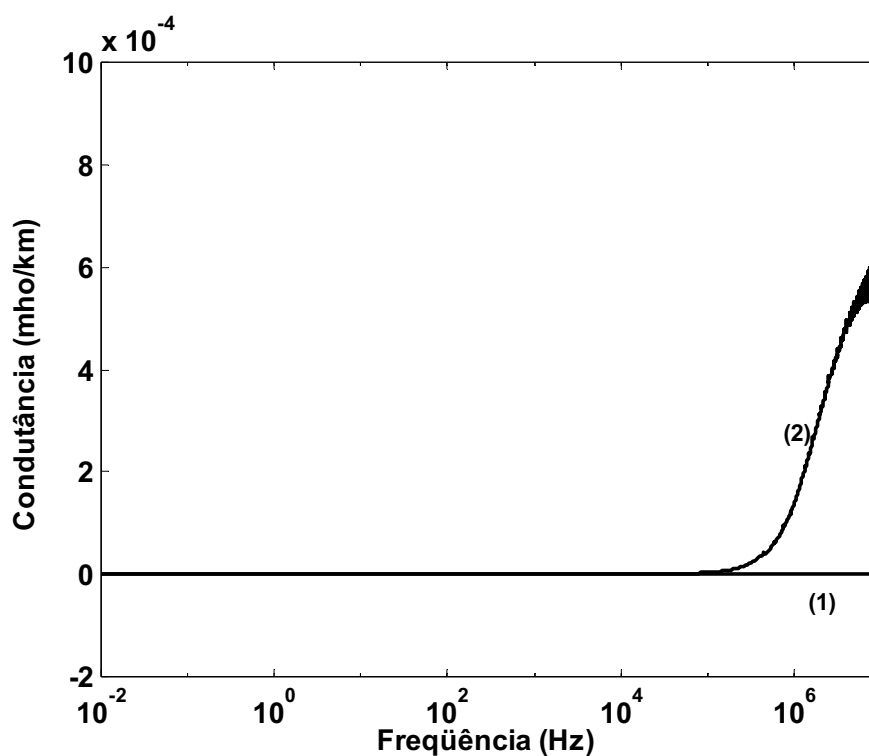


Figura 7.16 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

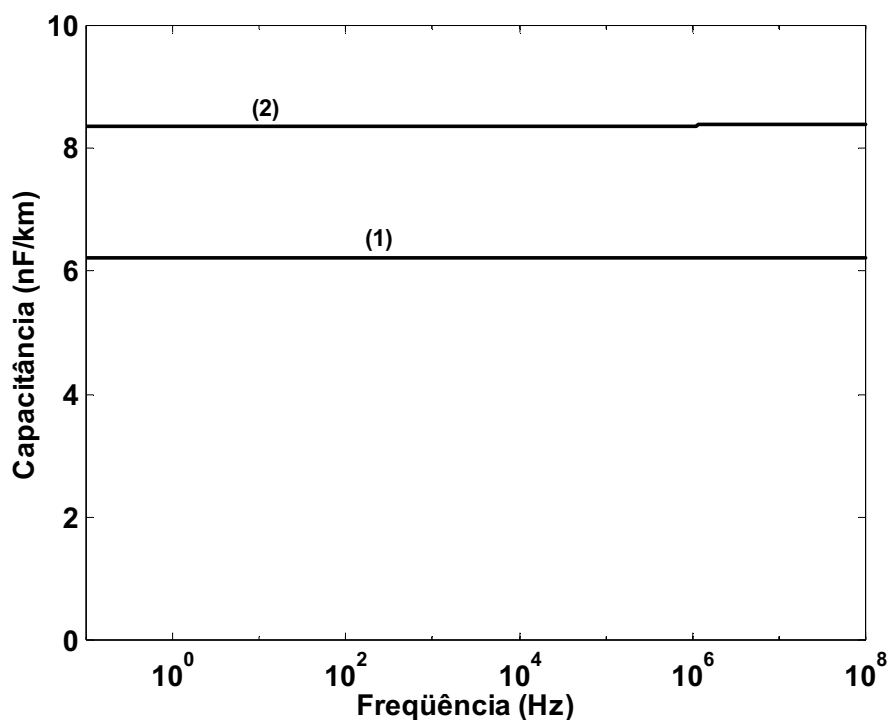


Figura 7.17 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

A Figura 7.16 mostra que a condutância calculada por meio do método clássico coincide com o valor obtido por meio do método proposto para a mesma. No entanto, para frequências superiores a 100 kHz, a condutância equivalente dos subcondutores torna-se variável em relação à frequência e este fato não é detectado quando se utiliza o método clássico.

Quanto à capacitância do condutor equivalente aos dois subcondutores, a Figura 7.17 mostra que quando a mesma é calculada com base no método clássico obtém-se um valor menor que o valor obtido por meio do método proposto para esta capacitância.

7.4.3 Análise de um segmento de 1 km

As Figuras 7.18-7.21 mostram os parâmetros longitudinais e transversais do condutor equivalente, considerando que os subcondutores da Figura 1 possuem um comprimento de 1000 m. A curva 1 mostra os parâmetros do condutor equivalente obtido a partir do método clássico, enquanto que a curva 2 mostra os parâmetros que foram obtidos a partir do método proposto.

A Figura 7.18 mostra que a resistência equivalente dos dois subcondutores é maior do que o valor obtido por meio do método clássico.

A Figura 7.19 mostra que quando o condutor equivalente é obtido por meio do método clássico, a indutância equivalente apresenta uma pequena diferença em relação ao seu valor obtido pelo método proposto em frequências inferiores a 1 kHz. Este erro tende a ser eliminado quando se considera frequências superiores a 1 kHz.

Quanto à condutância observa-se que quando se considera dois subcondutores, dispostos conforme mostra a Figura 1, a condutância equivalente torna-se variável quando se considera frequências superiores a 100 kHz e esta variação não é detectada quando se calcula a condutância equivalente utilizando o método clássico.

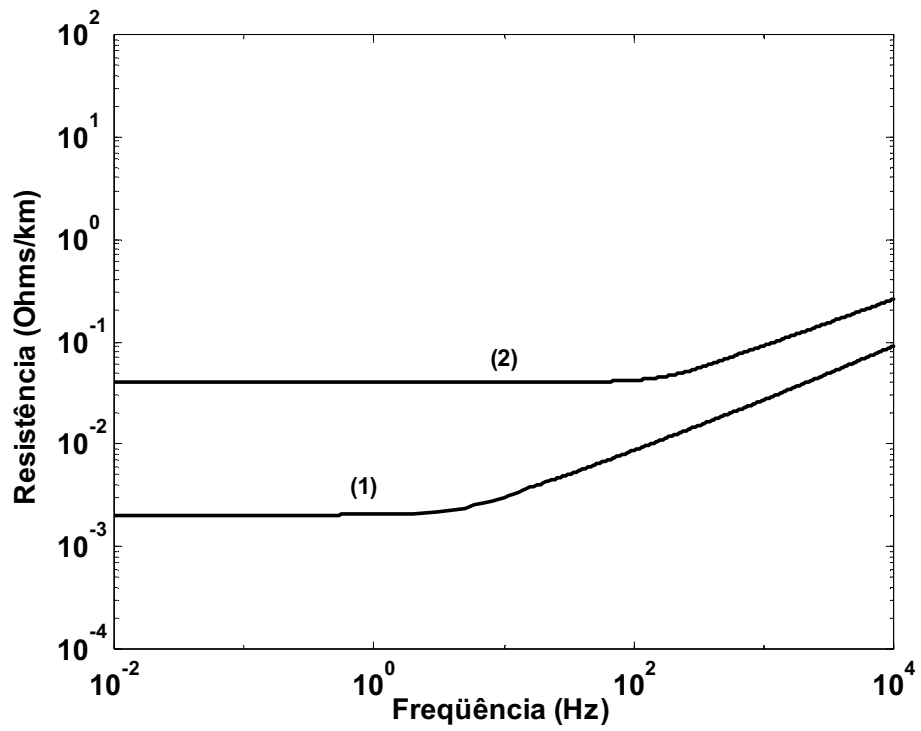


Figura 7.18 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

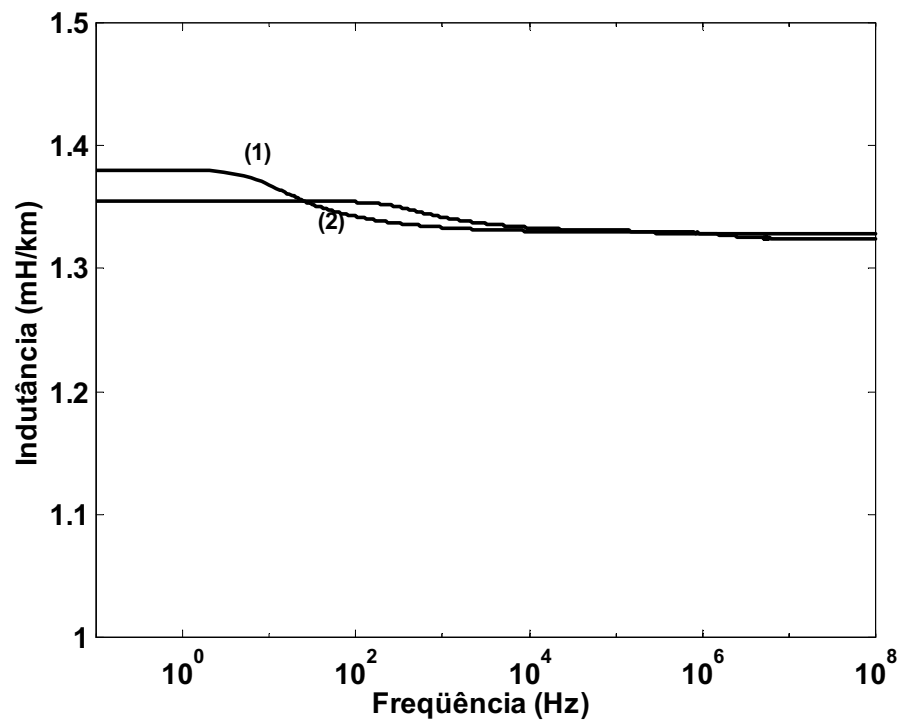


Figura 7.19 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

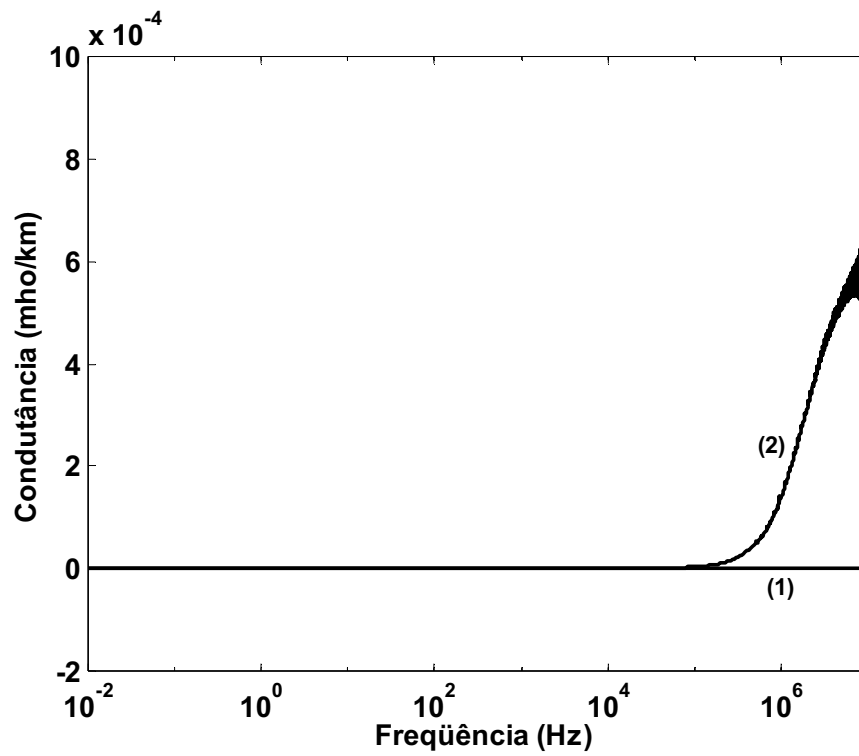


Figura 7.20 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

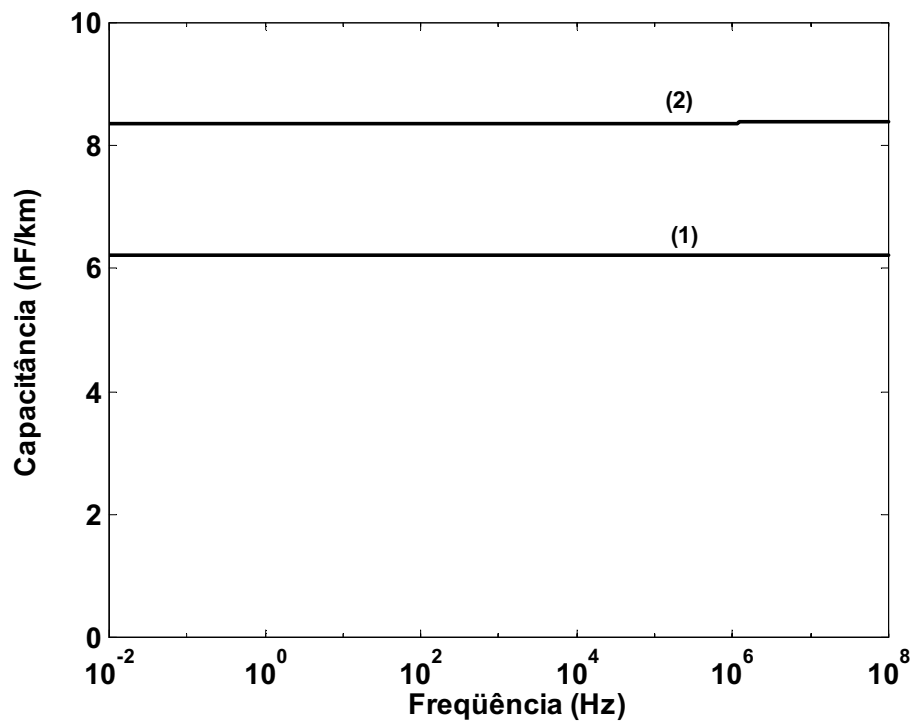


Figura 7.21 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

A Figura 7.21 mostra que a capacitância obtida a partir do método clássico é menor que o valor obtido por meio do método proposto para a mesma.

7.4.4 Análise de um segmento de 10 km

As Figura 7.22-7.25 mostram os parâmetros do condutor equivalente, considerando que os subcondutores da Figura 1 possui um comprimento de 10000 m. A curva 1 mostra os parâmetros do condutor equivalente obtido a partir do método clássico, enquanto que a curva 2 mostra os parâmetros obtidos a partir do método proposto.

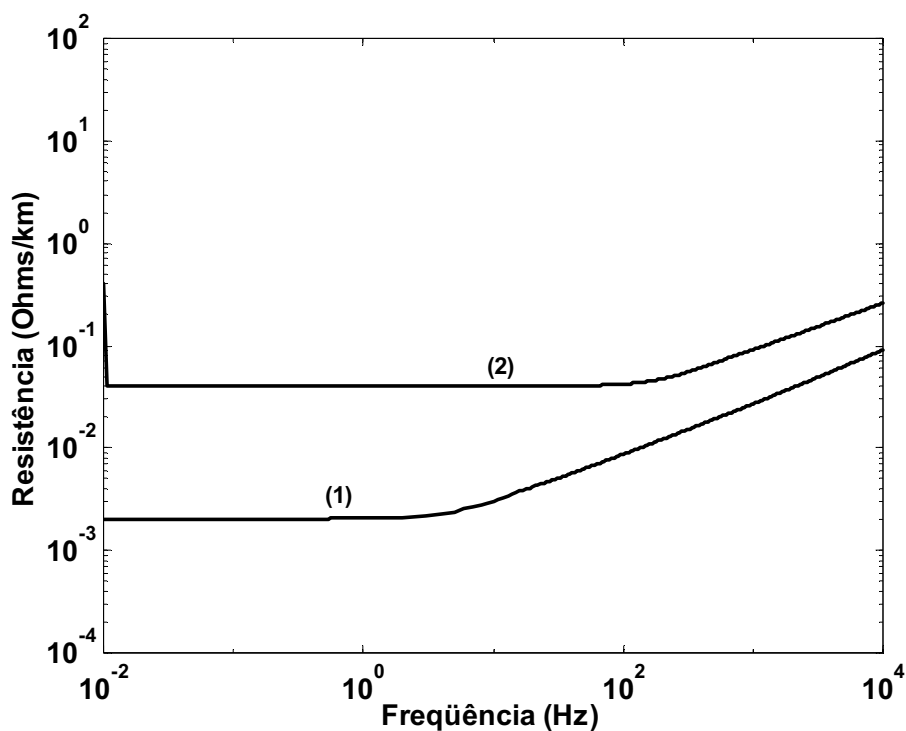


Figura 7.22 - Resistência do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

A partir da Figura 7.22 é possível verificar que quando o condutor equivalente é obtido a partir do método clássico, a resistência longitudinal apresenta um valor menor do que o valor obtido por meio do método proposto para a mesma. Quanto à indutância, a Figura

7.23 mostra que existe uma diferença bastante pequena entre os valores obtidos por ambos os métodos para a mesma.

A Figura 7.24 mostra que a condutância do condutor equivalente sofre influência da frequência, quando se considera frequências superiores a 100 kHz. No entanto, esta variação da condutância em função da frequência não é detectada quando o condutor equivalente é obtido a partir do método clássico. A Figura 7.25 mostra que quando se utiliza o método clássico para obter o condutor equivalente, a capacitância deste condutor é menor que o valor obtido pelo método proposto para a mesma.

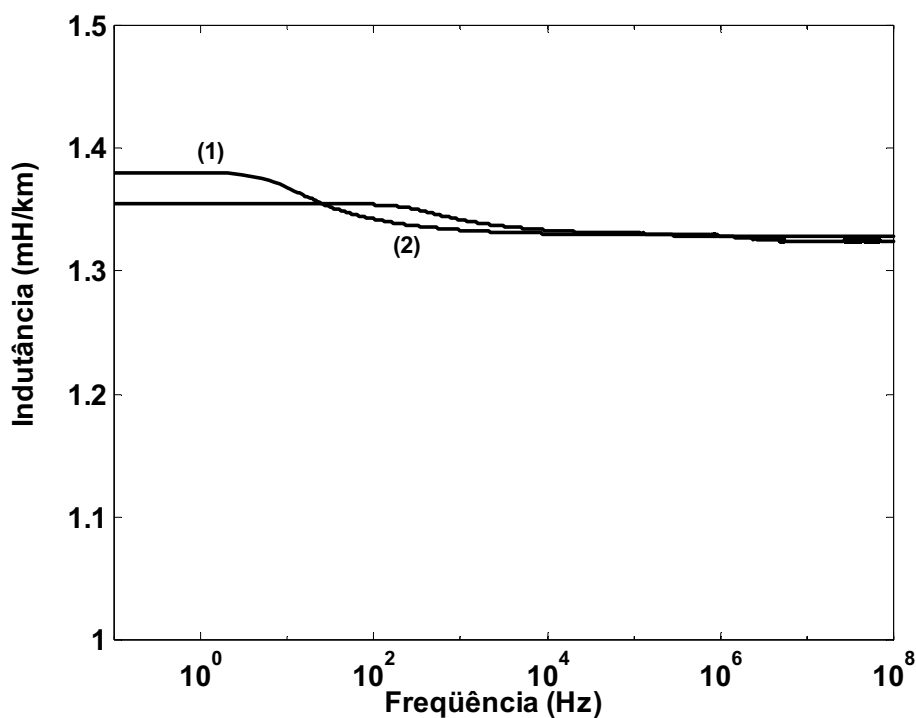


Figura 7.23 - Indutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

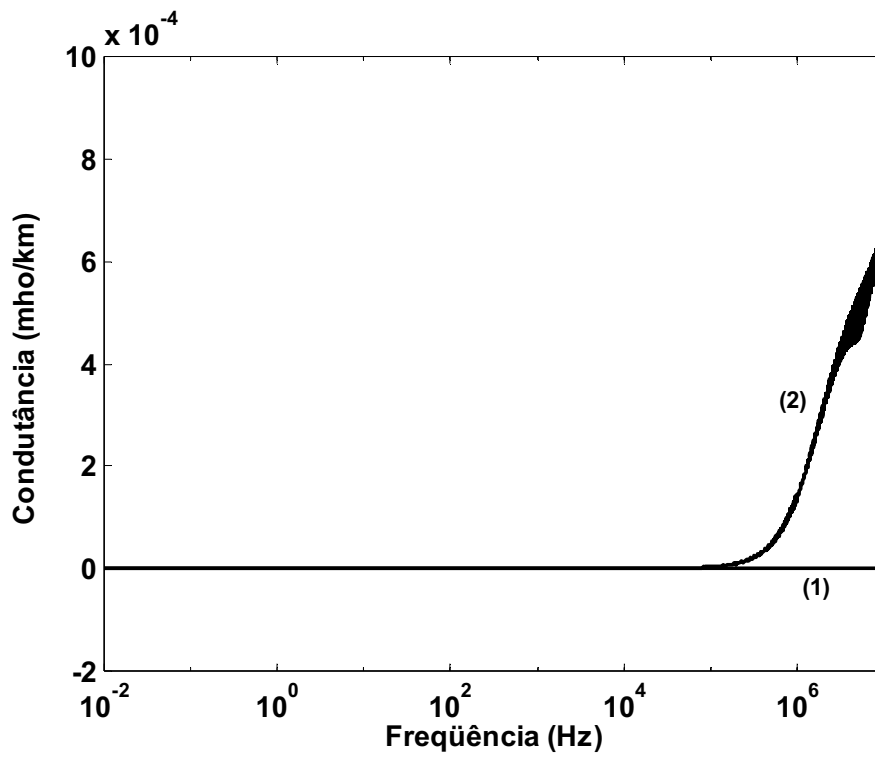


Figura 7.24 - Condutância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

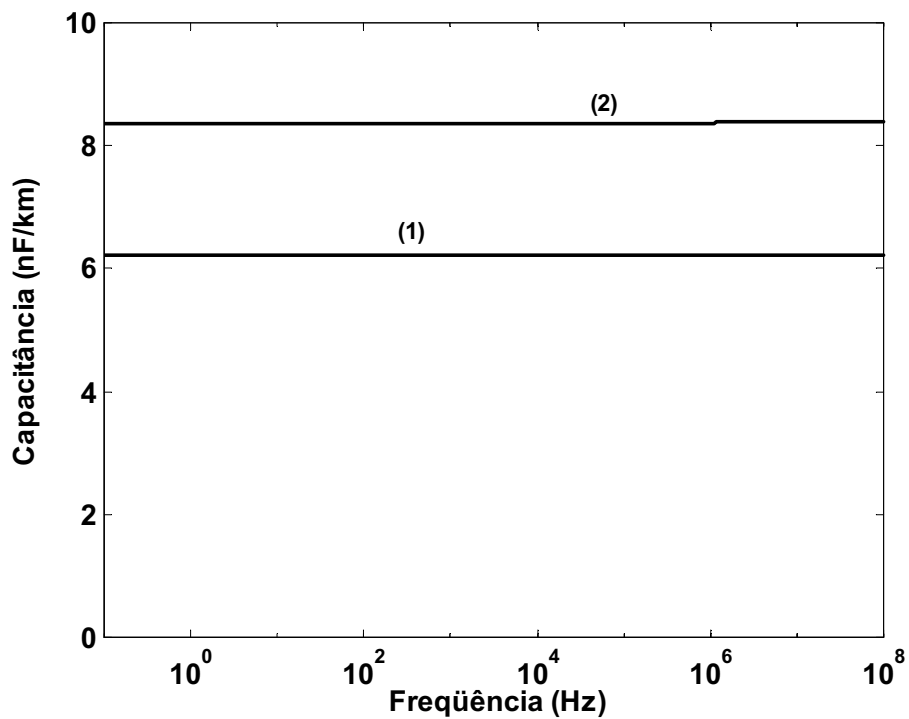


Fig. 7.25 - Capacitância do condutor equivalente: Método clássico (1) e proposto (2)

7.4.5 Influência do comprimento do condutor múltiplo sobre os parâmetros do condutor equivalente

As Figuras 7.26-7.29 mostram os parâmetros longitudinais e transversais do condutor equivalente à associação paralela dos subcondutores. A curva 1 mostra os parâmetros considerando que o condutor múltiplo possui um comprimento de 100 m, enquanto que a curva 2 mostra os parâmetros considerando que o condutor múltiplo possui um comprimento de 10 km.

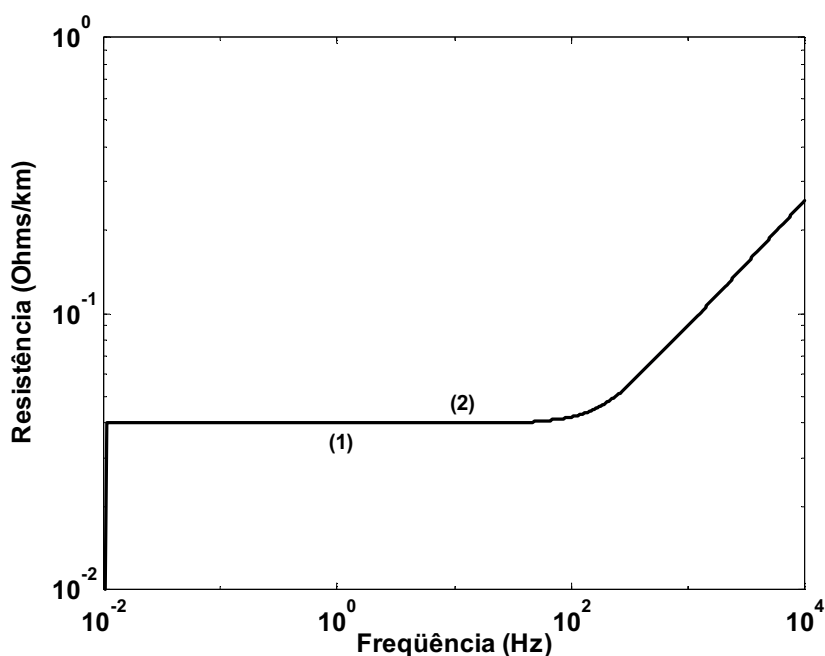


Figura 7.26 - Resistência do condutor equivalente obtida com o método proposto: Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)

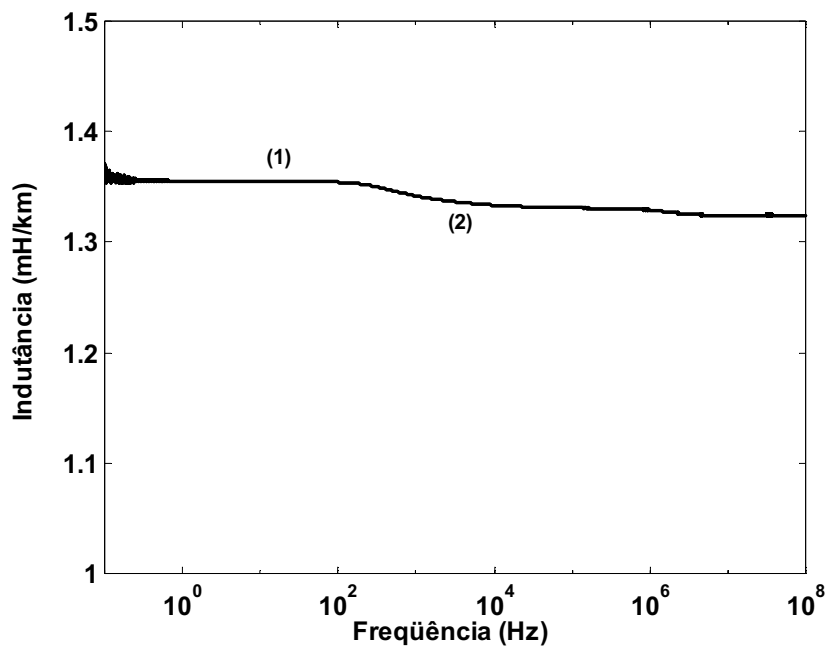


Figura 7.27 - Indutância do condutor equivalente obtida com o método proposto: Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)

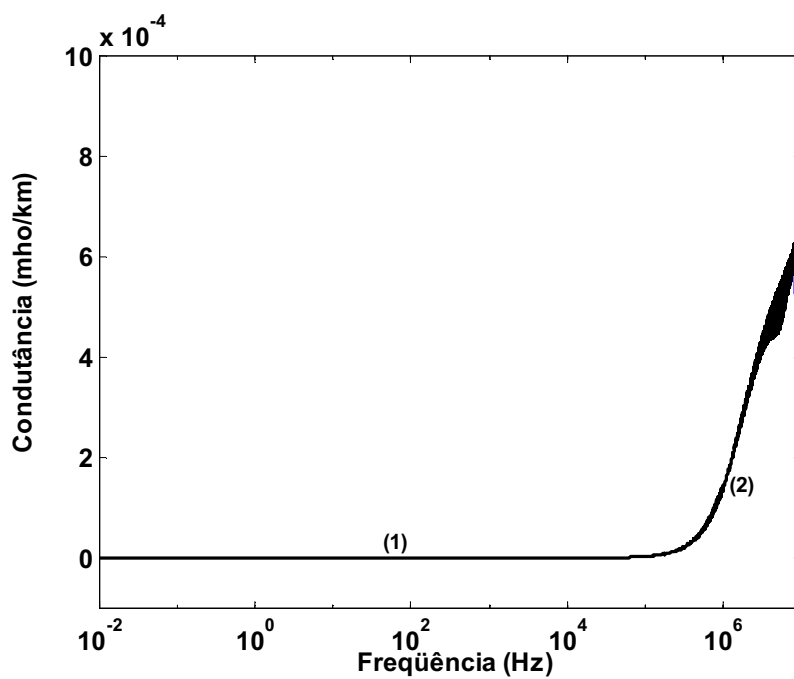


Figura 7.28 - Condutância do condutor equivalente obtida com o método proposto: Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)

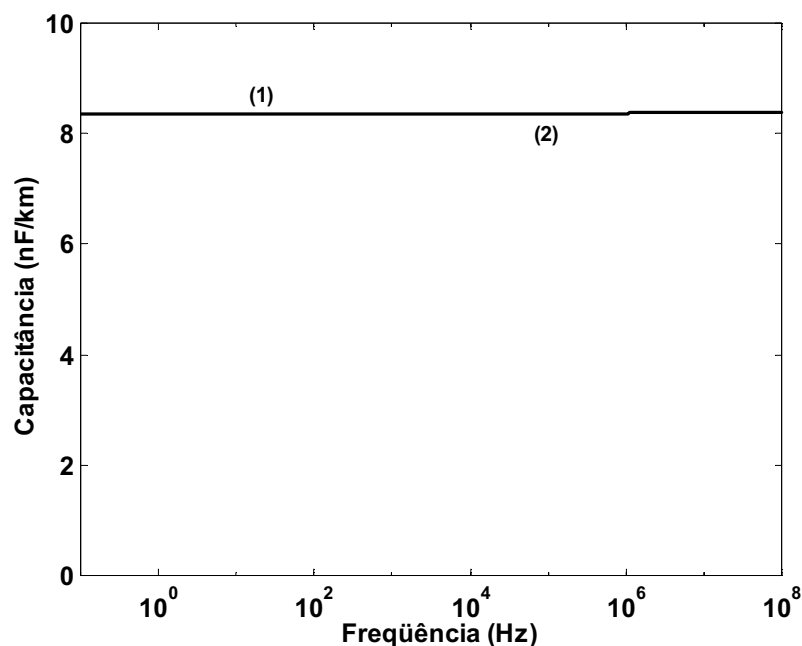


Figura 7.29 - Capacitância do condutor equivalente obtida com o método proposto: Condutor múltiplo de 100 m (1) e de 10 km (2)

7.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi feita uma análise do condutor equivalente a um condutor múltiplo. Sabe-se que um condutor equivalente a um condutor múltiplo é definido como sendo um condutor cujo raio corresponde ao raio médio geométrico do condutor múltiplo. Uma vez conhecido o raio e a posição do condutor equivalente é possível calcular os parâmetros longitudinais e transversais deste condutor.

Sabe-se que a substituição do raio médio geométrico como sendo o raio do condutor equivalente é uma aproximação, pois para obter, de forma exata, os parâmetros longitudinais e transversais do condutor equivalente a um condutor múltiplo, é necessário levar em conta a natureza distribuída de cada um dos subcondutores.

Os resultados, obtidos para um condutor constituído de dois subcondutores, mostraram que quando se calcula os parâmetros do condutor a partir do raio médio geométrico dos subcondutores obtêm-se resistências longitudinais e capacitâncias transversais menores do que os valores obtidos quando se considera a natureza distribuída dos parâmetros de cada um dos subcondutores. A indutância longitudinal do condutor equivalente praticamente não é alterada quando se determina a mesma a partir da associação paralela ou a partir do método baseado no raio médio geométrico do condutor múltiplo.

Um outro fato que foi possível constatar é que os parâmetros obtidos a partir da associação paralela dos subcondutores tendem a não variar em função do comprimento do condutor múltiplo. Mostrou-se que para um trecho hipotético de 100 m e de 10 km, os parâmetros unitários são praticamente os mesmos.

8 Conclusões

Este trabalho apresentou um método para calcular os parâmetros longitudinais e transversais de um condutor equivalente ao sistema de subcondutores a partir da associação paralela destes subcondutores.

No capítulo 1 foi feito um estudo dos sistemas de energia elétrica. Neste estudo, verificou-se que um sistema de potência vantajoso possui uma fonte primária hidráulica e a energia hidráulica obtida, é convertida em elétrica na própria origem. A energia elétrica, então, é transportada por linhas de transmissão até o ponto em que é convertida em outras formas. Contudo, um sistema elétrico é basicamente composto pelas estações geradoras, as linhas de transmissão e o sistema de distribuição. Este sistema é formado por uma estrutura organizada de maneira vertical e horizontal e cada organização é dividida em níveis de tensão diferentes isolados elétrica e geograficamente uns dos outros. O transporte de energia elétrica é realizado em todos os níveis, diferenciando-se pelas tensões e quantidades de energia que é transportada por cada uma das linhas de transmissão aéreas ou cabos. No Brasil, o sistema elétrico possui uma grande produção hidrelétrica e a maior parte desta produção é controlada por um grupo de empresas regionais que integram o Sistema Interligado Nacional.

No capítulo 2 foi desenvolvido um estudo sobre a evolução dos sistemas de transmissão de energia elétrica desde os primeiros resultados obtidos com a geração da energia mecânica até as modernas linhas de transmissão de alta tensão. Porém, o principal objetivo do capítulo, foi descrever o sistema de transmissão brasileiro e os principais tipos de

estruturas de sustentação utilizadas. Através deste estudo foi possível descrever as principais características das linhas de transmissão aéreas. Foram apresentados alguns modelos de estruturas e as características de cada linha.

No capítulo 3 fez-se uma análise das principais características físicas dos condutores que constituem uma linha aérea de transmissão. Verificou-se que os cabos condutores são considerados os principais elementos de uma linha de transmissão e por isso suas características correspondem ao bom desempenho da linha. Devido à exigência do mercado elétrico mundial, apenas o cobre e o alumínio satisfazem algumas das características exigidas, sendo então, empregados universalmente. Como ilustração, foi apresentada alguns modelos de condutores múltiplos. Este tipo de condutor é formado por grupos de subcondutores dispostos simetricamente em relação a um eixo vertical. Estes subcondutores são conectados em paralelo resultando em um único condutor.

No capítulo 4, fez-se um estudo dos parâmetros longitudinais e transversais de uma linha aérea de transmissão, sem cabos pára-raios, considerando a influência dos efeitos solo e pelicular. Desta forma foi possível verificar a influência da frequência nos parâmetros da linha. Constatou-se que os parâmetros longitudinais e transversais de uma linha aérea de transmissão são influenciados também pela geometria da linha e, em alguns casos, pelo meio a que a linha está imersa.

No capítulo 5 foi feito um estudo referente ao procedimento de cálculo dos parâmetros da linha constituída de condutores múltiplos Para determinar os parâmetros de um condutor múltiplo, considera-se que os subcondutores podem ser substituídos por um condutor equivalente cujo raio é igual ao raio médio geométrico dos subcondutores. Sendo assim, considerando as equações calculadas no capítulo anterior e substituindo o valor do raio médio geométrico nestas equações, desenvolveram-se as expressões que determinam os parâmetros

longitudinais e transversais de um condutor múltiplo genérico. Como exemplo, apresentou-se os resultados de uma linha trifásica de 440 kV e foram calculadas as indutâncias externas, as capacitâncias e também as resistências e indutâncias devido ao efeito solo.

No capítulo 6 apresentou-se um processo alternativo para determinar os parâmetros longitudinais e transversais de um condutor equivalente ao condutor múltiplo. Considerou-se neste processo o fato de que os subcondutores que constituem um condutor múltiplo não estão todos a uma mesma altura do solo e também não estão igualmente espaçados. Com isso, a corrente não se distribui igualmente entre todos os subcondutores e não é possível afirmar que o condutor equivalente possua um raio equivalente ao raio médio geométrico da associação de subcondutores. Neste método, é considerado que um condutor múltiplo pode ser substituído por um único condutor cujos parâmetros longitudinais e transversais são obtidos a partir da associação paralela dos subcondutores. No desenvolvimento deste método foi considerado um condutor múltiplo hipotético constituído de dois subcondutores, cujos parâmetros longitudinais e transversais eram conhecidos. Nas equações obtidas, verificaram-se uma relação entre a impedância característica da linha do condutor equivalente Z_c , e a função de propagação γ com os parâmetros do condutor equivalente. Desta forma, foi possível determinar os parâmetros longitudinal e transversal do condutor equivalente.

No capítulo 7 foram apresentados resultados da associação paralela de um condutor múltiplo. Estes resultados permitem analisar o comportamento dos parâmetros longitudinais e transversais de um condutor múltiplo constituído de dois subcondutores, simétricos em relação ao eixo vertical, com alturas diferentes em relação ao solo. Foi comparado o método proposto desenvolvido no capítulo 6 com o método clássico que se baseia no raio médio geométrico do conjunto de subcondutores. Para isso, consideraram-se os comprimentos de linha: 100m, 500m, 1000m e 10000m. Para todos estes comprimentos de linha, verificou-se

que quando o condutor equivalente é obtido a partir do método clássico, a resistência longitudinal apresenta um valor menor do que o valor obtido por meio do método proposto para a mesma. Quanto à indutância, verificou-se que existe uma diferença bastante pequena entre os valores obtidos por ambos os métodos. A condutância do condutor equivalente, a partir do método proposto, sofre influência da frequência, quando se considera frequências superiores a 100 kHz, o que não é detectado quando o condutor equivalente é obtido a partir do método clássico. Considerando o método clássico, o valor da capacitância do condutor equivalente é menor que o valor da mesma para o método proposto.

O procedimento de cálculo desenvolvido neste trabalho pode servir de referência para trabalhos que visam calcular os parâmetros de linha constituída de condutores múltiplos, a partir de um método mais preciso sem a necessidade de utilizar o conceito de raio médio geométrico.

Fica como sugestão para trabalhos futuros a análise dos efeitos causados na linha a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

Referências

BURNER, A. Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS 89, n° 1, p. 88-96, 1970.

CHIPMAN, R. A. **Teoria e problemas de linhas de transmissão**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.

COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA. CTEEP. Disponível em: <http://www.cteep.com.br/setor_sistemas_intro.shtml>. Acesso em: 19 jul. 2006.

D'AMORE, M.; SARTO, M. S. A new formulation of lossy ground return parameters for transient analysis of multiconductor dissipative lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.12, n.1, p. 303 - 314, 1997.

DERI, A.; TEVAN, G.; SEMLYEN, A. E.; CASTANHEIRA, A. The complex ground return plane – A simplified model for homogeneous and multi-layer earth return. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS 100, n.8, p. 3686-3693, 1981.

DOMMEL, H. W. **EMTP: theory book**. Canada: Vancouver, 1986.

DUFOUR, C. Real-time simulation of power transmission lines using Marti model with optimal fitting on dual-DSP card. **IEEE Trans. on Power Delivery**, New York, v.11, n.1, p.412-419, 1996.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linha aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

HAYT, W. H. **Eletromagnetismo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

HOFMANN, L. Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. **IEEE Trans. on Power Delivery**, New York, v.18, n.2, p. 564-570, 2003.

KUROKAWA, S. **Parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão calculados a partir das correntes e tensões de fase**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

KUROKAWA, S.; PISSOLATO, J.; TAVARES, M. C.; PORTELA, C. M.; PRADO, A. J. a new procedure to derive transmission-line parameters: applications and restrictions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.21, n.1, p. 492 – 498, 2006.

LEITHOLD, L. **O cálculo com geometria analítica**. 3. ed. São Paulo: Harbra, 1994. v.1.

MARTI, L. Low-order approximation of transmission line parameters for frequency-dependent models. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS 102, n.11, p. 3582-3589, 1983.

PHELPS DODGE INTERNATIONAL CORPORATION - PDCI.. Disponível em <http://www.pdicportuguese.com/>>. Acesso em : 8 jul.2006.

PETTERSSON, P. Propagation of waves on a wire above a lossy ground - different formulations with approximations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.14, n.3, p. 1173 - 1180, 1999.

SINCLAIR, A. J.; FERREIRA, J. A. Analysis and design of transmission line structures by means of the geometric mean distance. In: IEEE AFRICAN CONFERENCE IN AFRICA, 4, 1996, Stellenbosch. **Conference...** Stellenbosch: IEEE, 1996. v.2, p.1062-1065.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

TAVARES,. M. C. **Modelo de linha de transmissão polifásico utilizando quase modos**. 1998. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

WEDEPOHL, L. M. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.11, n. 3, p.1538-1546, 1996.