

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS EDUARDO BATISTA ANDREATA

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO E DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS EM CABOS SUBTERRÂNEOS INSTALADOS EM TUBOS
NÃO METÁLICOS NO CONTEXTO DE PARQUES EÓLICOS**

BELO HORIZONTE

2025

LUIS EDUARDO BATISTA ANDREATA

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO E DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS EM CABOS SUBTERRÂNEOS INSTALADOS EM TUBOS
NÃO METÁLICOS NO CONTEXTO DE PARQUES EÓLICOS**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Alberto Resende De Conti

BELO HORIZONTE

2025

A557a	Andreato, Luis Eduardo Batista. Análise das características de propagação e de transitórios eletromagnéticos em cabos subterrâneos instalados em tubos não metálicos no contexto de parques eólicos [recurso eletrônico] / Luis Eduardo Batista Andreato. – 2025. 1 recurso online (127 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Alberto Resende De Conti. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Inclui bibliografia. 1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Recursos renováveis – Teses. 3. Parque eólico – Teses. 4. Construção subterrânea – Teses. 5. Tubos de aço – Teses. 6. Linhas de telecomunicação – Teses. I. De Conti, Alberto Resende. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título. CDU: 621.3(043)
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA - COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO E DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM CABOS SUBTERRÂNEOS INSTALADOS EM TUBOS NÃO METÁLICOS NO CONTEXTO DE PARQUES EÓLICOS"

LUIS EDUARDO BATISTA ANDREATA

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de novembro de 2025.

Por:

Prof. Dr. Alberto Resende De Conti
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Ósis Eduardo Silva Leal
IECT (UFVJM)

Prof. Dr. Carlos Ermídio Ferreira Caetano
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Alberto Resende de Conti, Professor do Magistério Superior**, em 05/11/2025, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Ermidio Ferreira Caetano, Professor do Magistério Superior**, em 05/11/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ósis Eduardo Silva Leal, Usuário Externo**, em 06/11/2025, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4693162** e o código CRC **6D8A0661**.

Referência: Processo nº 23072.266700/2025-83

SEI nº 4693162

*Dedico esse trabalho a minha irmã Laene, que,
mesmo sem saber, nos lembra todos os dias do
quanto a vida é bela e o quanto vale a pena
lutar por ela*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha mãe Ana, ao meu pai Eduardo e à minha irmã Laene por serem as maiores inspirações da minha vida, pelo apoio mútuo e por contribuírem, cada um à sua maneira, para que nós formemos uma família unida e fraterna.

Agradeço à minha avó Conceição que, durante toda vida, foi o maior exemplo de resiliência, serenidade e amor que eu poderia ter, e também à minha avó Brígida, por todo amor e carinho e pela oportunidade de vivenciar os melhores momentos em família.

Agradeço a Arthur e Thiago, meus irmãos da vida, por estarem sempre presentes nos momentos de alegria e nos momentos difíceis, e por serem também minha inspiração acadêmica.

Agradeço ao professor e meu orientador Alberto por me guiar, de maneira paciente, comprometida e humana, durante o desenvolvimento desse trabalho e por contribuir com o meu aprendizado continuamente.

Agradeço ao Leonardo, meu chefe e amigo, pela compreensão e apoio durante essa trajetória e por ser minha referência profissional. Agradeço também a todos os colegas da RS Engenharia que contribuem todos os dias para minha evolução pessoal e profissional.

Agradeço especialmente a Deus por conceder essa oportunidade de estudar, por colocar todas essas pessoas especiais em minha vida e por dar sentido e razão a tudo que fazemos e buscamos.

“A minha alucinação é suportar o dia a dia, e o meu delírio é a experiência com coisas reais”

Belchior

Resumo

A construção de parques eólicos tem crescido de forma significativa nos últimos anos, tornando-se uma fonte de energia renovável promissora no cenário global de transição energética. Nesse contexto, diferentes configurações de cabos são utilizadas para o transporte da energia gerada e para a interligação do aterramento de aerogeradores adjacentes e equipotencialização dos parques, com intuito de reduzir sobretensões de origem atmosféricas e reduzir os impactos causados por esses fenômenos. Para estes fins, cabos subterrâneos têm sido largamente utilizados, em configurações que envolvem cabos diretamente enterrados e cabos dentro de tubos, muitas vezes constituídos de materiais não metálicos. Para a última configuração não há formulação analítica na literatura que permita o cálculo dos parâmetros de impedância e admitância diretamente. Dessa forma, é proposto o cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos em configurações típicas no contexto de parques eólicos através da combinação de expressões fechadas e do método de elementos finitos. São avaliadas quatro configurações básicas que envolvem cabos de média tensão diretamente enterrados e cabos enterrados em tubos de polietileno de alta densidade, além das suas variações que incluem um condutor de aterramento diretamente enterrado ou compartilhando um dos tubos. Essas configurações são analisadas do ponto de vista das suas características de propagação no domínio modal e da sua resposta transitória. Os resultados indicam que, de forma geral, configurações constituídas por cabos em tubos apresentam menor atenuação das ondas de tensão e corrente que, assim, viajam com uma velocidade maior do que em configurações de cabos diretamente enterrados no solo. Essa característica se traduz em uma resposta transitória caracterizada por sobretensões de magnitude mais elevada. Esse comportamento é um forte indicativo da necessidade da modelagem correta de configurações de cabos utilizadas em parques eólicos a fim de caracterizar com precisão o impacto de sobretensões atmosféricas na rede e no aterramento dos aerogeradores.

Palavras-chave: parques eólicos; cabos subterrâneos; tubos não metálicos; método de elementos finitos; domínio modal; teoria de linhas de transmissão; transitórios eletromagnéticos.

Abstract

The construction of wind farms has grown significantly in recent years, becoming a promising source of renewable energy in the global energy transition scenario. In this context, different cable configurations are employed both for transmitting the generated energy and for interconnecting the grounding systems of adjacent wind turbines, as well as for the equipotentialization of the wind farms, with the aim to mitigate lightning overvoltages and their impacts. For these purposes, underground cables have been widely used, in configurations that involve directly buried cables and pipe-type cables, often made of non-metallic materials. For the latter configuration, there is no analytical formulation in the literature for calculation of impedance and admittance parameters. Accordingly, this study proposes a hybrid methodology combining closed-form expressions and the finite element method to characterize typical cable arrangements in wind farms. Four configurations are evaluated, involving medium-voltage cables directly buried and cables placed within high-density polyethylene pipes, as well as their variations that include a grounding conductor directly buried or within the pipes. These configurations are assessed in terms of their propagation characteristics in the modal domain and their transient response. Results indicate that pipe-type configurations generally have lower attenuation and higher propagation velocities of voltage and current waves, leading to transient responses with higher overvoltage magnitudes compared to directly buried cables configurations. This behavior highlights the importance of accurately modeling the cable configurations to properly assess the impact of lightning overvoltages on wind farm networks and wind turbine grounding systems.

Keywords: wind farms; underground cables; non-metallic pipes; finite element method; modal domain; transmission line theory; electromagnetic transients.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de organização típica de um parque eólico	26
Figura 2.2 - Configuração da RMT de um parque eólico: (a) subterrânea e (b) aérea...	27
Figura 2.3 - Exemplo de configuração de cabo dentro de tubo de HDPE. Reprodução de (Lafaia et al., 2017)	35
Figura 3.1 - Configuração de cabos diretamente enterrados no solo.....	38
Figura 3.2 - Cabo isolado 300 mm ²	39
Figura 3.3 - Configuração de cabos dentro de tubos enterrados no solo.....	40
Figura 3.4 - Cabo isolado 300 mm ² e cabo de aterramento em repouso no tubo HDPE	41
Figura 4.1 - Cabo isolado composto por núcleo e blindagem	46
Figura 4.2 - Corte transversal do cabo da Figura 4.1	47
Figura 4.3 - Configuração simplificada composta por dois cabos quaisquer dentro de um tubo de HDPE.....	53
Figura 4.4 - Malha gerada pelo FEMM para a configuração de cabos dentro de tubos.	58
Figura 4.5 - Distribuição da densidade de fluxo elétrico: excitação do núcleo (a), blindagem (b) e condutor de aterramento (c)	59
Figura 5.1 - Configuração 1: Cabos diretamente enterrados.....	71
Figura 5.2 - Configuração 2: Cabos dentro de tubos enterrados	71
Figura 5.3 - Configuração 3: Cabos diretamente enterrados e um condutor adicional ..	72
Figura 5.4 - Configuração 4: Cabos dentro de tubos enterrados e um condutor adicional	72
Figura 5.5 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 1...	80
Figura 5.6 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 1	80
Figura 5.7 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 1	81
Figura 5.8 - Constante de atenuação em função da frequência para configuração 2	82
Figura 5.9 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 2	82
Figura 5.10 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 2	83
Figura 5.11 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 3.	84
Figura 5.12 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 3	84

Figura 5.13 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 3	85
Figura 5.14 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 4.	86
Figura 5.15 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 4	86
Figura 5.16 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 4	87
Figura 5.17 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 5.	88
Figura 5.18 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 5	88
Figura 5.19 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 5	89
Figura 5.20 - Constante de atenuação para os modos coaxiais para as cinco configurações	90
Figura 5.21 - Velocidade de fase para os modos coaxiais para as cinco configurações	91
Figura 5.22 - Módulo da impedância característica para os modos coaxiais para as cinco configurações.....	91
Figura 5.23 - Constante de atenuação para os modos entre blindagens para as cinco configurações.....	92
Figura 5.24 - Velocidade de fase para os modos entre blindagens para as cinco configurações.....	93
Figura 5.25 - Módulo da impedância característica para os modos entre blindagens para as cinco configurações.....	93
Figura 5.26 - Constante de atenuação para o modo terra para as cinco configurações..	94
Figura 5.27 - Velocidade de fase para o modo terra para as cinco configurações	95
Figura 5.28 - Módulo da impedância característica para o modo terra para as cinco configurações.....	95
Figura 5.29 - Constante de atenuação para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5.....	96
Figura 5.30 - Velocidade de fase para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5.....	97
Figura 5.31 - Módulo da impedância característica para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5	97

Figura 6.1 - Esquema para simulação de transitórios por excitação dos núcleos das Configurações 1 e 3: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga.....	100
Figura 6.2 - Esquema para simulação de transitórios por excitação dos núcleos das Configurações 2, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga.....	101
Figura 6.3 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto.....	101
Figura 6.4 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto.....	102
Figura 6.5 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte.....	102
Figura 6.6 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte.....	103
Figura 6.7 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga	103
Figura 6.8 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga	104
Figura 6.9 - Esquema para simulação de transitórios por excitação das blindagens das Configurações 1 e 3: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga.....	105
Figura 6.10 - Esquema para simulação de transitórios por excitação das blindagens das Configurações 2, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga.....	106
Figura 6.11 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto.....	107
Figura 6.12 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte.....	107
Figura 6.13 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga	108
Figura 6.14 - Esquema para simulação de transitórios por excitação do condutor adicional das Configurações 3, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga	109

Figura 6.15 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens em circuito aberto.....	110
Figura 6.16 - Tensão no condutor adicional no terminal emissor para a simulação das blindagens em circuito aberto.....	110
Figura 6.17 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte.....	111
Figura 6.18 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte.....	111
Figura 6.19 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga	112
Figura 6.20 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga	112
Figura 6.21 - Esquema para simulação de transitórios de uma aplicação real das Configurações 3, 4 e 5: (a) blindagens abertas na carga e (b) blindagens aterradas na carga.....	114
Figura 6.22 - Tensão na blindagem das fases A, B e C no terminal receptor em circuito aberto	115
Figura 6.23 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor com as blindagens não aterradas.....	116
Figura 6.24 - Tensão na blindagem das fases A, B e C no terminal receptor com as blindagens aterradas	116
Figura 6.25 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor com as blindagens aterradas.....	117

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Dados e propriedades dos cabos e tubo analisados	41
---	----

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Relevância e Motivação.....	18
1.2	Objetivo	22
1.3	Metodologia.....	22
1.4	Organização do Texto.....	23
2	Aplicações de Cabos Subterrâneos e Sobreensões de Origem Atmosférica em Parques Eólicos	25
2.1	Considerações Iniciais	25
2.2	Aterramento de Aerogeradores em Parques Eólicos	28
2.3	Modelagem de Cabos Enterrados	32
2.4	Considerações Finais	35
3	Configurações Avaliadas	37
3.1	Considerações Iniciais	37
3.2	Cabos Diretamente Enterrados	37
3.3	Cabos Dentro de Tubos Enterrados	39
3.4	Considerações Finais	42
4	Cálculo de Parâmetros de Cabos Enterrados e Cabos Dentro de Tubos Não Metálicos	43
4.1	Considerações Iniciais	43
4.2	Teoria de Linhas de Transmissão	44
4.3	Cálculo de Parâmetros de Cabos Diretamente Enterrados	46
4.3.1	Matriz de Impedância Longitudinal	46
4.3.2	Matriz de Admitância Transversal	51

4.4	Cálculo de Parâmetros de Cabos Enterrados Dentro de Tubos Não Metálicos	52
4.4.1	Matriz de Impedância Longitudinal	53
4.4.2	Matriz de Admitância Transversal	60
4.5	Modelo de Solo.....	62
4.6	Camadas Semicondutoras.....	63
4.7	Considerações Finais	64
5	Características de Propagação das Configurações Avaliadas	65
5.1	Considerações Iniciais	65
5.2	Transformação Modal	66
5.3	Configurações Analisadas	70
5.4	Análise dos Parâmetros Modais	79
5.4.1	Análise por Configuração de Cabos	80
5.4.2	Análise por Modos de Propagação	89
5.5	Considerações Finais	98
6	Análise de Transitórios Eletromagnéticos	99
6.1	Considerações Iniciais	99
6.2	Resposta Transitória por Excitação dos Núcleos dos Cabos.....	99
6.3	Resposta Transitória por Excitação das Blindagens dos Cabos	105
6.4	Resposta Transitória por Excitação do Condutor Adicional de Aterramento	109
6.5	Aplicação Real.....	113
6.6	Considerações Finais	117
7	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	118
7.1	Conclusões.....	118

7.2	Propostas de Continuidade	122
	Referências Bibliográficas	124

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

A utilização de cabos subterrâneos vem se tornando bastante difundida em todo o mundo, sobretudo com o aumento das restrições relacionadas à construção de novas linhas de transmissão aéreas, ao alto custo fundiário e à exigência de critérios de confiabilidade operacional cada vez maiores. Sua aplicação ocorre em diferentes contextos, como na indústria, em sistemas de distribuição urbanos, em usinas solares e em parques eólicos.

No que diz respeito à energia eólica, tem-se observado que a construção de parques eólicos tem crescido de forma significativa nos últimos anos como uma opção de fonte de energia renovável, sendo uma alternativa viável no contexto de transição energética global. Porém, a instalação recorrente de aerogeradores em locais abertos e elevados faz com que estes estejam frequentemente sujeitos à incidência de descargas atmosféricas (Alipio et al., 2021) (Rizk et al., 2016).

Para diminuição dos efeitos de descargas atmosféricas em aerogeradores e parques eólicos, a norma IEC 61400-24 (2019) recomenda a interconexão entre os aterramentos individuais de cada aerogerador (Alipio et al., 2021). Nesse sentido, a eficiência na redução da elevação de potencial no aterramento (GPR, sigla para *ground potential rise*) de cada aerogerador causada, por exemplo, pela incidência direta de uma descarga atmosférica depende do tipo de cabo utilizado nessa interligação. No caso da conexão através de um condutor enterrado nu, o valor de pico das sobretensões de origem atmosférica é fortemente influenciado pela dispersão de correntes ao longo do cabo de interconexão propriamente dito, o que depende diretamente da resistividade do solo. Por outro lado, quando são utilizados cabos de interconexão isolados enterrados, o aterramento dos aerogeradores adjacentes torna-se mais importante para a redução das sobretensões na turbina atingida do que no caso de cabos de interconexão nus (Alipio et

al., 2021). Isso ocorre porque não se verifica a dispersão de correntes para o solo e, com isso, uma parcela mais significativa da corrente de descarga é direcionada para o aterramento de turbinas vizinhas, gerando ondas refletidas que podem reduzir as sobretensões no aerogerador atingido. Além do tipo de cabo utilizado na interconexão, as características da forma de onda da corrente de descarga também influenciam na elevação de potencial, de modo que a escolha do tipo de cabo utilizado pode resultar em reduções de GPR distintas, a depender da onda de corrente analisada. Observa-se que a redução do GPR é menor para correntes de descargas subsequentes comparadas a correntes de primeira descarga, independentemente do tipo de cabo utilizado na interligação. Isso ocorre porque descargas subsequentes possuem maior conteúdo de frequências, situação na qual o comprimento efetivo dos condutores de conexão, caso estes sejam nus, é menor.

No que diz respeito à topologia da rede utilizada para a transmissão da energia gerada nos aerogeradores e aos critérios de aterramento adotados, a configuração dos parques eólicos varia conforme projeto e condições ambientais, técnicas e econômicas. Conforme mostrado em (Rizk et al., 2016), na maioria das situações a energia gerada é transmitida para o sistema elétrico através de cabos subterrâneos. Além disso, há casos nos quais se utilizam cabos subterrâneos em associação com uma rede aérea de média tensão para interconexão dos aerogeradores e equipotencialização do parque (Da Silva et al., 2025). Independentemente da estratégia utilizada quanto aos cabos enterrados, o seu uso dentro de tubos no contexto dos parques eólicos é bastante comum. Devido a restrições ambientais e fundiárias, às distâncias entre aerogeradores e muitas vezes a solos de resistividade elevada (Alipio et al., 2021), em diversas ocasiões opta-se por realizar a interconexão das turbinas eólicas por meio de cabos ou condutores nus em eletrodutos, utilizando-se, para isso, dutos individuais ou tubos que compartilham os cabos de média tensão com cabos de aterramento.

Nesse contexto, no qual diferentes configurações são possíveis para a transmissão da energia gerada e para a interconexão entre os sistemas de aterramento de turbinas eólicas, identificar a mais efetiva se torna uma tarefa essencial para reduzir o GPR produzido por correntes de descargas atmosféricas que eventualmente atinjam os aerogeradores, garantindo maior confiabilidade ao sistema e reduzindo os danos em componentes quando da ocorrência desses eventos. O comportamento de diferentes

métodos de conexão de aterramentos de aerogeradores foi objeto de estudo de vários trabalhos, como (Ahmed; Ishii, 2011), (Alipio et al., 2019), (Alipio et al., 2020) e (Da Silva et al., 2023). Uma das abordagens que pode ser utilizada para a avaliação desse problema consiste no emprego da teoria de linhas de transmissão para a modelagem da propagação das ondas de tensão e corrente geradas por descargas atmosféricas ao longo dos cabos que realizam essa interconexão. Para isso, o primeiro passo consiste em determinar os parâmetros por unidade de comprimento da configuração investigada.

O cálculo dos parâmetros por unidade de comprimento de cabos depende da distribuição geométrica dos condutores e das propriedades dos meios materiais envolvidos. Para o cálculo da impedância e da admitância de cabos coaxiais do tipo *single core*, enterrados ou aéreos, constituídos por núcleo, blindagem e, eventualmente, armadura, há formulação analítica disponível (Ametani, 1980); (Gudmundsdottir et al., 2011). Para cabos dentro de tubos, os parâmetros podem ser definidos analiticamente apenas em algumas situações. Como indicado em (Schinzinger; Ametani, 1978), quando o condutor está posicionado de forma concêntrica dentro de um tubo metálico isolado da terra, o cálculo de parâmetros por unidade de comprimento pode ser feito de forma analítica. No entanto, quando o posicionamento do cabo é feito de forma excêntrica no interior do tubo, é necessário utilizar uma transformação conformal a partir da solução clássica. No entanto, ainda para esse caso, expressões fechadas podem ser utilizadas. Além disso, quando a análise é feita em tubos com paredes de espessura finita, ou seja, quando se considera que o tubo metálico não está isolado da terra e, portanto, o tubo e a terra formam duas camadas condutoras distintas, também é possível calcular a impedância e admitância por meio de expressões analíticas (Amekawa; Nagaoka; Ametani, 2004).

Até recentemente, softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos, como o ATP (*Alternative Transients Program*), dispunham somente de formulações analíticas em suas rotinas internas de cálculos de parâmetros de cabos. No entanto, essas formulações são válidas apenas para um número limitado de geometrias e, além disso, consideram apenas o efeito pelicular, desprezando os efeitos de proximidade (Souza et al., 2017). Embora a existência de formulação para o cálculo de parâmetros para os cabos apresentados seja um aspecto vantajoso no que diz respeito à sua modelagem, as situações

descritas muitas vezes não representam a configuração real de cabos, sobretudo no contexto de parques eólicos.

Para a modelagem, por exemplo, de cabos apoiados no interior de tubos feitos de materiais não condutores, como HDPE (*high-density polyethylene*), e outras geometrias não canônicas, não existe formulação analítica para cálculo da impedância e admitância por unidade de comprimento (Lafaia et al., 2017). Essa é, contudo, a situação mais comum para representar seja a interconexão do aterramento de aerogeradores, seja os cabos subterrâneos de média tensão utilizados nesse contexto. Nessas situações, o uso do método de elementos finitos (FEM) tem se mostrado uma solução viável, conforme indicado em (Souza et al., 2017) e (Lafaia et al., 2017). É válido ressaltar ainda que, alternativamente ao FEM, o método MoM-SO tem sido utilizado para obtenção da impedância série de sistemas de cabos subterrâneos e submarinos. Essa estratégia combina o método dos momentos (MoM) com a técnica operador de admitância de superfície (SO), de modo que cada meio condutor seja substituído pelo meio externo e uma densidade de corrente equivalente seja introduzida na interface entre ambos os meios (Patel; Gustavsen; Triverio, 2013). Uma vez que os efeitos peliculares, de proximidade e de retorno pela terra são considerados por essa metodologia no cálculo dos parâmetros, a sua aplicação abrange uma grande quantidade de situações, como cabos do tipo three-core, cabos dentro de valas, túneis e tubos, e sistemas de cabos enterrados em solos de múltiplas camadas (Patel; Triverio, 2015) (Patel; Triverio, 2016). No que diz respeito a cabos dentro de tubos, o método MoM-SO inclusive já está incorporado em softwares de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, para situações que envolvem tubos metálicos com cobertura isolante, por exemplo.

O posicionamento promissor dos parques eólicos no cenário global de geração de energia renovável, aliado ao emprego de configurações de cabos com características as mais variadas possíveis e, muitas vezes, pouco estudadas no contexto da simulação de transitórios eletromagnéticos, torna o estudo da interconexão de aterramentos de aerogeradores e outras aplicações em parques eólicos particularmente desafiador. Para que esse problema seja devidamente compreendido, torna-se necessário avaliar o comportamento transitório de configurações de cabos que sejam efetivamente

empregadas em parques eólicos, com o que se espera viabilizar uma caracterização mais rigorosa de sobretensões geradas por descargas atmosféricas neste cenário.

1.2 Objetivo

Esse trabalho busca avaliar o comportamento das características de propagação e a resposta transitória de diferentes configurações de cabos subterrâneos aplicadas em parques eólicos, as quais incluem cabos isolados diretamente enterrados, cabos isolados dentro de tubos, individualmente ou em conjunto com cabos de aterramento. Sob essa perspectiva, busca-se atingir três objetivos específicos:

- Calcular a impedância e a admitância por unidade de comprimento de configurações de cabos dentro de tubos não metálicos utilizadas em parques eólicos, para as quais não há formulação analítica disponível;
- Analisar as características de propagação no domínio modal de cada configuração de cabos avaliada neste trabalho, no que diz respeito às diferenças observadas entre cada modo e entre as configurações;
- Analisar a resposta transitória das configurações de cabos por meio de simulações com a aplicação de um degrau de tensão unitário, de modo a avaliar as diferenças nas sobretensões resultantes em cada configuração.

Pretende-se, portanto, investigar características transitórias de configurações de cabos subterrâneos que, embora tenham grande relevância no contexto de parques eólicos, ainda foram pouco investigadas na literatura. Essas análises constituem a base para estudos mais aprofundados sobre os efeitos de descargas atmosféricas em parques eólicos utilizando a teoria de linhas de transmissão.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em três etapas distintas. A primeira delas consistiu em uma revisão bibliográfica acerca das aplicações de cabos subterrâneos em parques eólicos e dos fenômenos transitórios a que estão submetidos, especialmente aqueles causados por descargas atmosféricas. Nesse contexto, pretende-se identificar as diferentes configurações de cabos utilizadas em parques eólicos, os tipos de interligação dos aterramentos de aerogeradores e o impacto de cada uma das configurações

investigadas nos efeitos decorrentes da incidência de descargas atmosféricas em parques eólicos. A revisão apresenta ainda algumas estratégias utilizadas para a modelagem de cabos presentes na literatura, ressaltando os limites de validade para o uso de expressões analíticas e as configurações não tradicionais para as quais outras estratégias de cálculo são exigidas.

A segunda etapa consistiu na definição das diversas configurações de cabos a serem estudadas neste trabalho e a posterior determinação dos parâmetros de impedância e admitância por unidade de comprimento para cada caso. São consideradas, para isso, aplicações reais que têm sido utilizadas em parques eólicos no Brasil. Nessa etapa, são descritas as estratégias utilizadas para o cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos, envolvendo cabos diretamente enterrados e cabos dentro de tubos não metálicos.

Na sequência foi realizada uma análise modal detalhada das configurações de cabos estudadas. Essa análise parte da representação do problema multicondutor original em vários problemas monofásicos desacoplados equivalentes por meio do uso da teoria de autovalores e autovetores. Dessa forma, cada modo de propagação é devidamente identificado, e suas características de propagação são comparadas entre si e entre cada configuração.

Por fim, implementam-se modelos de cabos subterrâneos com base na teoria de linhas de transmissão, utilizando-se para isso a transformada numérica de Laplace (NLT) (Moreno; Ramirez, 2008). Nessa etapa, o modelo de linha implementado é utilizado para a obtenção da resposta transitória de cada configuração de cabo analisada, a fim de comparar seu comportamento no que diz respeito às características das sobretensões observadas.

1.4 Organização do Texto

O texto foi organizado da seguinte forma: o presente capítulo apresenta o contexto no qual este trabalho se insere, destacando a relevância e os questionamentos que levaram ao estudo de configurações de cabos presentes em parques eólicos, que incluem a interligação do aterramento de aerogeradores.

No **Capítulo 2**, é apresentado um histórico dos estudos já realizados no que se refere a diferentes configurações de cabos subterrâneos e suas respostas transitórias, especialmente no contexto de aplicação de parques eólicos, bem como as dificuldades e desafios da modelagem de cabos isolados, aéreos, subterrâneos e dentro de tubos não metálicos, no que diz respeito ao cálculo de parâmetros elétricos.

No **Capítulo 3**, é feita a caracterização das diversas configurações de cabos subterrâneos estudadas, no contexto de aplicação de parques eólicos, as quais englobam cabos diretamente enterrados e dentro de tubos não metálicos.

No **Capítulo 4**, é feita a descrição do procedimento para o cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos nas situações analisadas, ressaltando os limites de validade e limitações das expressões analíticas existentes para este fim e a estratégia utilizada para configurações tipicamente aplicadas em parques eólicos.

No **Capítulo 5**, são apresentadas as características de propagação das diferentes configurações de cabos subterrâneos estudadas no domínio modal, ressaltando as diferenças no comportamento de cada modo e entre as configurações.

No **Capítulo 6**, apresenta-se uma análise transitória fundamental para as configurações analisadas, além da simulação de uma situação representativa de uma aplicação real de cabos no contexto de um parque eólico, de modo que as diferenças nas sobretensões resultantes serão avaliadas para cada caso.

No **Capítulo 7**, são apresentadas as conclusões do trabalho e propostas de continuidade.

2 Aplicações de Cabos Subterrâneos e Sobreensões de Origem Atmosférica em Parques Eólicos

2.1 Considerações Iniciais

A geração de energia eólica constitui uma alternativa importante para a transição energética global. No Brasil, a participação da energia eólica na matriz energética nacional está em expansão, com o surgimento de novos empreendimentos em todo o país, sobretudo na região Nordeste. Segundo o Balanço Energético Nacional (2024), a energia eólica constitui a segunda maior fonte de energia do país em termos de capacidade instalada, o que equivale a 14,4% da matriz energética brasileira. No ano de 2023, a produção de eletricidade a partir dessa fonte atingiu o valor de 95,8 GWh de energia, sendo que 48% da capacidade total instalada de geração de energia elétrica adicionada ao sistema vieram dessa fonte de energia, em comparação com o ano anterior.

No Brasil, os parques eólicos são constituídos por um conjunto de turbinas eólicas, conhecidas como aerogeradores, que são interconectadas, em grande parte dos casos, por uma rede de média tensão (RMT) com tensão nominal de até 34,5 kV. A quantidade de turbinas em um parque depende da potência total instalada e da potência nominal de cada aerogerador. O espaçamento entre turbinas adjacentes, por sua vez,

depende de cada projeto. No entanto, está diretamente relacionada à potência nominal e, consequentemente, à altura da turbina.

A energia produzida em cada aerogerador é injetada na rede de média tensão de forma que a potência transmitida é cumulativa ao longo do traçado da rede. Geralmente, a RMT termina em uma subestação coletora, de onde a energia é transmitida por meio de linhas de transmissão com tensões nominais de 138 kV, 230 kV ou 500 kV. A Figura 2.1 mostra de forma esquemática a estrutura de organização típica de um parque eólico.

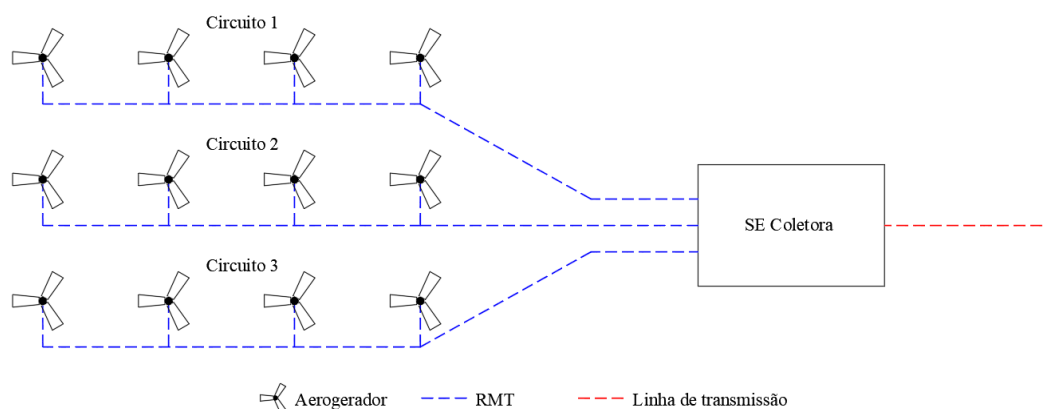
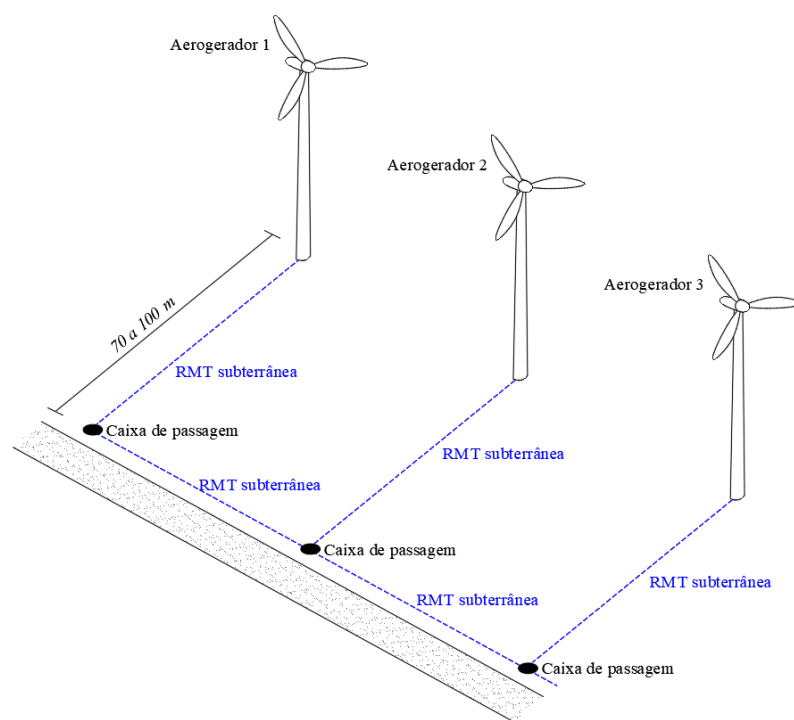


Figura 2.1 - Esquema de organização típica de um parque eólico

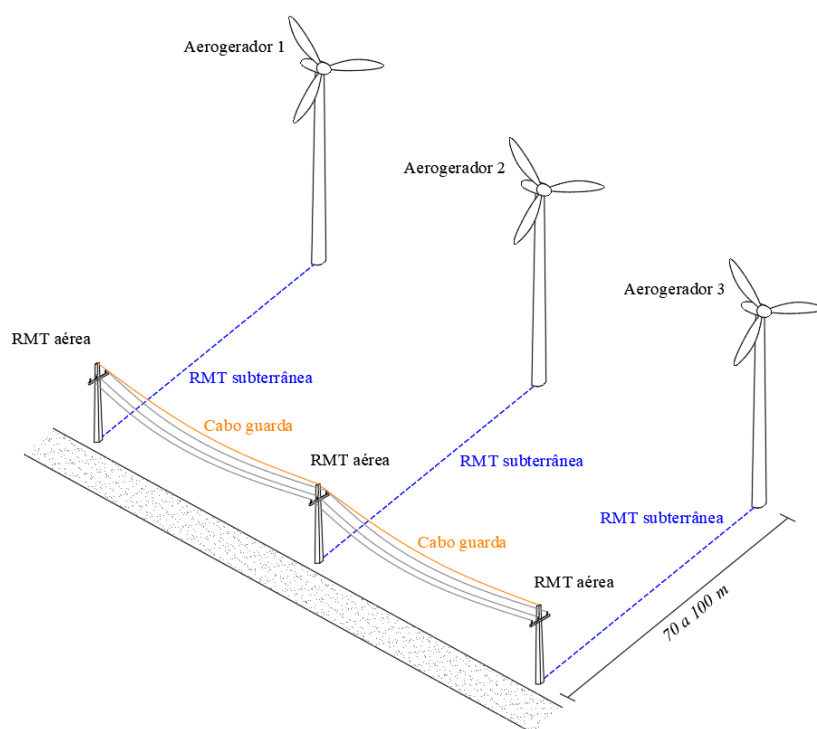
A RMT pode assumir diferentes configurações, podendo ser subterrânea, aérea ou híbrida, combinando trechos aéreos e subterrâneos (Da Silva et al., 2025). Isso ocorre porque, invariavelmente, mesmo nos casos em que se opta pela configuração aérea, trechos subterrâneos ainda são utilizados para a transição entre a turbina e a rede aérea, devido às restrições construtivas existentes na área imediatamente adjacente ao aerogerador. A depender do projeto, essa área corresponde a um raio de 70 m a 100 m a partir da base da torre. A Figura 2.2 mostra duas configurações de parques eólicos, uma exclusivamente subterrânea, ilustrada na Figura 2.2(a), e outra híbrida, com trechos subterrâneo e aéreo, ilustrada na Figura 2.2(b).

De forma geral, a aplicação de cabos subterrâneos é bastante comum em parques eólicos. Na fase de projeto, a configuração do trecho subterrâneo está relacionada intrinsecamente ao sistema de aterramento do parque, ou seja, depende da forma como o aterramento de cada aerogerador é concebido e das possíveis conexões existentes entre eles, além da sua conexão com a rede de média tensão. Nesse sentido, conforme é mostrado no item a seguir, diversos estudos presentes na literatura investigaram como

diferentes configurações podem ser utilizadas e qual seria o impacto observado do ponto de vista de sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas em algum dos aerogeradores pertencentes ao parque eólico.



(a)



(b)

Figura 2.2 - Configuração da RMT de um parque eólico: (a) subterrânea e (b) aérea.

2.2 Aterramento de Aerogeradores em Parques Eólicos

Uma das aplicações de cabos subterrâneos em parques eólicos ocorre no contexto do sistema de aterramento das turbinas eólicas e do parque como um todo. Os aerogeradores, devido a condições geográficas e à sua altura elevada, estão frequentemente sujeitos à incidência de descargas atmosféricas. Isso representa riscos aos equipamentos elétricos instalados no parque eólico, aumentando o risco de falhas e de interrupções na geração de energia. Um dos critérios de projeto que podem ser empregados para limitar elevações de potencial em parques eólicos (Alipio et al., 2021) consiste em obter um sistema de aterramento com a menor impedância possível (IEC 61400, 2024). O aterramento das turbinas geralmente é composto por anéis concêntricos interconectados entre si por condutores radiais, com ou sem hastes. Todo o sistema é preenchido por concreto e compõe a fundação da torre (Kontargyri; Gonos; Stathopulos, 2015) (Gazzana et al., 2018). Devido à sua geometria típica, os sistemas de aterramento de aerogeradores apresentam comportamento capacitivo, que se torna mais pronunciado quando a variação dos parâmetros do solo com a frequência é considerada (Alipio et al., 2019). Nessa situação, o GPR causado pela incidência de descargas em turbinas eólicas é reduzido e a impedância impulsiva vista pela turbina diminui, apresentando valores menores do que a resistência de aterramento de baixa frequência, especialmente em solos de alta e moderada resistividade (Alipio et al., 2017).

De acordo com a norma IEC 61400-24 (2019), eletrodos horizontais utilizados para reduzir o valor da impedância de aterramento em sistemas individuais têm um comprimento efetivo da ordem de 80 m, devido aos componentes de alta frequência das correntes de descargas e os consequentes efeitos de atenuação das ondas de tensão e corrente. Nesse caso, a sobretensão no aterramento causada pela incidência de uma descarga atmosférica em uma turbina não é reduzida para aumentos adicionais dos condutores horizontais, já que não se observa redução adicional da impedância total nessa situação. Frente a este cenário, a principal maneira de reduzir o GPR devido à incidência de descargas em turbinas eólicas se dá através da interconexão do aterramento individual de turbinas adjacentes. Conforme conclui Alipio et al. (2020), a eficiência dessa redução depende das características da corrente de descarga e da resistividade do solo, além do tipo de interligação utilizado. Para solos de baixa resistividade, correntes de frente rápida

e cabos nus, a redução do GPR causada pela interligação é praticamente nula, visto que nesse caso a distância entre dois aerogeradores é maior que o comprimento efetivo do aterramento e, dessa forma, toda corrente é drenada para o solo na região próxima ao ponto de injeção de corrente no aterramento.

No que diz respeito à interconexão entre aterramentos de turbinas eólicas, ela pode ser feita por meio de diferentes configurações, sejam elas de cabos subterrâneos diretamente enterrados ou cabos aéreos, através do cabo guarda ou neutro das redes aéreas de média tensão. Diversos trabalhos investigaram como diferentes configurações de aterramento podem influenciar nas sobretensões geradas por impulsos atmosféricos. A referência (Sunjerga et al., 2019) sugere que a impedância de aterramento de baixa frequência pode ser reduzida de um fator de dois ou mais ao se conectar o aterramento de duas torres separadas de 100 m por um cabo enterrado nu, sendo que a redução é menor em altas frequências devido à influência da indutância do cabo de conexão. Nesse sentido, Alipio et al. (2020) ressaltam que, embora a interconexão sempre melhore o desempenho do sistema de aterramento, a resposta impulsiva de cada sistema de aterramento individual pode ser muito diferente de seu desempenho em baixa frequência, a depender da resistividade do solo e das características das correntes de descarga, de modo que o aterramento da torre adjacente ou até mesmo a interligação entre os sistemas não seja percebido a partir do ponto de injeção da corrente. Além disso, os autores sugerem que a parcela de redução do GPR devido à interconexão das malhas de aterramento é maior em solos de maior resistividade.

Quando se utilizam cabos subterrâneos, a interconexão entre os aterramentos de turbinas eólicas pode ser feita por meio de cabos nus ou isolados, diretamente enterrados no solo. A resposta transitória dessas configurações comparada com o desempenho de uma turbina com aterramento isolado já foi analisada por alguns trabalhos na literatura. A referência (Ahmed; Ishii, 2011) faz uma comparação de dois métodos para a análise de transitórios em sistemas de aterramento interconectados de turbinas eólicas, um baseado no método dos momentos (MoM) e outro baseado no método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Os resultados indicam que a interconexão entre os aterramentos de turbinas adjacentes é eficaz na redução da sobretensão resultante devido a descargas atmosféricas. Esse efeito é mais pronunciado em solos de alta resistividade,

o que sugere que as características do solo podem influenciar fortemente no desempenho do aterramento. O trabalho sugere ainda que o emprego de um condutor de aterramento nu reduz a sobretensão transferida para o aterramento adjacente.

De forma semelhante, a resposta transitória frente a descargas atmosféricas de um par de aerogeradores com sistemas de aterramento interconectados também foi estudada por (Alipio et al., 2021) empregando o modelo eletromagnético híbrido (HEM) e a teoria de linhas de transmissão, considerando novamente condutores subterrâneos nus ou isolados. Nesse trabalho, os autores consideraram formas de onda de primeira corrente de retorno e corrente de retorno subsequente, parâmetros do solo dependentes da frequência e diferentes resistividades do solo. No que diz respeito às características de propagação das configurações avaliadas, observa-se uma atenuação reduzida e uma maior velocidade de propagação associada ao condutor isolado na faixa de frequência típica de correntes de descargas atmosféricas, o que sugere maior influência da torre adjacente no desempenho do aterramento. Embora os dois tipos de interconexão levem à redução do GPR, o condutor nu é mais eficiente. Quando os sistemas de aterramento são interconectados por um condutor nu, a redução do GPR se deve principalmente ao caminho adicional de dissipação de corrente para o solo criado pela presença deste condutor. Já quando a conexão é feita por um condutor isolado, a redução se dá principalmente por influência do aterramento adjacente.

Os trabalhos citados sugerem, de forma unânime, que a interconexão do aterramento de turbinas eólicas adjacentes através de cabos subterrâneos, nus ou isolados, diretamente enterrados no solo, é uma medida eficiente para a redução dos efeitos de sobretensões e correntes associadas a descargas atmosféricas ao sistema de um parque eólico. A referência (Da Silva et al., 2023) chega a uma conclusão semelhante, identificando que a impedância harmônica de aterramento de um aerogerador é reduzida com a interligação entre os sistemas de aterramento individuais. Além disso, no que diz respeito à modelagem do aterramento, sugere também que a consideração de parâmetros do solo variáveis com a frequência tem grande influência nas sobretensões causadas por descargas atmosféricas, sobretudo em solos de alta resistividade. Finalmente, ao se considerar partes aéreas dos aerogeradores, como a nacelle, pás e a torre propriamente

ditas, na simulação computacional da incidência de descargas atmosféricas em um parque eólico, as sobretensões observadas no aterramento apresentam amplitudes maiores.

Cabos subterrâneos são empregados em parques eólicos não apenas para fins de interconexão dos aterramentos das turbinas. A transmissão e a coleta de energia são normalmente feitas por cabos desse tipo. Sob essa perspectiva, o impacto de descargas que atingem os aerogeradores em sobretensões geradas na blindagem dos cabos de média tensão, por exemplo, é um aspecto de grande relevância. Essa questão foi avaliada no trabalho (Sekioka; Ootoguro; Funabashi, 2019), onde os autores investigam as sobretensões de origem atmosférica em cabos subterrâneos em uma rede coletora de 22 kV em um parque eólico composto por sete aerogeradores, do ponto de vista da influência do aterramento da blindagem metálica dos cabos. Os resultados sugerem que esse aterramento tem grande influência na magnitude das sobretensões, sendo que o aterramento apenas em uma das extremidades da blindagem não é efetivo e, portanto, as duas extremidades deveriam ser conectadas ao aterramento da torre.

Já em (Rizk et al., 2016), os autores propuseram a modelagem de um cabo subterrâneo dentro de um tubo por meio do método FDTD tridimensional, utilizando para isso a aproximação de fio fino. Foi avaliado como a condutividade e a permissividade relativa do solo, a posição da turbina eólica atingida e o tempo de subida da forma de onda da corrente de descarga influenciam na corrente resultante que circula pela blindagem do cabo e no campo elétrico radial associado. Os resultados apresentados indicam que a corrente que circula pela blindagem e seu campo elétrico associado são maiores à medida que a condutividade do solo diminui, situação na qual o efeito da permissividade do solo torna-se mais relevante. Como solução, é sugerida a interconexão dos sistemas de aterramento de torres adjacentes através de cabos nus enterrados, denominados contrapesos, o que garante efetiva redução da corrente de descarga que circula na blindagem dos cabos de média tensão.

Além de cabos diretamente enterrados, outras configurações de cabos também podem ser utilizadas para a interconexão de turbinas eólicas. A interligação por meio do cabo guarda ou neutro da rede de média tensão aérea, por exemplo, é uma opção bastante empregada em parques eólicos no Brasil (Da Silva et al., 2025). Na configuração avaliada nessa referência, a energia gerada pelos aerogeradores é transmitida através de uma rede

aérea de 34,5 kV, composta pelos cabos de média tensão e por um cabo guarda superior que tem a função de equipotencialização do parque eólico como um todo e de interligação do sistema de aterramento das turbinas. Nesse trabalho, os autores utilizaram um modelo eletromagnético de onda completa para modelagem do parque, baseado no método *Partial Element Equivalent Circuit* (PEEC). Os resultados apresentados sugerem que as correntes transitórias e o GPR são maiores para a configuração proposta em comparação com a configuração tradicional de interligação do aterramento através de cabos nus diretamente enterrados. Além disso, em concordância com os outros estudos apresentados, as sobretensões resultantes são maiores para solos de maior resistividade.

Como visto, diversas estratégias para interligação do sistema de aterramento de aerogeradores foram estudadas na literatura. Para cada estratégia, uma configuração diferente de cabos é utilizada e, com isso, diferentes são as respostas transitórias frente a descargas atmosféricas. Além das apresentadas, a utilização de uma rede de média tensão subterrânea dentro de tubos enterrados também é comum para o transporte da energia produzida, às vezes até de forma híbrida com redes aéreas. Na situação em que se utilizam exclusivamente tubos enterrados, a interconexão dos aterramentos de torres adjacentes ocorre, muitas vezes, por meio de cabos de aterramento nus ou isolados posicionados dentro de tubos individuais ou compartilhados com os cabos de média tensão. Para essa configuração, o comportamento transitório e as sobretensões resultantes na blindagem dos cabos e nos aterramentos de aerogeradores ainda carecem de investigação mais aprofundada.

2.3 Modelagem de Cabos Enterrados

Como visto na seção anterior, a aplicação de cabos subterrâneos no contexto de parques eólicos é bastante comum, seja para a interconexão de aerogeradores, seja como parte constituinte da rede de média tensão. A modelagem desses cabos é uma etapa importante dos estudos transitórios de alta frequência, sobretudo de origem atmosférica, não só no cenário dos parques eólicos, mas também nas aplicações em sistemas de transmissão de alta tensão.

Estudos da modelagem de cabos subterrâneos têm sido realizados com frequência crescente na literatura. A referência (Gudmundsdottir et al., 2011) descreve a modelagem

de cabos subterrâneos de alta tensão e compara os resultados de simulações com resultados de testes transitórios realizados em campo em um sistema de circuito duplo trifásico de 400 kV na Dinamarca. As simulações foram feitas utilizando um modelo no domínio das fases variável com a frequência no software EMTDC/PSCAD tendo em conta uma determinação rigorosa dos parâmetros de entrada, de modo que cada componente do cabo fosse representado adequadamente. Os resultados indicam que o modelo desenvolvido se comporta muito bem para cabos sem *cross-bonding* na blindagem. Para sistemas de cabos longos e com vários pontos de *cross-bonding*, observa-se a circulação de corrente entre as blindagens de cada fase, cujas características de propagação são extremamente afetadas por efeitos de proximidade. Esse efeito não é considerado pelo software utilizado em (Gudmundsdottir et al., 2011) para calcular a impedância série dos cabos avaliados, o que explicaria, em certa medida, as discrepâncias entre os resultados medidos e simulados.

A investigação conduzida em (Gudmundsdottir et al., 2011) sugere que os resultados de simulação são bastante sensíveis aos parâmetros dos cabos calculados, no que diz respeito à geometria e à propriedade dos materiais empregados. Nesse sentido, as referências (Souza, 2015) e (Souza et al., 2017) propõem uma metodologia baseada em elementos finitos para o cálculo de parâmetros por unidade de comprimento de cabos instalados em ambientes industriais para estudos de alta frequência. Os autores ressaltam que programas de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, utilizam métodos analíticos que são válidos para um número reduzido de geometrias. Além disso, esses métodos analíticos supõem que os cabos estejam suficientemente separados entre si e de outros componentes e sistemas metálicos, de forma que seja possível desprezar efeitos de proximidade no cálculo de seus parâmetros elétricos. Nesse cenário, o software FEMM é utilizado em (Souza et al., 2017) para o cálculo de parâmetros de cabos isolados em três situações – acima da superfície da terra, no interior de tubos e, finalmente, em calhas – de modo a investigar a influência dos efeitos de proximidade e comparar com os resultados obtidos na rotina *Line and Cable Constants* (LCC) do ATP. Os resultados indicam que, para cabos acima da terra, o efeito de proximidade tem pouca influência na impedância total, porém é relevante para a capacitância, quando resistividades realísticas do solo são utilizadas. No caso de cabos dentro de tubos, esse efeito é extremamente importante para o cálculo das resistências, indutâncias e capacitâncias e se torna mais

pronunciado com o aumento da frequência, sendo observada uma diferença de 50% a 70% entre os resultados obtidos no FEMM e no ATP, a depender da frequência de cálculo utilizada.

A maioria dos softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos se baseia no emprego de expressões analíticas para o cálculo de parâmetros de cabos. Com isso, só podem ser utilizados quando os efeitos de proximidade podem ser negligenciados. Para configurações de cabos não convencionais, como as citadas na referência (Souza et al., 2017), métodos numéricos são necessários. Sob essa perspectiva, Lafaia et al. (2017) realizaram a modelagem de um sistema de cabos de 225 kV na França, na tentativa de reproduzir resultados de testes em campo, tanto pela comparação entre os parâmetros calculados e os obtidos com as medições, como pela simulação de transitórios eletromagnéticos. A configuração de cabos analisada é composta por três cabos com núcleo e blindagem localizados individualmente dentro de um tubo de HDPE, envoltos por concreto e enterrados no solo. A Figura 2.3 mostra a configuração utilizada. Dadas as características dessa configuração, o cálculo de parâmetros não pode ser feito diretamente em softwares de transitórios eletromagnéticos (EMT), portanto, são apresentadas as correções consideradas. A isolação externa do sistema, por exemplo, é composta por três camadas, formada pela isolação externa do cabo, pelo ar e pelo tubo de HDPE não concêntrico, visto que o cabo está situado em repouso no tubo. Para essa configuração não há formulação analítica fechada para o cálculo da impedância e admitância do sistema. Os autores propõem uma isolação externa equivalente, a qual é concêntrica, com raio e permissividade relativa equivalentes calculados conforme apresentado em (Lafaia et al., 2015) e (Lafaia, 2016). O resultado foi validado através de um software de elementos finitos (FEM).

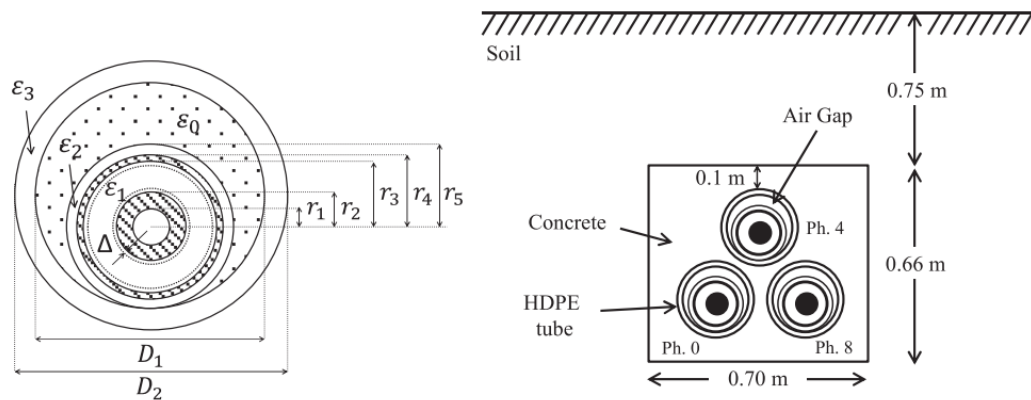


Figura 2.3 - Exemplo de configuração de cabo dentro de tubo de HDPE. Reprodução de (Lafaia et al., 2017)

Uma alternativa que pode ser utilizada no cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos considerando efeitos de proximidade é o método MoM-SO. Como destacam as referências (Patel; Triverio, 2015) e (Patel; Triverio, 2016), há uma excelente concordância entre esse método e o FEM no que diz respeito aos valores de resistência e indutância calculados, em comparação aos parâmetros obtidos por softwares tradicionais que possuem apenas expressões analíticas implementadas. O cálculo mais rigoroso dos parâmetros de cabos considerando efeito de proximidade se reflete na resposta transitória simulada, sobretudo em relação as tensões calculadas na blindagem dos cabos.

2.4 Considerações Finais

Configurações como a mostrada na Figura 2.3 não dispõem de expressões fechadas para o cálculo de parâmetros. No entanto, são bastante comuns em diversas aplicações. Especialmente no contexto de parques eólicos, cabos de média tensão em repouso dentro de tubos não metálicos como os de HDPE são largamente utilizados e se assemelham à configuração descrita em (Lafaia et al., 2017). Nessa topologia, no que diz respeito ao aterramento, a interconexão entre aerogeradores adjacentes, por exemplo, pode ser feita muitas vezes através de um cabo nu em repouso dentro de um tubo de HDPE isolado ou até mesmo compartilhado com os cabos de média tensão, constituindo, portanto, uma configuração especial que exige uma abordagem diferenciada em relação ao cálculo de parâmetros por unidade de comprimento. Por fim, a comparação entre a resposta transitória dessa configuração frente às demais estratégias já investigadas na literatura, no contexto de sobretensões atmosféricas em parques eólicos, é uma análise pertinente e que ainda carece de investigação mais aprofundada. Dessa forma, nos

próximos capítulos são apresentadas em detalhe configurações de cabos subterrâneos típicas utilizadas em parques eólicos, bem como o procedimento para o cálculo de parâmetros por unidade de comprimento, as características de propagação e a resposta transitória de cada uma delas.

3 Configurações Avaliadas

3.1 Considerações Iniciais

Os parques eólicos, como mostrado no Capítulo 2, podem fazer uso de inúmeras configurações de cabos, tanto nas redes de média tensão quanto na interligação do aterramento entre aerogeradores, as quais incluem configurações subterrâneas, aéreas ou híbridas. Em relação às configurações subterrâneas, são de notório interesse as aplicações de cabos dentro de tubos não metálicos, para as quais não existe formulação analítica disponível para cálculo de parâmetros por unidade de comprimento.

Nesse cenário, são apresentadas nas seções a seguir duas configurações padrão de cabos subterrâneos comumente empregadas em parques eólicos: uma composta por cabos diretamente enterrados no solo e outra composta por cabos dentro de tubos feitos de HDPE.

3.2 Cabos Diretamente Enterrados

A Figura 2.2(a) apresenta a configuração da rede de média tensão (RMT) de um parque eólico composta exclusivamente por cabos subterrâneos, diretamente enterrados no solo. Nessa configuração, a energia produzida por cada aerogerador é transmitida de forma subterrânea da base da turbina até a RMT tronco, a qual continua seu percurso até o ponto de conexão do próximo aerogerador, e assim sucessivamente. Nessa forma de organização do parque eólico, a potência transmitida na RMT aumenta a cada aerogerador de forma progressiva até chegar à subestação coletora. Nessa situação, a maneira mais comum para a composição da RMT se dá através de cabos isolados diretamente enterrados no solo. A Figura 3.1 mostra uma configuração trifásica composta por três cabos unipolares constituídos por núcleo, blindagem e uma camada isolante externa, dispostos horizontalmente, igualmente espaçados e enterrados a uma determinada profundidade no solo. No caso ilustrado, que se baseia em um projeto típico de parque eólico no contexto brasileiro, a profundidade utilizada para os cabos é de 1,2 m e o espaçamento horizontal entre os cabos é 0,2 m.

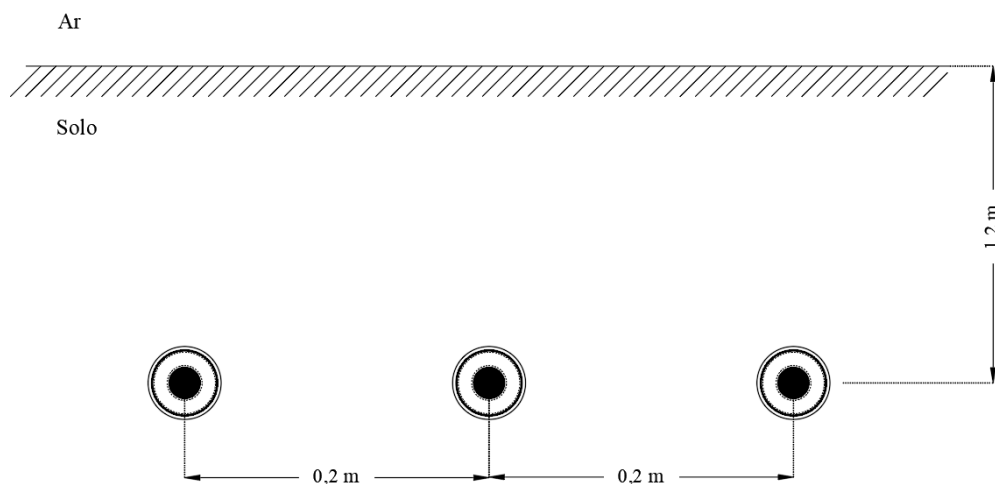


Figura 3.1 - Configuração de cabos diretamente enterrados no solo

O cabo isolado utilizado possui dimensões variáveis conforme o trecho no qual está sendo aplicado. Para os trechos entre o aerogerador e a RMT tronco utilizam-se comumente cabos de 95 mm^2 de seção transversal, a depender da potência nominal da turbina eólica. Já no eixo principal da RMT, em geral os cabos podem variar de 95 mm^2 a 300 mm^2 , de forma que no início da rede são empregados cabos de seções retas menores e, à medida que a potência é progressivamente injetada na rede, cabos maiores passem a ser utilizados. A seção reta máxima a ser utilizada depende da quantidade de aerogeradores que compõem o circuito da RMT em questão e da extensão total da rede até a subestação coletora.

É válido ressaltar que o dimensionamento dos cabos de média tensão de um parque eólico requer o cumprimento das normas técnicas pertinentes e eventuais especificações técnicas dos empreendimentos aos quais se destinam. De acordo com a NBR-14039 (2005), o método a ser utilizado para verificação da capacidade de corrente dos cabos varia conforme o tipo de instalação e configuração adotadas. Além da capacidade de condução de corrente, o dimensionamento deve levar em consideração também critérios como corrente de curto-circuito no núcleo e na blindagem, queda de tensão, perdas por efeito Joule e ampacidade.

Para efeito de estudo, as análises apresentadas nesse trabalho foram conduzidas utilizando cabos de seção transversal única de 300 mm^2 e 48 mm de diâmetro externo ao longo de todo trecho de linha analisado. O cabo é composto por um núcleo de alumínio com 20,65 mm de diâmetro, isolamento de 8,8 mm de espessura feita de composto termofixo

de Polietileno Reticulado (XLPE), blindagem metálica em fios de cobre nu de 0,8 mm de espessura e cobertura externa feita de composto termoplástico de Policloreto de Vinila (PVC), de 2,2 mm de espessura. A Figura 3.2 e a Tabela 3.1 mostram as dimensões do cabo utilizado.

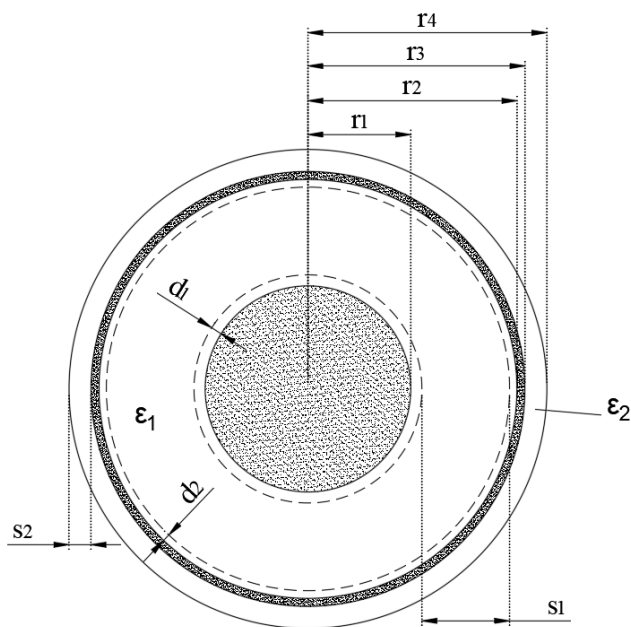


Figura 3.2 - Cabo isolado 300 mm²

3.3 Cabos Dentro de Tubos Enterrados

Alternativamente à configuração apresentada na Figura 3.1, a rede subterrânea de um parque eólico pode ser concebida a partir da utilização de cabos de média tensão dentro de tubos de materiais não metálicos, como o HDPE, enterrados no solo. Essa situação é bastante comum e tem sido utilizada não apenas em redes de média tensão exclusivamente subterrâneas (Figura 2.2(a)), mas também nos trechos subterrâneos de uma configuração híbrida (Figura 2.2(b)), para ligação do aerogerador ao eixo principal da RMT ou para a realização de travessias sob acessos, por exemplo.

A Figura 3.3 mostra uma configuração trifásica composta por três cabos unipolares constituídos por núcleo, blindagem e uma camada isolante externa, individualmente em repouso dentro de tubos dispostos horizontalmente, igualmente espaçados e enterrados a uma determinada profundidade no solo. Nessa configuração, a depender da concepção do aterramento do parque eólico, pode haver também um cabo nu de aterramento juntamente com o cabo de média tensão dentro de um dos tubos, com a

finalidade de interligar o aterramento dos aerogeradores individuais. O interior dos tubos é preenchido apenas com ar.

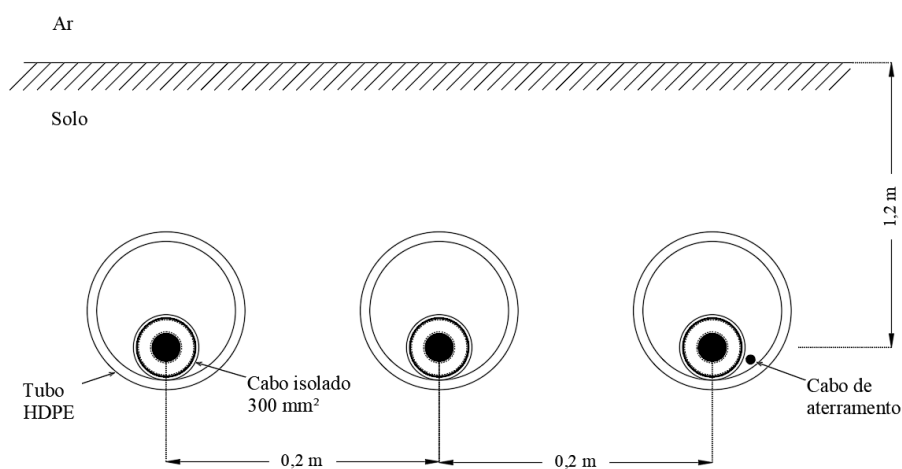


Figura 3.3 - Configuração de cabos dentro de tubos enterrados no solo

O cabo de média tensão utilizado nessa configuração é o mesmo apresentado na Figura 3.2. O núcleo de cada cabo está posicionado na mesma profundidade da configuração da Figura 3.1, assim como o seu espaçamento horizontal para o cabo adjacente. O cabo de aterramento considerado é um cabo de cobre cujas dimensões estão mostradas na Tabela 3.1. O tubo é feito de composto polietileno de alta densidade (HDPE) de 4 polegadas.

A Figura 3.4 mostra em detalhe a composição formada pelo cabo de média tensão, tubo de HDPE e o cabo nu de aterramento dessa configuração. A Tabela 3.1 mostra de forma detalhada as dimensões e propriedades dos cabos e do tubo utilizados.

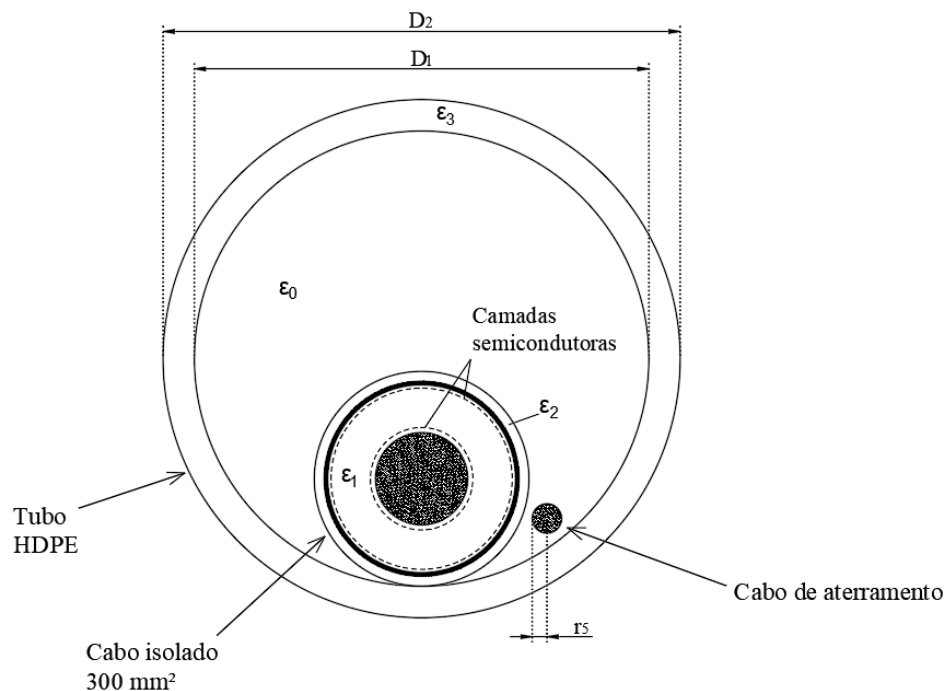
Figura 3.4 - Cabo isolado 300 mm² e cabo de aterramento em repouso no tubo HDPE

Tabela 3.1 - Dados e propriedades dos cabos e tubo analisados

Identificação	Parâmetro	Dimensões
Cabo isolado 300 mm ²	Núcleo de alumínio	$r_1 = 10,325 \text{ mm}$ $\sigma = 3.8 \times 10^7 \text{ S/m}$
	Camada semicondutora 1	$d_1 = 1,125 \text{ mm}$
	Isolação do núcleo	$s_1 = 8.8 \text{ mm}$ $\epsilon_{r1} = 2.2$
	Camada semicondutora 2	$d_2 = 0,75 \text{ mm}$
	Blindagem metálica	$r_2 = 21.0 \text{ mm}$ $r_3 = 21.8 \text{ mm}$ $\sigma = 6.0 \times 10^7 \text{ S/m}$
	Isolação externa	$r_4 = 24.0 \text{ mm}$ $s_2 = 2.2 \text{ mm}$ $\epsilon_{r2} = 2.8$
Cabo de aterramento	Núcleo de cobre	$r_5 = 3.3 \text{ mm}$ $\sigma = 6.0 \times 10^7 \text{ S/m}$
Tubo	Tubo HDPE	$D_1 = 101.6 \text{ mm}$ $D_2 = 115.6 \text{ mm}$ $\epsilon_{r3} = 2.35$

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as duas configurações de cabos trifásicos típicas que serão investigadas: uma constituída por cabos diretamente enterrados e outra constituída por cabos dentro de tubos não metálicos. Uma vez definidos os parâmetros e dimensões relacionados a cada configuração, no próximo capítulo será apresentada a metodologia utilizada para o cálculo dos parâmetros por unidade de comprimento, tendo em vista as especificidades e considerações adotadas para cada caso, o que constitui a primeira etapa para avaliação da sua resposta transitória.

4 Cálculo de Parâmetros de Cabos Enterrados e Cabos Dentro de Tubos Não Metálicos

4.1 Considerações Iniciais

A resposta transitória de cabos subterrâneos pode ser determinada através do emprego da teoria de linhas de transmissão. A primeira etapa nesse processo consiste na modelagem adequada e no cálculo dos parâmetros por unidade de comprimento das configurações de cabos estudadas.

Os capítulos anteriores apresentaram algumas configurações de cabos isolados aplicadas em contextos diversos, sobretudo em parques eólicos. Conforme discutido nesses capítulos, o cálculo de parâmetros por unidade de comprimento de cabos diretamente enterrados no solo ou de cabos dentro de tubos metálicos pode ser feito através de expressões analíticas consolidadas na literatura, desde que efeitos de proximidade possam ser desprezados. Para situações nas quais essa premissa não é válida, faz-se necessária a utilização de outras estratégias para o cálculo de parâmetros, as quais incluem o método dos elementos finitos (FEM) ou o MoM-SO.

Os itens a seguir apresentam a metodologia utilizada para o cálculo de parâmetros por unidade de comprimento das duas configurações de cabos apresentadas no Capítulo 3 e que são investigadas nesta dissertação: uma configuração trifásica de cabos unipolares com núcleo e blindagem diretamente enterrados no solo e uma configuração composta

pelos mesmos cabos enterrados dentro de tubos de HDPE, juntamente com um cabo nu de aterramento.

4.2 Teoria de Linhas de Transmissão

De acordo com a teoria clássica de linhas de transmissão, as ondas de tensão e corrente que se propagam por dois ou mais condutores seguem como premissa o modo de propagação do tipo transversal eletromagnético (TEM). Essa teoria possui validade quando as seguintes hipóteses são satisfeitas: os condutores são infinitos, paralelos entre si e condutores perfeitos; suas seções transversais são uniformes ao longo de toda extensão da linha; a separação entre os condutores é muito menor que o comprimento de onda associado à maior frequência de interesse; e a soma das correntes que circulam pelos condutores é nula. Nessas condições, os campos elétrico e magnético são nulos na direção de propagação das ondas de tensão e corrente, ocorrendo, portanto, apenas na direção transversal à direção de propagação (Paul, 2007).

Na prática, no entanto, os condutores apresentam perdas. Nesse caso, os campos elétrico e magnético na direção de propagação não são nulos. Define-se, com isso, o modo de propagação quase-TEM, que pressupõe as mesmas hipóteses para a estrutura do tipo TEM, com exceção da possibilidade de existência de componentes dos campos elétrico e magnético na direção longitudinal de propagação. Na prática, considera-se o modo de propagação quase-TEM equivalente ao modo TEM desde que os campos na direção de propagação tenham magnitude desprezível em relação aos campos no plano transversal à direção de propagação. Isso ocorre desde que as perdas nos condutores não sejam elevadas e desde que os efeitos solenoidais associados a condutores trançados ao longo da direção de propagação possam ser desprezados.

Supondo um par de condutores com perdas posicionados no espaço livre ao longo da coordenada x , as equações da teoria de linha de transmissão que descrevem as ondas de tensão e corrente são escritas da seguinte forma, no domínio da frequência:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -Z'I(x) \quad (4.1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -Y'V(x) \quad (4.2)$$

onde $V(x)$ e $I(x)$ são a tensão e corrente, respectivamente, em um ponto qualquer da linha, Z' é a impedância longitudinal por unidade de comprimento da linha e Y' é a admitância transversal por unidade de comprimento da linha.

Para o caso de linhas com n condutores mais um condutor de referência, as equações acima podem ser reescritas da forma:

$$\frac{d\mathbf{V}(x)}{dx} = -\mathbf{Z}'\mathbf{I}(x) \quad (4.3)$$

$$\frac{d\mathbf{I}(x)}{dx} = -\mathbf{Y}'\mathbf{V}(x) \quad (4.4)$$

em que $\mathbf{V}(x)$ e $\mathbf{I}(x)$ são vetores de ordem n e $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ são matrizes de ordem $n \times n$.

Para uma linha de transmissão composta por um cabo isolado enterrado diretamente no solo, considera-se a energia armazenada na parte isolante do cabo, as perdas nos condutores e toda a corrente que circula pelo condutor retorna pelo solo. Nessa situação, as matrizes $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ são escritas da seguinte forma:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_i + \mathbf{Z}'_e + \mathbf{Z}'_g \quad (4.5)$$

$$\mathbf{Y}' = (\mathbf{Y}'_e^{-1} + \mathbf{Y}'_g^{-1})^{-1} \quad (4.6)$$

em que $\mathbf{Z}'_i$ é a impedância interna dos condutores do cabo, $\mathbf{Z}'_e$ é a impedância externa associada às camadas isolantes do cabo, $\mathbf{Z}'_g$ é a impedância de retorno no solo, $\mathbf{Y}'_e$ é a admitância externa e $\mathbf{Y}'_g$ é a admitância de retorno no solo.

Nos itens a seguir, o cálculo dos termos das Equações ((4.5) e ((4.6) é detalhado tendo em vista as especificidades a serem consideradas em cada uma das configuração de cabos apresentadas na Figura 3.1 e na Figura 3.3.

4.3 Cálculo de Parâmetros de Cabos Diretamente Enterrados

A Figura 3.1 mostra uma linha de transmissão trifásica composta por três cabos isolados diretamente enterrados. Para o cálculo das matrizes $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ correspondentes a essa configuração, considera-se primeiramente o caso monofásico composto por apenas um cabo isolado idêntico ao mostrado na Figura 3.2. Nessa situação, o sistema é composto por dois condutores, núcleo e blindagem, mais o condutor de referência, que é o solo. Portanto, as matrizes têm ordem 2×2 . Por simplicidade, o cabo em questão pode ser representado conforme a Figura 4.1.

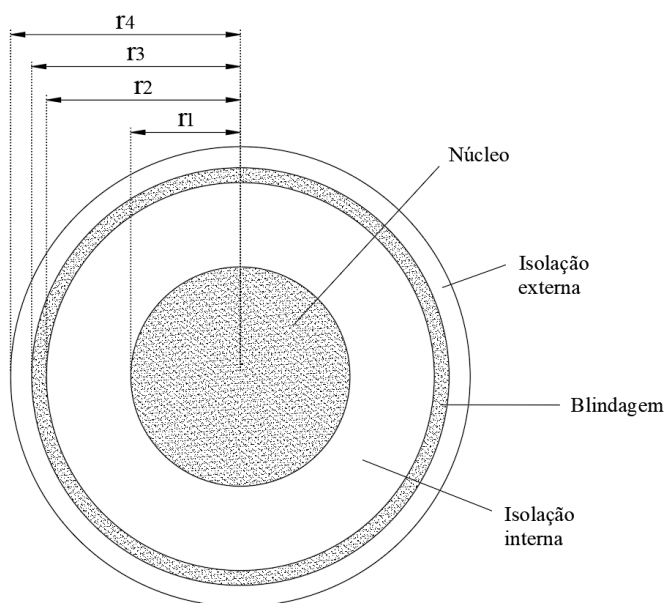


Figura 4.1 - Cabo isolado composto por núcleo e blindagem

4.3.1 Matriz de Impedância Longitudinal

A Figura 4.2 mostra a visualização transversal do cabo da Figura 4.1. Nela, estabelecem-se as tensões entre núcleo e blindagem V_1 , e entre a blindagem e um ponto de referência remoto no solo V_2 . A corrente identificada como I_1 circula pelo núcleo e retorna pela face interna da blindagem, enquanto a corrente identificada como I_2 circula pela face externa da blindagem e retorna pelo solo.

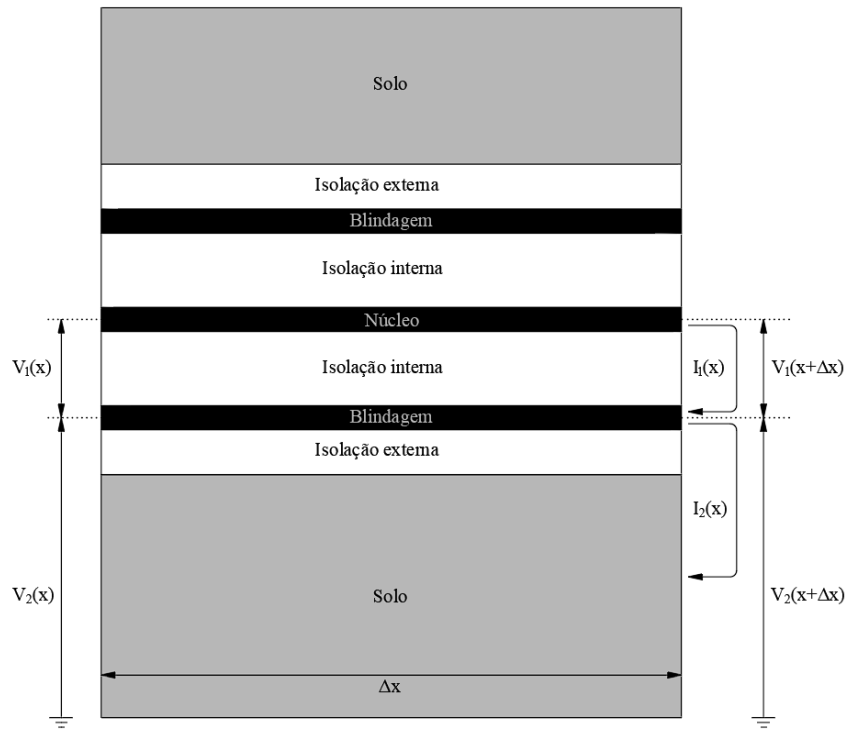


Figura 4.2 - Corte transversal do cabo da Figura 4.1

Nesse caso, supondo inicialmente que o solo seja um condutor elétrico perfeito, a Equação (4.1) pode ser reescrita como:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_1(x) \\ V_2(x) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

O primeiro termo próprio da matriz de impedâncias da Equação (4.7), Z'_{11} , é calculado da seguinte forma (Martinez-Velasco, 2010):

$$Z'_{11} = Z'_{nucleo} + Z'_{isol-int} + Z'_{blind-int} \quad (4.8)$$

em que Z'_{nucleo} é a impedância interna do núcleo, $Z'_{isol-int}$ é a impedância da isolação interna entre núcleo e blindagem, e $Z'_{blind-int}$ é a impedância da blindagem, considerando o retorno de corrente pela sua face interna. Cada um desses termos é calculado por (Martinez-Velasco, 2010):

$$Z'_{nucleo} = \frac{\rho_c m_c I_0(m_c r_1)}{2\pi r_1 I_1(m_c r_1)} \quad (4.9)$$

$$Z'_{isol-int} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.10)$$

$$Z'_{blind-int} = \frac{\rho_{sh} m_{sh} [I_0(m_{sh} r_2) K_1(m_{sh} r_3) + I_1(m_{sh} r_3) K_0(m_{sh} r_2)]}{2\pi r_2 [K_1(m_{sh} r_2) I_1(m_{sh} r_3) - I_1(m_{sh} r_2) K_1(m_{sh} r_3)]} \quad (4.11)$$

$$m_c = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho_c}} \quad (4.12)$$

$$m_{sh} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho_{sh}}} \quad (4.13)$$

onde ρ_c e ρ_{sh} são as resistividades do núcleo e da blindagem, respectivamente, r_1 é o raio do núcleo, r_2 é o raio interno da blindagem, r_3 é o raio externo da blindagem, I_0 e I_1 são funções de Bessel modificadas do primeiro tipo, K_0 e K_1 são funções de Bessel modificadas do segundo tipo, ω é a frequência angular e μ é a permeabilidade magnética do meio.

O segundo termo próprio da matriz de impedâncias da Equação (4.7), Z'_{22} , é calculado da seguinte forma (Martinez-Velasco, 2010):

$$Z'_{22} = Z'_{blind-ext} + Z'_{isol-ext} \quad (4.14)$$

em que $Z'_{blind-ext}$ é a impedância da blindagem considerando o retorno de corrente pela sua face externa e $Z'_{isol-ext}$ é impedância da isolação externa entre blindagem e solo. Cada um desses termos é calculado por:

$$Z'_{blind-ext} = \frac{\rho_{sh} m_{sh} [I_0(m_{sh} r_3) K_1(m_{sh} r_2) + I_1(m_{sh} r_2) K_0(m_{sh} r_3)]}{2\pi r_3 [K_1(m_{sh} r_2) I_1(m_{sh} r_3) - I_1(m_{sh} r_2) K_1(m_{sh} r_3)]} \quad (4.15)$$

$$Z'_{isol-ext} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad (4.16)$$

onde r_4 é o raio externo nominal do cabo, I_0 , I_1 e K_0 , K_1 são funções de Bessel modificadas do primeiro e do segundo tipo, respectivamente.

O termo mútuo da matriz de impedâncias da Equação (4.7), Z'_{12} , se refere à impedância de transferência da blindagem devido à queda de tensão em uma das faces da blindagem em virtude da circulação de corrente na outra face. Esse termo é calculado da seguinte forma (Martinez-Velasco, 2010):

$$Z'_{12} = Z'_{21} = -\frac{\rho_{sh}}{2\pi r_2 r_3} \frac{1}{[K_1(m_{sh} r_2) I_1(m_{sh} r_3) - I_1(m_{sh} r_2) K_1(m_{sh} r_3)]} \quad (4.17)$$

É de interesse que as tensões sejam referidas ao condutor de referência, que no caso é o solo, e as correntes sejam iguais às correntes totais em cada condutor. Dessa forma, estabelecem-se as relações:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{nucleo} - V_{blindagem} \\ V_2 &= V_{blindagem} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{nucleo} \\ I_2 &= I_{nucleo} + I_{blindagem} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Partindo das Equações (4.18) e (4.19), pode-se reescrever a Equação (4.7) da seguinte forma:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{nucleo}(x) \\ V_{blindagem}(x) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z'_{cc} & Z'_{cs} \\ Z'_{sc} & Z'_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{nucleo}(x) \\ I_{blindagem}(x) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$Z'_{cc} = Z'_{11} + 2Z'_{12} + Z'_{22} \quad (4.21)$$

$$Z'_{cs} = Z'_{sc} = Z'_{12} + Z'_{22} \quad (4.22)$$

$$Z'_{ss} = Z'_{22} \quad (4.23)$$

Percebe-se que a matriz de impedâncias da Equação (4.20) considera os elementos correspondentes à impedância interna dos condutores e os elementos correspondentes à impedância externa associada às camadas isolantes do cabo. A impedância longitudinal do cabo é então escrita da forma:

$$\mathbf{Z}'_a = \begin{bmatrix} Z'_{cc} & Z'_{cs} \\ Z'_{sc} & Z'_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

A matriz $\mathbf{Z}'_a$ se refere à impedância própria de apenas um cabo. Para o caso trifásico, composto por cabos idênticos, a matriz de impedância própria é uma matriz diagonal, cujos elementos da diagonal principal são formados por submatrizes com a mesma estrutura de $\mathbf{Z}'_a$, conforme Equação (4.25).

$$\mathbf{Z}'_p = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_a & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

em que $\mathbf{Z}'_a$, $\mathbf{Z}'_b$ e $\mathbf{Z}'_c$ são as matrizes de impedância própria de cada cabo, de ordem 2 x 2, cuja estrutura é idêntica à da Equação (4.24).

Para acrescentar o efeito da condutividade finita do solo na impedância, é necessário adicionar uma matriz de ordem 6 x 6 composta pela impedância de retorno pelo solo. Essa matriz possui a seguinte estrutura:

$$\mathbf{Z}'_g = \begin{bmatrix} Z'_{g11} & Z'_{g12} & Z'_{g13} \\ Z'_{g21} & Z'_{g22} & Z'_{g23} \\ Z'_{g31} & Z'_{g32} & Z'_{g33} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{Z}'_{gjk} = \begin{bmatrix} Z'_{gjk} & Z'_{gjk} \\ Z'_{gjk} & Z'_{gjk} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

O termo Z'_{gjk} na Equação (4.27) se refere à impedância de retorno pelo solo entre o j-ésimo e o k-ésimo cabo. As expressões para o cálculo desses elementos são apresentadas mais adiante.

A impedância longitudinal para a configuração trifásica da Figura 3.1 é obtida somando as expressões (4.25) e (4.26):

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_p + \mathbf{Z}'_g \quad (4.28)$$

4.3.2 Matriz de Admitância Transversal

Retomando o corte transversal apresentado na Figura 4.2, para obtenção da matriz de admitância, definem-se as admitâncias Y'_1 e Y'_2 como sendo as admitâncias entre o núcleo e a blindagem, e entre a blindagem e o solo, respectivamente. O inverso das capacitâncias oriundas das admitâncias Y'_1 e Y'_2 corresponde aos coeficientes de potencial, que são calculados da seguinte forma (Martinez-Velasco, 2010):

$$P'_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.29)$$

$$P'_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon_2} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad (4.30)$$

onde r_1 é o raio do núcleo, r_2 é o raio interno da blindagem, r_3 é o raio externo da blindagem, r_4 é o raio externo nominal do cabo, ϵ_1 é a permissividade elétrica da camada isolante interna e ϵ_2 é a permissividade elétrica da camada isolante externa.

Assim, obtêm-se os elementos Y'_1 e Y'_2 fazendo:

$$Y'_1 = j\omega P'_1{}^{-1} \quad (4.31)$$

$$Y'_2 = j\omega P'_2{}^{-1} \quad (4.32)$$

Para o caso monofásico, a Equação (4.2) pode ser reescrita como:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_{nucleo}(x) \\ I_{blindagem}(x) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y'_1 & -Y'_1 \\ -Y'_1 & Y'_1 + Y'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nucleo}(x) \\ V_{blindagem}(x) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$Y'_a = \begin{bmatrix} Y'_1 & -Y'_1 \\ -Y'_1 & Y'_1 + Y'_2 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

A matriz Y'_a se refere à admitância própria de apenas um cabo. Para o caso trifásico, composto por cabos idênticos, a matriz de admitância própria é uma matriz diagonal, cujos elementos da diagonal principal são formados por submatrizes com a mesma estrutura de Y'_a , conforme Equação (4.35).

$$\mathbf{Y}'_p = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_a & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}'_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}'_c \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

em que $\mathbf{Y}'_a$, $\mathbf{Y}'_b$ e $\mathbf{Y}'_c$ são as matrizes de admitância própria de cada cabo, de ordem 2 x 2, cuja estrutura é idêntica à da Equação (4.34).

Para acrescentar o efeito do solo na admitância, é necessário adicionar uma matriz de ordem 6 x 6 composta pela admitância de retorno do solo. Em termos de coeficientes de potenciais, essa matriz possui a seguinte estrutura:

$$\mathbf{P}'_g = \begin{bmatrix} P'_{g11} & P'_{g12} & P'_{g13} \\ P'_{g21} & P'_{g22} & P'_{g23} \\ P'_{g31} & P'_{g32} & P'_{g33} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\mathbf{P}'_{gjk} = \begin{bmatrix} P'_{gjk} & P'_{gjk} \\ P'_{gjk} & P'_{gjk} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

O termo P'_{gjk} na Equação (4.37) se refere ao coeficiente de potencial de retorno do solo entre o j -ésimo e o k -ésimo cabo. As expressões para o cálculo desses elementos são apresentadas mais adiante. Portanto, a matriz de admitância de retorno do solo possui a seguinte estrutura:

$$\mathbf{Y}'_g = j\omega \mathbf{P}'_g{}^{-1} \quad (4.38)$$

A admitância longitudinal para a configuração trifásica da Figura 3.1 é obtida somando as expressões (4.35) e (4.38):

$$\mathbf{Y}' = (\mathbf{Y}'_p{}^{-1} + \mathbf{Y}'_g{}^{-1})^{-1} \quad (4.39)$$

4.4 Cálculo de Parâmetros de Cabos Enterrados Dentro de

Tubos Não Metálicos

A Figura 3.3Figura 3.1 mostra uma linha de transmissão trifásica composta por três cabos isolados em repouso dentro de tubos enterrados, sendo que em um deles há também um cabo nu em repouso. Para o cálculo das matrizes $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ correspondentes a essa configuração, considera-se primeiramente o caso monofásico composto pelo cabo

isolado juntamente com o condutor de aterramento, idêntico ao mostrado na Figura 3.4. Nessa situação, o sistema é composto por três condutores, que são núcleo e blindagem do cabo isolado e o condutor de aterramento, mais o condutor de referência, que é o solo. Portanto, as matrizes têm ordem 3×3 .

O cálculo de parâmetros de cabos dentro de tubos não metálicos requer um cuidado especial uma vez que não existem expressões analíticas que permitem a obtenção de todos os elementos que compõem a impedância longitudinal e a admitância transversal. Conforme a referência (Ametani, 1980), quando o tubo é metálico e possui uma cobertura isolante, expressões fechadas estão disponíveis. Este, no entanto, não é o caso a ser analisado e, portanto, outras estratégias são necessárias.

4.4.1 Matriz de Impedância Longitudinal

A impedância longitudinal de cabos dentro de tubos possui uma estrutura semelhante à de cabos diretamente enterrados e pode ser definida através da expressão (4.5). Diferentemente de configurações de tubos metálicos, nas quais é necessário contabilizar a impedância interna do tubo e a impedância mútua entre suas superfícies interna e externa, para configurações com tubos não metálicos, a impedância do tubo é contabilizada apenas na forma da indutância externa associada à cobertura isolante da configuração.

Supõe-se inicialmente uma configuração composta por dois cabos quaisquer dentro de um tubo de HDPE, conforme a Figura 4.3.

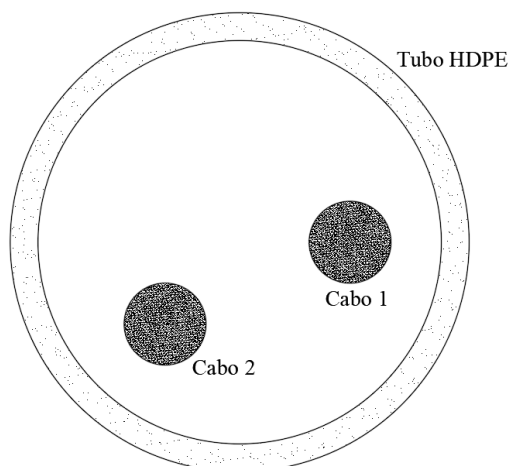


Figura 4.3 - Configuração simplificada composta por dois cabos quaisquer dentro de um tubo de HDPE

A matriz de impedância longitudinal dessa configuração deve ter a seguinte estrutura, tal como a Equação (4.5), aqui repetida por simplicidade:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_i + \mathbf{Z}'_e + \mathbf{Z}'_g \quad (4.40)$$

em que $\mathbf{Z}'_i$ é a matriz de impedância interna de todos os cabos dentro do tubo, $\mathbf{Z}'_e$ é a impedância externa associada às camadas isolantes da configuração, que inclui o ar interno e o tubo propriamente dito e $\mathbf{Z}'_g$ é a impedância de retorno pelo solo.

Para o caso de dois cabos no tubo, a impedância interna $\mathbf{Z}'_i$ terá a seguinte estrutura:

$$\mathbf{Z}'_i = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{i1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_{i2} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

em que $\mathbf{Z}'_{i1}$ e $\mathbf{Z}'_{i2}$ são as matrizes de impedância interna de cada cabo, cuja ordem depende da quantidade de condutores existentes em cada cabo no interior do tubo.

Considerando a configuração apresentada na Figura 3.4, define-se $\mathbf{Z}'_{i1}$ como a matriz de impedância interna do cabo isolado, de ordem 2 x 2, e $\mathbf{Z}'_{i2}$ como a matriz de impedância interna do cabo nu de aterramento, composta por um elemento único.

Caso efeitos de proximidade entre a blindagem externa do cabo isolado e o cabo de aterramento sejam desprezados no cálculo da distribuição de correntes, $\mathbf{Z}'_{i1}$ possui a mesma estrutura da Equação (4.24), uma vez que o cabo isolado é idêntico ao da Figura 3.2, podendo ser escrita como:

$$\mathbf{Z}'_{i1} = \begin{bmatrix} Z'_{cc} & Z'_{cs} \\ Z'_{sc} & Z'_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

em que os elementos internos são dados pelas expressões (4.21) a (4.23).

No entanto, devido às especificidades da configuração em questão, a impedância externa será calculada separadamente em outra etapa. Dessa forma, a parcela referente à cobertura isolante externa do cabo será desconsiderada e, assim, o elemento Z'_{22} , anteriormente calculado pela expressão (4.14), será calculado apenas por:

$$Z'_{22} = Z'_{blind-ext} \quad (4.43)$$

em que $Z'_{blind-ext}$ é a impedância da blindagem considerando o retorno de corrente pela sua face externa, dada pela Equação (4.15). Já os elementos Z'_{11} e Z'_{12} permanecem inalterados e são calculados pelas Equações (4.8) e (4.17). Assim, os elementos Z'_{cc} , Z'_{cs} , Z'_{sc} e Z'_{ss} , podem ser calculados diretamente pelas expressões (4.21) a (4.23).

Desprezando-se efeitos de proximidade na distribuição de correntes no interior do cabo nu de aterramento, sua impedância interna, Z'_{i2} , por sua vez, é dada pela expressão (Martinez-Velasco, 2010):

$$Z'_{i2} = \frac{1}{2\pi r_5} \sqrt{j\omega\mu\rho_{at}} \frac{I_0(m_{at}r_5)}{I_1(m_{at}r_5)} \quad (4.44)$$

$$m_{at} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho_{at}}} \quad (4.45)$$

onde ρ_{at} é a resistividade do condutor, r_5 é o raio do condutor, I_0 e I_1 são funções de Bessel modificadas do primeiro tipo, ω é a frequência angular e μ é a permeabilidade magnética do meio.

No que diz respeito à impedância externa Z'_e na Equação (4.40), o seu cálculo não pode ser feito por expressões analíticas, devido às características não condutoras do tubo, ao posicionamento não concêntrico dos cabos no seu interior e à influência do efeito de proximidade, que é bastante pronunciado, uma vez que os cabos se encontram em contato e em repouso na superfície interna do tubo. Nessas circunstâncias, a distribuição de cargas e de corrente não é uniforme. Dessa forma, a ferramenta utilizada para a obtenção da impedância externa Z'_e foi o método de elementos finitos (FEM).

Primeiramente, a estrutura de Z'_e é definida da seguinte forma para a configuração da Figura 3.4:

$$\mathbf{Z}'_e = j\omega \mathbf{L}'_e = j\omega \begin{bmatrix} L'_{e11} & L'_{e12} & L'_{e13} \\ L'_{e21} & L'_{e22} & L'_{e23} \\ L'_{e31} & L'_{e32} & L'_{e33} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

em que $\mathbf{L}'_e$ representa a matriz de indutância externa da configuração, de ordem 3 x 3.

Sabe-se que, em uma linha de transmissão aérea, composta por condutores nus, a relação entre a matriz de capacitâncias e a matriz de indutâncias externas é dada pela Equação (4.47):

$$\mathbf{L}'_e = \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{C}'^{-1} \quad (4.47)$$

em que $\mathbf{L}'_e$ é a matriz de indutâncias externas, $\mathbf{C}'$ é a matriz de capacitâncias, μ_0 e ε_0 são a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica no vácuo.

A expressão (4.47) não é válida para cabo isolados aéreos, subterrâneos ou dentro de tubos não metálicos, uma vez que as camadas isolantes possuem permissividade relativa diferente de 1 e, portanto, sua matriz de capacitâncias é alterada. No entanto, para essas configurações, esta equação pode ser utilizada para obtenção da matriz de indutância externa, a partir do cálculo de uma matriz de capacitâncias auxiliar correspondente à situação hipotética na qual a permissividade elétrica dos meios isolantes, isto é, a cobertura externa do cabo, o ar no interior e o tubo propriamente dito, sejam iguais a permissividade elétrica do vácuo. Assim, a indutância externa é obtida por:

$$\mathbf{L}'_e = \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{C}_{e0}'^{-1} \quad (4.48)$$

em que $\mathbf{C}_{e0}'$ é a matriz de capacitâncias equivalente quando todos os meios isolantes assumem permissividade relativa igual a 1.

Reescrevendo a Equação (4.46), tem-se:

$$\mathbf{Z}'_e = j\omega\mathbf{L}'_e = j\omega\mu_0\epsilon_0 \begin{bmatrix} C_{e0_11}' & C_{e0_12}' & C_{e0_13}' \\ C_{e0_21}' & C_{e0_22}' & C_{e0_23}' \\ C_{e0_31}' & C_{e0_32}' & C_{e0_33}' \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.49)$$

em que C'_{e0_ij} é a capacitância observada entre o condutor i e o condutor j quando o condutor j assume tensão de 1 V e o condutor i assume tensão de 0 V.

Para obtenção da matriz de capacitâncias $\mathbf{C}_{e0}'$ utilizou-se o software *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), de distribuição gratuita. Este programa dispõe da ferramenta *Finite Element Analysis* (FEA), a qual gera uma solução numérica das equações de linhas de transmissão e produz a distribuição do campo eletromagnético para a configuração de cabos estudada. Para isso, a região bidimensional do problema é discretizada, gerando uma malha formada por elementos triangulares (Souza, 2015).

Primeiramente, modela-se geometricamente a configuração em questão, conforme Figura 3.4. Em seguida, são definidas as propriedades eletromagnéticas dos meios isolantes, ou seja, a permeabilidade e permissividade relativas assumem valores iguais a 1. Por fim, a cada meio condutor, núcleo e blindagem do cabo isolado e cabo nu de aterramento, é atribuída uma tensão arbitrária pré-definida de valor igual a 1 V. A Figura 4.4 mostra a modelagem da configuração no FEMM após a geração da malha.

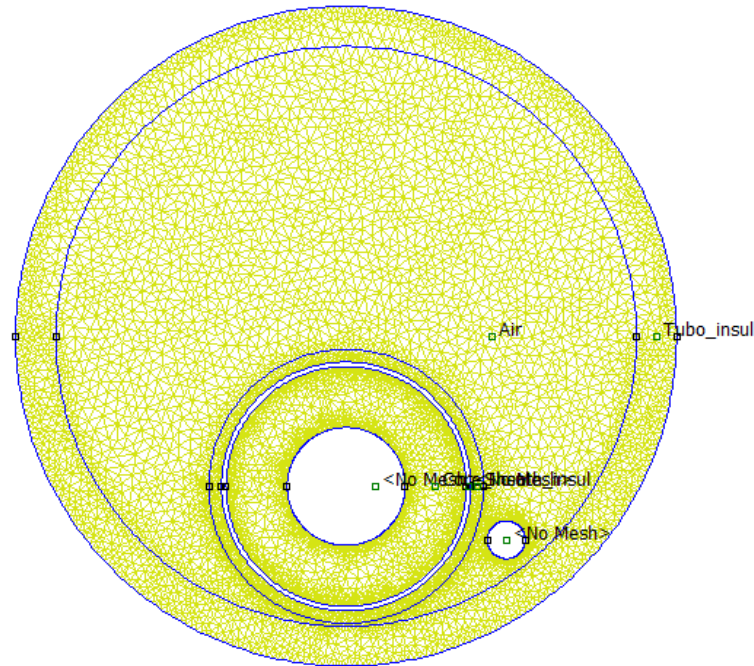


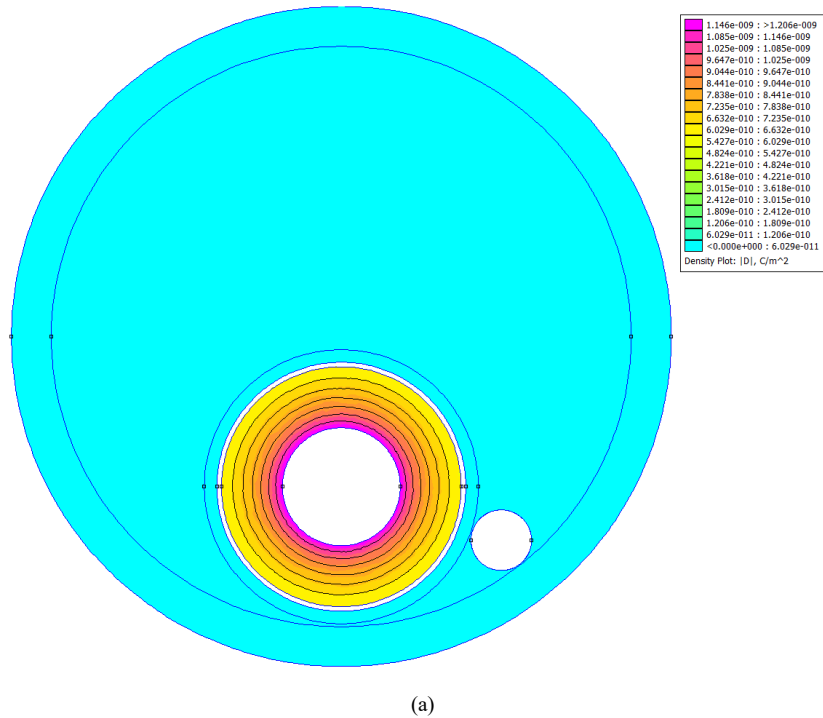
Figura 4.4 - Malha gerada pelo FEMM para a configuração de cabos dentro de tubos

Enquanto a tensão em um dos condutores assume esse valor, a tensão nos demais condutores é mantida em 0 V. Dessa forma, obtém-se a carga armazenada em cada condutor e a capacitância é diretamente obtida por:

$$C = \frac{q}{V} \quad (4.50)$$

em que C é a capacitância, q é a carga armazenada e V é a tensão no condutor excitado.

Assim, para cada condutor excitado, são obtidas as capacitâncias de cada coluna da matriz $\mathbf{C}_{e0}'$. A Figura 4.5 ilustra a distribuição da densidade de fluxo elétrico para cada condutor excitado, assim como as linhas equipotenciais.



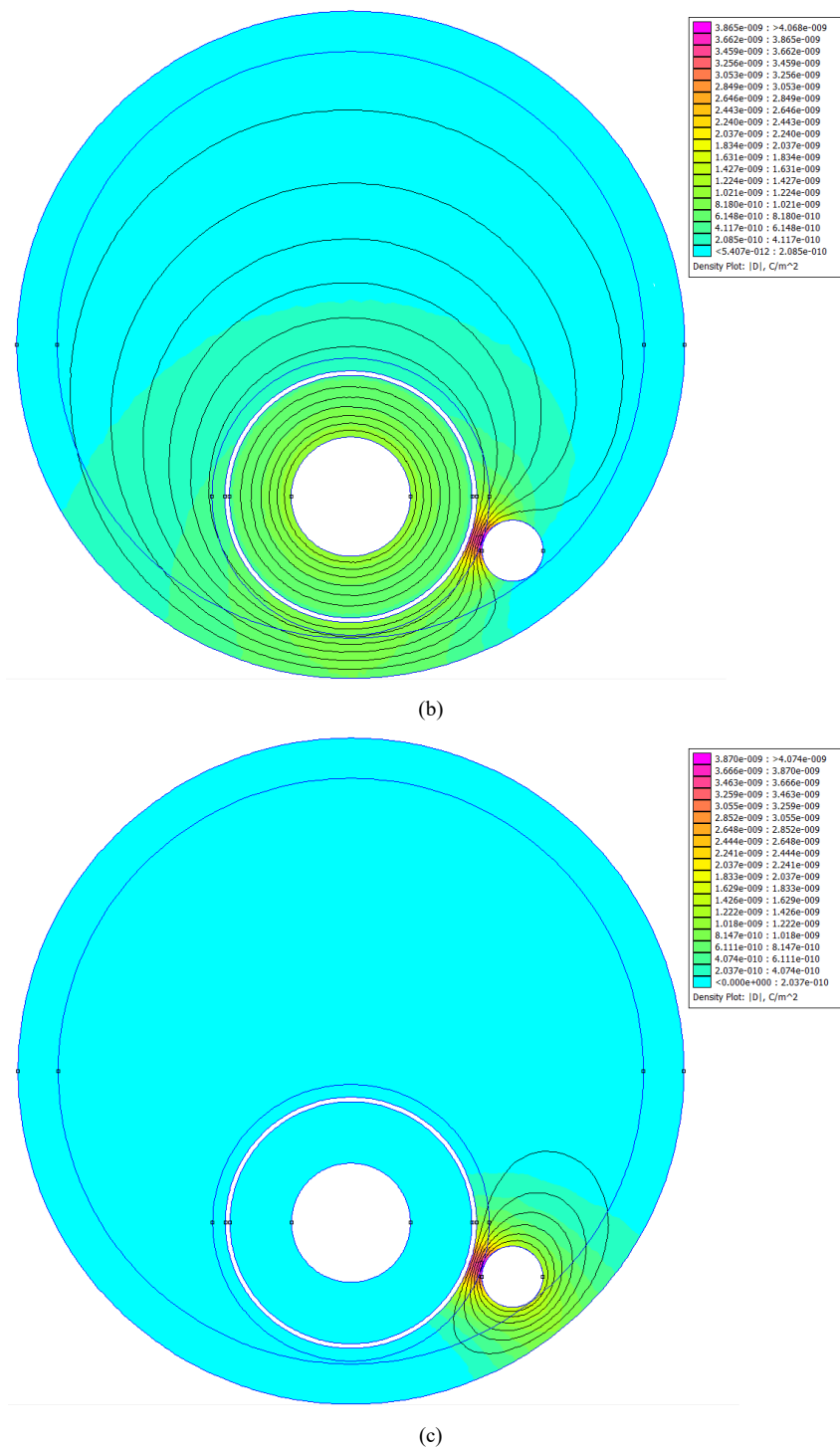


Figura 4.5 - Distribuição da densidade de fluxo elétrico: excitação do núcleo (a), blindagem (b) e condutor de aterramento (c)

A impedância longitudinal Z'_{ap} , por fim, para o caso monofásico é dada por:

$$Z'_{ap} = Z'_i + Z'_e \quad (4.51)$$

em que Z'_i é dado pela Equação (4.41) e Z'_e é dado pela Equação (4.49).

Definido o caso monofásico, o caso trifásico, composto por cabos isolados idênticos dentro de tubos não metálicos, tal como a Figura 3.3, é deduzido naturalmente. Assim:

$$\mathbf{Z}'_{pp} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{ap} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_{bp} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_{cp} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

em que $\mathbf{Z}'_{ap}$, $\mathbf{Z}'_{bp}$ e $\mathbf{Z}'_{cp}$ são as matrizes de impedância própria de cada cabo dentro do tubo com estrutura igual à Equação (4.51). É válido ressaltar que, devido à presença do cabo de aterramento, $\mathbf{Z}'_{ap}$ possui ordem 3 x 3, enquanto $\mathbf{Z}'_{bp}$ e $\mathbf{Z}'_{cp}$ possuem ordem 2 x 2.

Para acrescentar o efeito do solo na impedância, é necessário adicionar uma matriz de impedância de retorno pelo solo, com estrutura idêntica à Equação (4.26), em que cada submatriz $\mathbf{Z}'_{gjk}$ possui ordem correspondente ao número de condutores presentes no interior do tubo, seguindo a lógica apresentada para $\mathbf{Z}'_{pp}$.

A impedância longitudinal para a configuração trifásica da Figura 3.3 é obtida, portanto, somando as expressões (4.52) e (4.26):

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_{pp} + \mathbf{Z}'_g \quad (4.53)$$

4.4.2 Matriz de Admitância Transversal

A matriz de admitância transversal para o caso monofásico da configuração da Figura 3.4 possui estrutura semelhante à Equação (4.6), aqui repetida por simplicidade:

$$\mathbf{Y}' = (\mathbf{Y}'_e^{-1} + \mathbf{Y}'_g^{-1})^{-1} \quad (4.54)$$

em que $\mathbf{Y}'_e$ é a matriz de admitância externa e $\mathbf{Y}'_g$ é a admitância de retorno do solo.

Assim como para a matriz de impedância externa $\mathbf{Z}'_e$, também não há expressões analíticas para o cálculo da matriz de admitância externa $\mathbf{Y}'_e$, pelos mesmos motivos descritos no item 4.1.1. Dessa forma, o seu cálculo é feito de forma semelhante à indutância externa $\mathbf{L}'_e$, a partir das capacitâncias calculadas através do software FEMM. Assim, $\mathbf{Y}'_e$, assume a seguinte estrutura:

$$\mathbf{Y}'_e = j\omega \mathbf{C}'_e = j\omega \begin{bmatrix} C'_{e11} & C'_{e12} & C'_{e13} \\ C'_{e21} & C'_{e22} & C'_{e23} \\ C'_{e31} & C'_{e32} & C'_{e33} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

em que $\mathbf{C}'_e$ é a matriz de capacitâncias externas e C'_{eij} é a capacitância observada entre o condutor i e o condutor j quando o condutor j assume tensão de 1 V e o condutor i assume tensão de 0 V. Nesse caso, diferentemente do cálculo da indutância externa, consideram-se as permissividades relativas reais dos meios isolantes.

A admitância longitudinal $\mathbf{Y}'_{ap}$, por fim, para o caso monofásico é dada por:

$$\mathbf{Y}'_{ap} = \mathbf{Y}'_e \quad (4.56)$$

em que $\mathbf{Y}'_e$ é dado pela Equação (4.55).

A matriz $\mathbf{Y}'_{ap}$ se refere à admitância própria de apenas um tubo. Para o caso trifásico, composto por cabos idênticos dentro de tubos não metálicos, a matriz de admitância própria é uma matriz diagonal, cujos elementos da diagonal principal são formados por submatrizes com a mesma estrutura de $\mathbf{Y}'_{ap}$, conforme Equação (4.57).

$$\mathbf{Y}'_{pp} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_{ap} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}'_{bp} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}'_{cp} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

em que $\mathbf{Y}'_{ap}$, $\mathbf{Y}'_{bp}$ e $\mathbf{Y}'_{cp}$ são as matrizes de admitância própria de cada cabo dentro do tubo com estrutura igual à Equação (4.56). É válido ressaltar que, devido à presença do cabo de aterramento, $\mathbf{Y}'_{ap}$ possui ordem 3 x 3, enquanto $\mathbf{Y}'_{bp}$ e $\mathbf{Y}'_{cp}$ possuem ordem 2 x 2.

Para acrescentar o efeito do solo na admitância, é necessário adicionar uma matriz de admitância de retorno pelo solo, conforme Equações (4.36) a (4.38), considerando que cada submatriz $\mathbf{P}'_{gjk}$ possui ordem correspondente ao número de condutores presentes no interior do tubo, seguindo a lógica apresentada para $\mathbf{Y}'_{pp}$.

A admitância longitudinal para a configuração trifásica da Figura 3.3 é obtida, portanto, a partir das expressões (4.57) e (4.38):

$$\mathbf{Y}' = (\mathbf{Y}'_{pp}{}^{-1} + \mathbf{Y}'_g{}^{-1})^{-1} \quad (4.58)$$

4.5 Modelo de Solo

A contabilização do efeito do solo nos parâmetros de cabos enterrados feita por programas de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, é baseada nas integrais clássicas de Pollaczek e suas aproximações. Essas expressões, no entanto, partem da hipótese de que o solo seja um meio condutor ideal e, conseqüentemente, que sua admitância de retorno possa ser desprezada. Essa aproximação só é válida para estudos de baixa frequência e solos de baixa resistividade, o que não representa a grande parte das situações reais as quais necessitam ser analisadas.

Recentemente, diversos trabalhos se dedicaram à determinação de expressões mais completas acerca da impedância e admitância de retorno pelo solo para cabos enterrados. Uma expressão aproximada que leva a resultados rigorosos em sistemas de cabos em circuitos simples em ampla faixa de frequências foi proposta em (De Conti; Duarte; Alipio, 2023) e será adotada neste trabalho. Segundo os autores, a impedância de retorno pelo solo pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$Z'_{gjk} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[K_0(\gamma_g d) + \frac{(\gamma_g - \gamma_0)}{(\gamma_g + \gamma_0)} e^{-(h_j+h_k)\gamma_g} \left(\frac{2}{4 + \gamma_g^2 x_{jk}^2} \right) \right] \quad (4.59)$$

$$\gamma_0 = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad (4.60)$$

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)} \quad (4.61)$$

$$d = \sqrt{(h_j - h_k)^2 + x_{jk}^2} \quad (4.62)$$

em que Z'_{gjk} é a impedância de retorno pelo solo entre os cabos j e k indicada na Equação (4.27), K_0 é a função de Bessel modificada do segundo tipo, ω é a frequência angular, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, ϵ_0 é permissividade elétrica do vácuo, ϵ_g é a permissividade elétrica do solo, γ_0 é a constante de propagação do ar, γ_g é a constante de propagação do solo, h_j e h_k são as profundidades dos cabos j e k no solo,

respectivamente, x_{jk} é o espaçamento horizontal entre os cabos j e k , e σ_g é a condutividade do solo.

A Expressão (4.59) é válida até a frequência de 5 MHz, pode ser aplicada em solos de quaisquer resistividades, espaçamentos horizontais máximos de 2 m, e enterrados em profundidades de 0,5 a 2 m. Os termos próprios da matriz da Equação (4.27) podem ser obtidos fazendo-se $h_j = h_k$ e x_{jk} igual ao raio externo dos cabos ou tubos considerados (De Conti; Duarte; Alipio, 2023).

No que diz respeito à admitância de retorno pelo solo, o termo P'_{gjk} presente na Equação (4.37) e referente ao coeficiente de potencial de retorno pelo solo entre o j -ésimo e o k -ésimo cabo pode ser calculado por (De Conti; Duarte; Alipio, 2023):

$$P'_{gjk} = \frac{j\omega}{2\pi(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)} \left[K_0(\gamma_g d) + \frac{(\gamma_g^2 - \gamma_0^2)}{(\gamma_g^2 + \gamma_0^2)} K_0(\gamma_g D) \right] \quad (4.63)$$

$$D = \sqrt{(h_j + h_k)^2 + x_{jk}^2} \quad (4.64)$$

A Expressão (4.63) possui validade para quaisquer valores de resistividade do solo e frequências de até 10 MHz.

4.6 Camadas Semicondutoras

A maioria dos cabos isolados de média tensão comerciais são construídos com uma blindagem do núcleo condutor e uma blindagem da isolação interna constituídas por compostos semicondutores, conforme está representado na Figura 3.2 e na Tabela 3.1. De acordo com a Brochura *Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables* (Cigré Working Group C4.502, 2013), a função dessas camadas semicondutoras é equalizar o campo elétrico ao redor do núcleo do cabo, evitando danos nos materiais isolantes e na blindagem. Além disso, essas camadas têm efeito significativo nas características de propagação dos cabos em relação à velocidade de propagação, constante de atenuação e impedância de surto (Martinez-Velasco, 2010).

No que diz respeito ao cálculo de parâmetros, o material semicondutor atua como um meio isolante para fins de cálculo da corrente, no entanto, atua como parte do núcleo para a determinação das capacitâncias. Dessa forma, para garantir esse comportamento, as camadas semicondutoras são tratadas como constituinte da camada isolante interna através da consideração de uma permissividade relativa equivalente ε_{ins_eq} , a qual é dada por (Cigré Working Group C4.502, 2013):

$$\varepsilon_{ins_eq} = \varepsilon_{ins} \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \right) \quad (4.65)$$

em que ε_{ins} é a permissividade relativa real da camada isolante interna, r_1 é o raio do núcleo, r_2 é o raio interno da blindagem, r_a e r_b são os raios interno e externos, respectivamente, da camada isolante entre núcleo e blindagem.

4.7 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as expressões e metodologias relacionadas ao cálculo de parâmetros de cabos isolados enterrados e cabos dentro de tubos de materiais não metálicos, por meio da combinação de expressões analíticas fechadas e método de elementos finitos. Uma vez definida a formulação necessária para o cálculo de parâmetros, no próximo capítulo são apresentadas as características de propagação das configurações de cabos aqui discutidas e o comportamento observado no que diz respeito à constante de atenuação, velocidade de fase e impedância característica.

5 Características de Propagação das Configurações Avaliadas

5.1 Considerações Iniciais

Em uma linha de transmissão n-fásica, as relações entre tensões e correntes é dada pelas Equações (4.3) e (4.4), aqui repetidas por conveniência:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -Z'I(x) \quad (5.1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -Y'V(x) \quad (5.2)$$

em que $V(x)$ e $I(x)$ são vetores de tensão e corrente, respectivamente, de ordem n , e Z' e Y' são matrizes de impedância e admitância, de ordem $n \times n$.

A solução das Equações (5.1) e (5.2) são da seguinte forma:

$$V(x) = e^{-\sqrt{Z'Y'}x}V_F + e^{\sqrt{Z'Y'}x}V_B \quad (5.3)$$

$$I(x) = e^{-\sqrt{Y'Z'}x}I_F + e^{\sqrt{Y'Z'}x}I_B \quad (5.4)$$

em que V_F , V_B , I_F e I_B são vetores que dependem das condições terminais da linha em questão.

Ao se definir a admitância característica e a matriz de constantes de propagação de tensões, respectivamente, como

$$Y_C = Z'^{-1} \sqrt{Z' Y'} \quad (5.5)$$

$$\Gamma_V = \sqrt{Z' Y'} \quad (5.6)$$

pode-se reescrever as Equações (5.3) e (5.4) como

$$V(x) = e^{-\Gamma_V x} V_F + e^{\Gamma_V x} V_B \quad (5.7)$$

$$I(x) = Y_C (e^{-\Gamma_V x} V_F - e^{\Gamma_V x} V_B) \quad (5.8)$$

De forma semelhante, ao se definir a impedância característica e a matriz de constantes de propagação de correntes como

$$Z_C = Y'^{-1} \sqrt{Y' Z'} \quad (5.9)$$

$$\Gamma_I = \sqrt{Y' Z'} \quad (5.10)$$

pode-se reescrever as Equações (5.3) e (5.4) como

$$V(x) = Z_C (e^{-\Gamma_I x} I_F - e^{\Gamma_I x} I_B) \quad (5.11)$$

$$I(x) = e^{-\Gamma_I x} I_F + e^{\Gamma_I x} I_B \quad (5.12)$$

Como pode ser visto, a definição da impedância e admitância características e das constantes de propagação, necessárias para determinação da solução das equações de linhas de transmissão para o caso de uma linha com n condutores, requer o cálculo de exponenciais e raízes quadradas de matrizes cheias, o que nem sempre é uma tarefa simples de se realizar.

5.2 Transformação Modal

Uma alternativa para evitar o cálculo das exponenciais e raízes quadradas de matrizes é a realização de uma transformação de similaridade conhecida como transformação modal, a qual consiste em transformar o problema n -fásico em n linhas monofásicas desacopladas. Para isso, utilizam-se técnicas de diagonalização de matrizes, baseada na teoria de autovalores e autovetores.

Para diagonalizar uma matriz A qualquer, de ordem $n \times n$, utiliza-se a seguinte relação:

$$Q^{-1}AQ = \lambda \quad (5.13)$$

em que Q é uma matriz $n \times n$, cujas colunas são os autovetores de A , e λ é uma matriz diagonal composta pelos autovalores de A .

A solução do problema de linhas de transmissão pressupõe resolver as equações:

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = Z'Y'V(x) \quad (5.14)$$

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} = Y'Z'I(x) \quad (5.15)$$

No domínio modal, os vetores $V(x)$ e $I(x)$ podem ser escritos como:

$$V(x) = T_V V_m(x) \quad (5.16)$$

$$I(x) = T_I I_m(x) \quad (5.17)$$

em que $V_m(x)$ e $I_m(x)$ são vetores de tensões e correntes modais, e T_V e T_I são matrizes de transformação de tensão e corrente. Assim, o problema modal torna-se:

$$\frac{d^2 V_m(x)}{dx^2} = T_V^{-1} Z'Y' T_V V_m(x) = \lambda V_m(x) \quad (5.18)$$

$$\frac{d^2 I_m(x)}{dx^2} = T_I^{-1} Y'Z' T_I I_m(x) = \lambda I_m(x) \quad (5.19)$$

em que as matrizes $T_V^{-1} Z'Y' T_V$ e $T_I^{-1} Y'Z' T_I$ devem ser diagonais. Isso será possível caso T_V contenha os autovetores do produto $Z'Y'$ e T_I contenha os autovetores de $Y'Z'$, de modo que as matrizes resultantes sejam diagonais e contenham os autovalores λ dos produtos $Z'Y'$ e $Y'Z'$, que são idênticos.

Ressalta-se que as matrizes de transformação de tensão e corrente obedecem a seguinte relação:

$$\mathbf{T}_V^{-1} = \mathbf{T}_I^t \quad (5.20)$$

Assim, as Equações (5.1) e (5.2) podem, então, ser reescritas no domínio modal como:

$$\frac{d\mathbf{V}_m(x)}{dx} = -\mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z}' \mathbf{T}_I \mathbf{I}_m(x) = -\mathbf{Z}_m \mathbf{I}_m(x) \quad (5.21)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_m(x)}{dx} = -\mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y}' \mathbf{T}_V \mathbf{V}_m(x) = -\mathbf{Y}_m \mathbf{V}_m(x) \quad (5.22)$$

em que $\mathbf{Z}_m$ e $\mathbf{Y}_m$ são a impedância longitudinal e admitância transversal modais, ambas matrizes diagonais.

De forma análoga ao caso n -fásico original, ao se definir a admitância característica e a matriz de constantes de propagação modais, respectivamente, como

$$\mathbf{Y}_{cm} = \mathbf{Z}_m^{-1} \mathbf{\Gamma}_m \quad (5.23)$$

$$\mathbf{\Gamma}_m = \sqrt{\lambda} = \sqrt{\mathbf{Z}_m \mathbf{Y}_m} = \sqrt{\mathbf{Y}_m \mathbf{Z}_m} \quad (5.24)$$

pode-se reescrever as Equações (5.3) e (5.4) no domínio modal como:

$$\mathbf{V}_m(x) = e^{-\mathbf{\Gamma}_m x} \mathbf{V}_{Fm} + e^{\mathbf{\Gamma}_m x} \mathbf{V}_{Bm} \quad (5.25)$$

$$\mathbf{I}_m(x) = \mathbf{Y}_{cm} (e^{-\mathbf{\Gamma}_m x} \mathbf{V}_{Fm} - e^{\mathbf{\Gamma}_m x} \mathbf{V}_{Bm}) \quad (5.26)$$

De forma semelhante, ao se definir a impedância modal como:

$$\mathbf{Z}_{cm} = \mathbf{Y}_m^{-1} \mathbf{\Gamma}_m \quad (5.27)$$

as tensões e correntes modais são calculadas por:

$$V_m(x) = Z_{Cm}(e^{-\Gamma_m x} I_{Fm} - e^{\Gamma_m x} I_{Bm}) \quad (5.28)$$

$$I_m(x) = e^{-\Gamma_m x} I_{Fm} + e^{\Gamma_m x} I_{Bm} \quad (5.29)$$

Além dos parâmetros de impedância e admitância modais, os outros parâmetros de interesse são definidos a seguir. A constante de atenuação, a constante de fase e a velocidade de fase modais são dadas, respectivamente, por:

$$\alpha_m = \text{Re}\{\Gamma_m\} \quad (5.30)$$

$$\beta_m = \text{Im}\{\Gamma_m\} \quad (5.31)$$

$$v_m = \omega[\text{Im}\{\Gamma_m\}]^{-1} \quad (5.32)$$

No contexto da modelagem de linhas de transmissão, os parâmetros de impedância longitudinal Z' e admitância transversal Y' são variáveis com a frequência. Dessa forma, as matrizes de transformação T_V e T_I também apresentam o mesmo comportamento, sendo necessário, portanto, que os autovalores associados ao conjunto de autovetores dos produtos $Z'Y'$ e $Y'Z'$ sejam calculados para cada frequência do espectro de interesse. No entanto, verifica-se que os autovalores calculados que compõem a matriz λ podem trocar de posição entre si de uma frequência para outra. Isso ocorre porque as rotinas clássicas de determinação de autovalores e autovetores disponíveis em programas computacionais como o MATLAB não têm como garantir que autovalores calculados em frequências vizinhas sejam ordenados da mesma maneira. Esse fenômeno faz com que os elementos das matrizes de transformação apresentem saltos ao longo da faixa de frequência. Esse comportamento é indesejado, uma vez que a continuidade das funções é uma condição necessária para a realização de aproximações racionais dos autovetores feitas em programas de transitórios eletromagnéticos.

Para garantir um comportamento suave dos autovetores ao longo da frequência, algoritmos específicos podem ser utilizados. Uma das estratégias é a obtenção das matrizes de transformação variáveis com a frequência através do método de Newton-Raphson, conforme apresentado na referência (Wedepohl; Nguyen; Irwin, 1996). Um método alternativo consiste na comparação dos produtos escalares dos autovetores

frequência a frequência. Essa técnica compõe uma rotina para garantir a passividade de modelos de polos e resíduos através da perturbação de seus autovalores, desenvolvida por (Gustavsen, 2008). A fim de avaliar as características de propagação das configurações propostas nesse trabalho, foi utilizada a rotina proposta por (Gustavsen, 2008).

5.3 Configurações Analisadas

A análise das características de propagação de uma linha composta por n condutores é feita por meio da avaliação, ao longo da frequência, do comportamento de seus parâmetros modais. Particularmente, foram analisados quatro parâmetros de interesse, conforme descrito a seguir:

- Constante de atenuação modal α_m : corresponde à parte real da constante de propagação Γ_m e é responsável pela atenuação das ondas de tensão e corrente.
- Constante de fase modal β_m : corresponde à parte imaginária da constante de propagação Γ_m e é responsável por introduzir um deslocamento de fase nas ondas de tensão e corrente.
- Velocidade de fase modal v_m : determina o atraso de tempo para a manifestação de um sinal de tensão ou corrente ao longo da linha.
- Impedância característica modal Z_{cm} : representa a relação entre tensões e correntes na linha em uma determinada frequência.

Foram analisadas quatro configurações de cabos. A Figura 3.1 e a Figura 3.3 apresentam as duas configurações de cabos típicas comumente empregadas em parques eólicos, uma composta por cabos diretamente enterrados e outra composta por cabos dentro de tubos, acompanhados de um cabo de aterramento, ou ECC (sigla para *Earth Continuity Conductor*). Além dessas configurações, para efeito de comparação, foram analisadas também outras duas situações: uma correspondente aos cabos da configuração da Figura 3.1 posicionados em tubos e outra composta pelos cabos da configuração da Figura 3.3 diretamente enterrados.

As Figura 5.1 a Figura 5.4 apresentam as quatro configurações analisadas, bem como a descrição de cada uma delas. O cálculo dos parâmetros elétricos por unidade de comprimento de cada configuração foi feito com base na metodologia apresentada no

Capítulo 4, fazendo-se as adaptações necessárias a partir das duas configurações padrão ali descritas.

- Configuração 1: Três cabos compostos por núcleo e blindagem diretamente enterrados no solo (Figura 3.1 e Figura 5.1).

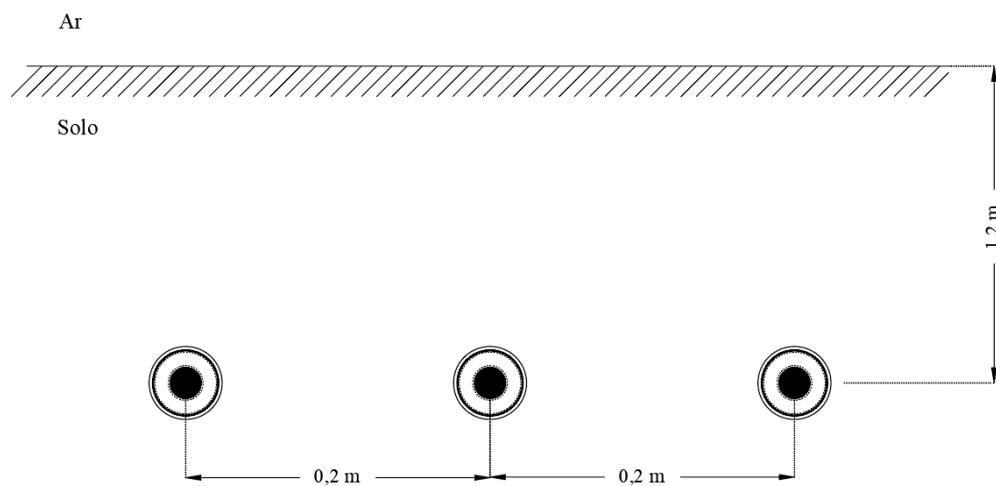


Figura 5.1 - Configuração 1: Cabos diretamente enterrados

- Configuração 2: Três cabos compostos por núcleo e blindagem dentro de tubos de HDPE enterrados no solo (Figura 5.2).

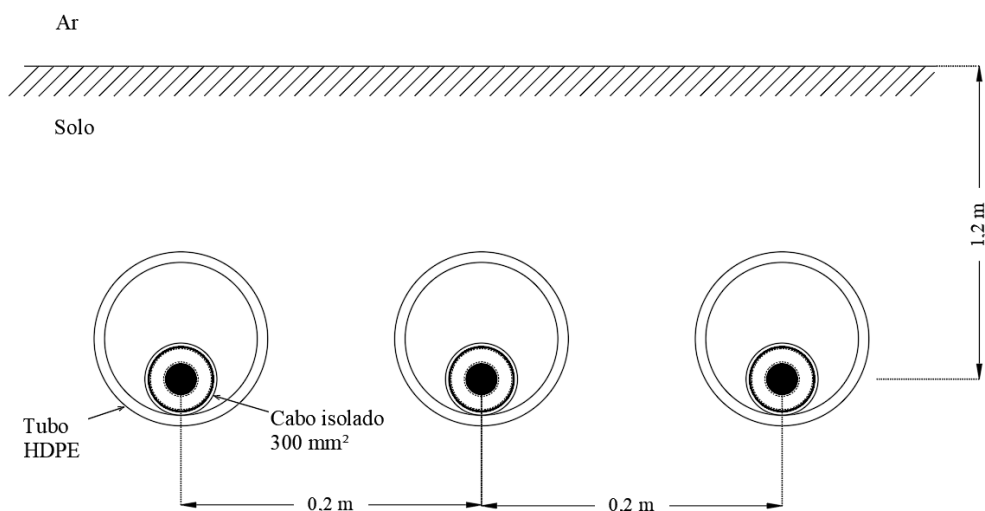


Figura 5.2 - Configuração 2: Cabos dentro de tubos enterrados

- Configuração 3: Três cabos compostos por núcleo e blindagem diretamente enterrados no solo, além de um cabo isolado também diretamente enterrado (Figura 5.3).

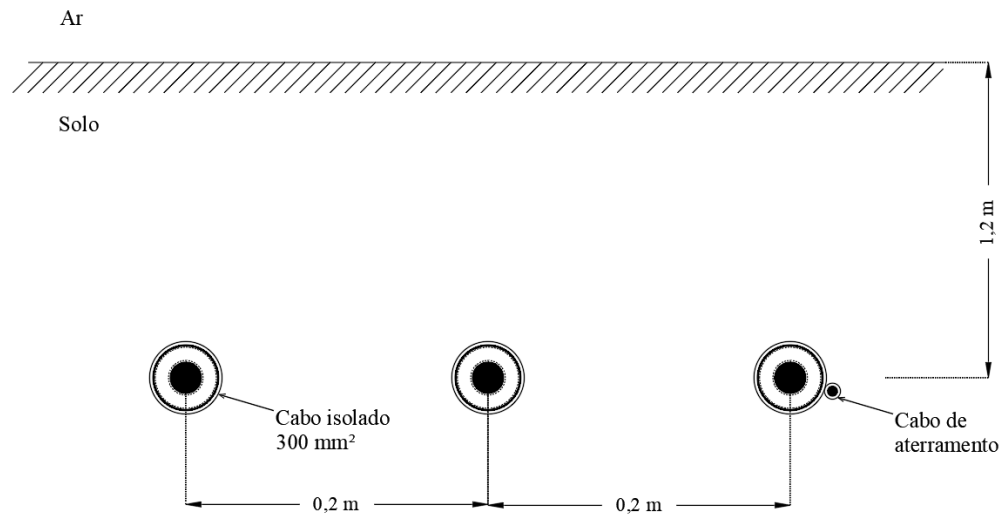


Figura 5.3 - Configuração 3: Cabos diretamente enterrados e um condutor adicional

- Configuração 4: Três cabos compostos por núcleo e blindagem dentro de tubos de HDPE enterrados no solo, além de um cabo isolado de aterramento compartilhado em um dos tubos (Figura 3.3 e Figura 5.4).

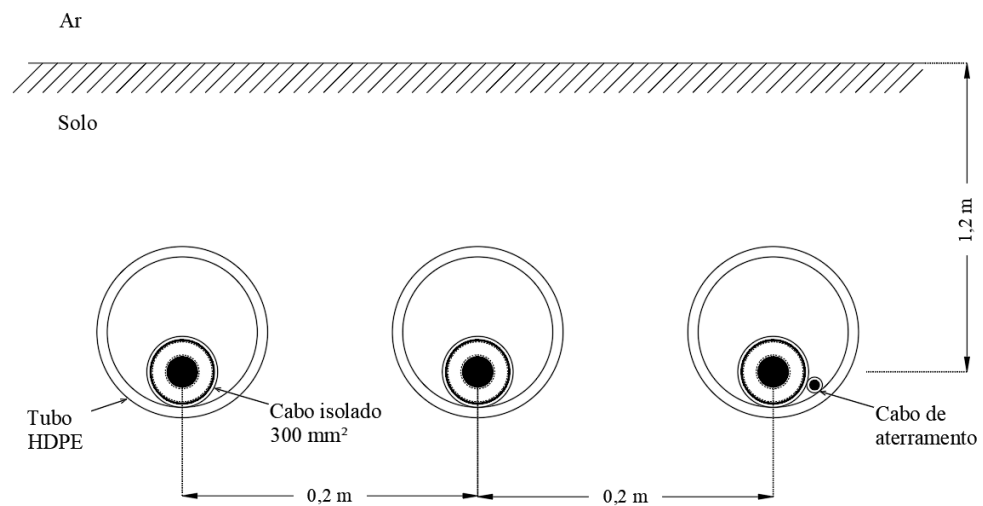


Figura 5.4 - Configuração 4: Cabos dentro de tubos enterrados e um condutor adicional

As configurações 1 e 2 apresentam no total 6 condutores principais, enquanto as configurações 3 e 4 apresentam 7 condutores, além do condutor de referência, que é o solo. Para linhas de transmissão polifásicas como estas, é necessário realizar uma transformação modal a fim de desacoplar cada modo. Assim, as configurações 1 e 2

apresentam 6 modos e as configurações 3 e 4 apresentam 7 modos, no total. A identificação e a caracterização dos modos em cada configuração podem ser feitas pela análise da matriz de transformação modal $\mathbf{T}_I$, conforme mostrado a seguir.

Para as configurações de 6 condutores, os 6 modos existentes são identificados como:

- Modo terra: modo de circulação de corrente pelas blindagens com retorno pela terra.
- Modo entre blindagens 1: modo de circulação de corrente em uma blindagem com retorno por outra blindagem.
- Modo entre blindagens 2: modo de circulação de corrente em uma blindagem com retorno pelas outras duas blindagens.
- Modo coaxial 1: modo de circulação de corrente pelos três núcleos com retorno pela terra.
- Modo coaxial 2: modo de circulação bifásico de corrente entre um núcleo com retorno por outro núcleo.
- Modo coaxial 3: modo de circulação trifásico de corrente entre um núcleo com retorno pelos outros dois núcleos.

Conforme a referência (Lafaia, 2016), os modos tornam-se desacoplados entre si quando a profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos na blindagem torna-se menor que a sua espessura. A frequência limite a partir da qual esse comportamento é observado é definida como:

$$f_c = \frac{\rho_{sh}}{\pi \mu_{sh} (r_{sh-out} - r_{sh-in})^2} \quad (5.33)$$

em que ρ_{sh} é a resistividade, μ_{sh} é a permeabilidade magnética e r_{sh-out} e r_{sh-in} são os raios externos e internos da blindagem.

A matriz de transformação modal de corrente $\mathbf{T}_I$ é uma matriz complexa variável com a frequência. Ao analisar os seus elementos, é possível identificar cada um dos 6 modos da configuração 1. As Equações (5.34) a (5.36) mostram a matriz $\mathbf{T}_I$ que satisfaz a Equação (5.17) em diferentes frequências. Para efeito de comparação, foi considerada apenas a parte real dos seus elementos e cada autovetor foi normalizado por um fator

adequado. O problema foi estruturado a partir das matrizes de impedância e admitância $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$, construídas com os núcleos nas três primeiras linhas/colunas e com as blindagens dispostas nas três linhas/colunas finais.

$$\mathbf{T}_{I-1Hz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

$$\mathbf{T}_{I-10kHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & -1/3 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & -1/3 & 0 & -2/3 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & -1/3 & -1/2 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

$$\mathbf{T}_{I-10MHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & 0 & -1 & 0 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & 0 & 0 & -1 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Nas Equações (5.37) a (5.39), são apresentadas as matrizes de transformação de corrente $\mathbf{T}_I$ em diferentes frequências para a configuração 2. Percebe-se que as matrizes são iguais às da configuração 1. Novamente, as matrizes de impedância e admitância $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ foram construídas de forma semelhante à configuração 1 quanto à disposição dos condutores. Além disso, o mesmo tratamento prévio dos seus elementos foi feito.

$$T_{I-1Hz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

$$T_{I-10kHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & -1/3 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & -1/3 & 0 & -2/3 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & -1/3 & -1/2 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

$$T_{I-10MHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & -1/3 & 0 & -1 & 0 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & -1 & 0 & 0 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Nas Equações (5.34) a (5.39), cada coluna representa um autovetor correspondente ao respectivo autovalor do produto $\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'$. A primeira coluna (modo 1) se refere ao modo terra, a segunda coluna (modo 2) representa o primeiro modo entre blindagens e terceira coluna (modo 3) representa o segundo modo entre blindagens. As três colunas finais (modos 4, 5 e 6) se referem aos modos coaxiais. Percebe-se ainda que os modos 1, 2 e 3 são constantes, enquanto os modos 4, 5 e 6, variam com a frequência. Para baixas frequências (1 Hz), os modos finais são quase exclusivamente coaxiais, não havendo circulação de corrente pelas blindagens ou retorno pela terra. Para frequências intermediárias (10 kHz), os modos 4, 5 e 6 representam os modos coaxiais coexistindo com os modos entre blindagens, havendo circulação de corrente entre os núcleos e as blindagens. Já para frequências elevadas (10 MHz), esses modos tornam-se puramente

coaxiais e monofásicos, ou seja, ocorre circulação de corrente em apenas um núcleo com retorno pela respectiva blindagem. Para frequências elevadas, presume-se, portanto que os modos estejam completamente desacoplados.

Para as configurações de 7 condutores, além dos 6 modos já identificados, existe um sétimo modo, o qual pode ser descrito como:

- Modo entre blindagem e condutor adicional: modo de circulação de corrente entre o condutor adicional com retorno por uma ou mais blindagens.

De maneira análoga às configurações 1 e 2, analisando a matriz de transformação modal de corrente $\mathbf{T}_I$ em diferentes frequências, é possível identificar cada um dos 7 modos da configuração 3, conforme mostrado nas Equações (5.40) a (5.42). O problema foi estruturado a partir das matrizes de impedância e admitância $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$, construídas com os núcleos nas três primeiras linhas/colunas, com as blindagens nas três linhas/colunas seguintes e o condutor adicional na linha/coluna final. Cada coluna representa um autovetor correspondente ao respectivo autovalor do produto $\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'$.

$$\mathbf{T}_{I-1Hz} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 2/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & -1/2 & -1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/3 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & -1/3 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & -1/3 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

$$\mathbf{T}_{I-100kHz} = \begin{bmatrix} 4/9 & 0 & -3/7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2/5 & 2/7 & 2/5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/7 & -5/7 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4/9 & 0 & 3/7 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ -2/5 & -2/7 & -2/5 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ -1/7 & 5/7 & -1/6 & -1/2 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

$$\mathbf{T}_{I-10MHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1/3 & 1/2 & -1/3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 1/3 & -1/2 & -1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

Analisando as Equações (5.40) a (5.42), percebe-se que, em baixas frequências, no modo 1, as correntes se distribuem pelos núcleos e retornam pela terra. Nos modos 2 e 3, as correntes circulam por um dos núcleos e retornam pelos demais. Essas características indicam que os modos 1, 2 e 3 são, portanto, modos coaxiais. Em frequências intermediárias, as correntes circulam pelos núcleos dos cabos e retornam por uma ou mais blindagens. Já em frequências elevadas, os modos coaxiais tornam-se exclusivamente monofásicos, com a circulação de corrente por um dos núcleos e retorno pela respectiva blindagem.

O modo 4, nas três faixas de frequência analisadas, se caracteriza pela circulação de corrente pelas blindagens com retorno pelo sétimo condutor da configuração. Trata-se, portanto, do modo entre blindagem e o condutor adicional. Já os modos 5, 6 e 7 são invariantes na frequência e se caracterizam pela circulação de corrente pela blindagem, com retorno seja pela terra seja pelas demais blindagens. Esse comportamento indica que esses são os modos terra e entre blindagens, cujas características são idênticas às observadas para as configurações 1 e 2.

Nas Equações (5.43) a (5.45), são apresentadas as matrizes de transformação de corrente $\mathbf{T}_I$ em diferentes frequências para a configuração 4. Novamente, as matrizes de impedância e admitância $\mathbf{Z}'$ e $\mathbf{Y}'$ foram construídas de forma semelhante à configuração 3 quanto à disposição dos condutores. Cada coluna representa um autovetor correspondente ao respectivo autovalor do produto $\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'$. Analisando estas equações, nota-se que a coluna 1 representa o modo entre blindagem e o condutor adicional, uma vez que, em todas as faixas de frequência, o caminho fechado de corrente passa por uma das blindagens e pelo sétimo condutor da configuração.

As colunas 2, 3 e 4 se referem aos modos coaxiais, cujo comportamento é marcado pela circulação de corrente entre os núcleos dos cabos e suas blindagens em frequências

baixas e intermediárias. Em altas frequências, com o desacoplamento dos modos, eles se tornam puramente monofásicos com a circulação de corrente em um núcleo com retorno pela respectiva blindagem.

Por fim, as colunas 5 e 7 representam os modos entre blindagens, enquanto a coluna 6 indica o modo terra. De forma semelhante às configurações anteriores, esses três últimos modos são invariantes na frequência e possuem comportamento bem similar de uma configuração para outra.

$$\mathbf{T}_{I-500Hz} = \begin{bmatrix} 0 & -2/5 & 0 & 3/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4/7 & 0 & 2/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/7 & 0 & -3/5 & 1/2 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & -5/8 & 0 & -2/5 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 & 0 & -1/2 & 1/3 & -1/3 \\ -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

$$\mathbf{T}_{I-100kHz} = \begin{bmatrix} 0 & -2/5 & 0 & 3/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/5 & 0 & 2/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2/5 & 0 & -3/5 & 1/2 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & -3/5 & 0 & -2/5 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 & 0 & -1/2 & 1/3 & -1/3 \\ -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

$$\mathbf{T}_{I-10MHz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1/2 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1/2 & 1/3 & -1/3 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

É válido ressaltar que as matrizes de transformação de corrente $\mathbf{T}_I$ apresentadas nas Equações (5.34) a (5.45) variam continuamente ao longo da frequência, de modo que o comportamento de cada modo não muda abruptamente de uma frequência para outra. Na verdade, o que se observa é uma mudança contínua da distribuição das correntes ao longo de todo espectro de frequência. Para efeito de comparação, foram selecionadas algumas frequências em torno das quais as matrizes $\mathbf{T}_I$ apresentam comportamento bem

definido, conforme foi descrito. Além disso, é importante destacar que, embora a natureza dessas matrizes seja complexa, foi considerada apenas a parcela real de seus elementos. Apesar dessas aproximações, a análise e a identificação de cada modo são feitas sem prejuízos.

De forma geral, é possível notar que para todas as quatro configurações os modos apresentam comportamento semelhante. Os modos entre blindagens e o modo terra para todos os casos são invariantes com a frequência. Já os modos coaxiais não são constantes ao longo de todo o espectro. Em baixas e médias frequências, há uma ligeira diferença na distribuição de corrente entre as configurações 1 e 2, comparadas às configurações 3 e 4, o que se justifica pela assimetria na disposição de cabos observada nas duas últimas. Em frequências elevadas, no entanto, quando todos os modos estão devidamente desacoplados devido à pequena profundidade de penetração, o comportamento é idêntico para todas elas e se caracteriza pela circulação de corrente entre núcleo e blindagem.

Por fim, o modo entre blindagem e o condutor adicional, presente nas configurações 3 e 4, também apresenta comportamento semelhante entre elas e se caracteriza por ser o único modo no qual há circulação de corrente pelo condutor de aterramento adicionado às configurações.

5.4 Análise dos Parâmetros Modais

Para cada uma das quatro configurações apresentadas na seção 5.3, foram avaliados os seguintes parâmetros modais: constante de atenuação, velocidade de fase e o módulo da impedância característica. Além disso, foi feita uma comparação de cada grandeza entre os modos de cada configuração. Os resultados são mostrados a seguir.

Os parâmetros foram calculados na faixa de frequência entre 0,1 Hz e 1 MHz. Foi considerada a variação da resistividade e da permissividade elétrica relativa do solo com a frequência, com uma resistividade de baixa frequência de 100 Ωm , conforme descrito na referência (Salvador et al., 2020). Para a impedância e admitância de retorno do solo foram consideradas as expressões desenvolvidas por (De Conti; Duarte; Alipio, 2023).

5.4.1 Análise por Configuração de Cabos

As Figura 5.5 a Figura 5.7 mostram os parâmetros modais de interesse para a configuração 1, constituída por 3 cabos diretamente enterrados no solo.

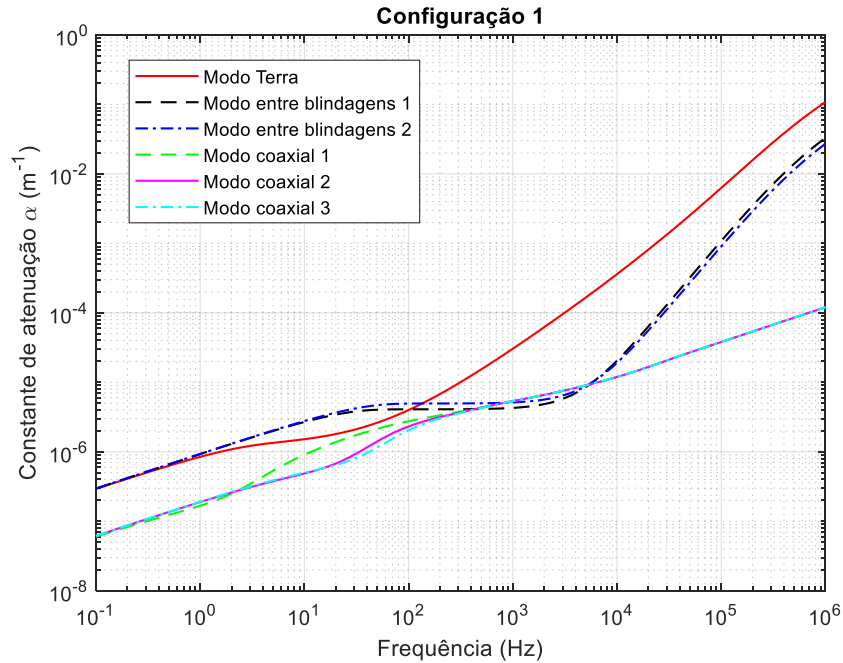


Figura 5.5 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 1

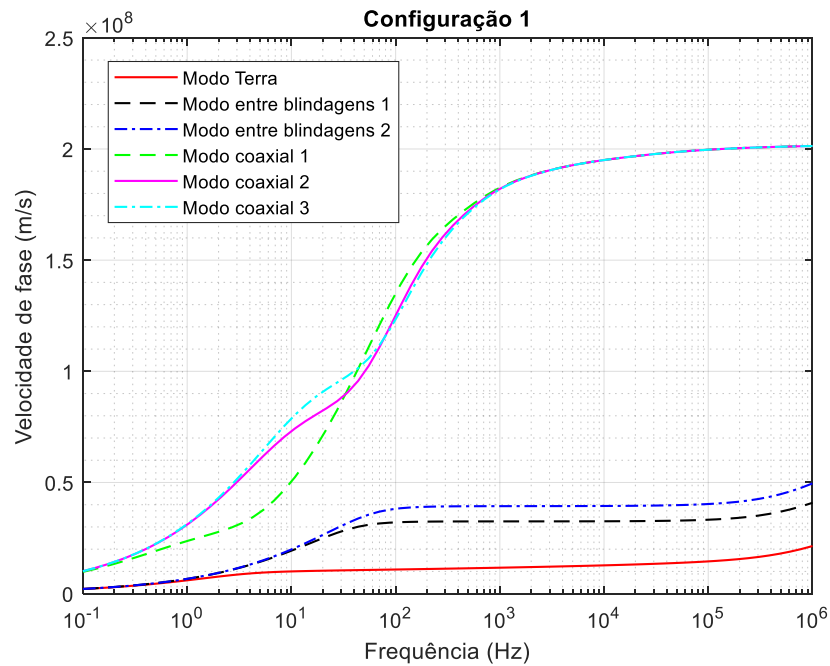


Figura 5.6 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 1

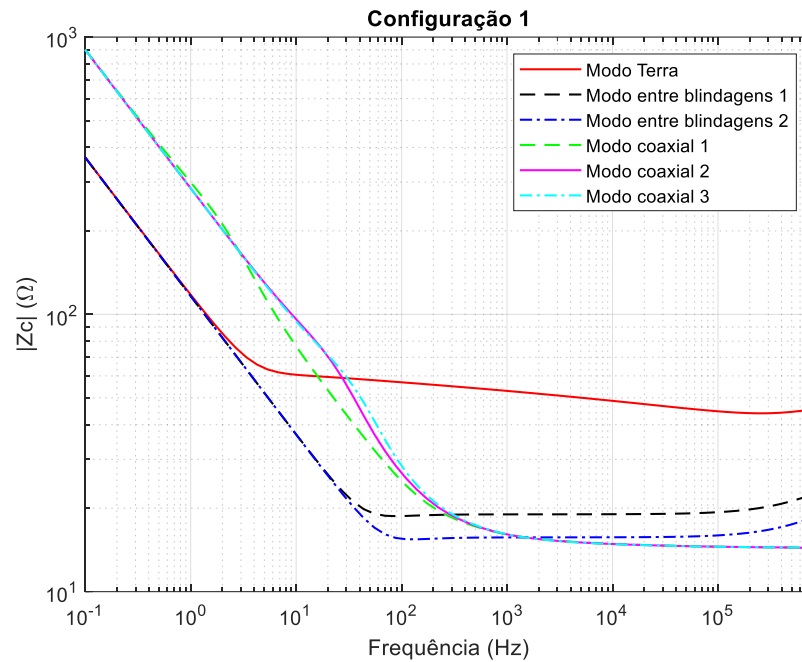


Figura 5.7 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 1

Percebe-se que, para a configuração 1 em frequências elevadas, os modos coaxiais são os modos com maior velocidade de fase, o que se traduz em uma menor atenuação comparado aos demais modos. Em contrapartida, o modo terra apresenta comportamento oposto, ou seja, possui a maior constante de atenuação, menor velocidade de fase entre os seis modos e, conseqüentemente, maior impedância característica em alta frequência. Entre os modos coaxiais e o modo terra, os dois modos entre blindagens apresentam atenuação intermediária, que também resulta em uma velocidade de propagação das suas ondas de tensão e corrente que é maior que no modo terra e menor que nos modos coaxiais.

Um comportamento semelhante é observado para a configuração de três cabos isolados dentro de tubos de HDPE enterrados no solo. As Figura 5.8 a Figura 5.10 mostram os parâmetros modais de interesse para a configuração 2. É possível notar que, assim como na configuração 1, o modo terra é o modo mais lento, enquanto os três modos coaxiais são os modos mais rápidos, comportamento observado de maneira oposta para a constante de atenuação. Novamente os modos entre blindagens estão em uma escala intermediária em termos de velocidade de propagação, porém, visivelmente mais rápidos comparados à configuração 1. Uma análise individualizada de cada modo está apresentada na Seção 5.4.2.

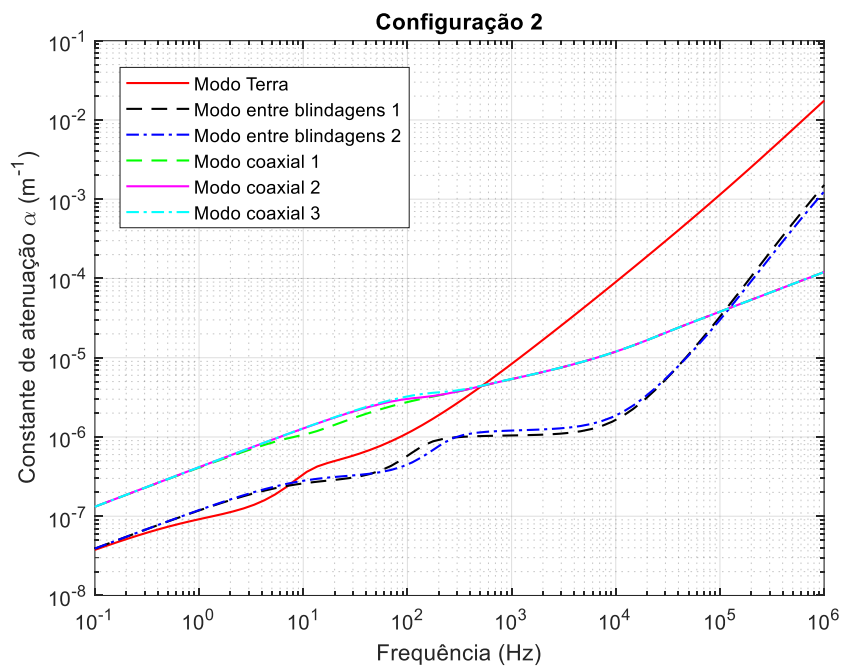


Figura 5.8 - Constante de atenuação em função da frequência para configuração 2

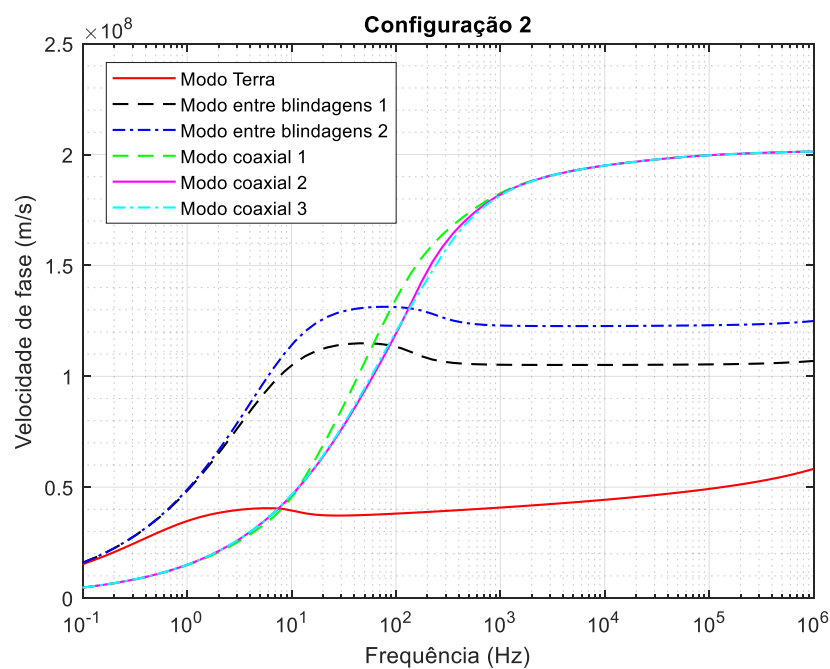


Figura 5.9 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 2

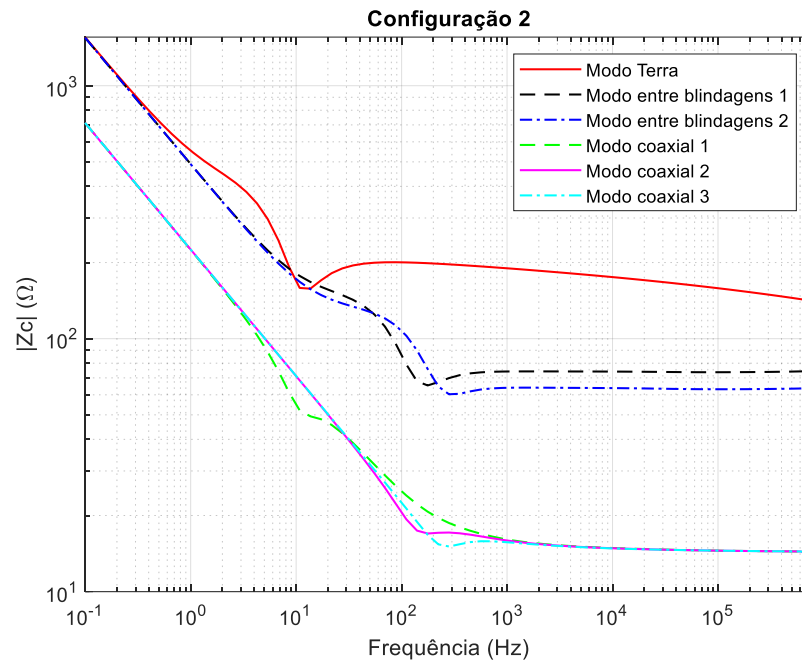


Figura 5.10 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 2

As Figura 5.11 a Figura 5.13 mostram os parâmetros modais de interesse para a configuração 3, constituída por 3 cabos diretamente enterrados no solo, além de um cabo isolado também enterrado. A adição de um condutor extra à configuração não altera de maneira significativa o comportamento dos seis modos existentes comuns à configuração 1. Dessa forma, em altas frequências, os modos coaxiais se apresentam como os modos mais rápidos e menos atenuados, o modo terra se comporta de maneira oposta a esta, enquanto os modos entre blindagens possuem comportamento intermediário entre os dois modos. Entretanto, observa-se o surgimento de um novo modo, oriundo da circulação de corrente entre as blindagens e o condutor de aterramento adicional. Esse modo, por sua vez, possui velocidade de fase menor que os modos coaxiais e maior que os modos entre blindagens, o que se traduz em uma constante de atenuação que é um pouco menor que a observada nos modos terra e entre blindagens, em altas frequências, mas é significativamente maior que a apresentada nos modos coaxiais.

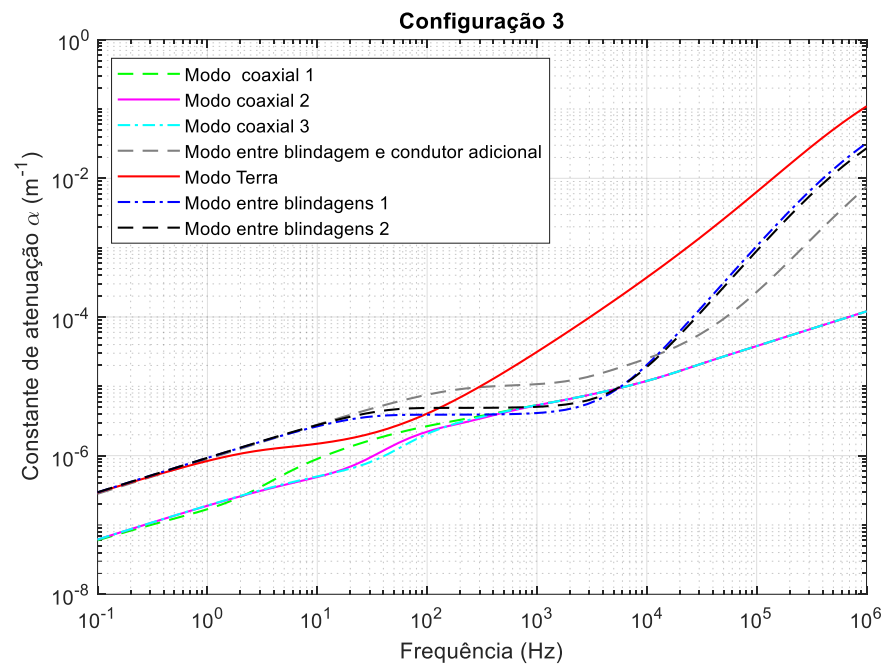


Figura 5.11 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 3

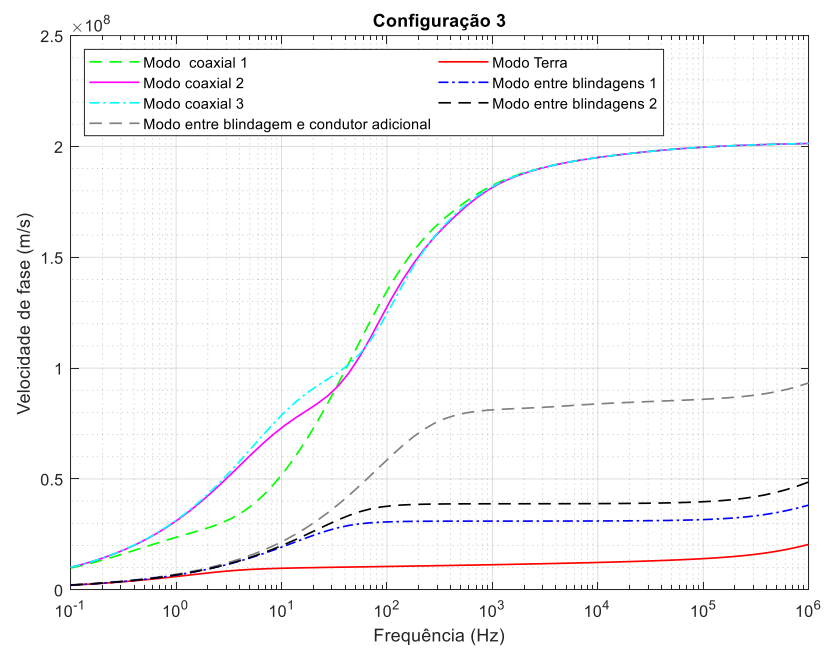


Figura 5.12 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 3

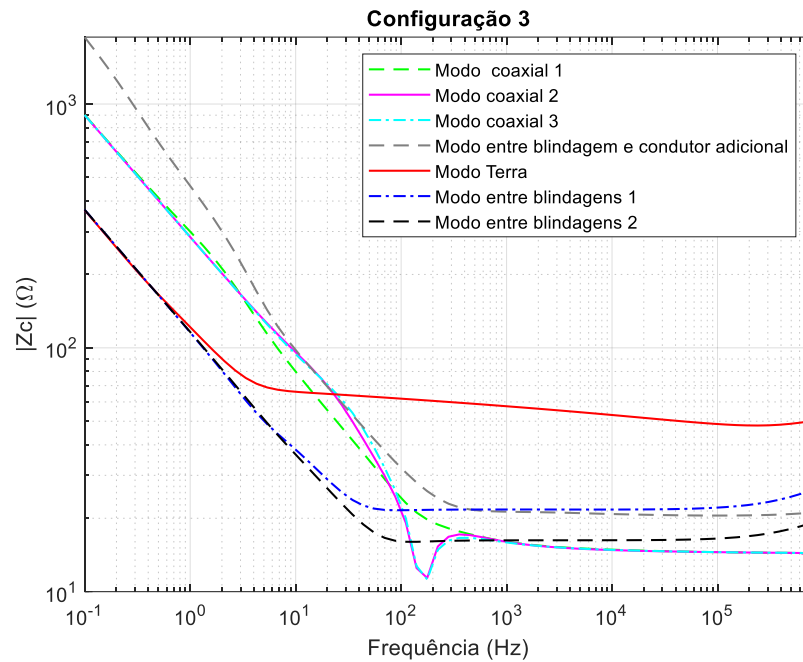


Figura 5.13 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 3

Ao modificar a configuração 3 considerando que os cabos estejam em repouso dentro de um tubo de HDPE, ocorrem algumas mudanças importantes nas características de propagação das ondas de tensão e corrente. As Figura 5.14 a Figura 5.16 mostram os parâmetros modais de interesse para a configuração 4, que se constitui por 3 cabos dentro de tubos enterrados no solo, com um cabo isolado em repouso em um dos tubos. A primeira grande diferença observada é em relação aos modos coaxiais. Enquanto nas configurações 1, 2 e 3 os três modos coaxiais possuem comportamento semelhante entre si, na configuração 4 o modo coaxial referente ao núcleo do cabo que compartilha o tubo com o condutor adicional possui velocidade de propagação maior que os outros dois modos coaxiais. Além disso, destaca-se que o modo entre blindagem e o condutor adicional possui velocidade de fase intermediária entre os modos coaxiais e os modos entre blindagens. Esse comportamento é explicado pela presença de ar no interior dos tubos, que reduz a atenuação das ondas de tensão e corrente e aumenta a impedância característica em altas frequências tendo como referência a configuração 3, na qual os dois cabos estão separados pelo solo. Por fim, assim como nos demais casos, percebe-se que o modo terra é o mais lento, seguido pelos modos entre blindagens, fato que se manifesta também em uma impedância característica e constante de atenuação maiores em alta frequência para esses modos.

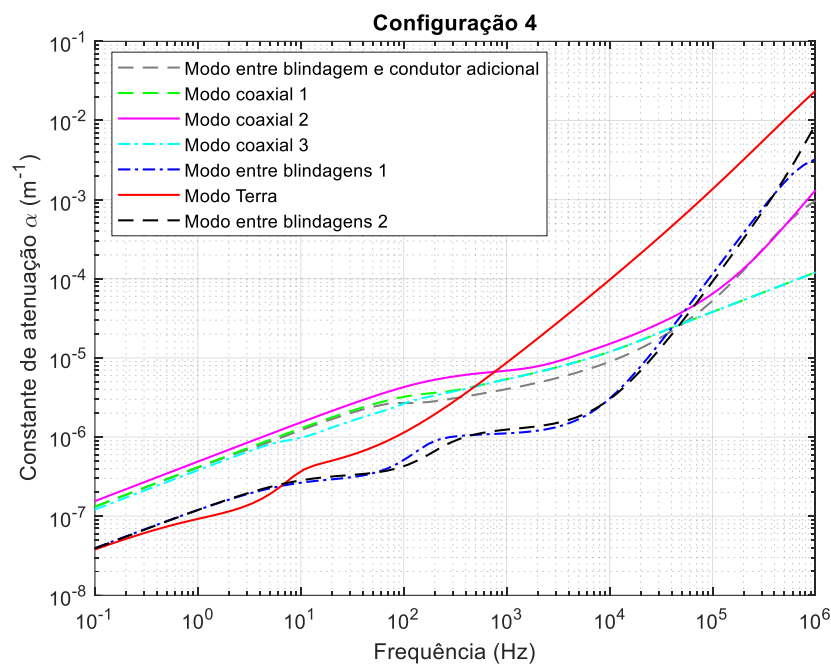


Figura 5.14 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 4

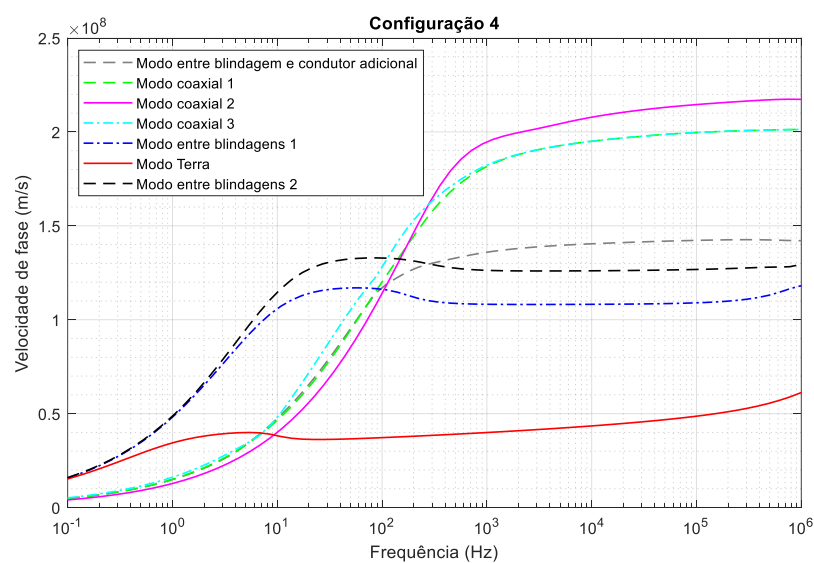


Figura 5.15 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 4

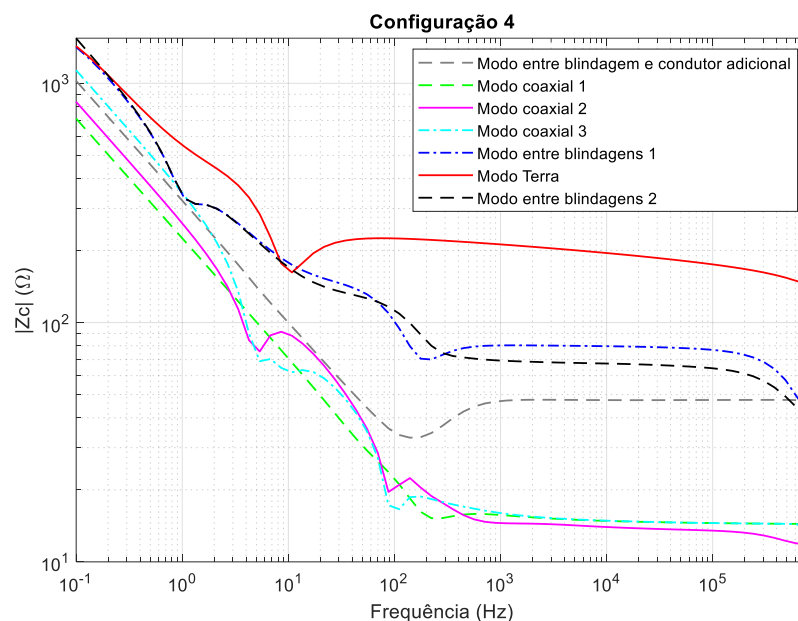


Figura 5.16 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 4

Uma variação da configuração 4 é a substituição do cabo isolado adicional em um dos tubos por um cabo nu de cobre, típico em aplicações de aterramento, mantendo as dimensões do núcleo e sua posição relativa ao cabo de média tensão. Para essa nova situação, identificada como configuração 5, os parâmetros modais de interesse estão apresentados nas Figura 5.17 a Figura 5.19. Para essa nova configuração, as características de propagação são similares às da configuração 4. Dessa forma, observa-se novamente que um dos modos coaxiais se comporta de maneira diferente dos demais, apresentando velocidade de fase maior e constante de atenuação menor que os outros dois. Novamente, o modo entre blindagem e condutor adicional apresenta velocidade de propagação intermediária em comparação com os modos coaxiais e entre blindagens em altas frequências, sendo maior que na configuração 3 e semelhante à configuração 4. Esse comportamento é explicado pela ausência da cobertura isolante no condutor de aterramento, o que reduz a atenuação das ondas de tensão e corrente ainda mais em relação à configuração 3. Além disso, de forma idêntica às outras quatro configurações, o modo terra é o mais lento e mais atenuado, seguido pelos modos entre blindagens.

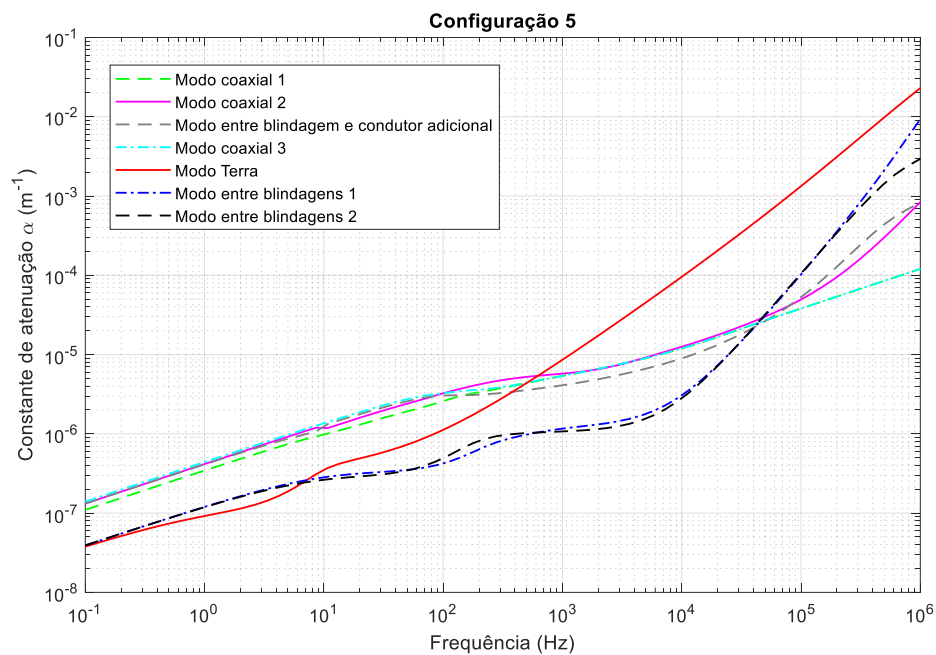


Figura 5.17 - Constante de atenuação em função da frequência para a configuração 5

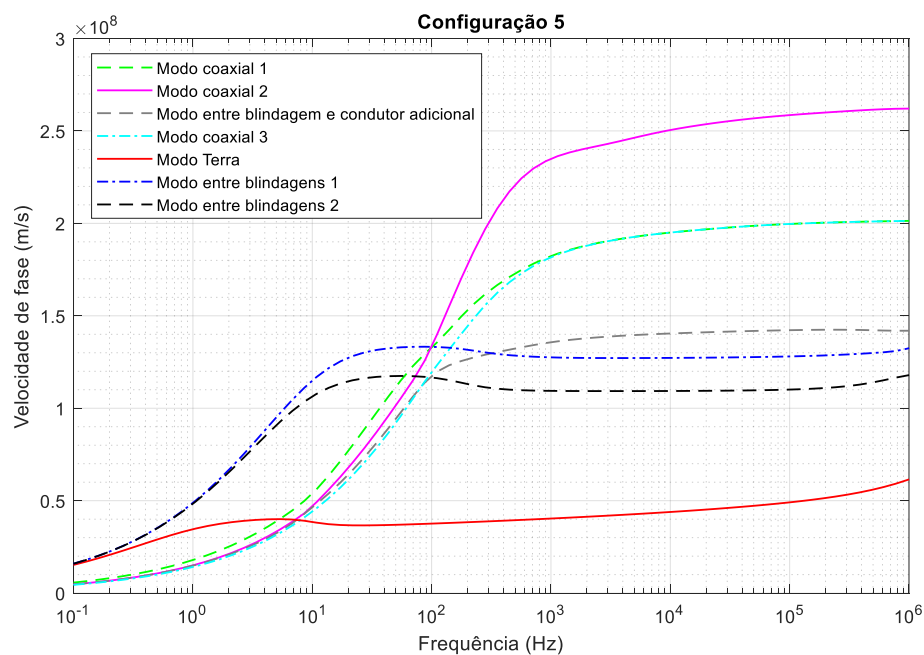


Figura 5.18 - Velocidade de fase em função da frequência para a configuração 5

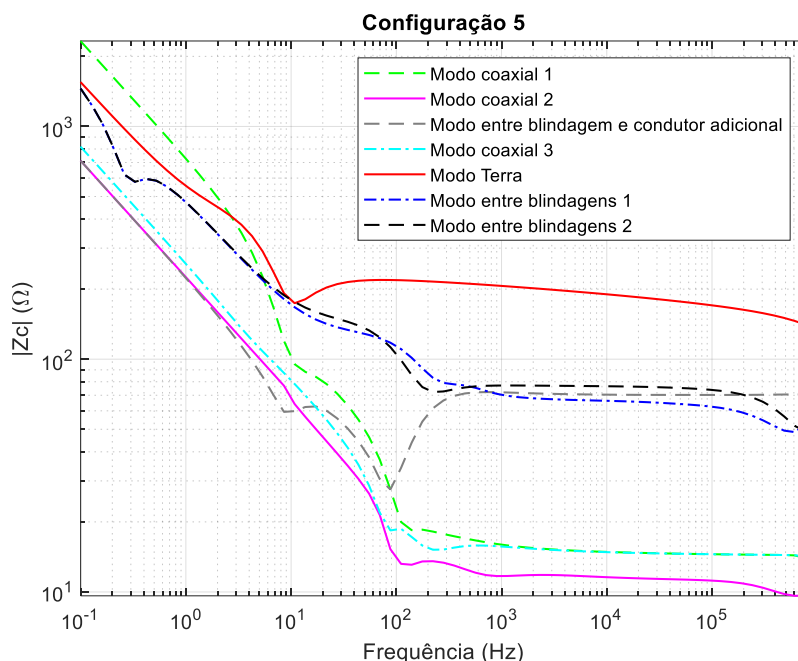


Figura 5.19 - Módulo da impedância característica em função da frequência para a configuração 5

Em resumo, para as cinco configurações analisadas, os modos de propagação possuem comportamento semelhante entre si. O modo terra possui a menor velocidade de fase e a maior atenuação em altas frequências para todas as configurações, seguido pelos modos entre blindagens. Os modos coaxiais são os mais rápidos, sendo que, nas configurações com condutor adicional dentro do tubo, o modo coaxial associado ao tubo que contém o cabo extra apresenta maior velocidade de propagação devido à presença do ar no interior do tubo. Nessas configurações, o sétimo modo entre o condutor de aterramento e blindagem possui velocidade intermediária entre os modos coaxiais e entre blindagens. As diferenças de cada configuração são analisadas com mais detalhe na Seção 5.4.2.

5.4.2 Análise por Modos de Propagação

Outra análise de grande relevância é a comparação do comportamento de cada modo entre as cinco configurações. As Figura 5.20 a Figura 5.22 mostram os parâmetros modais de interesse para os três modos coaxiais para as cinco configurações. Percebe-se que, para os três parâmetros de interesse, há poucas diferenças significativas no comportamento dos modos coaxiais de uma configuração para outra em altas frequências. No entanto, é válido destacar que o modo coaxial associado ao cabo que compartilha o tubo com o condutor adicional de aterramento nas configurações 4 e 5 possui uma

constante de atenuação maior que as demais em ambas as configurações. Além disso, devido à presença de ar entre os dois cabos dentro do tubo, as ondas de tensão e corrente viajam com uma velocidade de propagação maior, o que é refletido também em uma impedância característica menor, sendo que na configuração 5, onde não há cobertura isolante no cabo ECC, a velocidade é ainda maior. Na configuração 3, embora exista um sétimo condutor, todos os cabos se encontram enterrados. Portanto, o modo coaxial se sobressai em relação ao modo entre blindagem e condutor adicional.

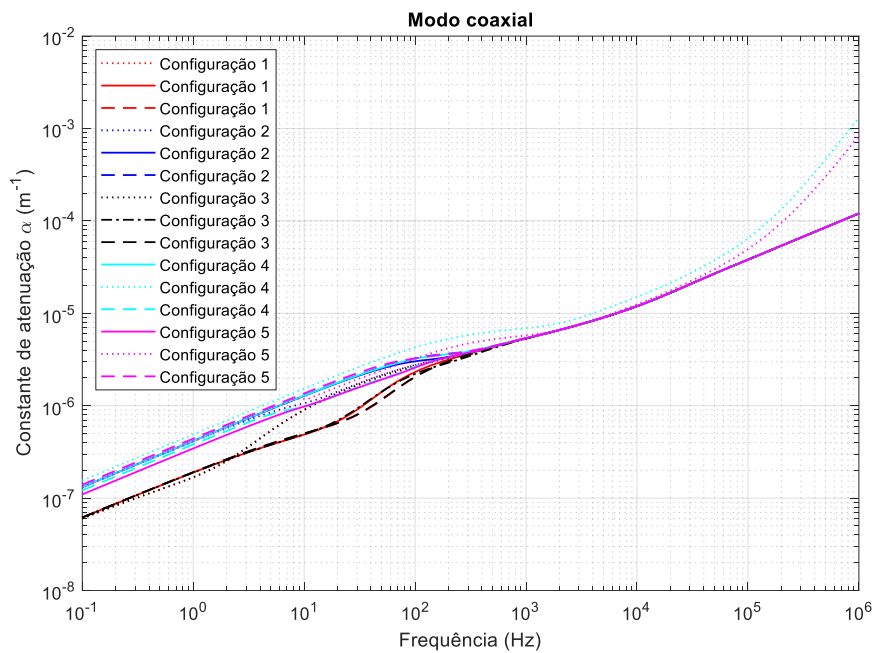


Figura 5.20 - Constante de atenuação para os modos coaxiais para as cinco configurações

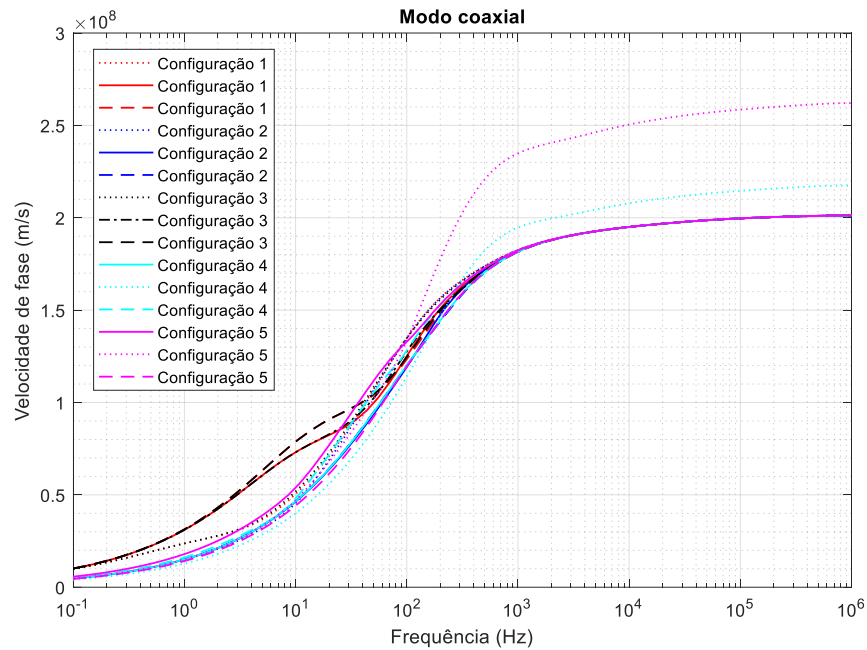


Figura 5.21 - Velocidade de fase para os modos coaxiais para as cinco configurações

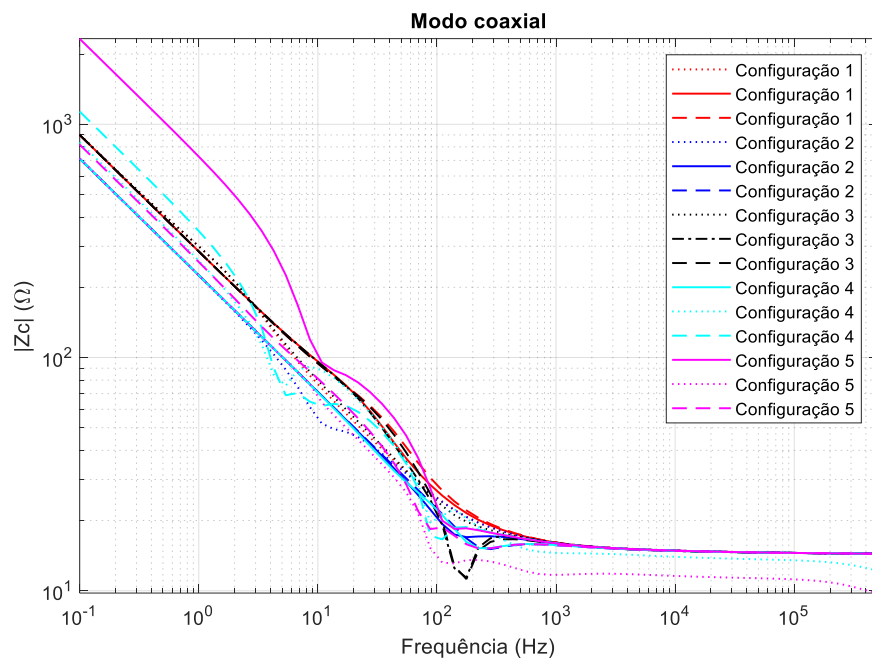


Figura 5.22 - Módulo da impedância característica para os modos coaxiais para as cinco configurações

O primeiro modo para o qual são observadas diferenças significativas entre as configurações é o modo entre blindagens. As Figura 5.23 a Figura 5.25 mostram os parâmetros modais de interesse para os dois modos entre blindagens para as cinco configurações. Os gráficos mostram que para as situações em que os cabos estão diretamente enterrados no solo (configurações 1 e 3), a constante de atenuação é maior

comparadas às configurações com cabos dentro de tubos (configurações 2, 4 e 5). Esse comportamento se deve à maior área ocupada pela isolamento por causa da presença de ar e do tubo propriamente dito, que também é composto por material isolante. Assim, as velocidades de propagação e as impedâncias características são maiores para os casos em que se utilizam cabos em repouso dentro de tubos. Ressalta-se que entre essas últimas configurações, a atenuação é menor na configuração 2, devido à ausência do condutor adicional. Por fim, é válido destacar que são observadas diferenças entre os dois modos entre blindagens a depender da configuração, sobretudo nas configurações 4 e 5. Esse comportamento ocorre devido à distribuição de correntes, de modo que quando a circulação ocorre por todas as blindagens, ou seja, a corrente circula por uma blindagem e retorna pelas outras duas, a velocidade de propagação é maior.

Esses resultados são de grande relevância para as aplicações reais de cabos nas quais é comum a circulação de corrente nas blindagens. No contexto de parques eólicos, por exemplo, utiliza-se o aterramento das blindagens em uma ou ambas as pontas entre geração e carga como forma de equipotencialização e via para sinalização de proteção. Nesses casos, entender a influência de diferentes configurações de cabos nas características de propagação resultantes é essencial.

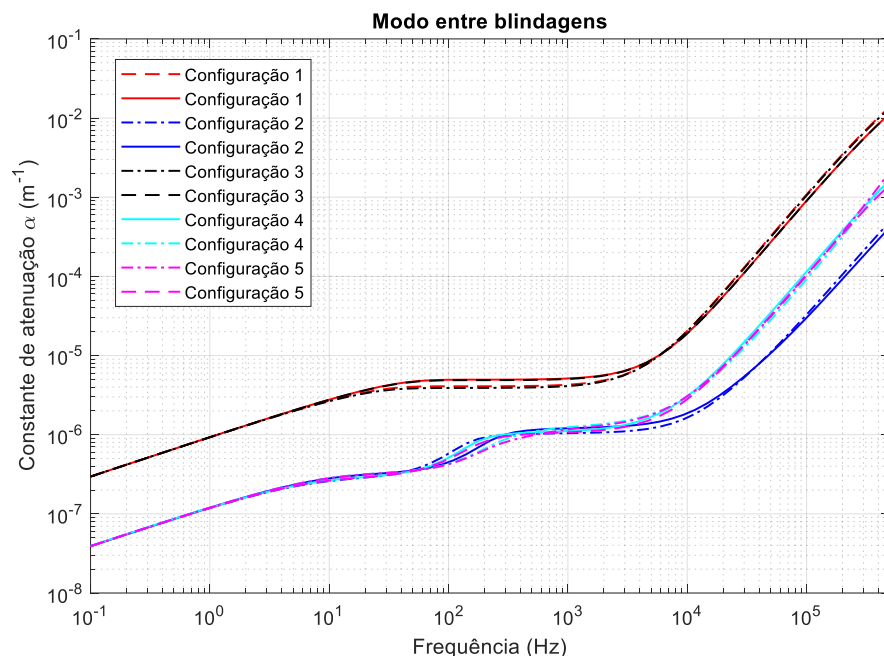


Figura 5.23 - Constante de atenuação para os modos entre blindagens para as cinco configurações

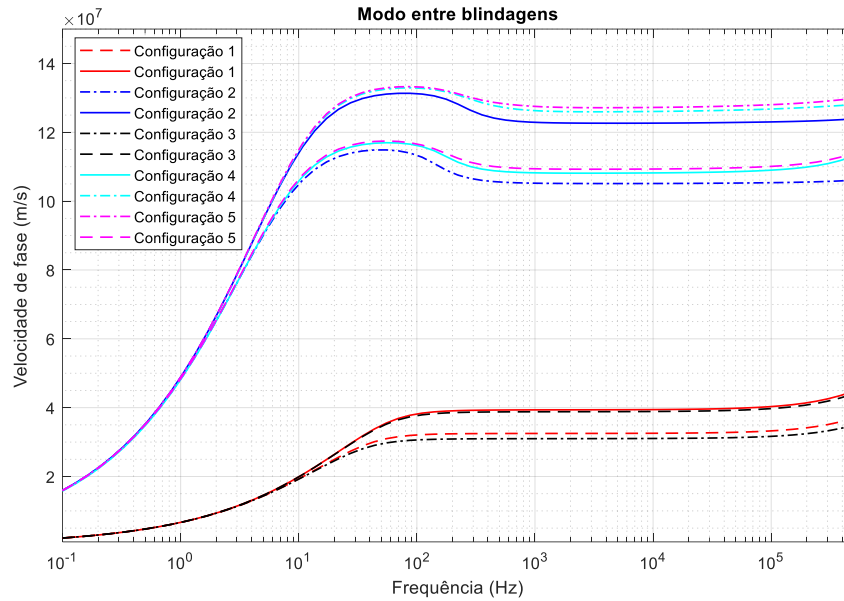


Figura 5.24 - Velocidade de fase para os modos entre blindagens para as cinco configurações

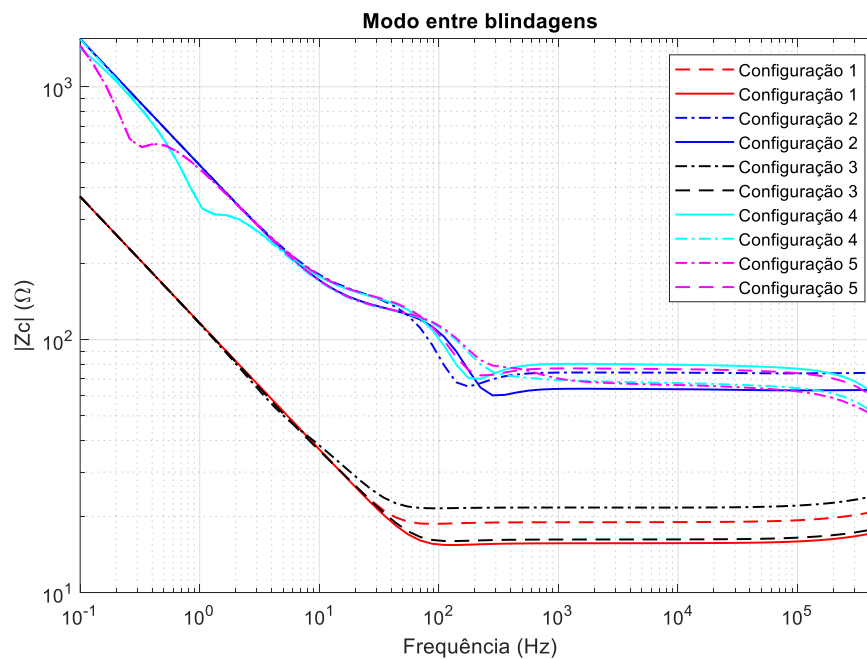


Figura 5.25 - Módulo da impedância característica para os modos entre blindagens para as cinco configurações

As Figura 5.26 a Figura 5.28 mostram os parâmetros modais de interesse do modo terra para as cinco configurações. Assim como para o modo entre blindagens, a diferença principal ocorre entre as configurações com cabos diretamente enterrados e as configurações com cabos em tubos. Percebe-se que a atenuação das ondas de tensão e corrente é maior nas configurações de cabos diretamente enterrados no solo. Isso se manifesta em uma menor velocidade de propagação. Tal comportamento novamente é

explicado pelas características da isolamento de cada configuração. Enquanto nas configurações 1 e 3 o isolamento é composto apenas pela cobertura isolante dos cabos, nas configurações 2, 4 e 5 o isolamento é constituído também pelas contribuições do ar e do tubo. Essa característica do isolamento é o motivo pelo qual a impedância característica para as configurações de cabos em tubos é maior do que para os cabos diretamente enterrados ao longo de todo o espectro de frequência. Diferenciados os dois grupos de configurações com características semelhantes, não há diferença de comportamento significativa entre as configurações do mesmo grupo.

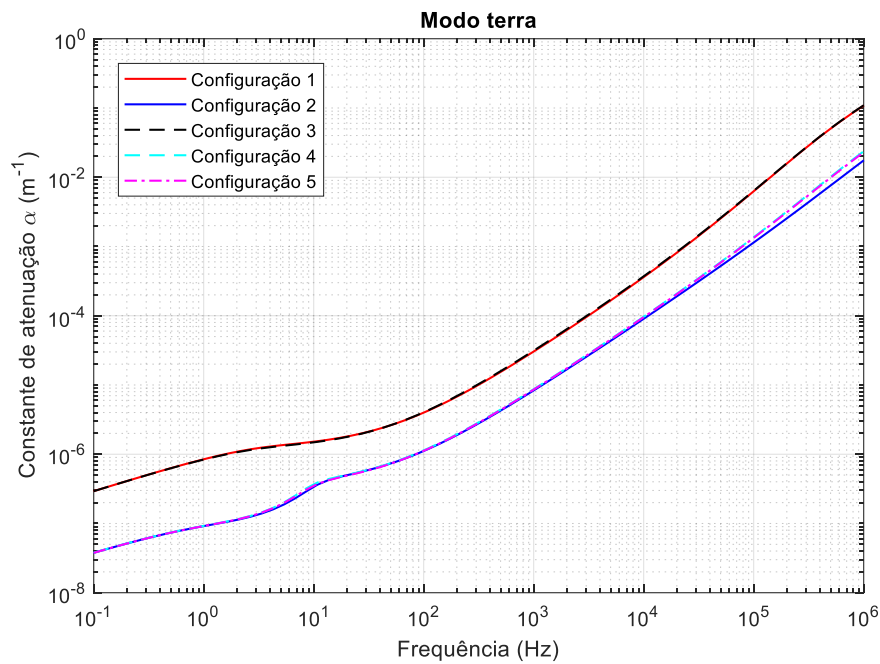


Figura 5.26 - Constante de atenuação para o modo terra para as cinco configurações

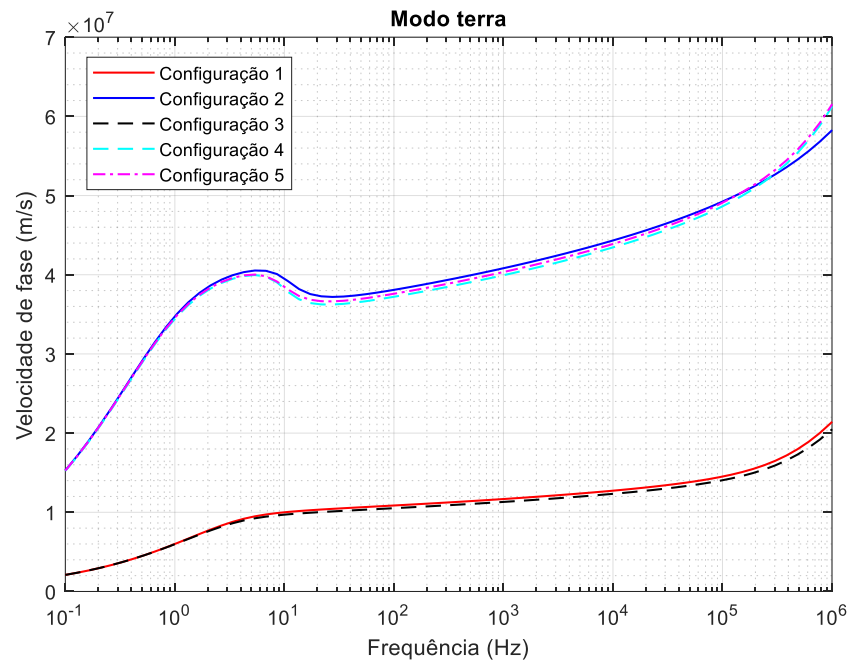


Figura 5.27 - Velocidade de fase para o modo terra para as cinco configurações

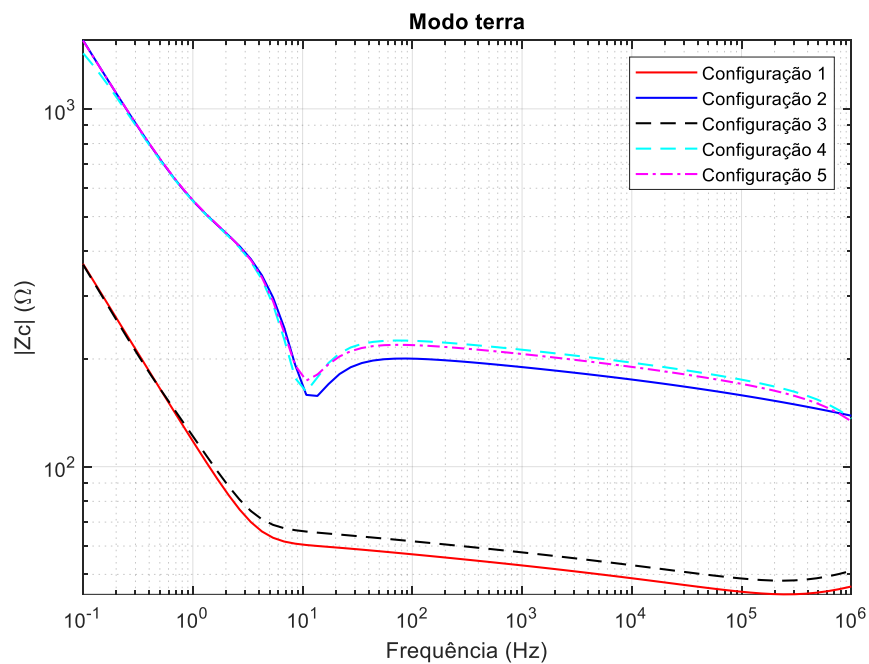


Figura 5.28 - Módulo da impedância característica para o modo terra para as cinco configurações

No que diz respeito ao modo entre blindagem e o condutor adicional, as Figura 5.29 a Figura 5.31 mostram os parâmetros modais de interesse para as configurações 3, 4 e 5. De maneira análoga aos outros três modos de propagação já analisados, a configuração 3 apresenta a maior atenuação e a menor velocidade de fase entre as três configurações, em virtude de os cabos estarem diretamente enterrados. A camada de

isolação extra das configurações 4 e 5, aliada à propriedade condutiva do solo, faz com que a impedância característica para os cabos em tubos seja maior em altas frequências, comparada à de cabos diretamente enterrados. É válido ressaltar ainda que, embora as impedâncias características sejam diferentes devido à ausência da camada isolante em um dos cabos ECC, as ondas se propagam com velocidades semelhantes tanto para a configuração em que o cabo adicional de aterramento é um condutor nu (configuração 5), quanto para a configuração em que esse cabo é isolado (configuração 4), visto que nesses casos as constantes de atenuação também são similares.

Entre as configurações 4 e 5, portanto, embora exista uma diferença em relação às impedâncias dos cabos, em termos do comportamento das características de propagação as ondas de tensão e corrente se comportam de forma similar. Portanto, podem ser consideradas as duas opções na escolha do cabo a ser utilizado em aplicações reais, por exemplo, para a interligação do aterramento entre aerogeradores e equipotencialização de parques eólicos.

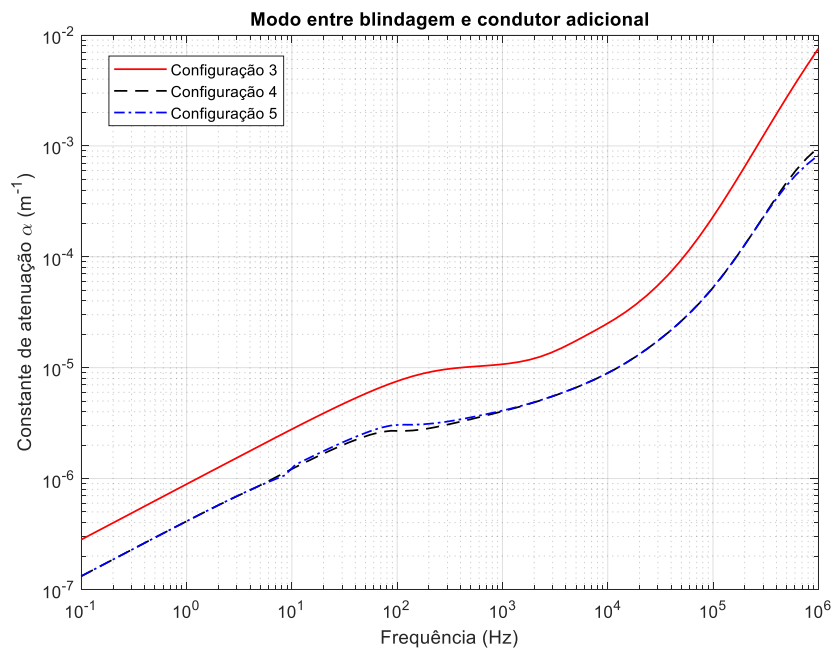


Figura 5.29 - Constante de atenuação para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5

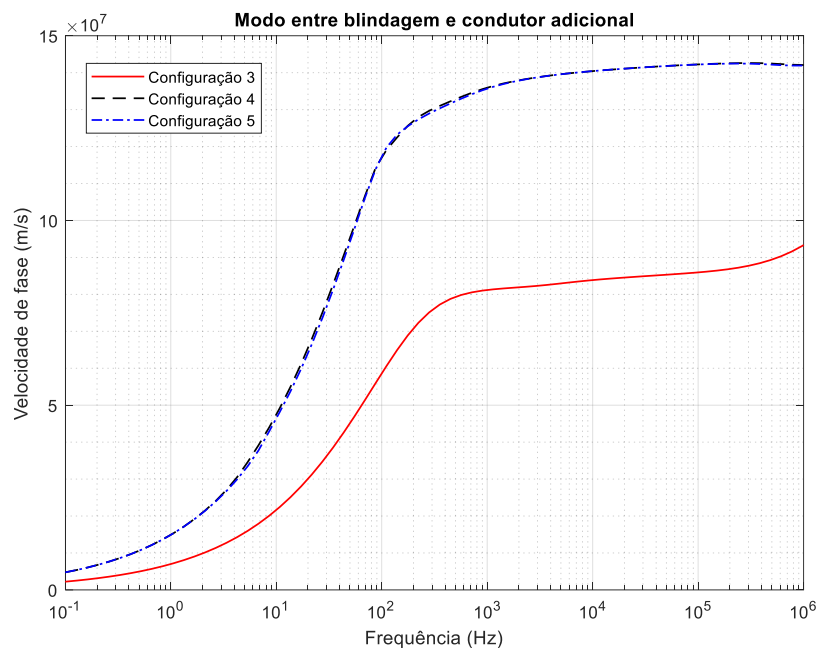


Figura 5.30 - Velocidade de fase para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5

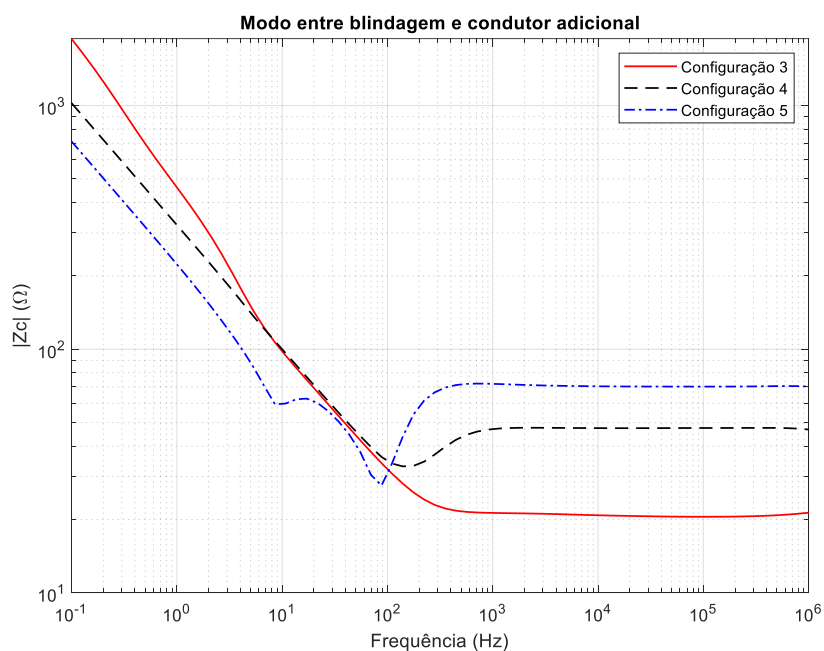


Figura 5.31 - Módulo da impedância característica para o modo entre blindagem e condutor adicional para as configurações 3, 4 e 5

De modo geral, a análise individualizada de cada modo de propagação indica que existe uma diferença de comportamento significativa entre cabos diretamente enterrados no solo (configurações 1 e 3) e cabos dentro de tubos de HDPE (configurações 2, 4 e 5). Percebe-se que devido à presença do ar e do tubo propriamente dito, as velocidades de

propagação são maiores e a atenuação é menor para essas configurações, independentemente de qual modo está sendo analisado.

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise do comportamento de cinco configurações de cabos diretamente enterrados e dentro de tubos, no que diz respeito às suas características de propagação. Uma vez que se trata de configurações com múltiplos condutores, foi apresentada metodologia para a realização de uma transformação modal, dando origem a modos monofásicos, desacoplados entre si. Além disso, foram analisadas as diferenças características de cada modo, bem como a variação do comportamento dos parâmetros modais ao longo da frequência de uma configuração para outra.

6 Análise de Transitórios Eletromagnéticos

6.1 Considerações Iniciais

Uma vez analisadas as diferenças das características de propagação para cada configuração de cabos apresentada no Capítulo 5, propõe-se um estudo fundamental de transitórios aplicados a estas configurações. Nesse sentido, foram simuladas três situações distintas: a primeira é através da excitação do núcleo dos cabos, a segunda é através da excitação das blindagens, e, por fim, pela excitação do condutor de aterramento nas situações em que forem aplicáveis. Além disso, foi simulada também uma situação representativa de uma aplicação real de cabos no contexto de parques eólicos.

Para esse estudo, novamente foi considerada a variação da resistividade e da permissividade elétrica relativa do solo com a frequência, com resistividade de baixa frequência de $100 \Omega\text{m}$. Para a impedância e admitância de retorno pelo solo foram consideradas as expressões desenvolvidas por (De Conti; Duarte; Alipio, 2023). Todas as configurações de cabos foram simuladas com uma extensão de 100 m. Isso foi feito para ressaltar o comportamento em altas frequências das configurações analisadas, e para se considerar uma situação representativa da distância entre duas turbinas em um parque eólico.

Além disso, a resposta transitória de cada configuração foi obtida através da modelagem de cabos subterrâneos com base na teoria de linhas de transmissão, utilizando-se para isso a transformada numérica de Laplace (NLT) (Moreno; Ramirez, 2008).

6.2 Resposta Transitória por Excitação dos Núcleos dos Cabos

A fim de avaliar a resposta transitória das configurações de cabos a partir da excitação dos núcleos, foram utilizados os circuitos mostrados na Figura 6.1 e na Figura 6.2, que correspondem às cinco configurações de cabos em três situações distintas: com

as blindagens em circuito aberto em ambas as terminações, as blindagens aterradas (e o condutor adicional quando aplicável) do lado da fonte e as blindagens aterradas (e o condutor adicional) em ambas as terminações da linha. Os terminais emissor e receptor do núcleo foram mantidos em circuito aberto. Em todos os casos a fase A foi energizada com um degrau de tensão de 1 p.u. e as tensões no terminal receptor do núcleo e da blindagem dessa mesma fase foram avaliadas. Ressalta-se que as simulações onde as blindagens e o cabo ECC são mantidos em circuito aberto não possuem aplicação prática quando se considera o contexto de parques eólicos. Contudo, para efeito de comparação com os demais casos, as tensões no núcleo e blindagem dos cabos para essa situação também foram calculadas. A resistência R_s da fonte de tensão possui $10\ \Omega$ e a resistência de aterramento R_G possui $50\ \Omega$ em todas as situações.

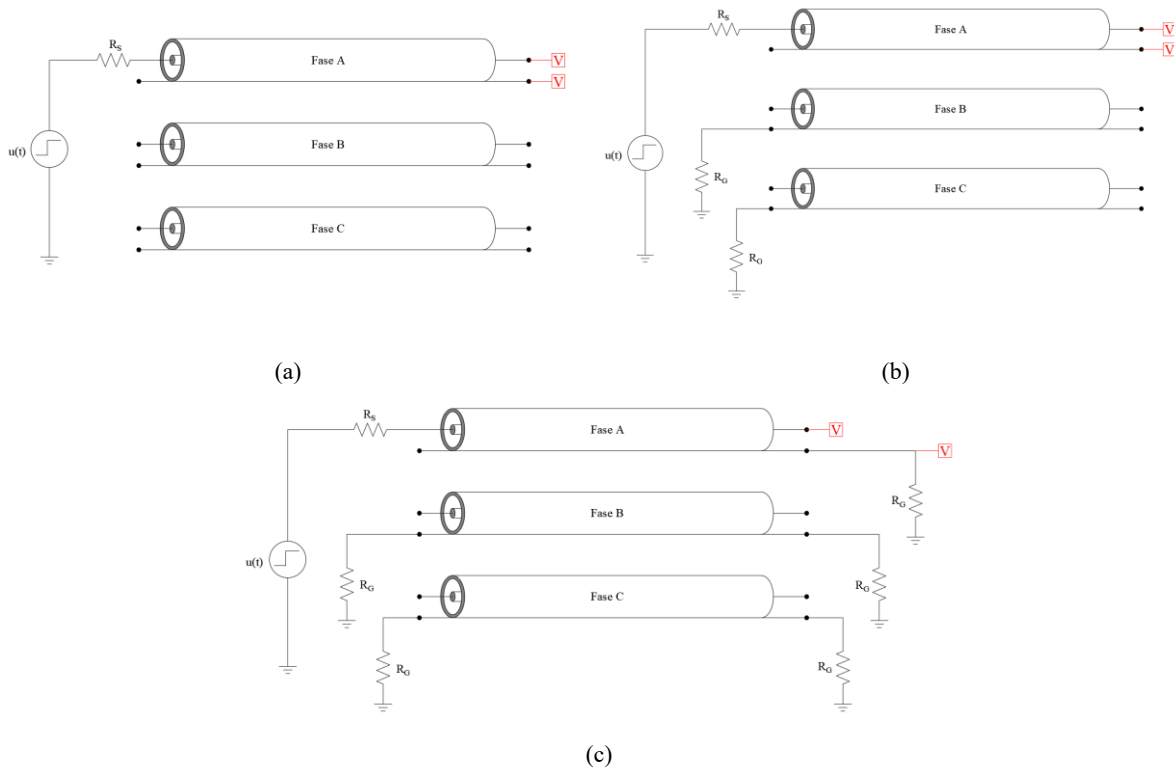


Figura 6.1 - Esquema para simulação de transientes por excitação dos núcleos das Configurações 1 e 3: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga

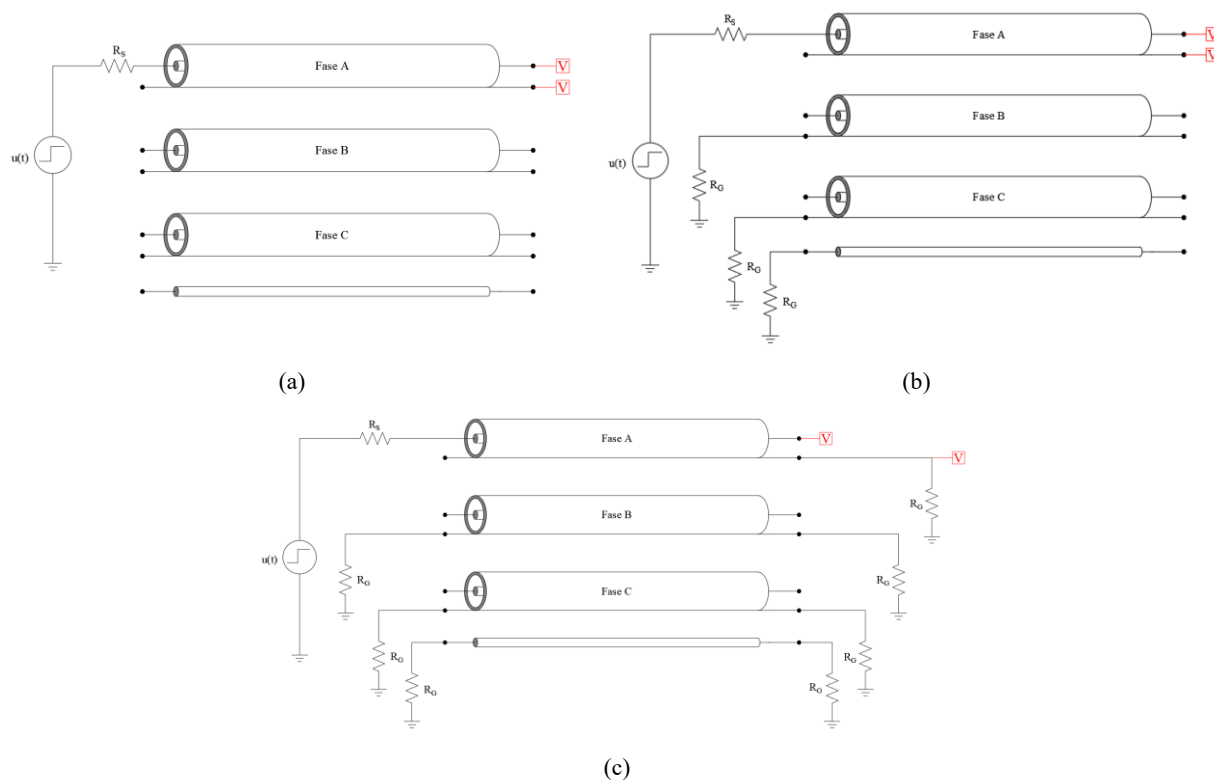


Figura 6.2 - Esquema para simulação de transientes por excitação dos núcleos das Configurações 2, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga

A Figura 6.3 e a Figura 6.4 mostram as tensões observadas no terminal receptor da fase A para a situação com todas as terminações em circuito aberto.

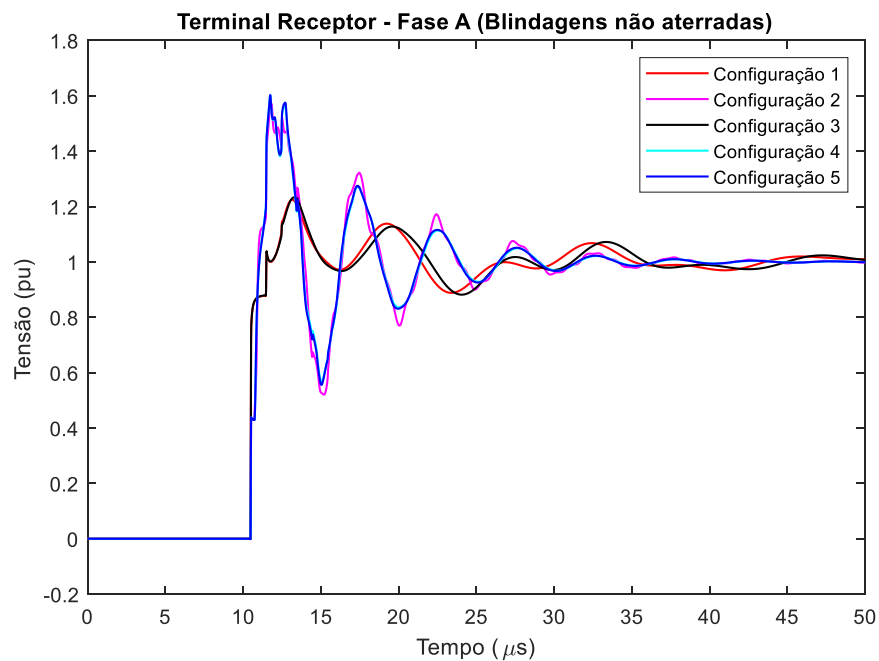


Figura 6.3 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto

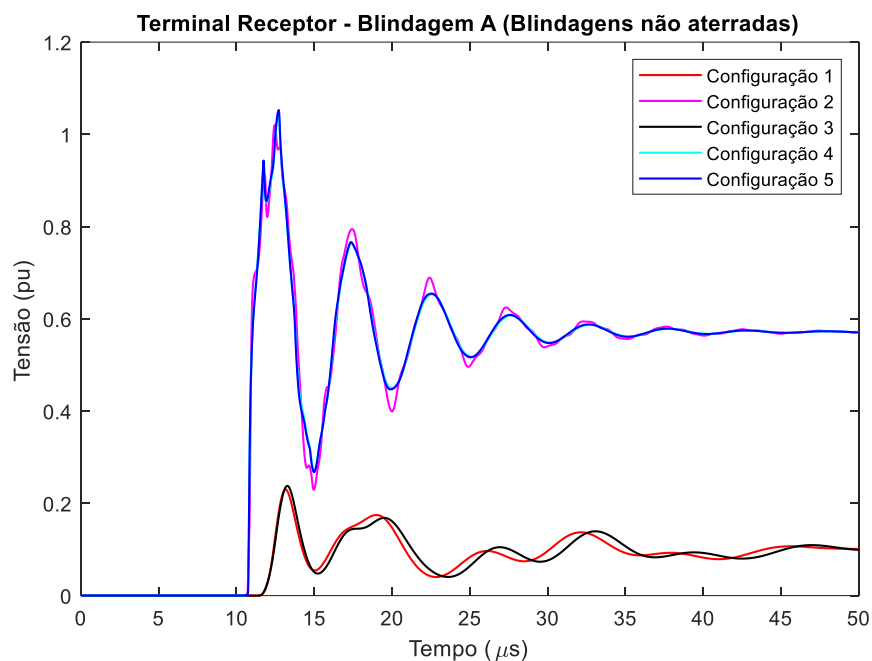


Figura 6.4 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto

A Figura 6.5 e a Figura 6.6 mostram as tensões observadas no terminal receptor da fase A para a situação com as blindagens e o condutor adicional aterrados no lado da fonte.

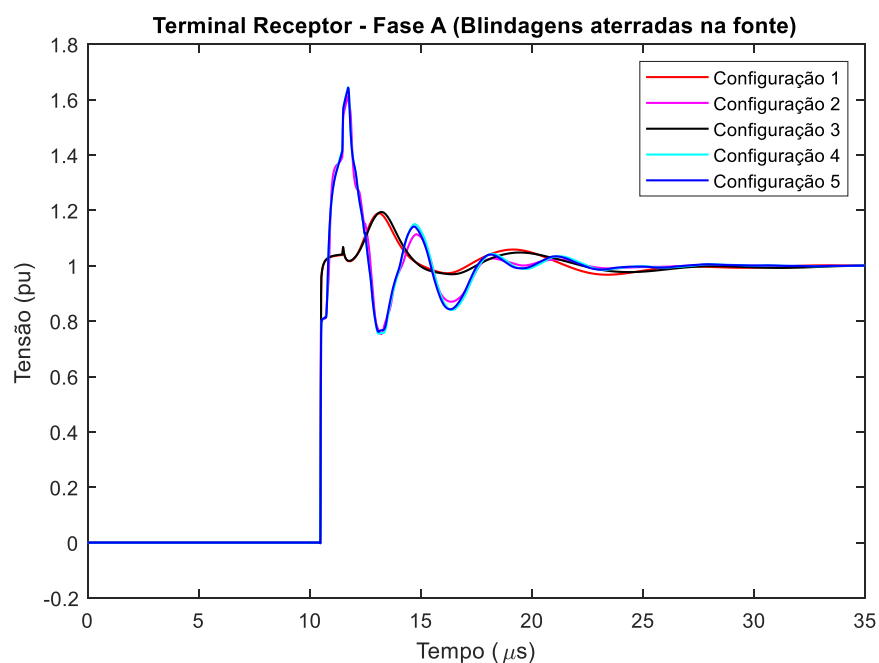


Figura 6.5 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte

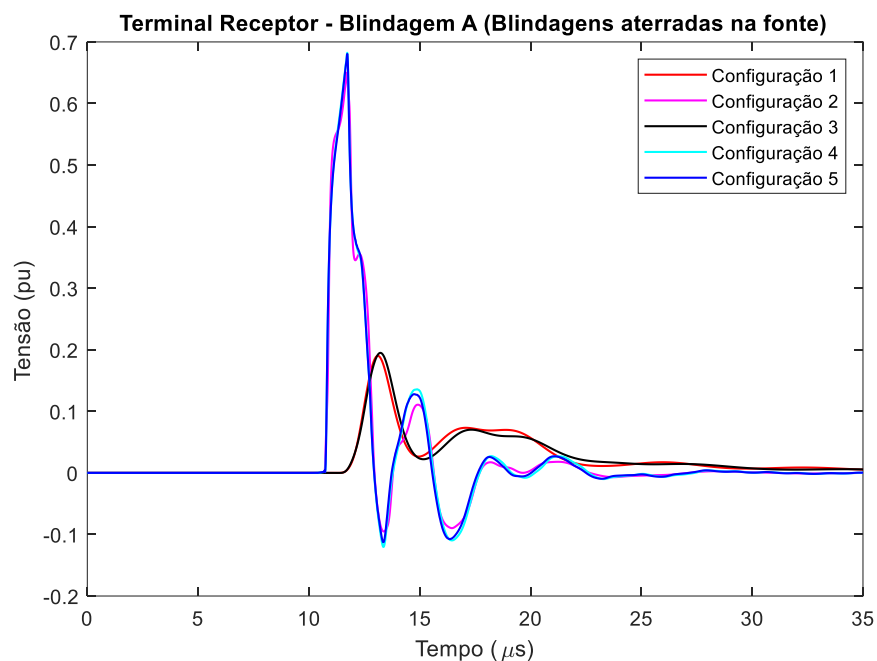


Figura 6.6 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte

As Figura 6.7 e Figura 6.8 mostram as tensões observadas no terminal receptor da fase A para a situação com as blindagens e o condutor adicional aterrados no lado da fonte e no lado da carga.

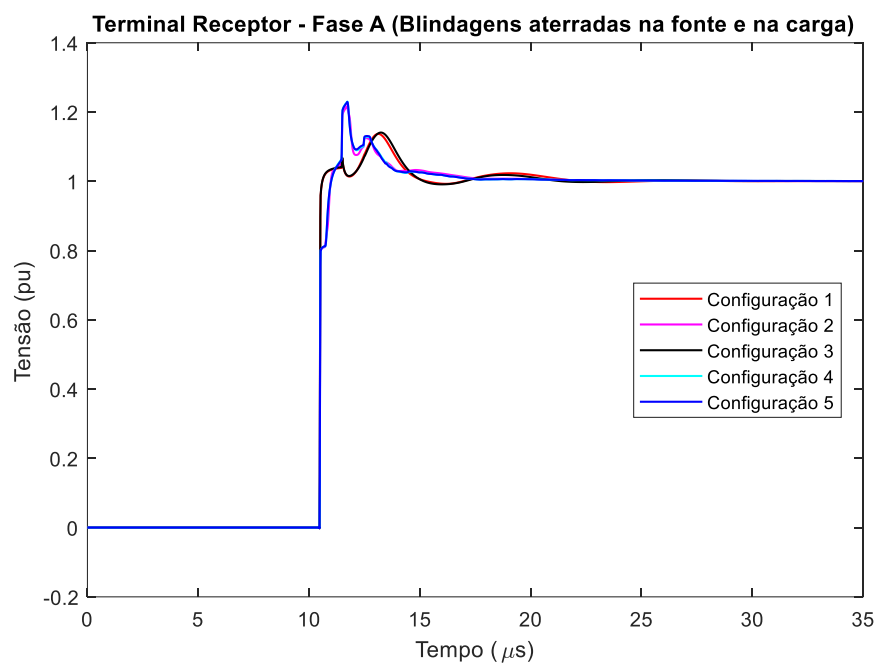


Figura 6.7 - Tensão no núcleo no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga

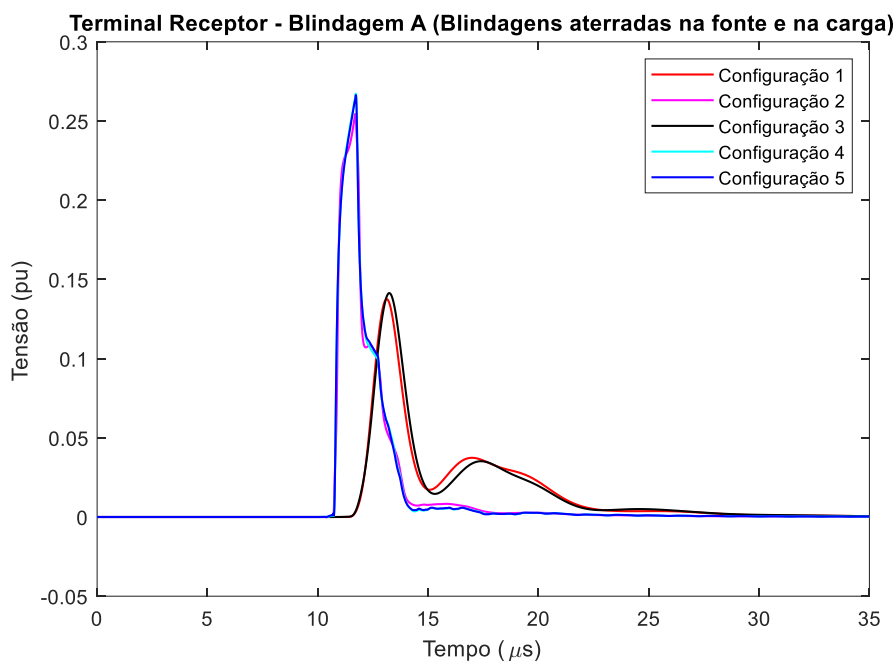


Figura 6.8 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga

Os gráficos das Figura 6.3 a Figura 6.8 mostram que, independentemente das condições terminais às quais as blindagens estão submetidas, o pico de tensão observado durante a fase transitória sempre é maior nas configurações 2, 4 e 5, ou seja, nas configurações em que os cabos se encontram dentro de tubos de HDPE. Esse comportamento ocorre tanto no núcleo quanto na blindagem da fase excitada. Além disso, percebe-se que, durante a excitação da fase A, a presença do condutor adicional não tem grande influência na magnitude das sobretensões, uma vez que as configurações de seis condutores possuem magnitudes de tensão semelhantes entre si, de forma semelhante ao que ocorre para as configurações de sete condutores. Essa constatação é uma evidência da menor atenuação das ondas de tensão e correntes observada nas configurações de cabos em tubos, sobretudo nos modos de propagação entre blindagens e no modo terra. Assim, a presença de uma camada de isolamento maior composta pelo ar e pelo próprio tubo nessas configurações é o fator principal no que diz respeito à magnitude das sobretensões.

É válido ressaltar também que na situação em que as blindagens são mantidas em circuito aberto nas duas terminações, as maiores sobretensões são observadas, com um pico máximo de 1,6 p.u. no núcleo da fase A e 1,1 p.u. na respectiva blindagem, ambas para a configuração 5. Nessa situação, observa-se que as blindagens apresentam um certo nível de tensão em regime permanente, de aproximadamente 0,6 p.u. para as

configurações 2, 4 e 5 e de 0,1 p.u. para as configurações 1 e 3. Além disso, o aterramento da blindagem, em um ou nos dois terminais, de modo geral, reduz a magnitude das sobretensões, sendo mais sensível nas blindagens comparada à tensão no núcleo. Para as três condições terminais, os picos de tensão na blindagem da fase A são, respectivamente, 1,1 p.u., 0,7 p.u. e 0,25 p.u., todos os valores observados na configuração 5. Com as blindagens aterradas, nenhuma tensão é verificada em regime permanente.

6.3 Resposta Transitória por Excitação das Blindagens dos

Cabos

Para excitação das blindagens foram utilizados os circuitos mostrados nas Figura 6.9 e Figura 6.10, que correspondem às cinco configurações nas mesmas três condições de contorno do Item 6.2. A blindagem da fase A foi excitada com um degrau de tensão unitário e a tensão na blindagem do terminal receptor dessa mesma fase foi avaliada.

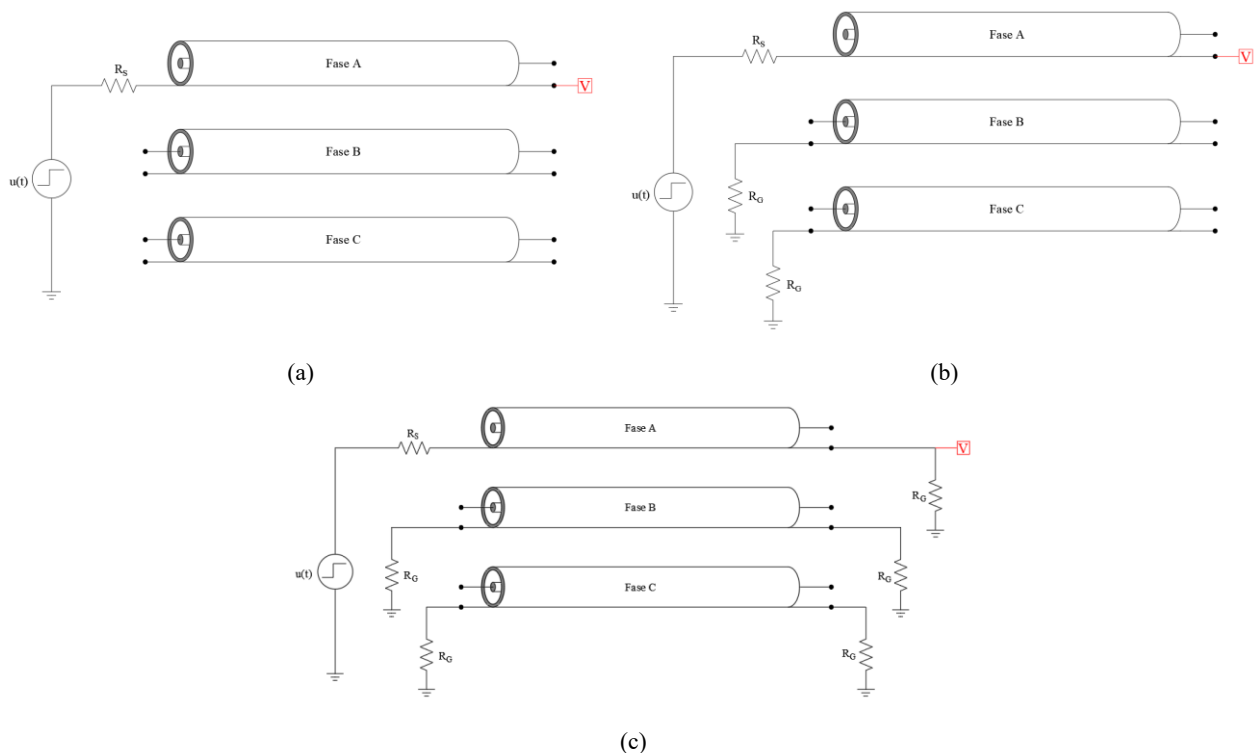


Figura 6.9 - Esquema para simulação de transitórios por excitação das blindagens das Configurações 1 e 3: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga

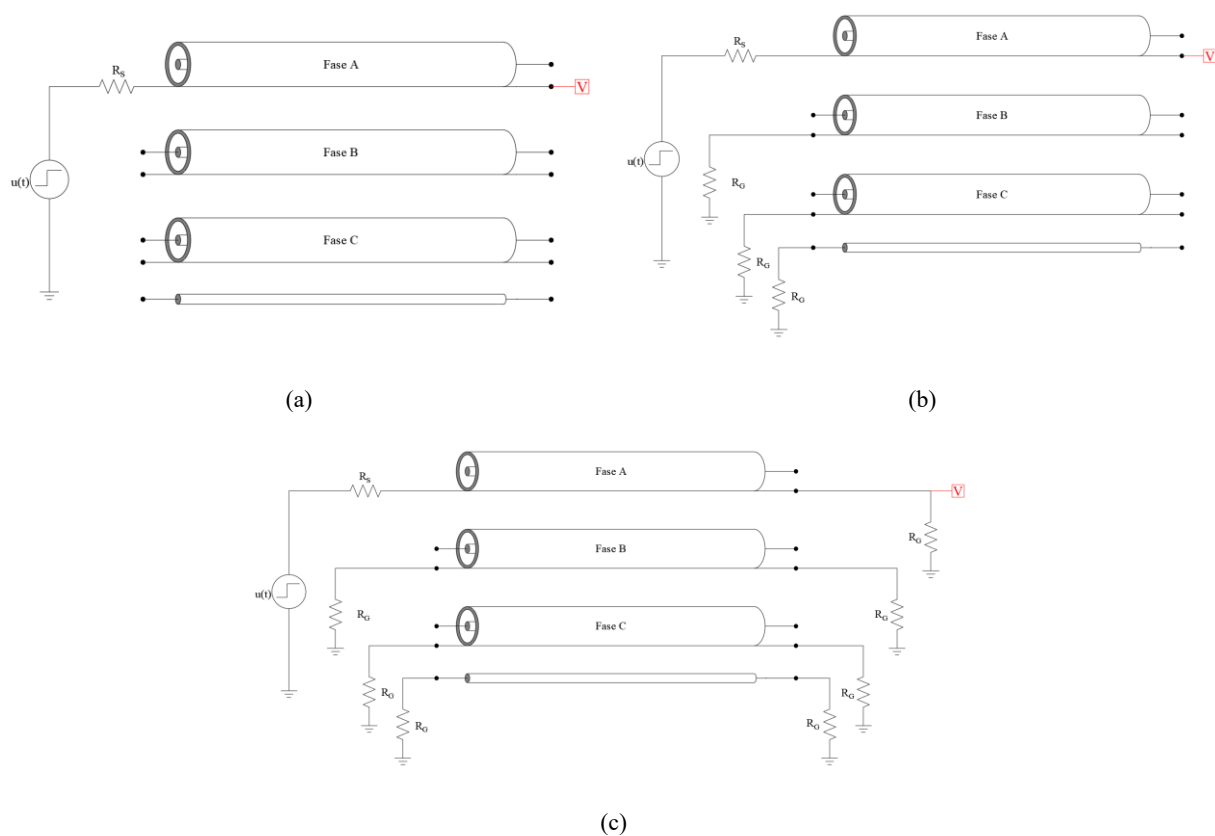


Figura 6.10 - Esquema para simulação de transitórios por excitação das blindagens das Configurações 2, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga

A Figura 6.11, a Figura 6.12 e a Figura 6.13 mostram as tensões observadas no terminal receptor da blindagem da fase excitada com as terminações em circuito aberto, com todas as blindagens aterradas no lado da fonte e com todas as blindagens aterradas na fonte e na carga.

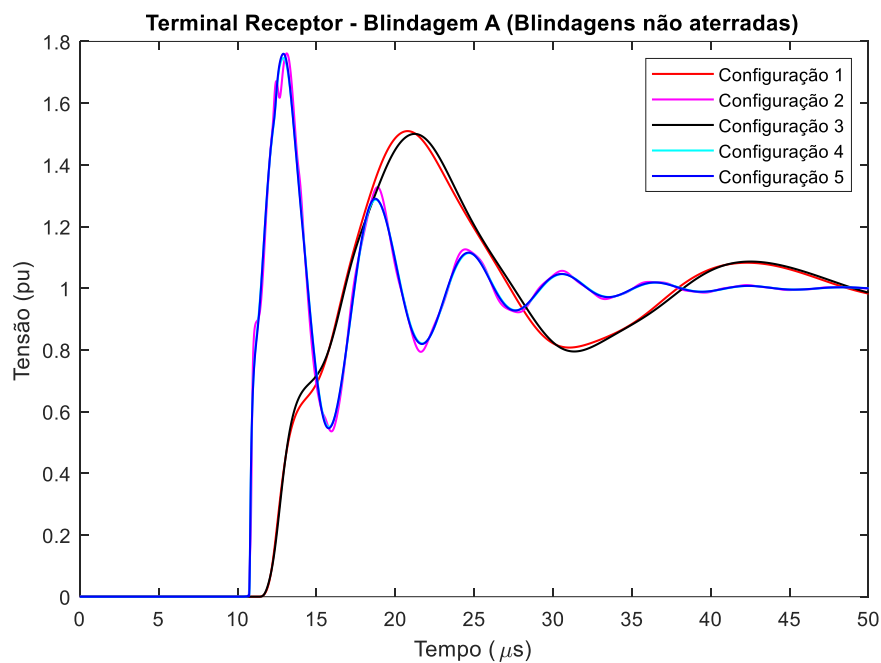


Figura 6.11 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens em circuito aberto

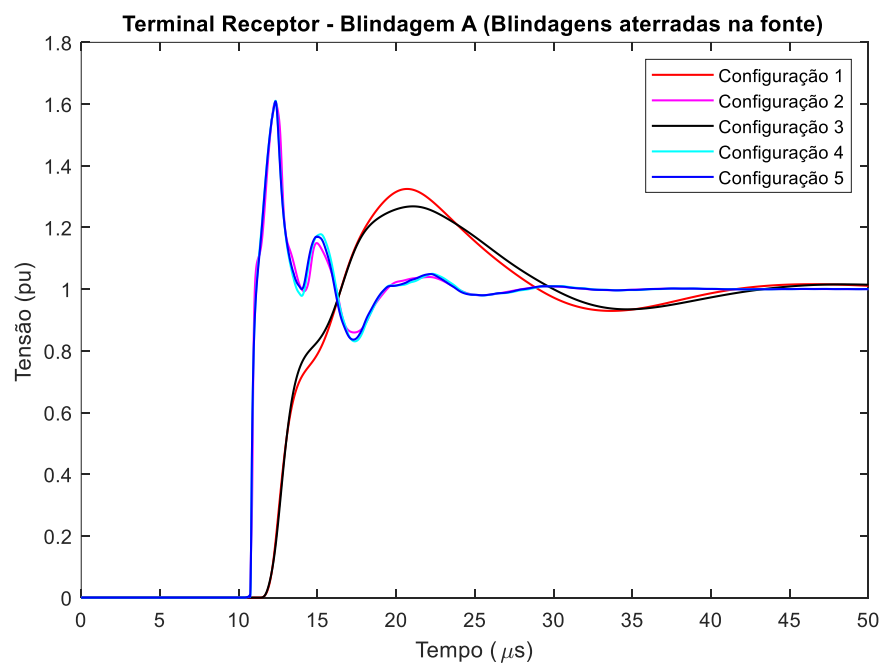


Figura 6.12 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte

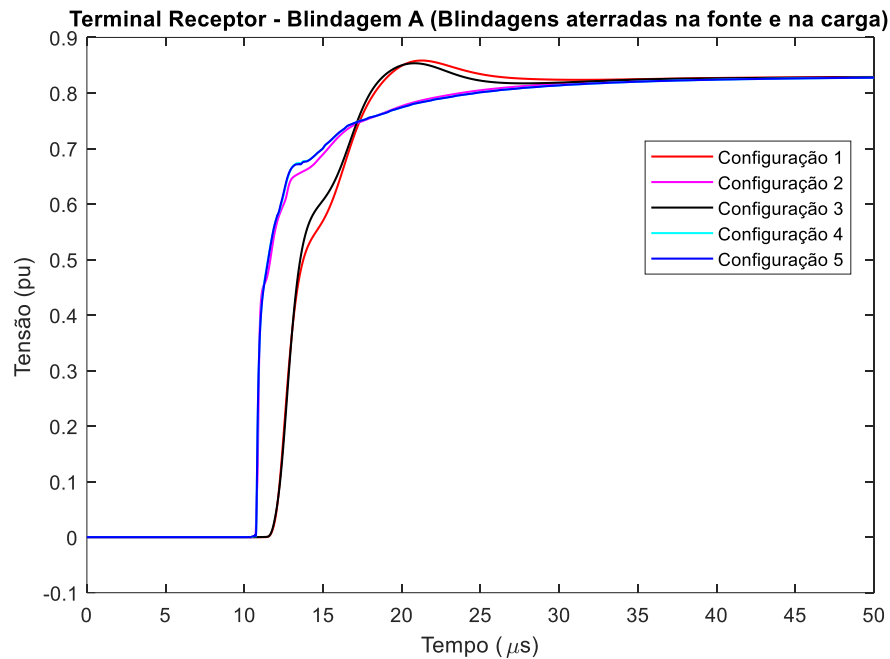


Figura 6.13 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase A para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga

Percebe-se novamente que as maiores sobretensões são verificadas para as configurações com cabos dentro de tubos, embora a diferença em relação às configurações de cabos diretamente enterrados é menor comparado à excitação do núcleo avaliada no Item 6.2. Além disso, o comportamento das configurações 1 e 3 é semelhante entre si em termos de pico de tensão, o mesmo ocorrendo com as configurações 2, 4 e 5. Outra característica relevante é a redução das sobretensões observada ao se aterrar as blindagens. Com as terminações abertas, o maior pico de tensão é verificado na configuração 5 com 1,8 p.u. aproximadamente, enquanto com as blindagens aterradas no lado da fonte, a magnitude máxima observada é de 1,6 p.u. para a mesma configuração. No entanto, observa-se que ao se aterrar as duas extremidades, as sobretensões observadas são mínimas, sendo inclusive ligeiramente maiores para as configurações 1 e 3. Nessa situação, o modo predominante é claramente o modo terra, visto que a atenuação das ondas de tensão é acentuada, o que leva rapidamente o circuito ao regime permanente.

6.4 Resposta Transitória por Excitação do Condutor Adicional de Aterramento

Para a excitação do condutor adicional, foram utilizados os circuitos mostrados na Figura 6.14 para as configurações 3, 4 e 5 nas três condições de contorno analisadas. O cabo de aterramento foi excitado com um degrau de tensão unitário e a tensão no seu terminal receptor foi avaliada, assim como a blindagem da fase C, a qual é a fase mais próxima ao cabo.

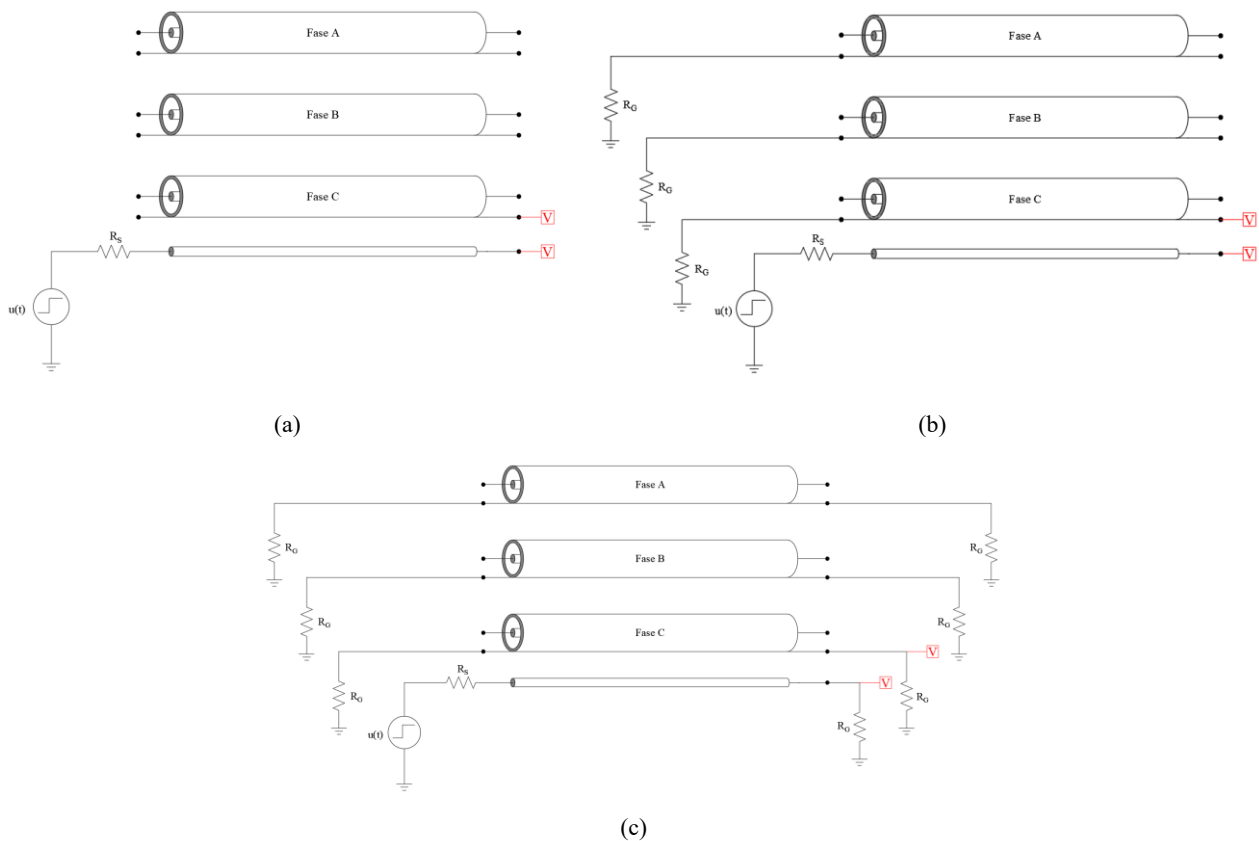


Figura 6.14 - Esquema para simulação de transientes por excitação do condutor adicional das Configurações 3, 4 e 5: (a) blindagens não aterradas, (b) blindagens aterradas na fonte e (c) blindagens aterradas na fonte e na carga

As Figura 6.15 e Figura 6.16 mostram as tensões observadas no terminal receptor do condutor adicional e da blindagem da fase C para a situação com todas as terminações em circuito aberto.

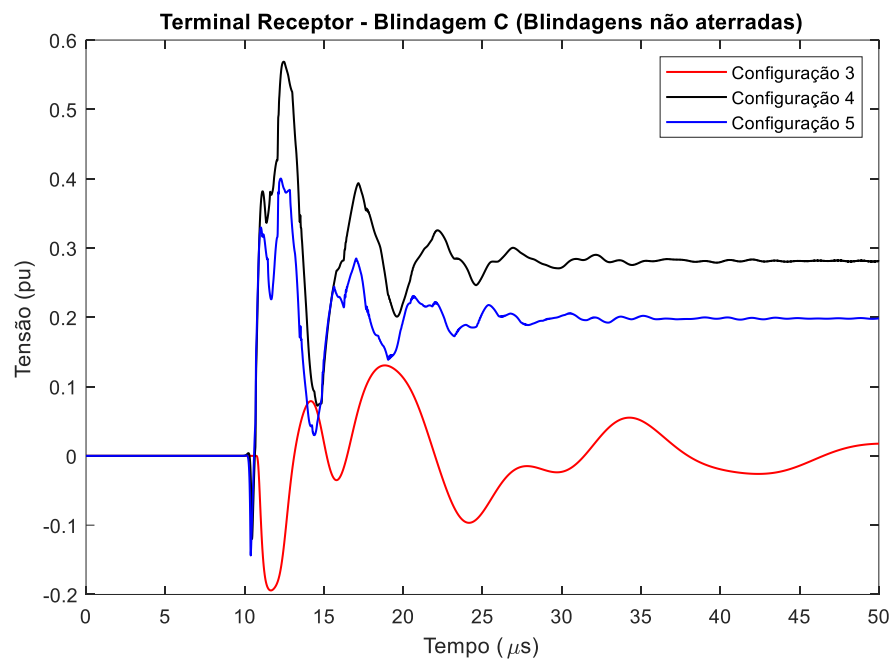


Figura 6.15 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens em circuito aberto

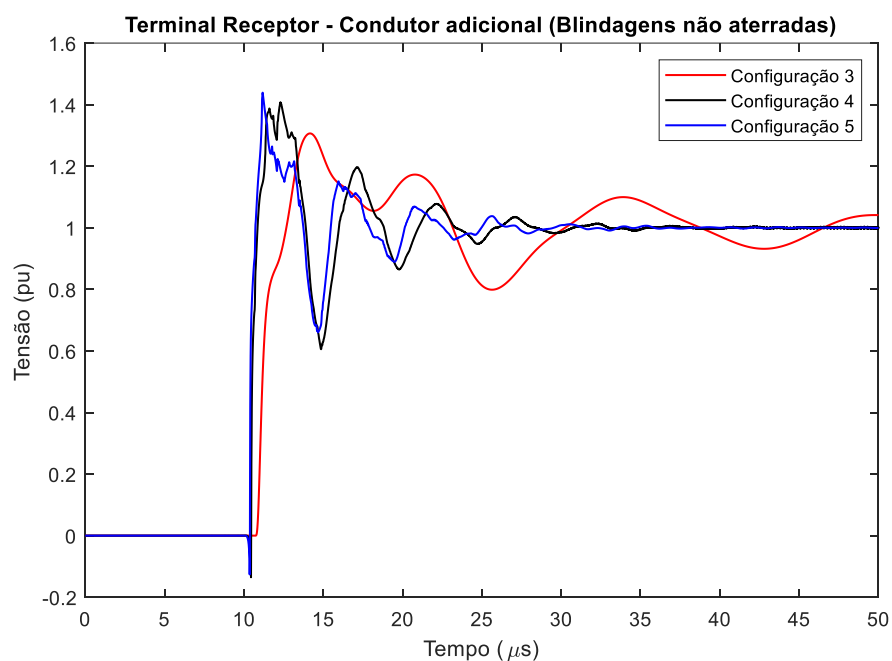


Figura 6.16 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor para a simulação das blindagens em circuito aberto

As Figura 6.17 e Figura 6.18 mostram as tensões observadas no terminal receptor do condutor adicional e da blindagem da fase C para a situação com as blindagens e o sétimo condutor aterrados no lado da fonte.

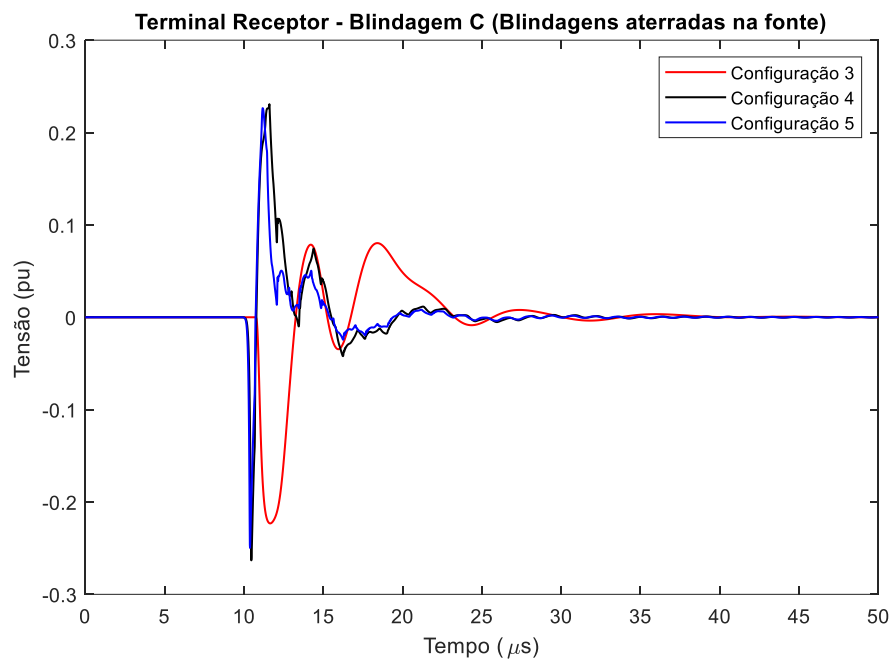


Figura 6.17 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte

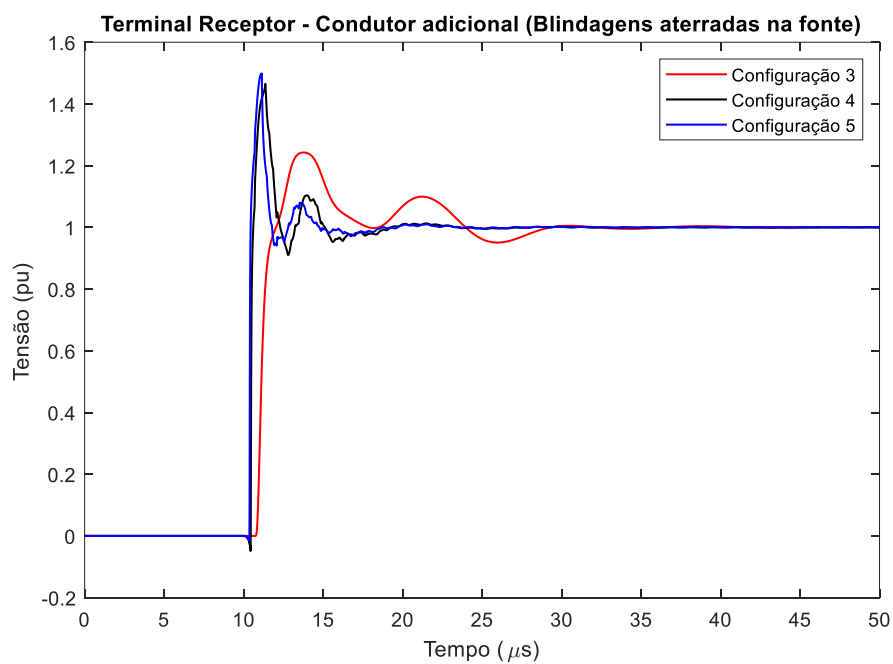


Figura 6.18 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte

As Figura 6.19 e Figura 6.20 mostram as tensões observadas no terminal receptor do condutor adicional e da blindagem da fase C para a situação com as blindagens e o sétimo condutor aterrados no lado da fonte e no lado da carga.

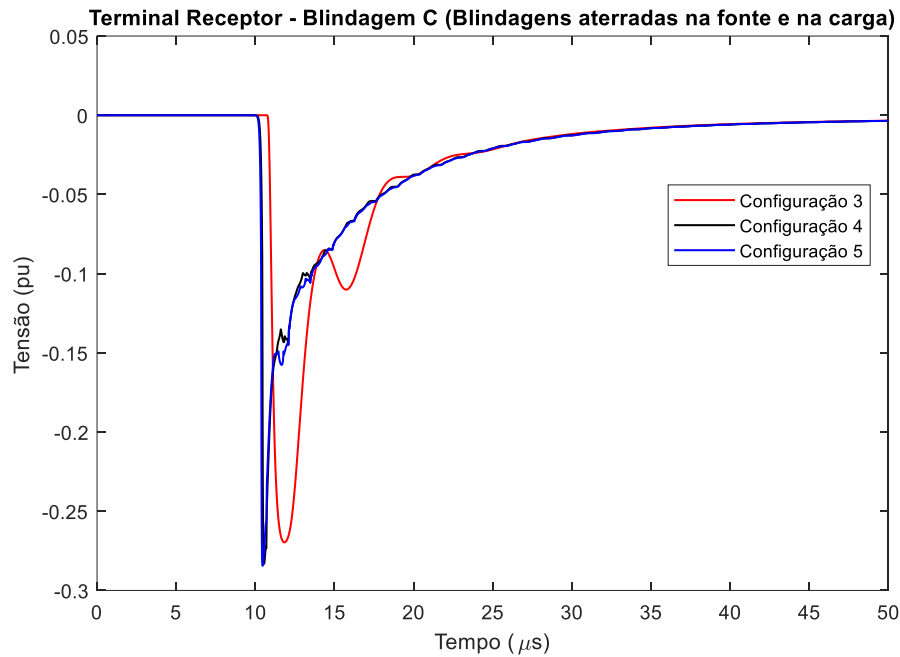


Figura 6.19 - Tensão na blindagem no terminal receptor da fase C para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga

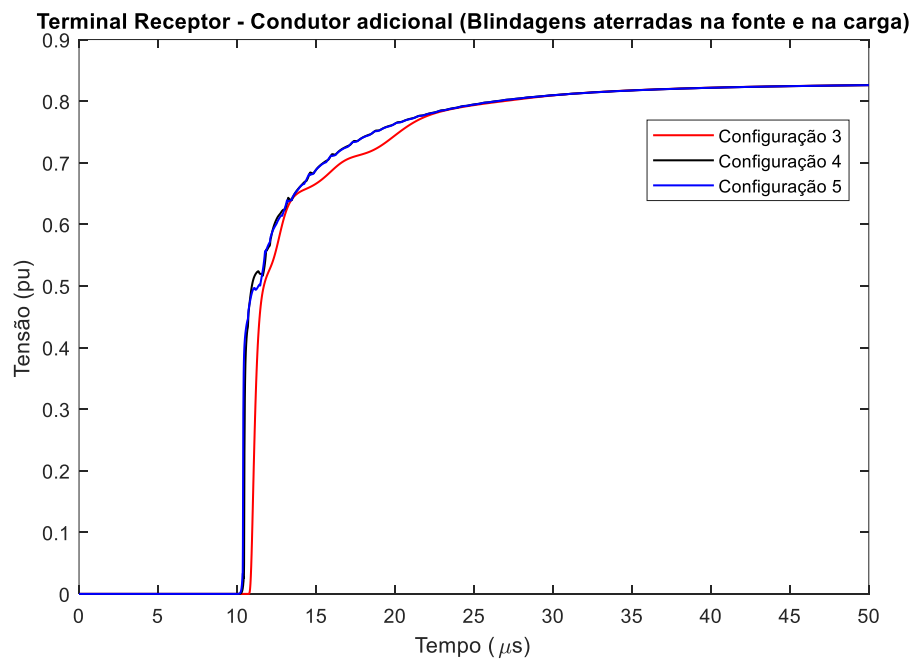


Figura 6.20 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor para a simulação das blindagens aterradas do lado da fonte e da carga

Os gráficos das Figura 6.15 a Figura 6.20 mostram que as configurações 4 e 5 apresentam maiores sobretensões comparadas à configuração 3, devido à maior camada isolante observada nessas configurações e, conseqüentemente, à menor constante de atenuação. Esse comportamento é observado tanto na tensão na blindagem da fase C

quanto no condutor adicional. Para todas as terminações em circuito aberto, as sobretensões observadas entre as configurações 4 e 5 são similares no condutor adicional, porém maiores para a configuração 4 na blindagem da fase C. A diferença entre as duas configurações de cabos no tubo não é observada, entretanto, quando é feito o aterramento das demais blindagens em uma ou nas duas extremidades.

Além disso, destaca-se que com ambas as terminações aterradas, a tensão na blindagem da fase C torna-se notadamente negativa durante a fase transitória para as três configurações de sete condutores, em virtude das reflexões negativas das ondas de tensão geradas pelas terminações aterradas. Nessa situação, o condutor adicional rapidamente entra em regime permanente, o que é um indicativo da presença predominante na propagação no modo terra.

6.5 Aplicação Real

Com o intuito de avaliar um caso real no contexto de um parque eólico, o circuito da Figura 6.21 foi simulado. Nesse caso, as três blindagens foram energizadas simultaneamente com um degrau de tensão unitário, enquanto o cabo ECC foi aterrado nas duas terminações. Essa situação é a aplicação mais comum nas configurações que utilizam esse cabo adicional, visto que sua função principal é garantir a continuidade do aterramento ao longo de todo o parque. A excitação das blindagens pode representar a ocorrência de um evento de origem atmosférica, como a incidência de uma descarga em um aerogerador onde ocorre a transferência de corrente para as blindagens dos cabos de média tensão. Para efeito de comparação, as blindagens na terminação oposta da linha foram avaliadas em circuito aberto e aterradas.

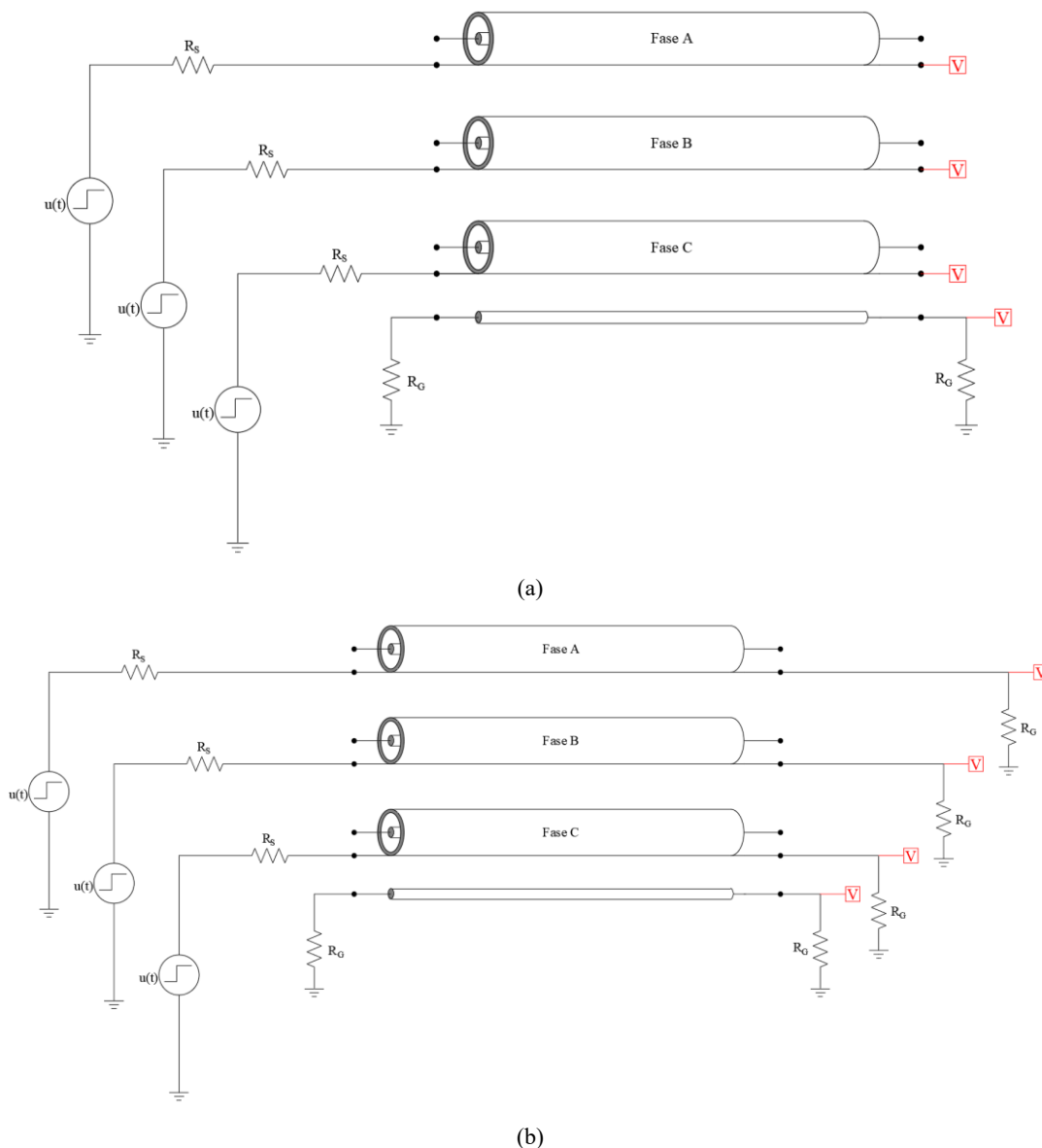


Figura 6.21 - Esquema para simulação de transitórios de uma aplicação real das Configurações 3, 4 e 5: (a) blindagens abertas na carga e (b) blindagens aterradas na carga

A Figura 6.22 mostra as tensões nas blindagens das três fases no terminal receptor quando esta extremidade é mantida aberta. Primeiramente observa-se que as sobretensões nas três fases são maiores em termos de magnitude máxima para as configurações de cabos dentro de tubos, uma vez que nessas configurações a atenuação das ondas de tensão e corrente é menor. Além disso, para essas configurações o tempo de frente é claramente menor. Para a configuração 3, com os cabos diretamente enterrados, as diferenças entre as três fases não são significativas em termos de magnitude das tensões, apresentando um valor máximo de aproximadamente 1,45 p.u para todas elas. No entanto, para as configurações 4 e 5, as fases se comportam de maneira distinta entre si. A fase A, que é a fase mais afastada do cabo ECC, apresenta a maior sobretensão, com um valor de pico

de 1,75 p.u. Em seguida, a fase B apresenta uma sobretensão intermediária com um pico de 1,68 p.u. Por fim, a fase C, a qual é a fase que compartilha o tubo com o cabo adicional, apresenta a menor sobretensão, com valor máximo de 1,45 p.u. Esse comportamento sugere que a posição do condutor adicional exerce influência sobre a magnitude das sobretensões em cada fase. Por fim, é válido ressaltar que entre as configurações 4 e 5 não são observadas diferenças significativas nas tensões, o que indica que a influência da cobertura isolante do cabo ECC é mínima para a situação analisada.

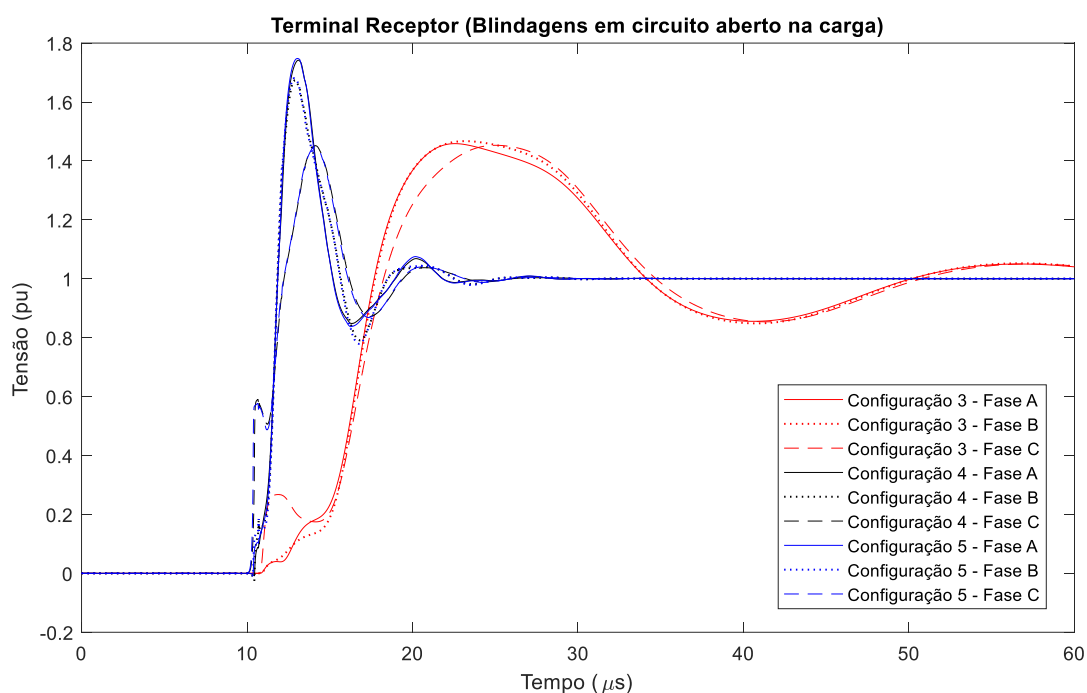


Figura 6.22 - Tensão na blindagem das fases A, B e C no terminal receptor em circuito aberto

A Figura 6.23 mostra a tensão no condutor adicional no terminal receptor para a situação em que as blindagens não são aterradas. Para essa situação, as sobretensões apresentam valores de pico mais baixos e, novamente, as configurações 4 e 5 apresentam comportamento similar entre si e diferentes em relação à configuração 3.

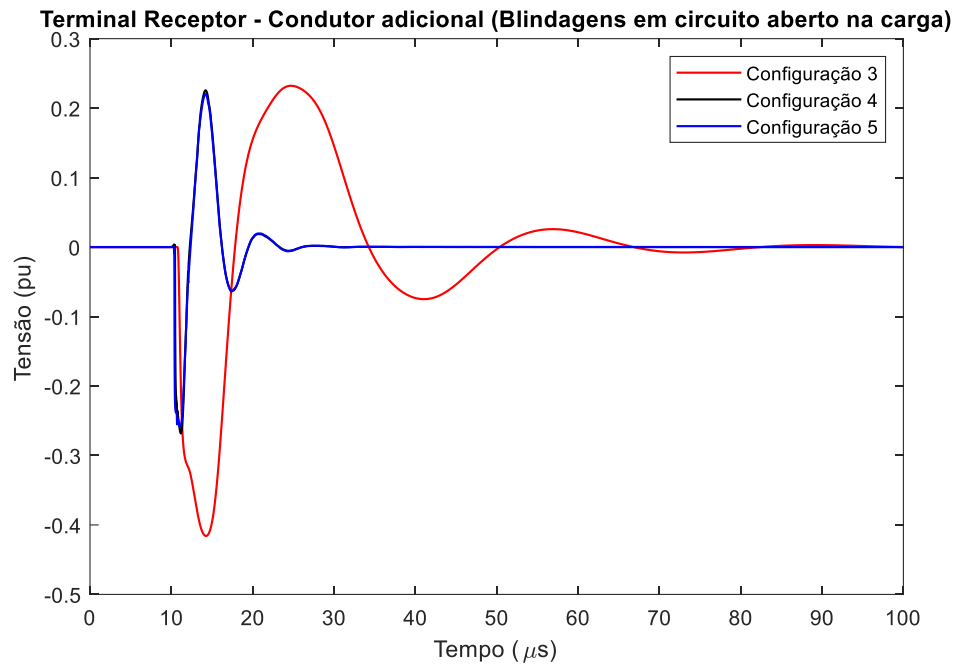


Figura 6.23 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor com as blindagens não aterradas

A Figura 6.24 mostra as tensões nas blindagens das três fases no terminal receptor quando esta extremidade é mantida aterrada. Nessa situação, o regime permanente é rapidamente atingido e não são observadas diferenças significativas entre as três fases em nenhuma das três configurações.

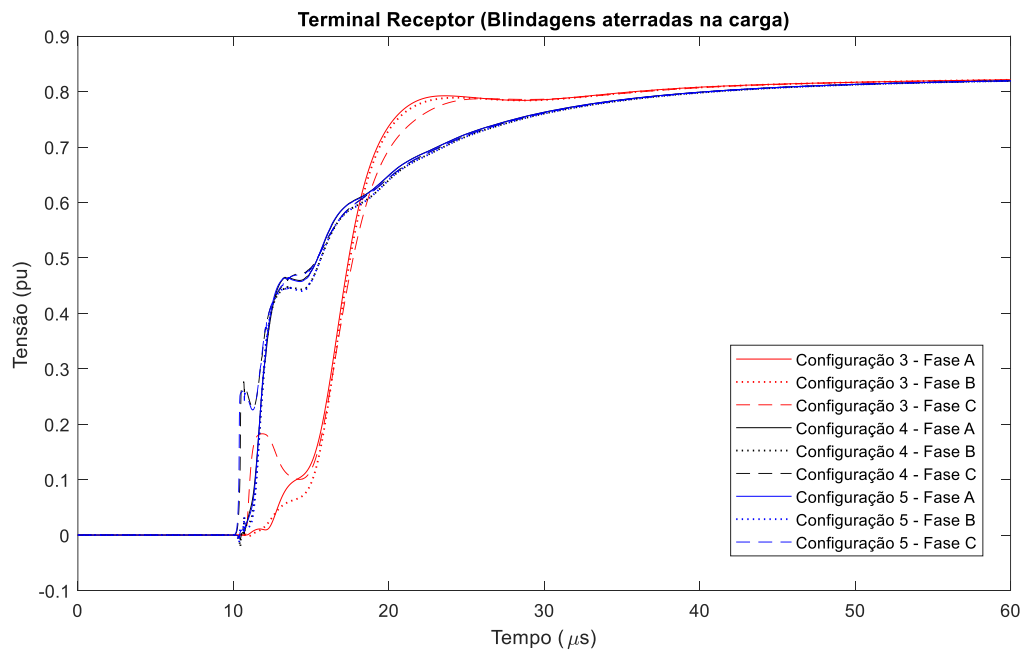


Figura 6.24 - Tensão na blindagem das fases A, B e C no terminal receptor com as blindagens aterradas

A Figura 6.25 mostra a tensão no condutor adicional no terminal receptor para a situação em que as blindagens são aterradas. Em virtude das reflexões negativas das ondas de tensão geradas pelas terminações aterradas, nessa situação as sobretensões no cabo ECC apresentam valores negativos. Além disso, de forma semelhante às demais situações analisadas, as configurações 4 e 5 apresentam comportamentos transitórios similares entre si e ligeiramente diferentes da configuração 3, sobretudo no que diz respeito ao tempo de frente.

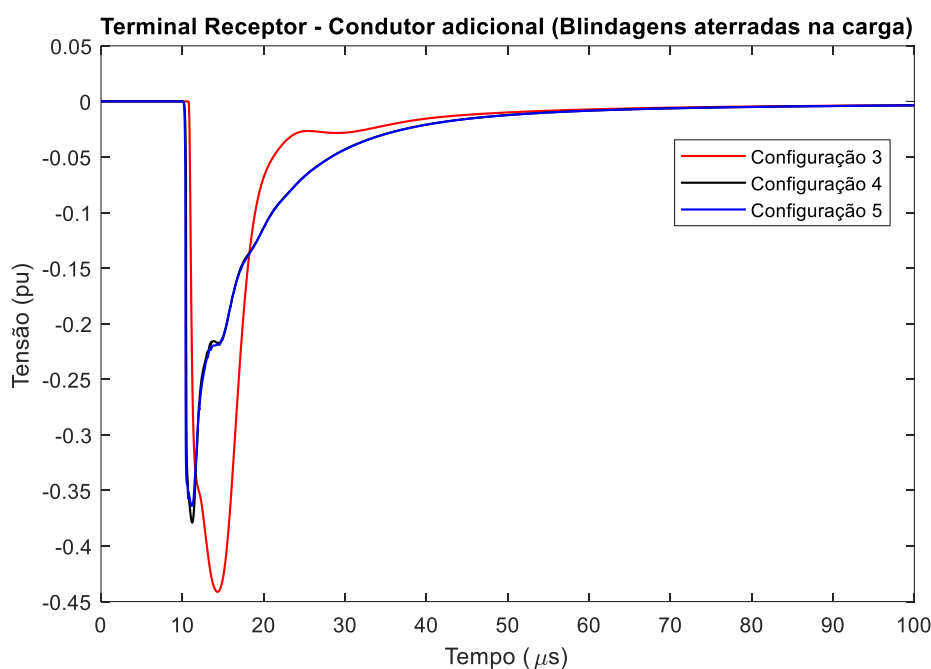


Figura 6.25 - Tensão no condutor adicional no terminal receptor com as blindagens aterradas

6.6 Considerações Finais

Esse capítulo apresentou uma análise fundamental da resposta transitória das cinco configurações de cabos analisadas nesse trabalho. As simulações foram realizadas para três situações distintas, as quais incluíram a excitação do núcleo e a excitação da blindagem de uma das fases e do condutor adicional, além de uma simulação representativa de uma aplicação real comum em parques eólicos. Os resultados mostraram as principais diferenças entre as configurações, no que diz respeito à magnitude das sobretensões transitórias. Dessa forma, foi possível verificar que a presença do tubo contribui significativamente para a elevação das tensões, comparado às configurações de cabos diretamente enterrados.

7 Conclusões e Propostas de Continuidade

7.1 Conclusões

A utilização de cabos subterrâneos no contexto de parques eólicos tem se tornado bastante comum, sobretudo com o crescimento dessa fonte de energia no cenário de transição energética global. Nesse sentido, diferentes configurações de cabos são utilizadas para as mais diversas funções, que vão desde o transporte da energia gerada à interligação do aterramento de aerogeradores adjacentes e equipotencialização dos parques. Entre as configurações empregadas tem-se cabos diretamente enterrados no solo e cabos dentro de tubos, muitas vezes constituídos de materiais não metálicos, para os quais não há formulação analítica na literatura que permita o cálculo dos parâmetros de impedância e admitância diretamente. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal estudar essas configurações de cabos não tradicionais, no que diz respeito a suas características de propagação e sua resposta transitória.

Sob essa perspectiva, foi feita uma revisão bibliográfica, a qual avaliou dois aspectos importantes: a aplicação de cabos em parques eólicos para o aterramento de aerogeradores e a modelagem de cabos enterrados de forma geral, no que diz respeito ao cálculo de seus parâmetros por unidade de comprimento. Na primeira parte, foi realizada uma revisão bibliográfica que indicou diversos trabalhos que investigaram como diferentes configurações de aterramento podem influenciar nas sobretensões geradas por impulsos atmosféricos. Nesse sentido, é notório que a interconexão entre o aterramento de turbinas eólicas, de forma geral, sempre melhora o desempenho do sistema de aterramento. No entanto, a resposta impulsiva de cada sistema de aterramento pode ser muito diferente de seu desempenho em baixa frequência, a depender da resistividade do solo e das características das correntes de descarga. Essa interconexão, por sua vez, pode ser feita por meio de cabos nus ou isolados, diretamente enterrados no solo. A resposta

transitória dessas configurações, comparada com o desempenho de uma turbina com aterramento isolado, foi analisada por alguns trabalhos na literatura como (Ahmed; Ishii, 2011), (Alipio et al., 2020), (Alipio et al., 2021) e (Da Silva et al., 2023). Todos eles, de forma unânime, sugerem que, independentemente do tipo de cabo utilizado na interconexão, essa é uma medida eficiente para a diminuição das sobretensões de origem atmosférica e para a redução do GPR associado a correntes de descarga em um parque eólico.

Além de cabos diretamente enterrados, a utilização de uma rede de média tensão subterrânea dentro de tubos enterrados também é comum em parques eólicos no Brasil. Nesses casos, a interconexão dos aterramentos de torres adjacentes ocorre muitas vezes por meio de cabos de aterramento nus posicionados dentro de tubos individuais ou compartilhados com os cabos de média tensão.

No que diz respeito à modelagem de cabos, enquanto configurações tradicionais compostas por cabos diretamente enterrados no solo possuem formulação analítica disponível para o cálculo dos parâmetros de impedância e admitância por unidade de comprimento, configurações de cabos em tubos não metálicos, feitos de HDPE, por exemplo, não dispõem de expressões fechadas para o cálculo dos parâmetros.

Assim, a fim de estudar configurações de cabos não tradicionais em parques eólicos que envolvem cabos em tubos de HDPE, este trabalho propôs o cálculo de parâmetros através da combinação de expressões fechadas, utilizadas para o cálculo da impedância interna dos cabos e da impedância e admitância de retorno do solo, além do método de elementos finitos (FEM), utilizado para o cálculo da impedância externa e da admitância das configurações. Foram avaliadas quatro configurações básicas que envolvem cabos de média tensão diretamente enterrados e cabos enterrados em tubos, além das suas variações que incluem um condutor de aterramento diretamente enterrado ou compartilhando um dos tubos. Essas configurações foram analisadas do ponto de vista das suas características de propagação no domínio modal e da sua resposta transitória.

Primeiramente, para cada uma das configurações de cabos estudadas, foi empregada a teoria de autovalores e autovetores para desacoplamento dos modos de propagação. Para as configurações de seis condutores, compostas por cabos diretamente enterrados (configuração 1) ou em tubos (configuração 2), existem 6 modos: um modo

terra, dois modos entre blindagens e três modos coaxiais. Para as configurações de sete condutores, compostas pelos mesmos cabos acrescidas de um condutor adicional diretamente enterrado (configuração 3) e de um condutor adicional dentro de um dos tubos (configuração 4), além dos seis modos anteriores, há também um modo entre blindagem e o condutor adicional. A identificação de cada modo foi feita através da investigação dos elementos da matriz de transformação de corrente, em que cada coluna corresponde a um autovetor associado ao autovalor referente a determinado modo. A inspeção dessas matrizes em várias frequências sugere que os modos entre blindagens e o modo terra para todas as configurações são invariantes com a frequência. Já os modos coaxiais não são constantes ao longo de todo o espectro. Em baixas e médias frequências, há uma ligeira diferença na distribuição de corrente entre as configurações 1 e 2, comparadas às configurações 3 e 4, o que se justifica pela assimetria na disposição de cabos observada nas duas últimas. Em frequências elevadas, no entanto, quando todos os modos estão devidamente desacoplados, observa-se a circulação de corrente puramente entre núcleo e blindagem em todos os modos coaxiais. Por fim, o modo entre blindagem e o condutor adicional, presente nas configurações 3 e 4, também apresenta comportamento semelhante em ambos os casos, caracterizando-se por ser o único modo no qual há circulação de corrente pelo condutor de aterramento adicionado às configurações.

Em um segundo momento, foram analisadas as características de propagação de cada modo ao longo da frequência em termos dos parâmetros modais de constante de atenuação, velocidade de fase e módulo da impedância característica. Para essa análise foi incluída também uma quinta configuração em que o cabo adicional dentro do tubo foi substituído por um condutor nu (configuração 5). De forma geral, observou-se que o comportamento entre as configurações é semelhante. O modo terra possui a menor velocidade de fase e a maior atenuação em altas frequências para todas as configurações, seguido pelos modos entre blindagens. Os modos coaxiais são os mais rápidos, sendo que, nas configurações com condutor adicional dentro do tubo, o modo coaxial associado ao tubo que contém o cabo extra apresenta maior velocidade de propagação devido à presença do ar no interior do tubo. Nessas configurações, o sétimo modo entre o condutor de aterramento e blindagem possui velocidade intermediária entre os modos coaxiais e entre blindagens.

Ao analisar, no entanto, individualmente cada modo de propagação, perceberam-se diferenças significativas no comportamento das configurações de cabos diretamente enterrados (configurações 1 e 3) comparadas às configurações de cabos dentro de tubos de HDPE (configurações 2, 4 e 5). De modo geral, independentemente de qual modo está sendo analisado, devido à presença do ar e do tubo propriamente dito, a camada de isolamento dos cabos é maior para essas últimas configurações. Com isso, as velocidades de propagação são maiores e a atenuação é menor. Além disso, é válido destacar que o modo coaxial em altas frequências tem comportamento idêntico para todas as configurações. Já no modo entre blindagens, entre as configurações de cabos em tubos, a menor atenuação ocorre na configuração 2, devido à ausência do condutor adicional. No modo terra, por sua vez, não há diferença de comportamento significativa entre as configurações do mesmo grupo em termos da presença ou não do tubo. Por fim, no modo entre blindagem e condutor adicional, destaca-se que, entre as configurações 4 e 5, não há diferenças significativas em termos do comportamento das características de propagação das ondas de tensão e corrente, podendo ser considerado tanto o cabo nu quanto o cabo isolado para aplicações reais, na interligação do aterramento entre aerogeradores, por exemplo.

No que diz respeito à análise de transitórios, foram feitas simulações com a aplicação de um degrau de tensão unitário no núcleo dos cabos, nas blindagens e no condutor adicional. De forma geral, para as três formas de excitação, as maiores sobretensões em termos de magnitude ocorrem para as configurações de cabos dentro de tubos de HDPE (configurações 2, 4 e 5), independentemente das condições terminais às quais as blindagens estão submetidas. Esse resultado é uma evidência da menor atenuação das ondas de tensão e correntes observada nas configurações de cabos em tubos, sobretudo nos modos de propagação entre blindagens e no modo terra. Assim, a presença de uma camada de isolamento maior composta pelo ar e pelo próprio tubo nessas configurações é o fator principal no que diz respeito à magnitude das sobretensões. Observou-se ainda que há uma tendência na redução dos valores de pico das sobretensões ao se aterrar as blindagens em uma extremidade e uma redução ainda maior ao se aterrar nas duas terminações da linha.

Por fim, foi simulada também uma situação representativa de uma aplicação real de cabos no contexto de um parque eólico, em que as três blindagens foram energizadas simultaneamente com um degrau de tensão unitário, enquanto o cabo ECC foi aterrado

nas duas terminações. Observou-se que, com as blindagens em circuito aberto no terminal receptor da linha, o comportamento é semelhante aos demais casos analisados, com as maiores magnitudes de sobretensões e os menores tempos de frente sendo observados nas configurações de cabos em tubos. No entanto, destaca-se que o valor de pico das tensões é diferente entre cada fase para as configurações 4 e 5. A fase A, que é a fase mais afastada do cabo ECC, apresenta a maior sobretensão, enquanto a fase C, que compartilha o mesmo tubo com o condutor adicional, apresenta a menor sobretensão. Esse comportamento é um indicativo de que a posição do cabo ECC exerce influência sobre a magnitude das sobretensões em cada fase.

Os resultados sugerem que o comportamento transitório e as características de propagação de configurações de cabos em tubos não metálicos são significativamente diferentes de configurações de cabos diretamente enterrados. Essa constatação é um forte indicativo da necessidade da correta modelagem dos cabos empregados em situações não tradicionais, como as utilizadas em parques eólicos, sobretudo no Brasil. Nesse contexto, a presença de um condutor de aterramento dentro dos tubos pode alterar a resposta transitória das configurações e exerce influência nas sobretensões observadas a depender da forma como o condutor é posicionado.

7.2 Propostas de Continuidade

Como propostas de continuidade deste trabalho, destacam-se as análises apresentadas a seguir.

A primeira delas consiste na consideração do efeito de proximidade entre a blindagem externa do cabo isolado e o cabo de aterramento no cálculo da distribuição de correntes para determinação da impedância interna dos cabos compartilhados no tubo. Para isso, pode-se utilizar o método de elementos finitos, o qual é a mesma estratégia usada neste trabalho para cálculo da impedância externa e da admitância dos cabos. Avaliar a influência dessa consideração no comportamento dos parâmetros é importante para entender o limite de validade de expressões analíticas para o cálculo de impedâncias de cabos em tubos não metálicos.

A segunda análise relevante é a avaliação da influência da resistividade do solo no comportamento de cada modo de propagação e, conseqüentemente, nas características

da resposta transitória das configurações de cabos analisadas. Assim, devem ser estudados solos de média e alta resistividade, situações nas quais o efeito da consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência é mais pronunciado.

Outro estudo a ser considerado é a simulação de transitórios através de diferentes formas de excitação dos cabos, com o intuito de reproduzir a distribuição de correntes entre os condutores da configuração que represente cada modo de propagação isoladamente. Dessa forma, propõe-se, por exemplo, a energização entre um núcleo e uma blindagem, para simulação do modo coaxial, ou a excitação entre duas ou três blindagens, para a avaliação de cada modo entre blindagens.

Por fim, uma última análise importante é a extensão dos estudos de transitórios realizados neste trabalho para arranjos mais realistas que englobem elementos terminais que estão presentes na configuração de cabos em parques eólicos. Nesse sentido, seria importante a consideração da excitação por uma forma de onda representativa de descargas atmosféricas, como primeira corrente de retorno e corrente de retorno subsequente. Além disso, a consideração de configurações reais de aterramento de aerogeradores também é relevante para a avaliação da influência de cabos em tubos não metálicos, como forma de interligação do aterramento entre turbinas adjacentes, nas sobretensões atmosféricas e no GPR observado a partir desses fenômenos.

Referências Bibliográficas

AHMED, Md. Raju; ISHII, Masaru. Electromagnetic Analysis of Lightning Surge Response of Interconnected Wind Turbine Grounding System. *In: International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*, 2011.

ALIPIO, Rafael; CONCEIÇÃO, Daiane; DIAS, Rosilene; VISACRO, Silvério; YAMAMOTO, Kazuo. The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Typical Wind-Turbine Grounding Systems. *In: XIV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, out. 2017.

ALIPIO, Rafael; CONCEIÇÃO, Daiane; DE CONTI, Alberto; YAMAMOTO, Kazuo; DIAS, Rosilene; VISACRO, Silvério. A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems. **Electric Power Systems Research**, v. 175, 1 out. 2019.

ALIPIO, Rafael; CORREIA, Maria Teresa; SCHROEDER, Marco Aurélio; YAMAMOTO, Kazuo. Analysis of the lightning impulse and low-frequency performance of wind farm grounding systems. **Electric Power Systems Research**, v. 180, 1 mar. 2020.

ALIPIO, Rafael; DE CONTI, Alberto; DUARTE, Naiara; CORREIA, Maria Teresa. Bare versus insulated conductors for improving the lightning response of interconnected wind turbine grounding systems. **Electric Power Systems Research**, v. 197, 1 ago. 2021.

AMEKAWA, Naoki; NAGAOKA, Naoto; AMETANI, Akihiro. Impedance Derivation and Wave Propagation Characteristics of Pipe-Enclosed and Tunnel-Installed Cables. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 1, p. 380–386, jan. 2004.

AMETANI, Akihiro. A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 3, 1980.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional**. 2024. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>

CIGRÉ WORKING GROUP C4.502. **Cigré Brochure 556: Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables.** , out. 2013.

DA SILVA, Wagner Costa; DE AZEVEDO, Walter Luiz; D'ANNIBALE, José Luciano; DE ARAÚJO, Anderson; FILHO, José. Transient Analysis on Wind Farms with Interconnected Grounding Systems Located on Frequency-Dependent Soils. *In: IEEE Computer Society*, 2023.

DA SILVA, Wagner Costa; DE AZEVEDO, Walter Luiz; D'ANNIBALE, José Luciano; DE ARAÚJO, Anderson; FILHO, José. Lightning analysis of grounding system in wind farms: Comparison between interconnected overhead ground wire and underground bare cables. **Electric Power Systems Research**, v. 242, 1 maio 2025.

DE CONTI, Alberto; DUARTE, Naiara; ALIPIO, Rafael. Closed-Form Expressions for the Calculation of the Ground-Return Impedance and Admittance of Underground Cables. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 38, n. 4, p. 2891–2900, 1 ago. 2023.

GAZZANA, Daniel; SMORGONSKIY, Alexander; MORA, Nicolas; ŠUNJERGA, Antonio; RUBINSTEIN, Marcos; RACHIDI, Farhad. An experimental field study of the grounding system response of tall wind turbines to impulse surges. **Electric Power Systems Research**, v. 160, p. 219–225, 1 jul. 2018.

GUDMUNDSDOTTIR, Unnur Stella; GUSTAVSEN, Bjørn; BAK, Claus Leth; WIECHOWSKI, Wojciech. Field test and simulation of a 400-kV cross-bonded cable system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 3, p. 1403–1410, jul. 2011.

GUSTAVSEN, Bjørn. Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2278–2285, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400: Wind energy generation systems-Part 24: Lightning protection.** Geneva, 2024.

KONTARGYRI, Vassiliki T.; GONOS, Ioannis F.; STATHOPOULOS, Ioannis A. Study on wind farm grounding system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 4969–4977, 1 nov. 2015.

LAFIA, Isabel; ALATAWNEH, N; MAHSEREDJIAN, Jean; AMETANI, Akihiro; BARROS, Maria Teresa.; KOÇAR, Ilhan; NAUD, Antoine. Modeling of an Underground Cable Installed in a Poly-Ethylene Tube for Transient Simulations. *In: IEEJ Power and Energy Society Conference*, 2015.

LAFIA, Isabel; AMETANI, Akihiro; MAHSEREDJIAN, Jean; NAUD, Antoine; BARROS, Maria Teresa; KOÇAR, Ilhan. Field Test and Simulation of Transients on the RTE 225 kV Cable. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 2, p. 628–637, 1 abr. 2017.

LAFIA, Maria Isabel. **Contributions to Modeling and Simulation of HVAC Cables Using Field Test Results**. Montreal: École Polytechnique de Montréal, out. 2016.

MARTINEZ-VELASCO, Juan A. **Power System Transients: Parameter Determination**. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.

MORENO, Pablo; RAMIREZ, Abner. Implementation of the numerical Laplace transform: A review. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2599–2609, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14039: Instalações elétricas de alta tensão (de 1,0 kV a 36,2 kV). 2005.

PATEL, Utkarsh R.; GUSTAVSEN, Bjørn; TRIVERIO, Piero. An equivalent surface current approach for the computation of the series impedance of power cables with inclusion of skin and proximity effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 4, p. 2474–2482, 2013.

PATEL, Utkarsh R.; TRIVERIO, Piero. MoM-SO: A Complete Method for Computing the Impedance of Cable Systems Including Skin, Proximity, and Ground Return Effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 5, p. 2110–2118, 1 out. 2015.

PATEL, Utkarsh R.; TRIVERIO, Piero. Accurate Impedance Calculation for Underground and Submarine Power Cables Using MoM-SO and a Multilayer Ground Model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 3, p. 1233–1241, 1 jun. 2016.

PAUL, Clayton R. **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**. Second ed. New York: Wiley-Blackwell, 2007.

RIZK, Mohammad; MAHMOOD, Farhan; LEHTONEN, Matti; BADRAN, Ebrahim; ABDEL-RAHMAN, Mansour. Investigation of Lightning Electromagnetic Fields on Underground Cables in Wind Farms. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 58, n. 1, p. 143–152, 1 fev. 2016.

SALVADOR, Joao Pedro Lopes; ALIPIO, Rafael; LIMA, Antonio C.S.; BARROS, Maria Teresa. A Concise Approach of Soil Models for Time-Domain Analysis. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 62, n. 5, p. 1772–1779, 1 out. 2020.

SCHINZINGER, R.; AMETANI, A. Surge Propagation Characteristics of Pipe Enclosed Underground Cables. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-97, n. 5, 1978.

SEKIOKA, Shozo; OTOGURO, Hitomi; FUNABASHI, Toshihisa. A Study on Overvoltages in Windfarm Caused by Direct Lightning Stroke. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 34, n. 2, p. 671–679, 1 abr. 2019.

SOUZA, Warley; DE PAULA, Hélder; DE CONTI, Alberto; MESQUITA, Renato. Cable Parameter Calculation for Typical Industrial Installation Methods and High-Frequency Studies. *In*: 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2017.

SOUZA, Warley Leal. **Cálculo de Parâmetros de Cabos Isolados por meio da Análise de Elementos Finitos**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

SUNJERGA, Antonio; LI, Quanxin; POLJAK, Dragan; RUBINSTEIN, Marcos; RACHIDI, Farhad. Isolated vs. Interconnected Wind Turbine Grounding Systems: Effect on the Harmonic Grounding Impedance, Ground Potential Rise and Step Voltage. **Electric Power Systems Research**, v. 173, p. 230–239, 1 ago. 2019.

WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN, H. V; IRWIN, G. D. Dependent Transformation atrices for Untranspose Lines using Newton-Raphson Method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 3, 1996.
