



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

WAGNER COSTA DA SILVA

Modelagem de transitórios eletromagnéticos de parques eólicos frente a descargas atmosféricas: uma abordagem de sobretensões transitórias e coordenação de isolamento

CAMPINAS

2022

WAGNER COSTA DA SILVA

Modelagem de transitórios eletromagnéticos de parques eólicos frente a descargas atmosféricas: uma abordagem de sobretensões transitórias e coordenação de isolamento

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Orientador: Professor Dr. José Pissolato Filho

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Wagner Costa da Silva, orientada pelo(a) Prof. Dr. José Pissolato Filho.

Assinatura do Orientador

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Si38m Silva, Wagner Costa da, 1989-
Modelagem de transitórios eletromagnéticos de parques eólicos frente a descargas atmosféricas: uma abordagem de sobretensões transitórias e coordenação de isolamento / Wagner Costa da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: José Pissolato Filho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Aterramentos elétricos. 2. Raio - Descargas atmosféricas. 3. Pára raios. 4. Parque eólico. 5. Transitórios (Eletricidade). 6. Descargas elétricas. 7. Equações de Maxwell. I. Pissolato Filho, José, 1951-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Modeling electromagnetic transients of wind farms against lightning: an approach to transient overvoltages and insulation coordination

Palavras-chave em inglês:

Grounding

Lightning

Surge arrester

Wind farm

Transients

Electrical discharge

Maxwell equations

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

José Pissolato Filho [Orientador]

Ricardo Augusto de Araujo

Paulo Edmundo da Fonseca Freire

Data de defesa: 05-12-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-9867-6396>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8120620921213120>

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato(a): Wagner Costa da Silva RA: 223738

Data da defesa: 05 de dezembro de 2022

Título da Tese: “Modelagem de transitórios eletromagnéticos de parques eólicos frente a descargas atmosféricas: uma abordagem de sobretensões transitórias e coordenação de isolamento”

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente)

Prof. Dr. Ricardo Augusto de Araujo (interno)

Dr. Paulo Edmundo da Fonseca Freire (externo)

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

DEDICATÓRIA:

Esse mestrado é dedicado aos meus avós Maria de Fátima Simões Costa da Silva (*in memoriam*) e Amaro Gomes da Silva (*in memoriam*), por um excelente apoio emocional e educacional;

Minha esposa Fabiana Gonzaga, pelo seu inestimável suporte, paciência em minha pesquisa e trabalho;

E minha filha Mirela Gonzaga Costa que faz com que toda magia aconteça.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu em meio a tantas adversidades e problemas, superá-las, em um momento difícil de pandemia e poder vivenciar diversos aprendizados numa universidade de referência mundial.

À minha família pelo apoio, carinho, ajuda e paciência, em especial a minha esposa Fabiana Gonzaga e filha Mirela Gonzaga Costa.

Primeiramente meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Pissolato, que acreditou nesse projeto e junto com o Dr. Anderson Justo, com muita paciência, dedicação, discursões técnicas, pude ser orientado, receber seus ensinamentos e orientações.

Ao amigo, Adilson Viera que me motivou a procurar e iniciar um mestrado.

Aos amigos Roberto Andolfato e Daniele Cuccarollo, pelas diversas discursões técnicas que tivemos sobre transitórios eletromagnéticos utilizando métodos numéricos para resolução das equações de Maxwell no domínio do tempo e frequência.

A todos os excelente amigos e colegas do setor elétrico e pessoais, com quem aprendi e aprendo constantemente.

Epígrafe:

“Semeie um pensamento e colha um ato;

Semeie um ato e colha um hábito;

Semeie um hábito e colha um caráter;

Semeie um caráter e colha um destino.”

Samuel Smiles

RESUMO

Com o crescimento das energias renováveis por questões ambientais e a expansão das energias limpas as eólicas, vem ganhando seu espaço no mercado de geração no Brasil. Com os aumentos de potências nos parques as dimensões dos aerogeradores vem crescendo consideravelmente, onde as máquinas chegam a ultrapassar os 200 metros de altura total. Pôr o Brasil ser um dos maiores campeões de raios do mundo a preocupação com a coordenação de isolamento e sobretensões nos parques eólicos, vem sendo um tema muito discutido, até por questões de falhas nos sistemas, indisponibilidade de geração e até risco na segurança de pessoas. Algumas técnicas de circuitos são utilizadas nos estudos de coordenação de isolamento, porém questionáveis devido à complexidade dos sistemas os quais estão interligados. Este trabalho apresenta uma análise de várias situações abordadas em sistemas de aterramento e sobretensões com a utilização de métodos numéricos para solução das equações de Maxwell no domínio do tempo. São considerados vários casos, desde apenas só os sistemas de aterramentos interligados ao parque completo, considerando pá, nacelle, torre, aterramentos e redes de média tensão. Na maioria das condições avaliadas neste trabalho, o parâmetro resistividade do solo tem um peso importante nas sobretensões encontradas, nos sistemas de aterramento. As descargas atmosféricas de frente rápida, tem um comportamento oscilatório no aspecto das sobretensões.

Palavras-chave: Aterramento, Proteção contra descargas atmosféricas, parques eólicos, transitórios eletromagnéticos e equações de Maxwell.

ABSTRACT

With the growth of renewable energy due to environmental issues and the expansion of clean energy such as wind, it has been gaining ground in the generation market in Brazil. With the increase in power in wind farms, the dimensions of wind turbines have been growing considerably, with machines reaching over 200 meters in total height. Because Brazil is one of the biggest champions of lightning in the world, the concern with the coordination of insulation and overvoltage in wind farms, has been a much-discussed topic, even due to system failures, unavailability of generation and even risk to the safety of people. Some circuit techniques are used in isolation coordination studies, but questionable due to the complexity of the systems which are interconnected. This work presents an analysis of several situations addressed in grounding and overvoltage systems using numerical methods to solve Maxwell's equations in the time domain. Several cases are considered, from just the grounding systems interconnected to the complete Wind Farm, considering the blade, nacelle, tower, grounding, and medium voltage networks. In most of the conditions evaluated in this work, the soil resistivity parameter has an important weight in localized overvoltage in grounding systems. Fast-front lightning strikes have an oscillatory behavior in terms of overvoltage.

Keywords: Grounding, lightning protection, wind farms, electromagnetic transients and Maxwell equations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Matriz elétrica brasileira no final de 2021, fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, 2022).....	17
Figura 1.2 - Mapa de ventos (m/s), do potencial eólico do Nordeste, fonte: (Governo do Estado do Ceará e Camargo Schubert, 2019).	18
Figura 1.3 – Densidade de descargas atmosféricas Ng – Mapa do Brasil (descargas atmosféricas/km ² /ano), fonte: (NBR ABNT 5419-2, 2015).....	21
Figura 1.4 – Danos catastróficos em aerogeradores, fonte: (Cigré 578 WG C4.409, 2014).....	22
Figura 1.5 – Nacele do aerogerador, fonte: Catálogo fabricante de turbinas eólicas Gamesa.....	24
Figura 2.1 – Descargas atmosféricas nuvem-terra (a) Descarga descendente negativa; (b) descarga ascendente positiva; (c) Descarga Descendente positiva; (d) Descarga ascendente positiva, fonte: (Cigré 549, WG C4.407, 2013), adaptado.	28
Figura 2.2 – Ondas de Heidler normalizadas 10/350µs, 1/200 µs e 0,25/100 µs, fonte: Autor.	28
Figura 2.3 - Onda de duplo pico subsequente normalizada, fonte: Autor.	29
Figura 2.4 – Módulo das correntes normalizadas x frequência, fonte: Autor.....	29
Figura 2.5 – Falta fase para terra no sistema de aterramento do parque eólico, fonte: Autor	31
Figura 2.6 – Atenuação (alfa), parcela real x frequência, para três tipos de resistividades de solo, 500, 1.000 e 2.000 Ω.m, fonte: Autor.	32
Figura 2.7 – Barra de equipotencialização principal do aerogerador, indicada em vermelho, Fonte: Catálogo Vestas.	33
Figura 2.8 – Fundação e anéis de aterramento, típica de um aerogerador em três dimensões com 22 metros de diâmetro, fonte: autor.	34
Figura 2.9 – Rede de média tensão nas proximidades de um aerogerador, fonte: Google Earth ®.	35
Figura 2.10 – Rede elétrica interna do aerogerador, fonte: Catálogo General Electric - GE.....	37
Figura 3.1 - Circuito típico de um estudo de coordenação de isolamento de parques eólicos, fonte: (The Institution of Engineering and Technology, 2020)	42
Figura 3.2 – Sistema de aterramento interligado entre os aerogeradores, fonte: (Alipio, Guimaraes, Passos, & Conceição, Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning, 2021)	42
Figura 4.1 – Geometria do problema, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011), adaptado.....	48
Figura 4.2 – Configuração dos elementos nos meios, (a) Elementos do primeiro grupo. (b) elementos do segundo grupo, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011), adaptado.....	51
Figura 4.3 – Circuito equivalente do modelo de uma célula do PEEC, (a) Elementos do primeiro grupo. (b) elementos do segundo grupo, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).....	52

Figura 4.4 – Circuito equivalente de cada elemento modelo “T”, fonte: (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016).....	55
Figura 5.1 – Sistema de Aterramento de quatro aerogeradores interligados, cotas em metros, fonte: Autor.....	59
Figura 5.2 – Aterramento de um aerogerador com as dimensões, anéis com diâmetro 23,1 e 8,6 metros, são de cobre, demais aço, cotas em metros, profundidade da base de 3,15 metros, fonte: autor.....	59
Figura 5.3 – Vista superior da Torre do aerogerador, cotas em metros, Fonte: Autor.....	60
Figura 5.4 – Vista superior da Nacele e eixo da turbina, cotas em metros, Fonte: Autor.....	60
Figura 5.5 – Vista da Nacele e eixo da turbina, em perspectiva, Fonte: Autor	61
Figura 5.6 – Pá do aerogerador 80 metros de comprimento sem escala, fonte: autor....	61
Figura 5.7 – Cabo Isolado de média tensão, Fonte: Catálogo Induscabos	62
Figura 5.8 – Rede de média tensão 34,5kV, vista superior, cotas em milímetros, fonte: autor.....	63
Figura 5.9 – Rede de média tensão 34,5kV, perspectiva, fonte: autor.....	63
Figura 6.1 – Aterramentos interligados, fonte: autor.....	65
Figura 6.2.1.1 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 500 Ω .m, fonte: autor.....	67
Figura 6.2.1.2 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor	68
Figura 6.2.1.3 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 3.000 Ω .m, fonte: autor	68
Figura 6.2.1.4 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor	69
Figura 6.2.2.1 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 500 Ω .m, fonte: autor	71
Figura 6.2.2.2 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor.....	71
Figura 6.2.2.3 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 3.000 Ω .m, fonte: autor.....	72
Figura 6.2.2.4 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor.....	72
Figura 6.3.1 – Aerogeradores e aterramentos interligados, fonte: autor.....	73
Figura 6.3.1.1 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 500 Ω .m, fonte: autor	74
Figura 6.3.1.2 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 1.000 Ω .m, fonte: autor	74
Figura 6.3.1.3 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 3.000 Ω .m, fonte: autor	75
Figura 6.3.1.4 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 5.000 Ω .m, fonte: autor	75
Figura 6.3.1.5 – Sobretensão na pá, onda 10/350 μ s, fonte: autor.....	77
Figura 6.3.1.6 – Sobretensão na nacele, onda 10/350 μ s, fonte: autor.....	77
Figura 6.3.1.7 – Sobretensão na base, onda 10/350 μ s, fonte: autor.....	78
Figura 6.3.1.8 – Espectro de frequência da tensão na pá para onda 10/350 μ s, fonte: autor.....	78
Figura 6.3.2.1 – GPR Onda 1/200 μ s, resistividade 500 Ω .m, fonte: autor.....	79
Figura 6.3.2.2 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 1.000 Ω .m, fonte: autor	80
Figura 6.3.2.3 – GPR Onda 1/200 μ s, resistividade 3.000 Ω .m, fonte: autor	80
Figura 6.3.2.4 – GPR Onda 1/200 μ s, resistividade 5.000 Ω .m, fonte: autor	81

Figura 6.3.2.5 – Sobretensão na pá, onda 1/200 μ s, fonte: autor	82
Figura 6.3.2.6 – Sobretensão na nacele, onda 1/200 μ s, fonte: autor.....	82
Figura 6.3.2.7 – Sobretensão na base, onda 1/200 μ s, fonte: autor.....	83
Figura 6.3.2.8 – Espectro de frequência da tensão na pá para onda 1/200 μ s, fonte: autor.....	83
Figura 6.4.1 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, fonte: autor	85
Figura 6.4.2 – Aterramentos interligados com rede de média tensão detalhe em vermelho da área de interesse, fonte: autor	86
Figura 6.4.1.1 – Correntes onda 10/350 μ s, solo de 1000 Ω .m, fonte: autor	86
Figura 6.4.1.2 – Sobretensão onda 10/350 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor	87
Figura 6.4.1.3 – Correntes ondas 10/350 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor	87
Figura 6.4.1.4 – Sobretensão onda 10/350 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor	88
Figura 6.4.2.1 – Correntes onda 1/200 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor.....	89
Figura 6.4.2.2 – Sobretensão onda 1/200 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor	90
Figura 6.4.2.3 – Correntes onda 1/200 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor.....	90
Figura 6.4.2.4 – Sobretensão onda 1/200 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor	91
Figura 6.5.1 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, descarga próxima a rede de média tensão, fonte: autor.....	92
Figura 6.5.2 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, descarga próxima a rede de média tensão, detalhe, fonte: autor	92
Figura 6.5.3 – Correntes onda de duplo pico, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor.....	93
Figura 6.5.4 – Sobretensões onda de duplo pico, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Nome dos principais componentes do aerogerador, fonte: Catálogo Gamesa, adaptado..... 24

Tabela 5.1 - Dados do cabo isolamento de média tensão 20/35 kV, fonte: Induscabos .62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PEEC - Partial Element Equivalent Circuit

GPR – Ground Potential Rise

PE – Parque Eólico

LLS - Lightning Locating Systems

Ng - Densidades de descargas atmosféricas/km²/ano

DE – Differential equations

IE – Integral equations

BEP – Barramento de equipotencialização principal

SIN – Sistema Interligado Nacional

ONS – Operador Nacional do Sistema

NBR – Norma Técnica Brasileira

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

RMT – Rede de Média Tensão

IEC – International Electrotechnical Commission

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

MPIE - Mixed Potential Integral Equation

MoM – Method of Moments

FC – Frequency Constant

FD - Frequency dependent

MT – Média tensão

DPS – Dispositivo de proteção contra Surtos

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	17
1.1 Contexto das renováveis no Brasil	17
1.2 Motivação	20
1.3 Objetivos do trabalho	25
1.4 Metodologia	25
CAPÍTULO II – CONCEITOS E ESTRUTURA DOS PARQUES EÓLICOS	26
2.1 Descargas atmosféricas	26
2.2 Modelos geométricos do solo	30
2.3 Sistemas de aterramentos de aerogeradores	32
2.4 Redes de média tensão	34
2.5 Coordenação de Isolamento em parques eólicos	35
CAPÍTULO III – REVISÃO E PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	37
CAPÍTULO IV - MÉTODO NUMÉRICO DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL	46
4.1 Introdução	46
4.2 Método PEEC para uma estrutura de fio fino	48
4.3 Formulação do PEEC no XGSLab®	52
4.4 Principais vantagens do modelo PEEC	56
CAPÍTULO V - MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	57
5.1 Modelos geométrico	57
5.2 Sistema de aterramento	57
5.3 Torre do aerogerador	60
5.4 Nacele	60
5.5 Pá	61
5.6 Rede de média tensão Isolada	62
5.7 Rede de média tensão aérea	62
5.8 Transformador de média tensão	64
CAPÍTULO VI – ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
6.1 Introdução	64
6.2 Sistema de aterramento interligado dos aerogeradores	64
6.2.1 Sistema de aterramento interligado onda 10/350 μ s	65
6.2.2 Sistema de aterramento interligado onda 1/200 μ s	69
6.3 Sistema de aterramento e aerogeradores	73

6.3.1	Sistema de aterramento e aerogeradores onda 10/350 μ s	73
6.3.2	Sistema de aterramento e aerogeradores onda 1/200 μ s	79
6.4	Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão descarga direta no aerogerador	84
6.4.1	Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão onda 10/350 μ s	84
6.4.2	Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão onda 1/200 μ s ⁸⁸	
6.5	Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão Descarga próxima a rede de média tensão aérea	91
CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS		94
7.1	Considerações finais e conclusões	94
7.2	Sugestões de trabalhos futuros em sistemas de aterramento	96
REFERÊNCIAS		97
ANEXO A.....		101

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

1.1 Contexto das renováveis no Brasil

Em 2021, foram instalados 110 novos parques eólicos, num total de 3,83 GW de nova capacidade. O ano de 2021 terminou com 795 usinas e 21,57 GW de potência eólica instalada, o que representou um crescimento de 21,53% de potência em relação a dezembro de 2020, quando a capacidade instalada era de 17,75 GW, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, 2022).

Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, em 2021, foram instalados 7,5 GW de potência e a eólica foi a fonte que mais cresceu, representando 50,91% da nova capacidade instalada no ano. A segunda fonte que mais cresceu foi a solar fotovoltaica, com 17,95% da nova capacidade, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, 2022). A figura 1.1 apresenta a matriz elétrica brasileira em dezembro 2021.

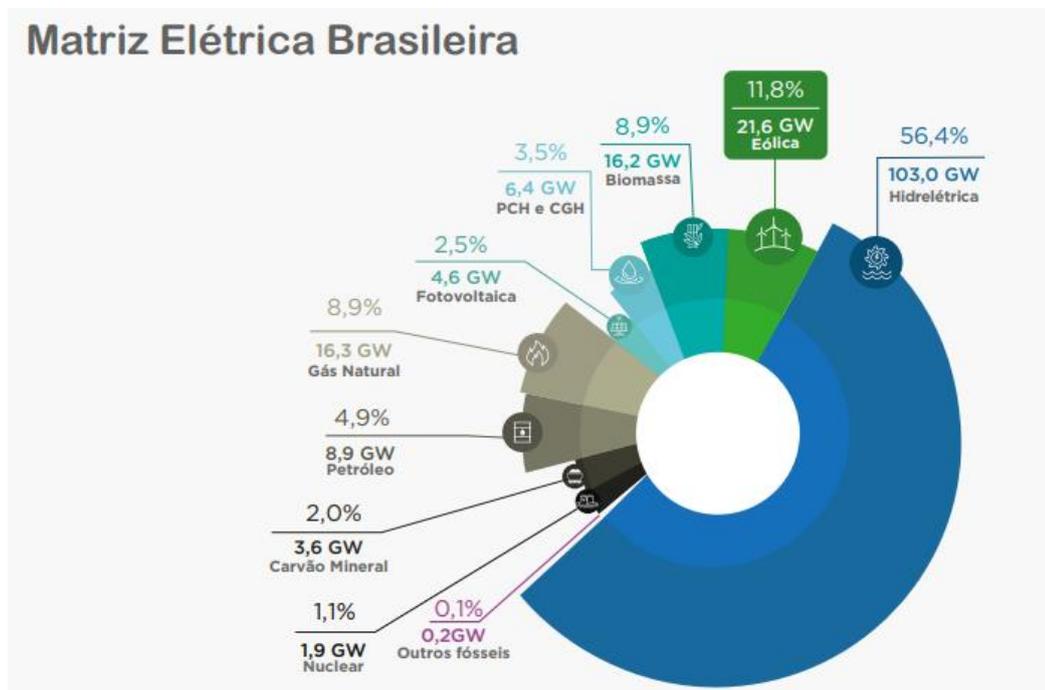


Figura 1.1 - Matriz elétrica brasileira no final de 2021, fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, 2022)

Alguns estados no Brasil tem um forte potencial eólico, o qual está relacionado à velocidade do vento, disponibilidade de sistema de transmissão para escoamento da energia, infraestrutura de logística de chegada dos equipamentos e materiais, valor da área para aquisição e/ou arrendamento de instalação do parque eólico, dentre outras. Na figura 1.2, pode ser observado, por exemplo, o atlas eólico do estado do Ceará, (Governo do Estado do Ceará e Camargo Schubert, 2019), onde há claramente um maior potencial nas regiões litorâneas.

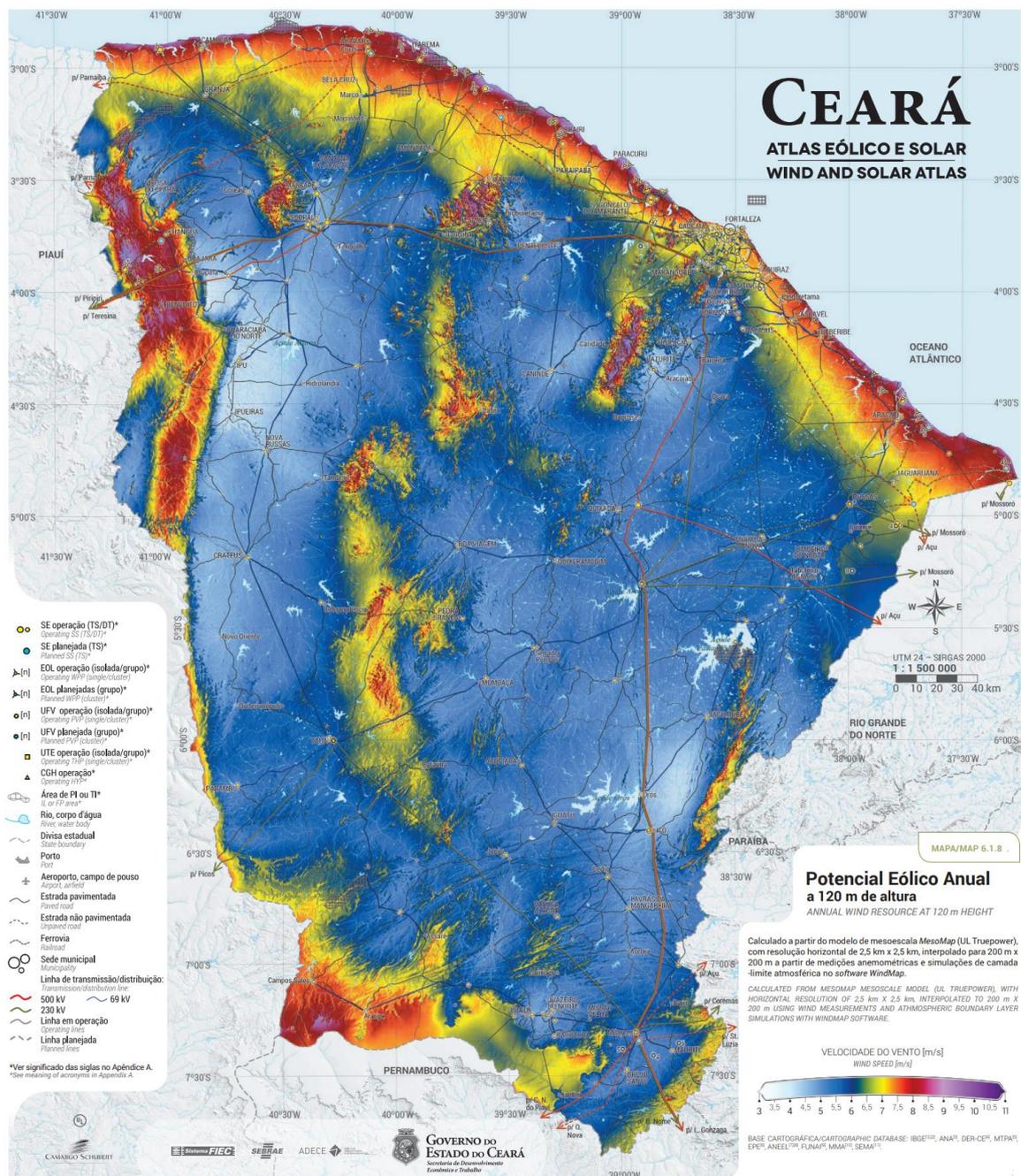


Figura 1.2 - Mapa de ventos (m/s), do potencial eólico do Nordeste, fonte: (Governo do Estado do Ceará e Camargo Schubert, 2019).

A evolução da capacidade instalada de geração das usinas eólicas, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), apresenta uma grande alta nos últimos seis anos, chegando a mais que dobrar tomando como base dezembro de cada ano, de 2016 a 2021, (Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, 2022).

Este aumento veio vinculado, também, ao crescimento do tamanho dos parques eólicos, que tinham potências típicas de até 100 MW instalados, atualmente alguns parques em início da operação comercial, por exemplo Oitis da Neoenergia, já superam os 500 MW, (Neoenergia, 2022).

O aumento da potência dos complexos eólicos é consequência de uma maior exigência sistêmica, pois muitos parques que eram conectados nas redes de distribuição (< 138 kV), agora estão migrando para o sistema de transmissão (até 500 kV). Isso também alavancou um alto crescimento no sistema de transmissão para possibilitar o escoamento destes grandes blocos de potências.

Com o crescimento de potência instalada dos complexos eólicos, foi exigido também que as potências dos aerogeradores seguissem o mesmo caminho, como a potência é fortemente influenciada pelo diâmetro da pá do aerogerador, foi necessário aumentar suas dimensões.

No início dos parques eólicos no Brasil, as máquinas tinham cerca 2,0 MW com diâmetros das pás de cerca de 95 metros e alturas totais (pá, aerogerador e torre) típicas totais de 125 metros. Instaladas no Brasil recentemente, há máquinas com potência de 5,5 MW, diâmetros das pás de 163 metros com altura total na ordem de 200 metros. Há estudos recentes no Brasil com máquinas que chegaram aos 7 MW em fases de testes que certamente romperão a barreira dos 200 metros, como indica (WEG, 2022), com diâmetros de rotor que superam os 170 metros.

O rápido crescimento da fonte de energia eólica na matriz energética brasileira, o aumento nas dimensões dos aerogeradores, principalmente quando instalados em morros e locais abertos, resulta em elevadas exposições às descargas atmosféricas. A proteção contra descargas atmosféricas constitui um fator importante para proteção do aerogerador, equipamentos de média e baixa tensão internos e no desempenho da rede de média tensão coletora do parque.

A rede de média tensão está exposta a desligamentos, caso uma descarga atmosférica incida na pá do aerogerador, e pode até ocasionar queima dos equipamentos, além do desligamento da rede, com a consequente interrupção na geração de energia, resultando em significativos prejuízos financeiros.

No Brasil, os parques eólicos vêm sendo instalados em locais com solos de altas resistividades ($>1.000 \Omega.m$), (NBR ABNT 7117-1, 2020). No topo de montanhas há um melhor aproveitamento do vento, aumentando assim a capacidade de geração de energia, como é o caso do Morro do Chapéu na Bahia e a Serra do Rio do Rastro no Planalto Catarinense, ambos com parques eólicos instalados e já em operação.

Um fator de grande impacto do aumento das energias renováveis, foi a preocupação do mundo com o comprometimento com as 17 metas globais de Desenvolvimento Sustentável (ODS), onde o sétimo objetivo tem como base a energia limpa e acessível. Este objetivo se compromete em assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos, (ONU Brasil, 2022).

1.2 Motivação

O Brasil é um dos maiores campeões de incidência de descargas atmosféricas no mundo, conforme pode ser observado no mapa da figura 1.3, onde são apresentadas as densidades de descargas atmosféricas/ km^2/ano (N_g) no Brasil, (NBR ABNT 5419-2, 2015). Há uma grande variedade de densidades de descargas atmosféricas no Brasil, desde locais com $N_g = 0,1$ descargas atmosféricas/ km^2/ano , geralmente no litoral do nordeste, como em locais na região sudeste, onde o índice superar o $N_g = 10$ descargas atmosféricas/ km^2/ano .

A proteção contra descargas atmosféricas em parques eólicos é de grande importância para o correto e bom funcionamento de todo o sistema elétrico envolvido desde o aerogerador, pás, nacelle e sistemas de média e baixa tensão internos aos aerogeradores. Outro componente do sistema elétrico afetado pelas descargas atmosféricas são as redes de média tensão com cabos isolados que adentram nos

aerogeradores. Esta rede aérea (tipicamente 34,5 kV), coleta toda energia gerada e escoava para as subestações coletora, que eleva a tensão para injeção desta energia no sistema elétrico de potência de subtransmissão (tipicamente 138 kV) ou transmissão (>138 kV).

Os danos em aerogeradores podem ser irreparáveis, dependendo das magnitudes das correntes e do tamanho dos aerogeradores. Alguns exemplos de danos retirados de (Cigré 578 WG C4.409, 2014) podem ser observados na figura 1.4, classificados como danos catastróficos.

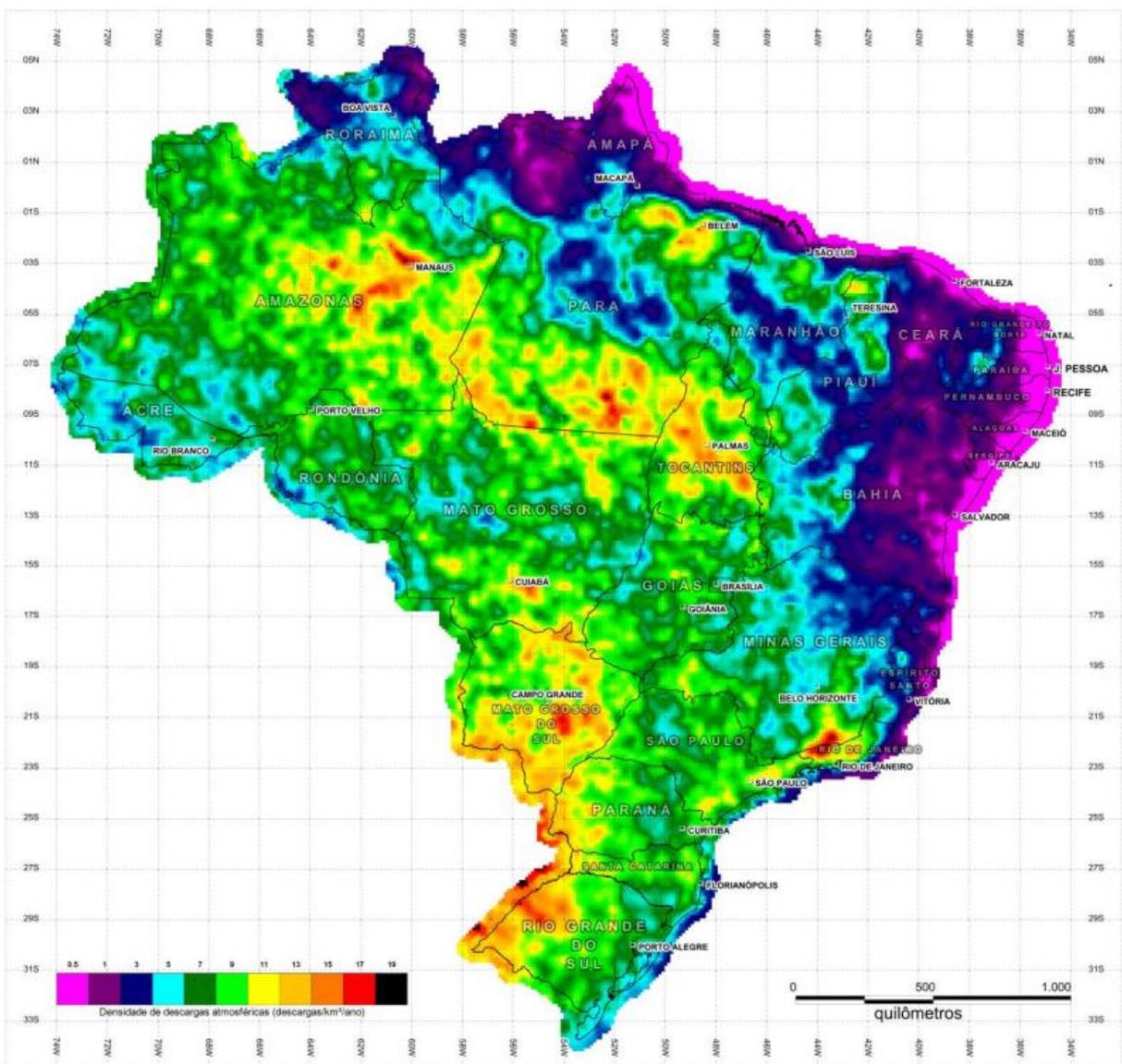


Figura 1.3 – Densidade de descargas atmosféricas Ng – Mapa do Brasil (descargas atmosféricas/km²/ano), fonte: (NBR ABNT 5419-2, 2015)



Figura 1.4 – Danos catastróficos em aerogeradores, fonte: *(Cigré 578 WG C4.409, 2014)*

Os raios podem causar danos nas turbinas eólicas que podem comprometer a segurança das pessoas e instalações em sua vizinhança, pois várias partes destas podem ser arremessadas longe das turbinas, com possibilidade de perdas econômicas, pois pode ocorrer indisponibilidade do aerogerador, até seu devido reparo.

Alguns países como o Japão já têm medidas de prevenção e testes de componentes que fazem parte da proteção contra descargas atmosféricas dos aerogeradores, com foco na segurança de pessoas e desempenho do sistema de geração, (YAMAMOTO, et al., 2020). Um dos testes mais importantes é a checagem da continuidade do subsistema de captação da pá que deve ter sua continuidade garantida, visando seu correto funcionamento, através de teste de continuidade com o método de ondas viajantes e o método da teoria de antenas, que é apresentado em detalhes em, (YAMAMOTO, et al., 2020).

As normativas internacionais como, (IEC 61400-24, 2019), mostram que devido aos aerogeradores serem elevados e estarem em locais geralmente abertos, sem edificações ou estruturas em suas proximidades (o que ocorre geralmente no Brasil), os riscos decorrentes de descargas atmosféricas podem chegar a dobrar, quando comparado com uma edificação, cuja proteção é regida pela (NBR ABNT 5419-2, 2015). Além da exposição às descargas atmosféricas descendentes, existe a possibilidade das descargas atmosféricas ascendentes, que tem origem, tipicamente em estruturas altas e pontiagudas, como é caso das torres de aerogeradores.

Outros tipos de possibilidade são as descargas ascendentes, iniciadas nas torres dos aerogeradores, com altos campos eletrostáticos, mas essas podem não se conectar por exemplo as nuvens não gerando as descargas de retorno, porém a

corrente de impulso associada tem magnitude de até 10kA, (IEC 61400-24, 2019). Este fenômeno implica gradientes no ambiente eletromagnético, que deve ser considerado nos estudos de compatibilidade eletromagnética.

Existem diversas formas de instalação do transformador elevador nos aerogeradores. No início, em aerogeradores com potência inferior a 2 MW, os transformadores eram instalados na base das torres, internos ou externos. Hoje, devido ao aumento da potência das turbinas e para redução das perdas, os transformadores elevadores estão sendo instalados na nacele, como mostram a figura 1.5 e a tabela 1.1. Este tipo de instalação aumenta os riscos associados a sobretensões, no caso de uma descarga atmosférica incidindo na pá do aerogerador, devido ao maior acoplamento eletromagnético com a nacele.

O objeto deste trabalho é a análise das sobretensões geradas em parques eólicos por descargas atmosféricas em torres de aerogeradores recentemente instalados no Brasil de 5,5 MW (com alturas totais de aproximadamente 200 metros), seus impactos na coordenação de isolamento do parque como um todo e as respectivas sobretensões, com uma abordagem teórica e prática de um sistema completo, que é escassa na literatura pesquisada.

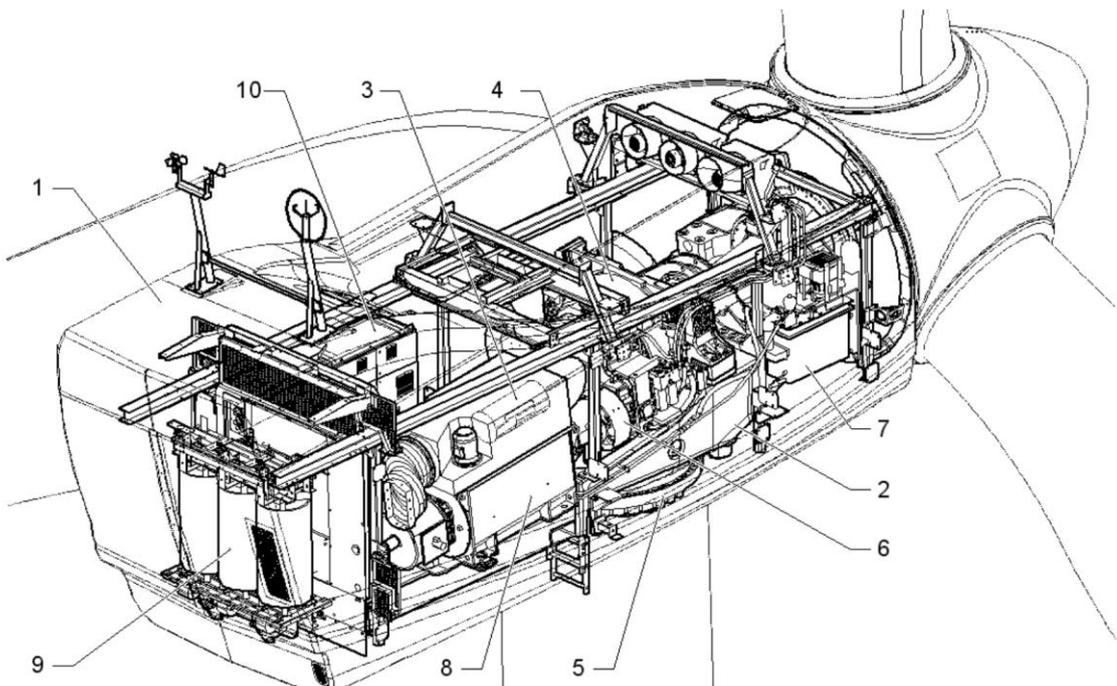


Figura 1.5 – Nacele do aerogerador, fonte: Catálogo fabricante de turbinas eólicas Gamesa

Tabela 1.1 - Nome dos principais componentes do aerogerador, fonte: Catálogo Gamesa, adaptado

Posição	Nome
1	Cobertura
2	Frame
3	Eixo Principal
4	Engrenagens
5	Regulagem
6	Freio Mecânico
7	Unidade Hidráulica
8	Gerador
9	Transformador
10	Painéis Elétricos

1.3 Objetivos do trabalho

Neste trabalho são analisadas as sobretensões geradas por descargas atmosféricas em complexos eólicos, segundo as atividades abaixo relacionadas:

- a) Estudo das sobretensões em parques eólicos através de métodos numéricos oriundos das descargas atmosféricas;
- b) Avaliação da importância de modelos de solo com parâmetros variantes com a frequência, no tocante ao cálculo das elevações de potenciais no solo (GPR¹);
- c) Apresentar a importância da modelagem dos itens que compõe os aerogeradores, como pá, nacelle, torre e sistema de aterramento;
- d) Verificação do cálculo da energia a ser especificada nos para-raios utilizados, na torre dos aerogeradores e nas redes de média tensão para solos, média e alta resistividade;
- e) Análise das sobretensões nos cabos isolados, associados a diferentes resistividades do solo e tipos de ondas;
- f) Apresentar as tensões induzidas nas proximidades das redes de média tensão aérea, nos postes de transição;
- g) Apresentar a importância de um estudo de coordenação de isolamento, considerando o parque eólico completo em um método numérico.

1.4 Metodologia

A estruturação desta dissertação foi elaborada da seguinte maneira:

- **Capítulo I – Introdução e Motivação** – Apresentação do cenário dos parques eólicos no Brasil, motivação do trabalho e metodologia utilizada;

¹ GPR: Do inglês Ground Potential Rise

- **Capítulo II – Conceitos e estrutura dos parques eólicos** – Conceituação e apresentação de toda estrutura de um parque eólico para análise a ser realizada;
- **Capítulo III – Revisão e pesquisa bibliográfica** – Revisão da literatura existente em publicações nacionais e internacionais, abordando sistemas de aterramentos de parques eólicos e a proteção contra descargas atmosféricas;
- **Capítulo IV – Método numérico das soluções das equações de Maxwell** – Apresentação do método numérico PEEC para solução das equações de Maxwell, no domínio do tempo e da frequência. Método numérico utilizado para análise das sobretensões e dos sistemas de aterramento neste trabalho;
- **Capítulo V – Modelagem dos componentes do sistema de aterramento e proteção contra descargas atmosféricas** - Apresentação de todos os componentes modelados no sistema do parque eólico utilizado neste trabalho;
- **Capítulo VI – Análise dos resultados** – Análise dos casos e interpretação dos resultados obtidos das simulações.
- **Capítulo VII – Conclusão e sugestão de trabalhos futuros** – Neste último tópico são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para temas futuros.

CAPÍTULO II – CONCEITOS E ESTRUTURA DOS PARQUES EÓLICOS

2.1 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas é um fenômeno de natureza estocástica, com os seus principais parâmetros utilizados, em aplicações de engenharia padronizado a partir de medições de várias estações espalhadas pelo mundo. Há diversos tipos de sistemas de medição, como sistemas localizadores de raio (LLS) e medições diretas, este último, por exemplo o Morro do Cachimbo no Brasil, Mount San Salvatore na Suíça e diversos outros sistemas de detecção de descargas atmosféricas,

posicionados em vários países e continentes, com diversos climas e altitudes em relação ao nível do mar.

Na figura 2.1, observa-se os tipos de descargas atmosféricas nuvem-solo, as quais serão abordadas neste trabalho, que tem um percentual de cerca de 25% em relação as descargas atmosféricas, (IET ENERGY ENGINEERING, 2020). As torres eólicas são estruturas altas e frequentemente são instaladas em locais com alto grau de exposição de raio, algumas normas internacionais como a (IEC 61400-24, 2019), considera que o número de descargas/km²/ano (N_g) que pode atingir o aerogerador é o dobro do valor encontrado no mapa da figura 1.3 de cada local do Brasil, por exemplo, pois além das descargas atmosféricas negativas, pode-se haver também as positivas.

Alguns parâmetros das descargas atmosféricas para aplicações em engenharia, são de suma importância para o desempenho do sistema de aterramento e proteção contra descarga atmosférica a ser estudado, os principais são: valor de pico da corrente, taxa de crescimento da frente da onda (di/dt) e energia da onda, este último tem um forte impacto no dimensionamento da energia dos para-raios.

Há vários tipos e modelos de onda de descarga atmosférica, as mais utilizadas em estudos de proteção contra a descarga em estruturas são as de Heidler, (IEC 62305-1, 2010), primeira descargas positiva (10/350 μ s), primeira descarga negativa (1/200 μ s) e subsequente negativa (0,25/100 μ s), estas estão apresentadas na figura 2.2. A norma (IEC 61400-24, 2019) de proteção contra descarga em parques eólicos, dimensiona a performance contra descarga atmosférica dos componentes dos aerogeradores nas ondas padronizadas de Heidler. Outros normas com um enfoque mais em sistemas de potência, trabalham com a onda de duplo pico, com as (Cigre 781 WG C4.33, 2019) e (IEEE Std 1410 - 2010, 2010), esta última é utilizada, para o dimensionamento da proteção contra descargas em redes de distribuição (tipicamente com nível de tensão inferior a 69 kV). Na figura 2.3 é apresentada, através do somatório de 7 ondas de Heidler a descarga atmosférica subsequente de duplo pico, conforme apresenta, (De Conti & Visacro, 2007).

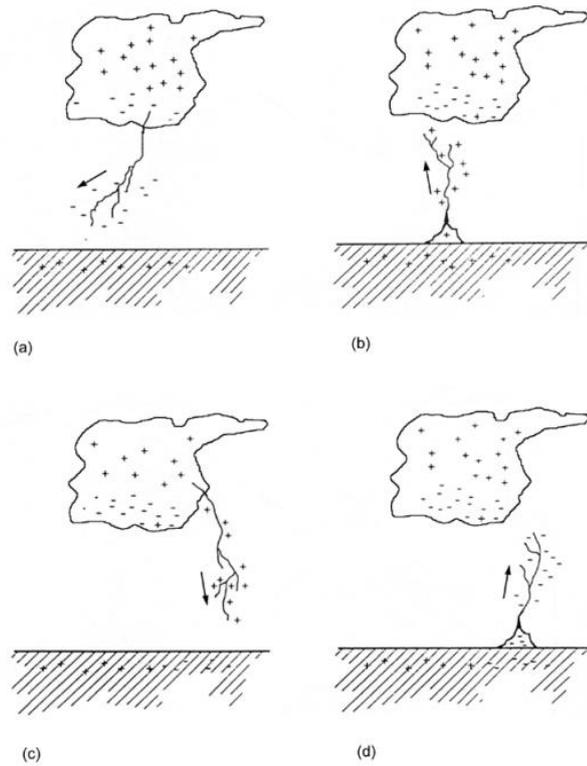


Figura 2.1 – Descargas atmosféricas nuvem-terra (a) Descarga descendente negativa; (b) descarga ascendente positiva; (c) Descarga Descendente positiva; (d) Descarga ascendente positiva, fonte: (Cigré 549, WG C4.407, 2013), adaptado.

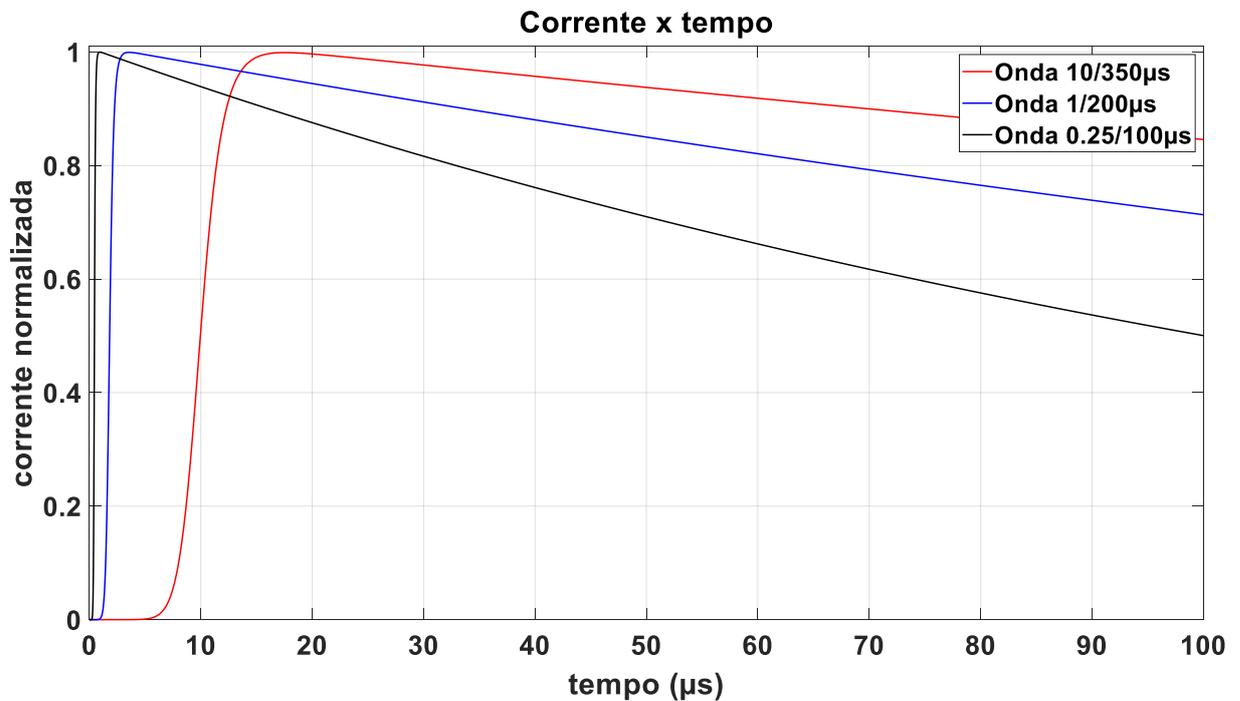


Figura 2.2 – Ondas de Heidler normalizadas 10/350 μs , 1/200 μs e 0,25/100 μs , fonte: Autor.

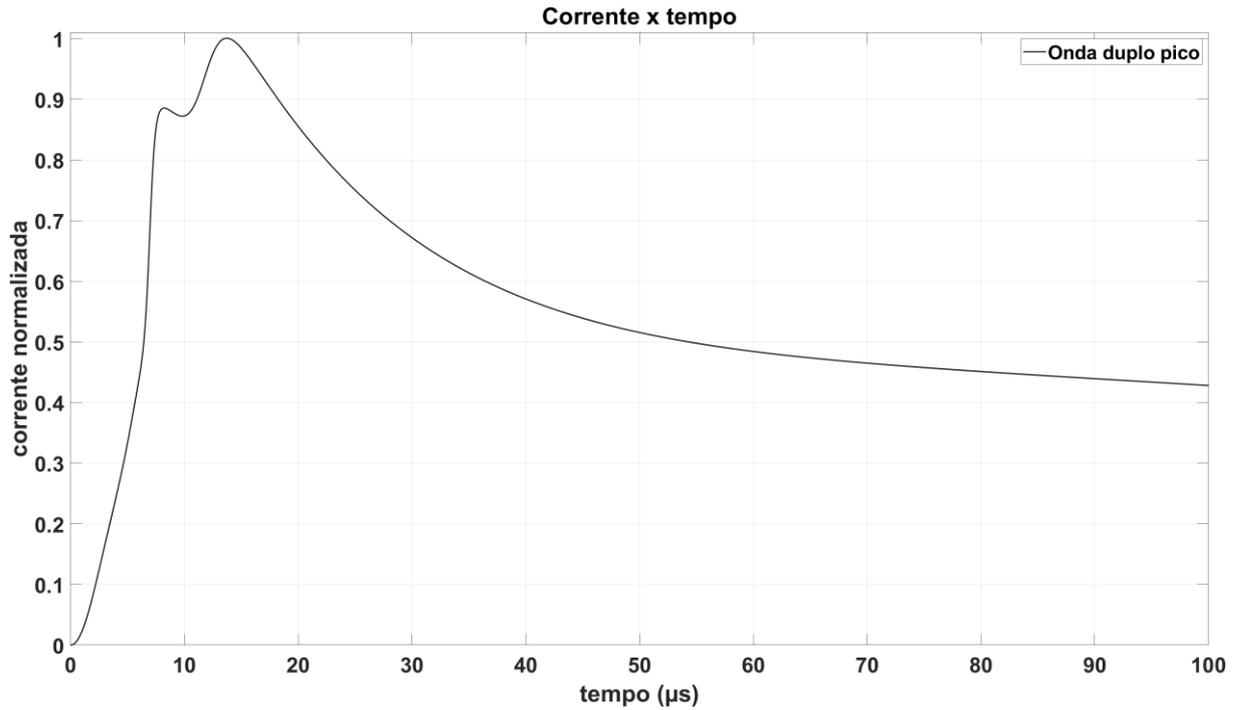


Figura 2.3 - Onda de duplo pico subsequente normalizada, fonte: Autor.

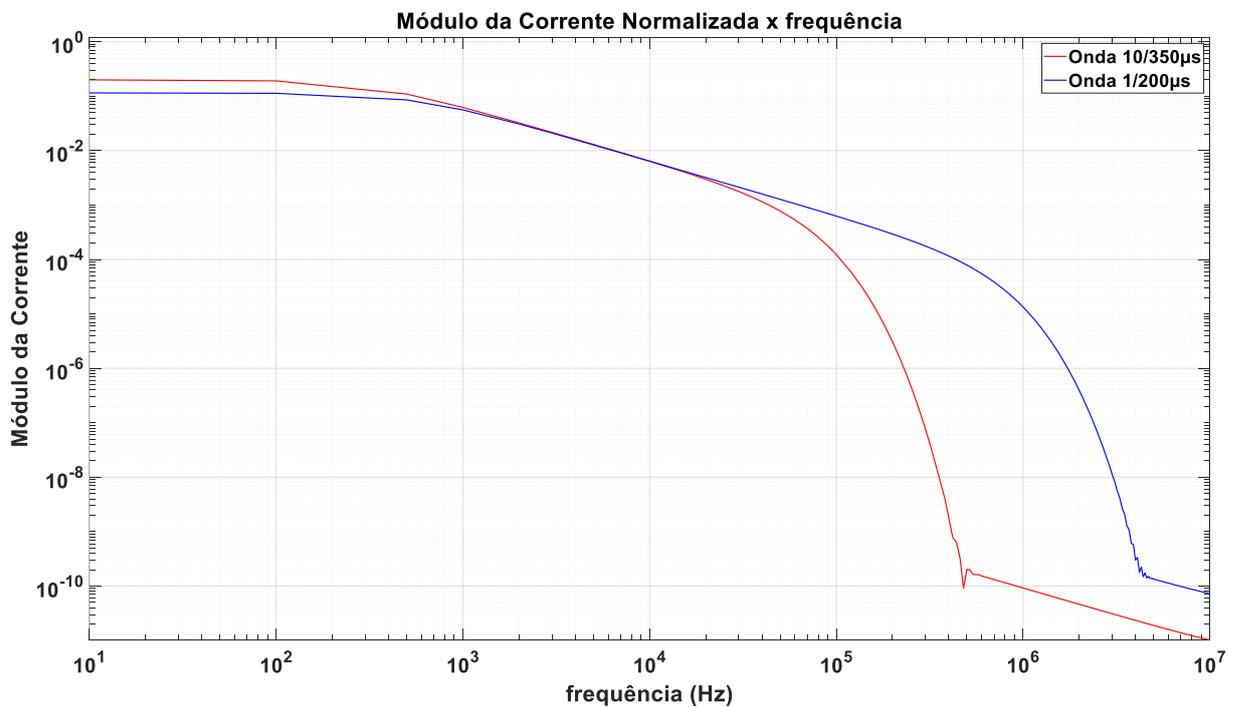


Figura 2.4 – Módulo das correntes normalizadas x frequência, fonte: Autor

As descargas atmosféricas comumente representada no domínio do tempo, tem um espectro característico de frequências no domínio da frequência, que representa o sinal, onde as descargas com maiores taxas de crescimento têm um

espectro com componentes de maiores frequências, conforme apresentado na figura 2.4, das ondas 10/350 μs e 1/200 μs . A descarga atmosférica 1/200 μs , devido sua alta taxa de subida tem um espectro de frequências superior ao da onda de descarga mais lenta.

2.2 Modelos geoeletricos do solo

Um dos parâmetros mais impactantes nos cálculos dos sistemas de aterramento, bem como seu desempenho frente a descargas atmosféricas é a resistividade do solo, que são obtidas a partir de campanhas de medições de campo, conforme os procedimentos normativos apresentados na (NBR ABNT 7117-1, 2020).

Em baixa frequência (60 Hz por exemplo), o comportamento de um sistema de aterramento é completamente diferente de alta frequência ou transitório (que contém um espectro de várias frequências que pode ser observado na figura 2.4), pois o fenômeno de variação dos parâmetros do solo com a frequência não precisa ser considerado o que não é válido para as altas frequências e transitórios, como pode ser observado na figura 2.5 num sistema de aterramento de um parque eólico que sofreu uma falta para a terra em um dos aerogeradores, numa simulação no domínio da frequência.

Em estudos de mapeamento das tensões de toque e passo, devido a uma falta para a terra no sistema elétrico de potência, podemos utilizar os valores das resistividades coletados em campo e construir um modelo geoeletrico de solo, com os levantamentos no site proporcional ao tamanho do sistema de aterramento, como sugere (FREIRE, 2022). Isto acontece, pois, quanto menor a frequência menor a atenuação da corrente no solo, como apresentado na figura 2.6, com três tipos de resistividades diferentes em função da frequência, tomando a apenas a parte real da propagação. A figura 2.6 também mostra que quanto maior a resistividade menor a atenuação, como era de se esperar pois o solo tem uma maior área efetiva, ou seja, uma maior dificuldade de dissipação da corrente no solo pelo sistema de aterramento.

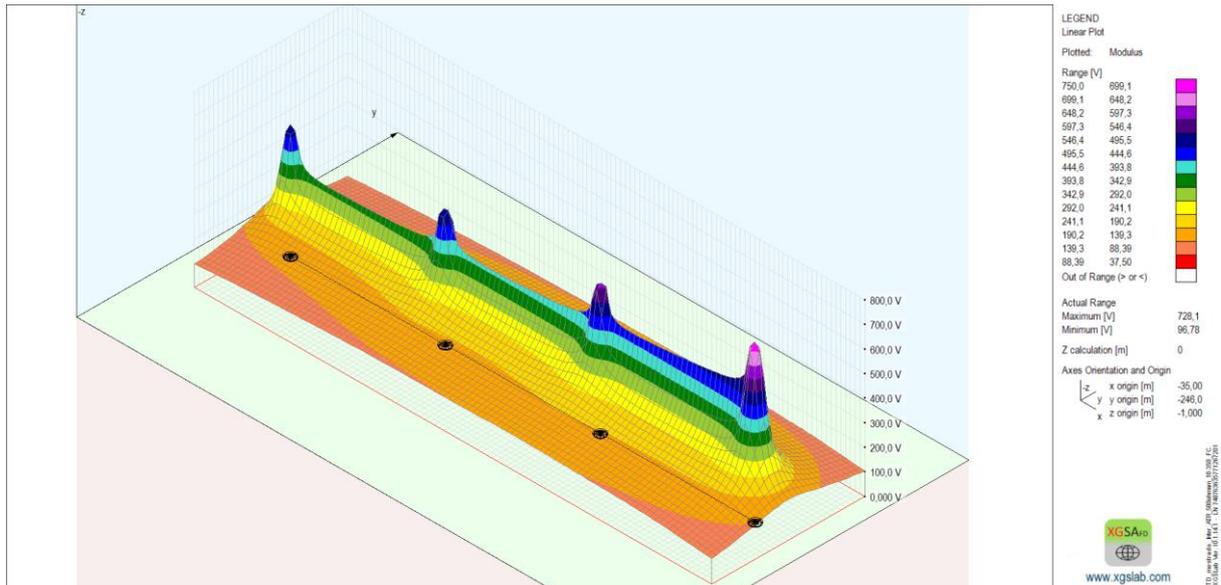


Figura 2.5 – Falta fase para terra no sistema de aterramento do parque eólico, fonte: Autor

A descarga atmosférica, devido seu amplo espectro de frequência, limitado geralmente a 4 MHz, como informa (Cigre 781 WG C4.33, 2019), tem uma grande concentração da densidade de corrente nas camadas mais superficiais. Diferente das baixas frequências, que tendem a penetrar em camadas mais profundas, o que exige modelos geoeletricos de solo mais profundos e em grandes sistemas de aterramento a utilização de sondagens pela combinação de técnicas de eletroresistividade.

Nas equações 2.1 e 2.2 são apresentados um modelo de correção dos parâmetros do solo com a frequência (Cigre 781 WG C4.33, 2019) que pode ser utilizado para o cálculo das variações dos parâmetros do solo com a frequência em sistemas de aterramento. Estes dados podem ser facilmente correlacionados com as medições em baixa frequência que são obtidas das campanhas de medições em campo, como por exemplo sugere a (NBR ABNT 7117-1, 2020).

$$\rho(f) = \frac{\rho_0}{1 + 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0,73} \cdot f^{0,54}} \quad \text{eq. 2.1}$$

$$\varepsilon(f) = 9,5 \times 10^4 \cdot \rho_0^{-0,27} \cdot f^{-0,46} + 12 \quad \text{eq. 2.2}$$

Onde:

$\rho(f)$ = Resistividade variável com a frequência [$\Omega.m$];

$\epsilon(f)$ = Permissividade do meio variável com a frequência [F/m];

f = frequência [Hz];

ρ_0 = Resistividade em baixa frequência [$\Omega.m$];

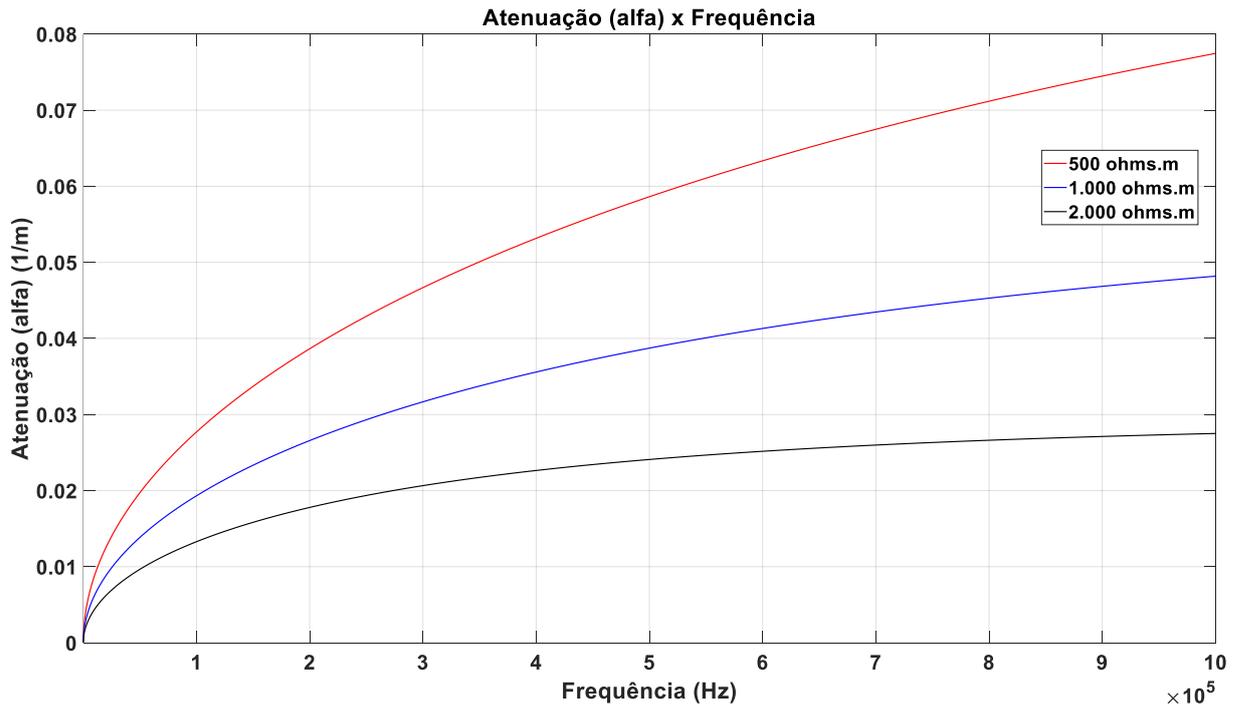


Figura 2.6 – Atenuação (alfa), parcela real x frequência, para três tipos de resistividades de solo, 500, 1.000 e 2.000 $\Omega.m$, fonte: Autor.

2.3 Sistemas de aterramentos de aerogeradores

Em sistemas de aterramentos de aerogeradores é muito comum a utilização de anéis concêntricos com cabos de cobre ou aço cobreado, com seções típicas de 70 mm². Os anéis são interligados à fundação dos aerogeradores através do barramento de equipotencialização principal (BEP), como apresentado na figura 2.7 em vermelho.

Este barramento de equipotencialização conecta todos os equipamentos da base da torre do aerogerador, bem como o aterramento dos cabos de descidas da

nacele do aerogerador, para integração dos aterramentos e condução da corrente da descarga atmosférica para o sistema de aterramento.



Figura 2.7 – Barra de equipotencialização principal do aerogerador, indicada em vermelho, Fonte: Catálogo Vestas.

As fundações dos aerogeradores são dimensionadas pelos engenheiros civis de fundações, sua utilidade na proteção contra descargas atmosféricas é fundamental na redução das sobretensões nos equipamentos, como apresenta, (Azevedo, Silva, Araújo, & Filho, 2021), (Shulzhenko, Yamamoto, & Rock, 2021) e (Alipio, Guimaraes, Passos, & Conceição, Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning, 2021).

Na figura 2.8 pode-se observar uma fundação típica de um aerogerador com diâmetro de 22 metros e seu anel de aterramento com diâmetro de 23 metros e quatro hastes de aterramento.

Em alguns parques eólicos, devido a fragilidade mecânica do terreno, são utilizadas fundações profundas do tipo estaca, com ferro estrutural (armada), o que este torna-se um eletrodo vertical, melhorando a proteção contra descargas atmosféricas e o sistema de aterramento como é apresentado em mais detalhes em, (Freire & Pereira, 2016).

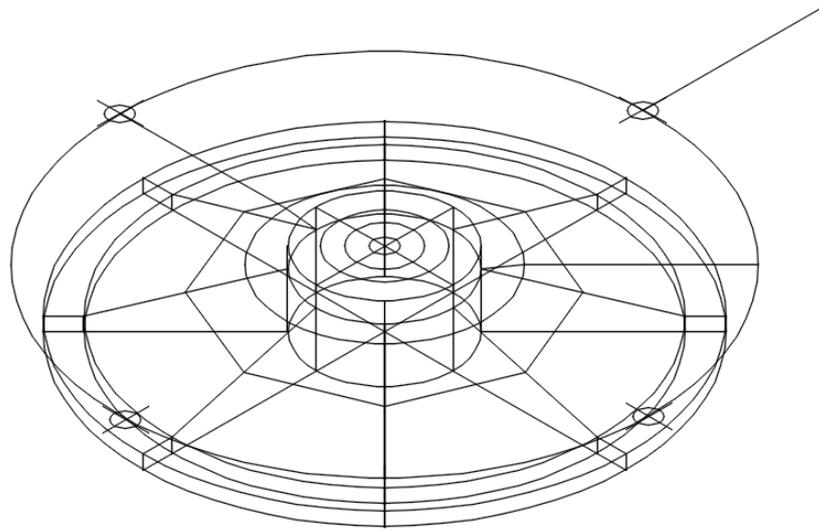


Figura 2.8 – Fundação e anéis de aterramento, típica de um aerogerador em três dimensões com 22 metros de diâmetro, fonte: autor.

2.4 Redes de média tensão

Os parques eólicos têm sua rede de média tensão que coleta a energia gerada nos aerogeradores e leva até a subestação coletora, onde é elevada a tensão e essa energia é injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN) ou no sistema de subtransmissão da distribuidora local.

Estas redes de média tensão são aéreas ou subterrâneas, com tensão típica de 34,5 kV, elas podem chegar há algumas dezenas de quilômetros de extensão. Em parques eólicos é utilizado as duas redes, na maior parte aérea, com trechos subterrâneos, este último é geralmente instalado entre o poste de transição (aérea para subterrânea) e os aerogeradores, com comprimento típico entre 80 e 200 metros, em travessias de acessos e na saída das subestações coletoras.

Nas entradas das subestações coletoras no setor de média tensão, são instalados cubículos de média tensão abrigados ou disjuntores ao tempo, dependendo do projeto. No caso dos cubículos devido aos aspectos construtivos, há uma necessidade de utilização dos cabos isolados para conexão com a rede.

Um dos principais motivo de indisponibilidade da rede de média tensão são as descargas atmosféricas que caem próximo da rede de média tensão. Dependendo

da resistividade do solo este tipo de evento pode ser um problema, visto que as tensões induzidas podem ser relativamente altas, pois o nível básico de isolamento destas redes é tipicamente da ordem de 200 kV.

A figura 2.9 apresenta um caso típico de aerogeradores em proximidade com a rede de média tensão. Esta proximidade, além de resultar em uma sobretensão conduzida, através da rede de média tensão, resulta também, em uma sobretensão induzida por acoplamento eletromagnético, devido à torre eólica se comportar como uma antena que irradia campos eletromagnéticos que são acopladas com a rede de média tensão.

Poucos são os trabalhos que apresentam uma modelagem completa das torres eólicas e suas respectivas conexões com as redes de média tensão, porém em nossa pesquisa, foram encontrados alguns artigos que abordam o tema, e que serão abordados na revisão bibliográfica.



Figura 2.9 – Rede de média tensão nas proximidades de um aerogerador, fonte: Google Earth ®.

2.5 Coordenação de Isolamento em parques eólicos

O estudo de coordenação de isolamento num parque eólico tem por objetivo basicamente a definição da suportabilidade de energia dos para-raios, o cálculo das cargas (em Coulomb), a localização física do para-raios e o cálculo das

sobretensões temporárias, decorrentes da ocorrência de faltas para a terra na rede de média tensão.

As sobretensões temporárias causam sobretensão sustentada no sistema de 34,5 kV quando a proteção atua, podendo o sistema operar nesta condição cerca de 2 segundos. Neste caso pode haver queima dos para-raios, por sobretensões temporárias, se o para-raios não for corretamente dimensionado. A instalação de para-raios de 36,2 ou 40 kV é uma prática muito usual de mercado para essa condição, contudo não é escopo deste trabalho a análise deste tipo de sobretensão. As normas da família da IEC 60099, pode auxiliar nestas especificações ou a (IEC 60099-5, 2018), pode-se avaliar as aplicações e recomendações.

Outros pontos importantes também de proteção são os painéis de comando e controle em baixa tensão, geralmente providos de dispositivos de proteções contra surtos (DPS). Neste trabalho as avaliações estão limitadas à bucha de média tensão do transformador elevador instalado na nacele de 34,5/0,69 kV.

Os transformadores instalados nas naceles são a seco, ou seja, suas capacitâncias são diferentes dos transformadores isolados a óleo, estes últimos que são imersos no óleo que tem uma capacitância maior.

A figura 2.9 mostra um diagrama típico de um aerogerador e sua conexão com a rede de média tensão. Observamos dentre os componentes principais, o transformador de três enrolamentos, que é responsável para elevação da tensão e seu terciário para alimentação dos controles das máquinas. Na base do aerogerador temos os disjuntores e dispositivos de manobra, representados pela sigla MVSG e os demais componentes como os para-raios e DPS.

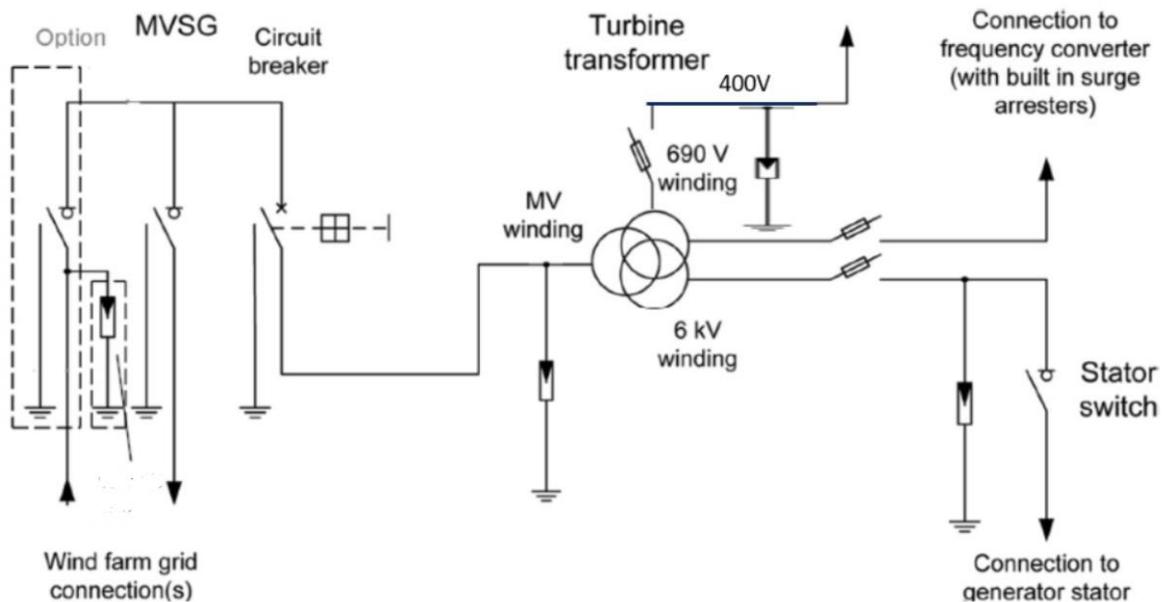


Figura 2.10 – Rede elétrica interna do aerogerador, fonte: Catálogo General Electric - GE.

CAPÍTULO III – REVISÃO E PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho foi baseado em uma vasta literatura consultada, desde textos científicos do Cigré, Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), International Electrotechnical Commission (IEC), livros e periódicos, onde foi levado em consideração aspectos existentes no mercado, como potência dos aerogeradores, dimensões e sistemas de aterramentos reais, baseados em aplicações práticas e teóricas.

Uma das primeiras análises realizadas, foi o entendimento dos fenômenos eletromagnéticos envolvidos nos transitórios, desde os conceitos de linhas de transmissão (Cardoso, 2011), (Bewley, 1933) e (Fuchs, 2015), conceitos e revisões de eletromagnetismo (Sadiku, 2012) e (David K, 2014) e em teoria de antenas (Visser, 2015) e (Balanis, 2009).

Após essa revisão de conceitos básicos para implementação de aplicação destes conceitos, foram pesquisados, uma vasta literatura aplicada no setor de renováveis, focada em parques eólicos, algumas das quais serão resumidamente apresentadas adiante.

Um dos primeiros critérios utilizados, foi o conhecimento da referência normativa abordada na (IEC 61400-24, 2019), que apresenta vários aspectos da proteção contra descargas atmosféricas em parques eólicos. Este documento apresenta recomendações para os fabricantes de aerogeradores a serem seguidas em seus equipamentos, principalmente nas pás, pois este é geralmente o primeiro elemento a ser atingido pela descarga atmosférica e que é de difícil manutenção e reparo, que requisita paradas longas da geração.

Esta norma também apresenta as formas de ondas, correntes de pico, energia e cargas a serem utilizados nos ensaios de proteção contra descargas atmosféricas dos aerogeradores e próximo destes, como por exemplo nas redes de média tensão, estimativa de riscos de danos, acidentes e de descargas atmosféricas atingidas diretamente nos aerogeradores, baseado em análise de risco específica.

Destaca-se nesta norma os cuidados com o projeto do sistema de aterramento, serem considerados nos cálculos das sobretensões nos equipamentos internos e conduzidas para os aerogeradores vizinhos, ou seja, não há uma ligação direta disso com um valor de baixa resistência em baixa frequência (60Hz por exemplo), como por exemplo 10Ω , pois dependendo do ponto de injeção da descarga atmosférica e como o sistema está interligado a impedância impulsiva do sistema de aterramento muda consideravelmente.

Um ponto interessante, apresentado no anexo A, é o ambiente de descargas atmosféricas que estão sujeitas as turbinas eólicas, baseado no trabalho (Rakov & Uman, 2003). Neste trabalho ele elucida a importância da consideração tanto das descargas descendentes, quanto das ascendentes, além dos problemas de compatibilidade eletromagnética gerados devido às descargas ascendentes que foram iniciadas nos aerogeradores e não foram conectadas com um líder para que ocorra a descarga de retorno.

No anexo Q da norma IEC também são apresentadas algumas recomendações para os sistemas de aterramento, preocupações com os roteamentos de cabos metálicos e principalmente a recomendação de interligação dos aterramentos de alguns aerogeradores para melhoria da proteção contra descarga atmosférica e redução dos potenciais perigosos no caso, por exemplo, de uma falta para a terra.

Há alguns trabalhos publicados no Cigré, como o de (YAMAMOTO, et al., 2020), que abordam os cuidados e problemas que existem no Japão com turbinas

eólicas e sua expansão no país. Este artigo aborda a segurança de pessoas por um raio que cai por exemplo numa torre e causa algum dano físico e projeta no solo partes das pás, por exemplo. Alguns testes para o sistema de proteção contra descarga são sugeridos, com a utilização de ondas viajantes e de teoria de antenas, além de sensores instalados no sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

O trabalho revela que um dos módulos de falhas e incidentes ocorridos nos aerogeradores são decorrentes das descargas atmosféricas e que representam um percentual de 11%.

Este trabalho também mostra a necessidade de instalação de sensores para proteção contra descargas atmosféricas e de recursos para desligamentos das máquinas em casos de surtos, que contribuem para a redução de danos e melhoria da segurança da operação. Outro ponto também é a recomendação de instalação de sensores, para não haver sinais errôneos, que podem ser irradiados, por exemplo, pelo aerogerador vizinho.

Alguns ensaios e testes de continuidade dos sistemas de captação, descida e conexão do sistema da torre eólica são apresentados. Um dos ensaios apresentado é baseado no conceito de onda viajantes, através da injeção de uma onda ao longo da pá do aerogerador e cálculo do tempo de reflexão de acordo com seu comprimento, para a checagem do ponto de rompimento do condutor interno a pá do aerogerador. Uma desvantagem desse método é quando há um rompimento do subsistema de captação próximo a extremidade da pá, devido às diferenças entre os tempos de viagem da onda, não serem significativos nestes casos, podem gerar resultados inconsistentes.

Um livro recente, publicado com vários conceitos de proteções contra descargas atmosféricas aplicados a sistemas de potência é o (The Institution of Engineering and Technology, 2020). O capítulo dedicado aos sistemas eólicos explica a importância da consideração das análises de proteções contra descargas atmosféricas, os impactos causados pelas descargas atmosféricas e alguns danos possíveis que as descargas atmosféricas podem causar nas turbinas.

Na figura 3.1, pode ser observado o circuito típico de um aerogerador a ser considerado quando este é atingido por uma descarga atmosférica direta na pá, onde as sobretensões de GPR são dependentes da geometria da torre, da impedância de aterramento e da forma de onda da descarga atmosférica. O raio tem um amplo espectro de frequências, com componentes de frequências elevadas, e

devido ao efeito indutivo nos condutores do sistema de aterramento, pode ocorrer sobretensões elevadas.

Mesmo com a resistência de aterramento (em 60Hz) sendo abaixo dos 10 Ω , tipicamente exigida pelos fabricantes de aerogeradores, não é, necessariamente, indicativo de um bom sistema de aterramento. O que enfatiza, que o arranjo do sistema de aterramento e como eles estão interligados entre os demais aerogeradores, tem um impacto maior do que apenas um valor de resistência em baixa frequência. O raio que atinge um aerogerador tem uma impedância impulsiva, pois este tem um espectro de frequências no domínio do tempo, diferente por exemplo de uma falta para a terra, como um curto-circuito.

Outros componentes afetados por essas sobretensões são os equipamentos de baixa tensão, de controle e supervisão, protegidos por dispositivos de proteções contra surtos (DPS), que são largamente utilizados nestas turbinas. As sobretensões nos componentes de baixa tensão pode ser causadas por acoplamentos indutivos ou transferidos pelo lado de média tensão do transformador.

Um tipo de descarga atmosférica citado nessa referência, mas não muito comum, é a direta na nacelle, que pode ser muito mais severa, principalmente para os equipamentos de baixa tensão instalados nela.

Em complexos eólicos há também uma preocupação com a segurança das pessoas que trabalha no parque, a norma (IEEE Standard Association 2760, 2020), apresenta recomendações e sugestões com relação a eventos de curto-circuito, cuidados com as tensões de passo e toque, campanhas de medições de resistividade do solo e métodos de interligações entre os aerogeradores. Estas interligações podem ser realizadas através dos cabos para-raios das redes de média tensão, blindagens dos cabos isolados e através de cabo nu enterrado, este último objeto do escopo deste trabalho e que será considerado nas modelagens.

O artigo de (Zhang, Fang, Wang, Zhao, & Zou, 2017), avalia os parques eólicos offshore, porém este trabalho aborda o tamanho dos componentes, onde a influência da altura da torre nas sobretensões geradas por descargas atmosféricas é significativa, sendo que o parâmetro da altura está vinculado diretamente à impedância de surto. Quando aumentamos a altura da torre, temos um aumento das sobretensões, além de um aumento nas frequências oscilatórias chegando a cerca de 5 MHz para uma torre de 150 metros de altura, como é citado no trabalho.

Outro trabalho que aborda a proteção contra descargas atmosféricas de aerogeradores interligados é o de (Alipio, Guimaraes, Passos, & Conceição, Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning, 2021), que apresenta uma abordagem híbrida, usando também o Hybrid Electromagnetic Model (HEM), (Visacro & Soares, 2005). Para solução do sistema de aterramento foi utilizado o HEM, após este resolvido, foi utilizada a técnica de Vector Fitting, (Gustavsen & Semlyen, 1999) e tratado num ambiente de circuitos ou domínio modal no ATP para composição das partes imersas no ar onde foram calculadas as respectivas impedâncias de surto e os parâmetros variantes com a frequência no sistema de aterramento.

Após a modelagem, foram apresentadas as impedâncias harmônicas e a influência da conexão entre os 5 aerogeradores em forma de cruz, apresentado na figura 3.2, onde foi observado que em baixa frequência, quanto maior a quantidade de aerogeradores, menor a impedância, já em transitórios estas curvas convergiam, devido as componentes de alta frequência e ao aumento da atenuação no caso de descargas atmosféricas.

Foi apresentado também que a magnitude dos GPR's são maiores, quando maior as resistividades do solo, tendo um maior impacto na adição de mais aerogeradores, principalmente em solos de alta resistividade. Em meios com maiores resistividades, há uma atenuação menor que os mais condutivos ao longo do sistema de aterramento interconectado, então os aerogeradores mais distantes têm uma contribuição maior para redução do GPR, porém após a conexão de mais de três aerogeradores, a influência na impedância harmônica é reduzida, mesmo no caso de um solo de $3.000 \Omega.m$, para uma descarga de frente lenta ($8/75\mu s$).

Foram apresentados os GPR's em vários modelos de solo para uma descarga atmosférica com frente lenta e rápida, onde observou-se que quanto mais eram adicionados aerogeradores, os valores de GPR's eram reduzidos. Quanto maior a resistividade do solo, maior era este impacto na redução, com a onda de frente lenta.

Neste trabalho foi apresentando um arranjo em que o aerogerador central foi atingido pela descarga atmosférica (ver figura 3.2), onde a corrente se divide em quatro caminhos, no caso em que há os cinco aerogeradores considerados na simulação. Em um solo de baixa resistividade ($300 \Omega.m$) e com a onda de frente rápida, ou seja, com componentes de elevadas frequências em seu amplo espectro,

ainda ocorreu uma redução significativa nas sobretensões na adição do quinto aerogerador em comparação com o caso com apenas três unidades. Esta resposta seria completamente diferente caso os aerogeradores estivessem alinhados, onde vem a importância de considerar uma modelagem real e que represente o físico.

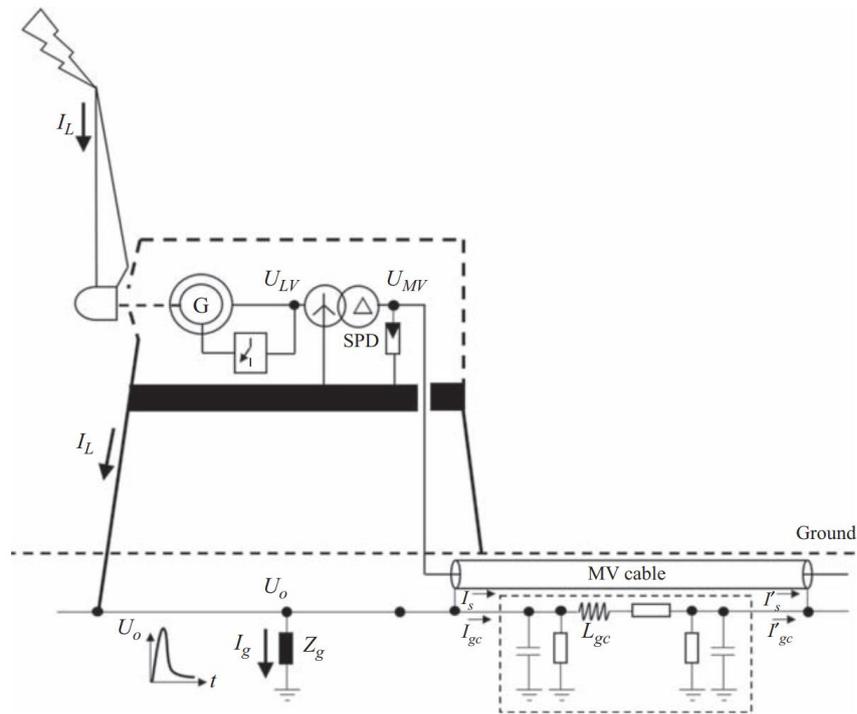


Figura 3.1 - Circuito típico de um estudo de coordenação de isolamento de parques eólicos, fonte: (*The Institution of Engineering and Technology, 2020*)

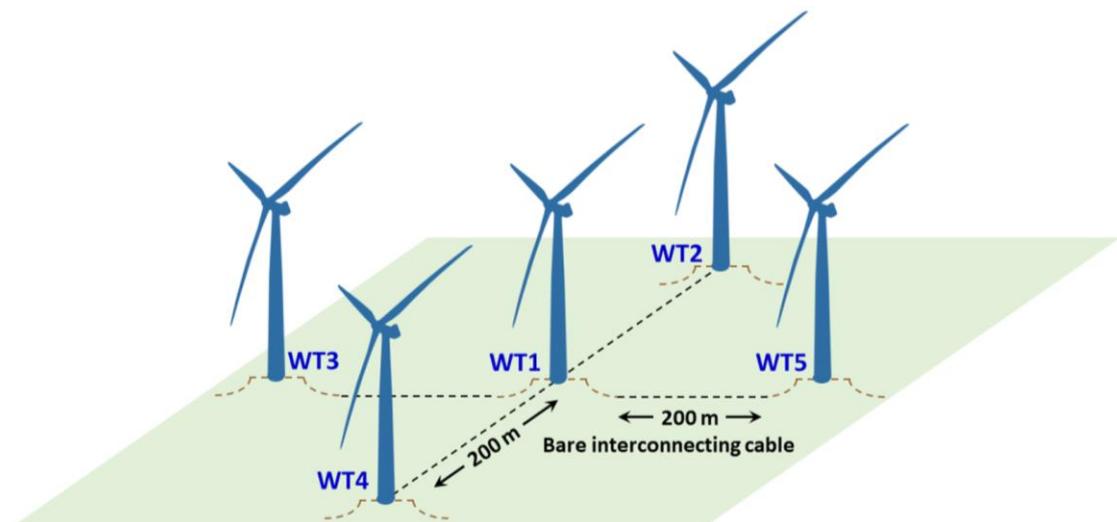


Figura 3.2 – Sistema de aterramento interligado entre os aerogeradores, fonte: (*Alipio, Guimaraes, Passos, & Conceição, Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning, 2021*)

O artigo do (Moein Nazari & Dawalibi, 2020), apresenta os métodos numéricos para aplicação em descargas atmosféricas em sistemas de aterramento, através do método dos momentos (MoM) que utiliza solução de onda completa, em configurações simples por meio de eletrodos verticais e horizontais, considerando o teor de umidade e a variação dos parâmetros do solo com a frequência e em sistemas mais complexo, inclusive imersos no ar.

Foi mostrada a aplicação de uma descarga direta em solos uniforme e estratificados, onde foi constatado que o GPR tem uma maior variação quando considera-se os parâmetros do solo com a frequência em solos de maior resistividade (ou menor percentual umidade). O trabalho também mostra que no caso das descargas indiretas (próximas ao sistema de aterramento) mesmo não considerando a variação dos parâmetros de solo com a frequência, o incremento do GPR é menor que 10% em solos de resistividades de 1.000 Ω .m. Isso ocorre pois para as descargas indiretas, a variação dos parâmetros de solo com a frequência, só passa a ser significativo após os 2.500 Ω .m.

Por fim este trabalho apresenta as descargas atmosféricas em sistemas mais complexos, como os dos aerogeradores. Foi considerado um aerogerador com 100 metros de altura e com 50 metros de pá, totalizando uma altura de 160,2 metros.

Neste estudo foi utilizado apenas solos uniformes de 100 e 1.000 Ω .m, com parâmetros constantes, variantes com a frequência e com o teor de umidade. Inicialmente foi apresentado o GPR em função da frequência sem o aerogerador e observa-se que as resistividades têm um peso significativo nas magnitudes dos GPR's, como era de se esperar.

Nos gráficos que apresentam os valores das tensões x frequência no topo da pá, onde foi atingido pela descarga, observa-se que a resistividade do solo tem um impacto quase desprezível no espectro de frequências.

No ponto B (no solo), temos uma variação pouco significativa, também. O interessante de se observar é que há uma ressonância em torno da frequência de 380 kHz, que é a frequência de oscilação do transitório nos primeiros 10 μ s, devido a estrutura de 160 metros (pá + estrutura da torre).

Nas demais simulações, são apresentados os valores sem o aerogerador para a primeira descarga e subsequente, há um maior impacto no GPR, quando se considera a variação da resistividade do solo com a frequência na descarga

subsequente, no entretanto esta é mais significativa a diferença, devido a propagação e suas componentes de maiores frequências contidas em seu espectro.

Com o aerogerador e o sistema de aterramento, os valores das sobtensões na pá (ponto de injeção da descarga atmosférica), há uma influência desprezível quando é modificada a resistividade do solo nas descargas subsequentes e pouco significativa na primeira descarga, sendo mais significativa na cauda da onda da primeira descarga, onde há componentes de menores frequências.

Uma das mais importantes conclusões deste trabalho, que faz parte do escopo desta dissertação de mestrado é que a não modelagem dos componentes da torre, nacela e pá, ou seja, das estruturas acima do solo, muda consideravelmente as frequências de oscilação das respostas transitórias do sistema e as sobretensões que ocorrem nos equipamentos. Dependendo da descarga atmosférica e da dimensão física da torre, a não consideração do conjunto torre-nacela-pá, muda consideravelmente os resultados.

Outra publicação de suma importância para este trabalho, e é abordada também nesta dissertação é a (Aghabarati, et al., 2017), que mostra a análise das sobretensões nos cabos com blindagem e condutores nus no interior dos aerogeradores, que são utilizados para escoamento da potência gerada pela turbina no caso de cabos blindados de média tensão e os condutores nus são utilizados para interligação dos equipamentos no topo da nacela para interligação ao BEP (barramento de equipotencialização principal) por exemplo.

Foram modelados os cabos blindados e condutores nus dentro da nacela e torre e foram avaliadas as correntes ao longo dos respectivos trajetos, instalados na nacela e na torre de descida, onde foram avaliadas as correntes nas blindagens e em seus respectivos núcleos.

Foi observado que os cabos blindados mais afetados são os instalados na nacela com correntes no núcleo cerca de 1,5 vezes maior que na torre e cerca de 20 vezes maior nas blindagens.

O campo elétrico calculado em pontos da nacela, torre início e torre meio, apresentam uma maior magnitude na nacela, cerca de 5 vezes maior que no meio da torre, ou seja, o campo elétrico tende a reduzir a medida que nos afastamos da nacela, que é o local mais crítico e próximo ao ponto de injeção da descarga atmosférica.

Observou-se que no caso dos condutores nus, temos uma corrente menor na nacele e maior na torre. Fica comprovada a importância da utilização dos cabos com blindagem, componente importante na atenuação das correntes induzidas nos condutores internos, como, por exemplo, de comunicação, quando providos de partes metálicas.

Um trabalho também voltado para descargas atmosféricas diretas em aerogeradores interligados, que também faz parte do escopo desta dissertação, é o (Sekioka, Ootoguro, & Funabashi, 2019), que enfatiza os cuidados com as sobretensões oriundas das descargas atmosféricas nos cabos isolados que interligam os aerogeradores as redes de média tensão coletoras, baseado no tipo de aterramento da blindagem do cabo.

Geralmente são empregados os dois tipos de aterramentos em parques eólicos o *single bonding*, aterrado em apenas uma extremidade e a outra aterrada através de um para-raios de blindagem ou *solid bonding*, solidamente aterrado em ambas as extremidades. O *solid bonding* faz com que as velocidades de propagação sejam menores, o que reduz as sobretensões, a grande desvantagem deste tipo de aterramento é a redução da ampacidade do condutor, devido ao seu maior aquecimento e maiores perdas.

A importância da análise do sistema de aterramento da blindagem do cabo isolado interno ao aerogerador nas sobretensões, tem uma diferença significativa, principalmente na base da torre dos aerogeradores, que possui vários equipamentos de manobra que seus isolamentos precisam estar corretamente dimensionados para evitar queima.

Outro fato importante é que as sobretensões nos cabos isolados são dependentes das impedâncias dos sistemas de aterramentos, visto que com o aumento desta impedância, temos uma elevação nas sobretensões nos cabos isolados.

Por fim, não se limitando apenas às revisões bibliográficas apresentadas no presente capítulo para os desenvolvimentos desta dissertação, temos o livro (Pinto, 2013), um livro que aborda os fundamentos das energias eólicas em geral, em seu capítulo 13 elucida as questões de aterramento e proteção contra descargas atmosféricas em aerogeradores.

Este capítulo apresenta aspectos relacionados aos raios no Brasil e mostra que no passado, pensava-se que devido as pás serem feitas tipicamente de fibra de

vidro, material não condutor, não haveria preocupações com descargas atmosféricas. A prática demonstrou que esta premissa não era verdadeira e que havia pás de aerogeradores sendo destruídas.

Outro tópico deste capítulo aborda a área de influência das torres, conforme recomenda a (IEC 61400-24, 2019), bem como as proteções e cuidados com os cabos que adentram as torres eólicas e suas interligações.

No final do capítulo são abordadas as interligações entre os sistemas de aterramento e os tipos de fundações do tipo sapata e estacada. Neste trabalho são abordadas apenas as fundações do tipo sapata (por gravidade), porém as fundações do tipo estaca contribuem para redução das sobretensões oriundas de descargas atmosféricas e redução do GPR e claro impedância de aterramento no caso de uma falta para a terra.

CAPÍTULO IV - MÉTODO NUMÉRICO DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL

4.1 Introdução

As soluções quase estáticas eram adequadas mesmo para os sistemas de maior desempenho. Problemas como as quedas de tensão transitórias devido a grandes correntes de chaveamento foram descobertos muito cedo. Isso estimulou e ampliou o trabalho em cálculos de indutância parcial para problemas de dimensão cada vez maior. Na década de 1990, a modelagem de chips de maior desempenho e os pacotes se tornaram um problema com a corrida por taxas de *clock* mais altas em chips de computador. Esta levou à necessidade de soluções de onda completa. Como consequência, problemas de estabilidade e passividade tornou-se importante. Hoje, aspectos como perda por efeito pelicular e modelos de perda dielétrica são necessários para modelos realistas, (E. RUEHLI, ANTONINI, & JIANG, 2017).

Modelos aproximados de circuitos equivalentes de PEEC baseados em componentes físicos, podem ser construídos, que são muito úteis para uma infinidade de propósitos (E. RUEHLI, ANTONINI, & JIANG, 2017) como, por exemplo, análise de sistemas de aterramentos e transitórios eletromagnéticos.

O método PEEC também é uma técnica baseada em equações integrais. O método é baseado no potencial misto equação integral (MPIE) da qual um circuito equivalente é extraído. (Cigré TB 785, 2019).

Ao contrário da equação diferencial o qual são baseados outros métodos, o método PEEC tem menos incógnitas do que o método baseado em equação diferencial, uma vez que não requer discretização de todo o espaço do domínio. Embora as matrizes resultantes sejam densas, solucionadores rápidos e recentes melhoraram muito o tempo de solução para simulações PEEC (Cigré TB 785, 2019).

Nos últimos 30 anos, o desenvolvimento do PEEC vem crescendo em várias áreas, como a de radiação eletromagnética, modelo de linhas de transmissão, problemas de dispersão, circuitos eletrônicos, análise de antenas, efeitos das descargas atmosféricas, elevação de potências no solo em problemas de descargas atmosféricas em sistemas de potência, (Cigré TB 785, 2019).

Com o rápido aumento dos poderes de processamento, memória de e dos demais recursos computacionais, ficou muito mais fácil a aplicação de métodos numéricos para soluções das equações de Maxwell, mesmo em soluções de grandes sistemas, inclusive em computadores pessoais.

Alguns documentos técnicos, como o (Working Group Cigré C4.501 TB 543, 2013), comentam que os métodos de onda completa (Full-wave), estão se tornando promissores para simulação de fenômenos transitórios complexos, tipo de problema que não pode ser resolvido diretamente através da teoria de circuitos (incluindo a teoria de linha de transmissão).

A teoria baseada em circuitos, apresenta maior dificuldade para resolver problemas de transitórios complexos em meios como sistemas de aterramento, cabos etc. Inicialmente a teoria de circuitos precisa de uma certa “calibração” dos parâmetros para utilização, o que torna muitas vezes complicado e difícil, (Working Group Cigré C4.501 TB 543, 2013).

Por outro lado, as soluções eletromagnéticas, vem resolvendo este problema, porém exigem muito mais esforço computacional e algumas definições de condições de contorno, que nem sempre são simples, (Working Group Cigré C4.501 TB 543, 2013).

O método do Circuito equivalente de elemento parcial (PEEC) é derivado das equações de Maxwell e prover uma solução em onda completa. Este método pode ser utilizado no domínio do tempo e da frequência, (S. Wang, 2010). Neste trabalho

utilizamos o método PEEC para a solução dos problemas de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo e da frequência. Nos próximos tópicos é apresentado o modelo matemático deste método.

4.2 Método PEEC para uma estrutura de fio fino

A derivação teoria do método PEEC para a estrutura do fio começa a partir de um campo elétrico total em uma superfície de fio. Através da aproximação de um fio fino, correntes e densidades de carga são assumidas como distribuídas ao longo do contorno do eixo do fio ($C(\mathbf{r})$). A condição de contorno na superfície do fio fino é ilustrada na figura 4.1 e o campo elétrico tangencial total pode ser definido pela equação 4.1, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

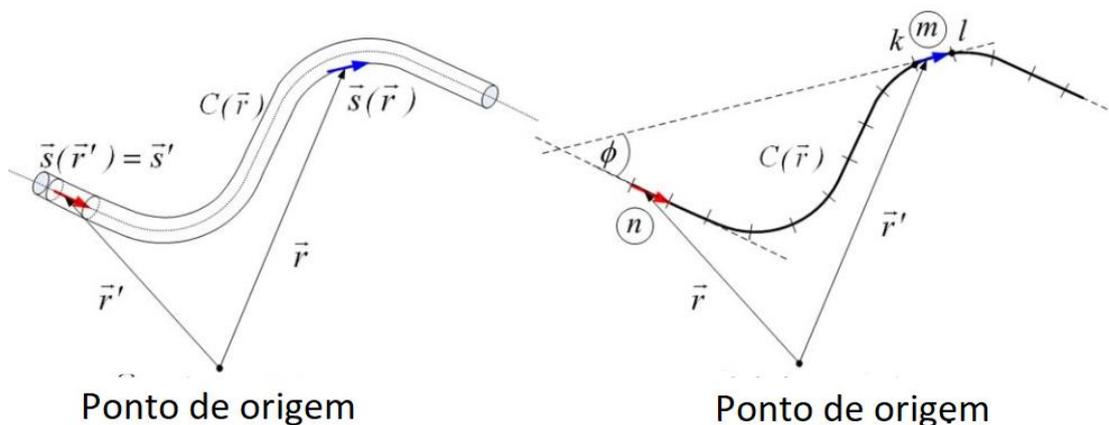


Figura 4.1 – Geometria do problema, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011), adaptado

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{E}^t(\mathbf{r}) = \mathbf{s} \cdot (\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r})) = \mathbf{s} \cdot \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r})}{\sigma} \quad \text{eq. 4. 1}$$

Onde:

\mathbf{s} vetor unitário tangencial ao longo de $C(\mathbf{r})$

\mathbf{s}' vetor unitário tangencial da superfície do fio

\mathbf{E}^i campo elétrico incidente

\mathbf{E}^s campo elétrico de espalhamento, pela reação do fio ao campo incidente

O problema do campo elétrico de espalhamento é calculado pelo volume das densidades de correntes e um volume de densidades de cargas os quais são expressos em termos do vetor potencial magnético ($\mathbf{A}(\mathbf{r})$) e do potencial escalar elétrico ($\phi(\mathbf{r})$) no ponto \mathbf{r} . Assumindo um fio fino, $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ e $\phi(\mathbf{r})$ podem ser escritos na forma de corrente ao longo do condutor ($I(\mathbf{r}')$) e de uma linha de densidade de carga ($\rho_l(\mathbf{r}')$), que pode ser observado através da figura 4.1 e as equações 4.1 a 4.3, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

$$\mathbf{E}^s = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\phi \quad \text{eq. 4.2}$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \mathbf{s}' I(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' \quad \text{eq. 4.3}$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\hat{\epsilon}} \int_C \rho_l(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' \quad \text{eq. 4.4}$$

Onde ds' é uma pequena distância ao longo de $C(\mathbf{r})$, $\hat{\epsilon} = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ e γ é a constante de propagação do meio dado através da equação 4.5.

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad \text{eq. 4.5}$$

A dependência com o tempo das variáveis no domínio da frequência é expressa por $\exp(j\omega t)$. Os símbolos σ , ϵ , μ , ω , representam a condutividade, permissividade, permeabilidade do meio e a frequência angular, respectivamente.

Substituindo as equações 4.2 a 4.4 em 4.1 e obtemos então a equação 4.6, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) - \mathbf{s} \cdot \frac{I(\mathbf{r})}{\sigma_l} - j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_C \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}' I(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' - \frac{d\phi}{ds} = 0 \quad \text{eq. 4.6}$$

Onde σ_l é a condutividade por unidade de comprimento do condutor.

A figura 4.2 mostra que os condutores são segmentados em dois grupos. O primeiro grupo 4.2(a) tem N elementos e o segundo grupo 4.2 (b) tem M elementos. Os elementos dos dois grupos são intercalados entre si. As configurações dos elementos do primeiro e segundo grupo são usados para calcular as impedâncias série e admitâncias em derivação, respectivamente, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

Da equação 4.6, um elemento m com comprimento L_m para o nó k e l no primeiro grupo é considerado. Rearranjando e integrando a equação 4.6 ao longo do segmento m de um ponto k até o ponto l , temos as equações 4.7 e 4.8, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

$$\int_k^l \frac{d\phi}{ds} ds = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{s'=k}^{s'=l} \int_C \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}' I(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' ds - \int_{s'=k}^{s'=l} \frac{I(\mathbf{r})}{\sigma_l} ds + \int_k^l \mathbf{s} \cdot \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) ds \quad \text{eq. 4.7}$$

$$\phi_l - \phi_k = \phi_{lk} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{s'=k}^{s'=l} \int_C \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}' I(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' ds - \int_{s'=k}^{s'=l} \frac{I(\mathbf{r})}{\sigma_l} ds + \int_k^l \mathbf{s} \cdot \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) ds \quad \text{eq. 4.8}$$

Os primeiros termos do lado direito das equações 4.7 e 4.8 podem ser expressos através das equações 4.9 e 4.10.

$$j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{s'=k}^{s'=l} \int_C \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}' I(\mathbf{r}') \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' ds = \sum_{n=1}^N (Z_{Lmn} I_{Ln}) \quad \text{eq. 4.9}$$

$$Z_{Lmn} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_m} \int_{L_n} \frac{\exp^{-\gamma R} \cos \phi}{R} dl_n dl_m \quad \text{eq. 4.10}$$

A corrente ao longo de cada pequeno elemento é assumida como constante. Os tempos de propagação entre quaisquer pontos no elemento n a qualquer ponto do elemento m são assumidos idênticos, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

Considere o elemento cujo centro está no nó k no segundo grupo da figura 4.2(b). Assumindo constante a densidade de carga ao longo deste elemento e conservando a carga, a densidade de carga, pode ser calculada pela equação 4.11.

$$\rho_l = \frac{(I_{Lm} + I_{L0} + I_{Lp})}{j\omega L_k} = \frac{I_{Tk}}{j\omega L_k} \quad \text{eq. 4.11}$$

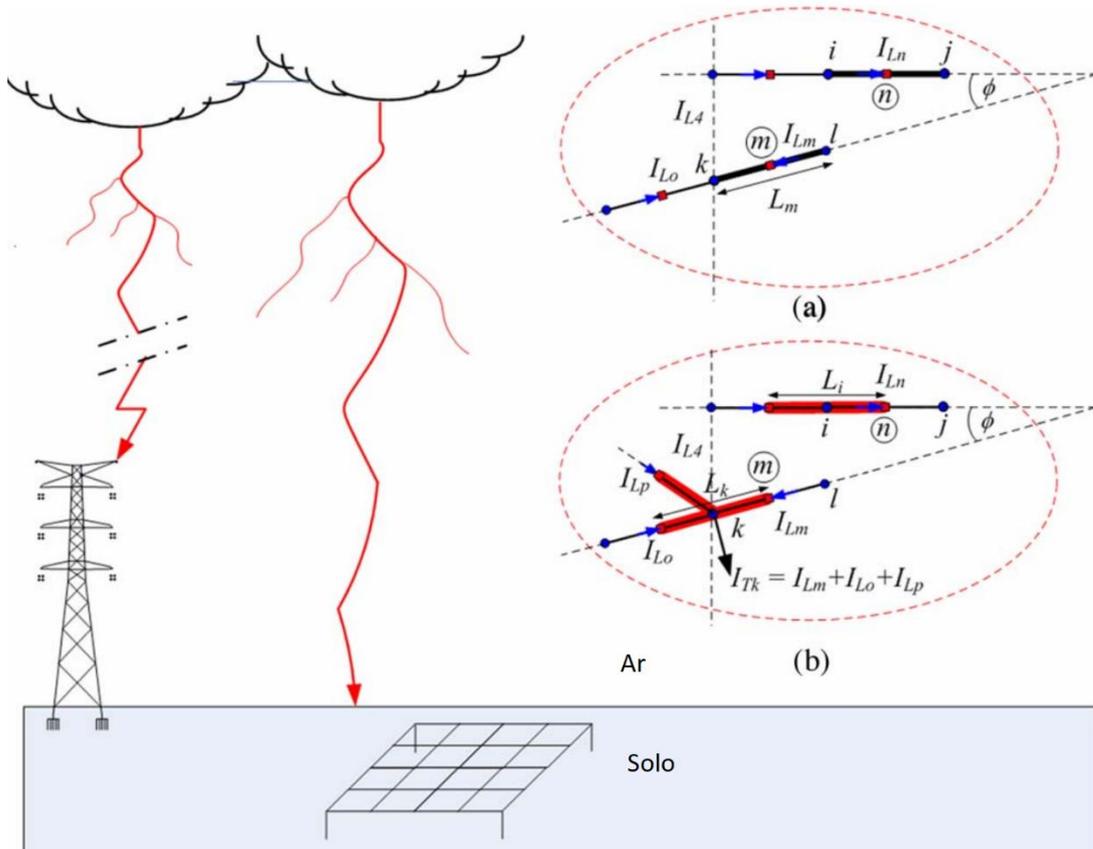


Figura 4.2 – Configuração dos elementos nos meios, (a) Elementos do primeiro grupo. (b) elementos do segundo grupo, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011), adaptado

O potencial médio ao longo do elemento do nó k pode ser calculado através das equações 4.12 a 4.14.

$$\phi_k = \frac{1}{L_k} \int_{L_k} \phi(\mathbf{r}) dl_k = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_k} \int_{L_k} \int_c \frac{I_{Ti}}{L_i} \mathbf{x} \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} ds' dl_k \quad \text{eq. 4.12}$$

$$\phi_k = \sum_{i=1}^M (Z_{Tki} I_{Ti}) \quad \text{eq. 4.13}$$

$$Z_{Tki} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_k L_i} \int_{L_k} \int_{L_i} \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl_i dl_k \quad \text{eq. 4.14}$$

Onde ϕ_{kl} é a diferença de potencial entre os dois terminais (k e l) do elemento m e ϕ_k é a tensão média do nó k. l_m é a distância ao longo do elemento m empregado na integração das equações 4.9, 4.10 e 4.11. Subscritos m e n indicam os elementos m e n, respectivamente do primeiro grupo e os subscritos k e i correspondem aos elementos k e i, respectivamente (ver figura 4.2). R é a distância entre o elemento m e n, já o $\cos\Phi$ é o ângulo entre a posição do elemento m e n.

Através da formulação acima, então calcula-se os elementos do circuito equivalente apresentado na figura 4.3, ou seja, através das equações 4.1 a 4.14, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

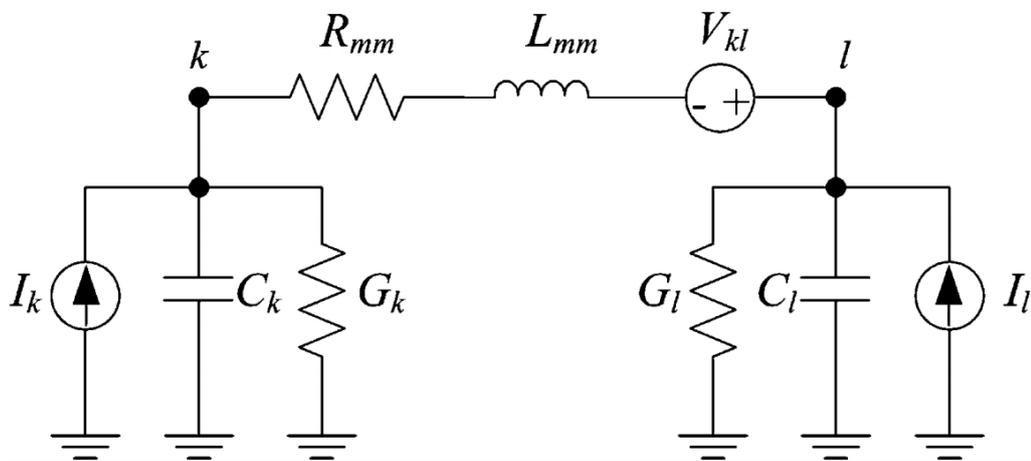


Figura 4.3 – Circuito equivalente do modelo de uma célula do PEEC, (a) Elementos do primeiro grupo. (b) elementos do segundo grupo, Fonte: (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011)

Todos os efeitos de acoplamento, propagação estão inclusos nesse método. A diferença de potencial e os potenciais médios estão dos elementos estão descritos como matrizes os quais são compostos pelos seus respectivos nós, corrente de condução, corrente transversal e campo elétrico incidente.

4.3 Formulação do PEEC no XGSLab®

Em nosso trabalho a ferramenta computacional de simulação é o software XGSLab®, uma breve descrição é apresentada no anexo A, este software utiliza o

método PEEC como descrito de maneira geral no item anterior. A seguir apresentaremos uma breve descrição do método PEEC implementado no programa.

O método implementado pode resolver condutores com diversos tipos de arranjos, em configurações arbitrárias no espaço 3D incluindo fontes e vítimas. Os sistemas de condutores são particionados em pequenos elementos finitos e então o campo eletromagnético e a teoria de linha de transmissão são utilizadas para calcular os parâmetros do circuito, enquanto a teoria de circuito é empregada para descrever as relações entre os parâmetros das tensões e correntes e as conexões metálicas entre os elementos, (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016).

Todos os condutores do sistema devem ser finos o suficiente para serem simulados com um número adequado de elementos retos.

O método implementado deriva diretamente das equações de Maxwell. Utilizando o escalar e vetor potencial, as equações de Maxwell podem ser escritas através das equações 4.15 e 4.16 (equações de Helmholtz), (Ramo, Whinnery, & Duzer, 1965).

$$\Delta \dot{\mathbf{A}} - \gamma^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad \text{eq. 4.15}$$

$$\Delta \dot{V} - \gamma^2 \dot{V} = -\frac{q}{\varepsilon} \quad \text{eq. 4.16}$$

Onde γ é a propagação no meio utilizada na equação 4.5, q e J representam a distribuição de carga e densidade de corrente em suas respectivas fontes.

As soluções da equação 4.15 e 4.16 para uma fonte com distribuição de corrente linear e densidade de carga são obtidas através das equações 4.17 e 4.18, (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016).

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L I \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl \quad \text{eq. 4.17}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int_L q \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl \quad \text{eq. 4.18}$$

A relação entre campo elétrico e vetor potencial escalar e vetorial pode ser obtida através da equação 4.19.

$$\mathbf{E} = -\text{grad}V - j\omega\mathbf{A} \quad \text{eq. 4.19}$$

Levando em consideração que o campo elétrico e o vetor potencial na superfície do condutor são paralelos ao eixo do condutor, (Dawalibi & Southey, 1989), somente a magnitude dos vetores na equação 4.19, precisam ser consideradas e escrita ao longo do eixo do condutor através da equação 4.20.

$$E = -\frac{\partial V}{\partial l} - j\omega A \quad \text{eq. 4.20}$$

O campo elétrico tangencial na superfície do condutor, sendo levado em consideração temos suas impedâncias próprias dadas através da equação 4.21.

$$E = zI \quad \text{eq. 4.21}$$

Combinando as equações 4.20 e 4.21, temos a equação 4.22.

$$zI + j\omega A + \frac{\partial V}{\partial l} = 0 \quad \text{eq. 4.22}$$

A equação 4.22, é derivada diretamente das equações de Maxwell e é válida em todas as condições (inclusive não estacionárias). Em casos práticos a equação 4.22 só pode ser resolvida numericamente. O sistema de condutores é então particionado em uma quantidade pequena de pequenos elementos. Cada elemento é orientado com um ponto inicial (in) e seu ponto final (out). Integrando a equação 4.22, entre os pontos inicial ao ponto final dos elementos, substituindo o potencial vetor e o escalar nas equações 4.17 e 4.18 e rearranjando, o sistema de equações lineares da equação 4.23, pode ser obtida (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016).

$$Z_i I_i + \sum_{j \neq i} M_{ij} I_j + \sum (W_{outij} - W_{inij}) J_j = 0 \quad \text{eq. 4.23}$$

Onde:

$$M_{ij} = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{in}^{out} \int_{in}^{out} \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl_i dj \quad \text{eq. 4.24}$$

$$W_{outij} = \frac{\rho}{4\pi l} \int_{in}^{out} \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl_j \text{ (calculado em out) } \text{ eq. 4.25}$$

$$W_{inij} = \frac{\rho}{4\pi l} \int_{in}^{out} \frac{\exp^{-\gamma R}}{R} dl_j \text{ (calculado em in) } \text{ eq. 4.26}$$

O Z representa a impedância própria do elemento, M e W representam a mútua parcial do acoplamento e os coeficientes de potenciais entre os elementos respectivamente. I e J representam a corrente longitudinal e a corrente de dispersão respectivamente.

Escrevendo uma equação linear para cada elemento, as equações de Maxwell são então reduzidas a um sistema linear. Para o cálculo destes coeficientes devem ser utilizados o método complexo do deslocamento das imagens e o método das imagens modificado. Se for adicionado o retardo da propagação, este método é de onda completa híbrido (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016). Cada elemento é representado por um “T” equivalente, conforme mostrado na figura 4.4.

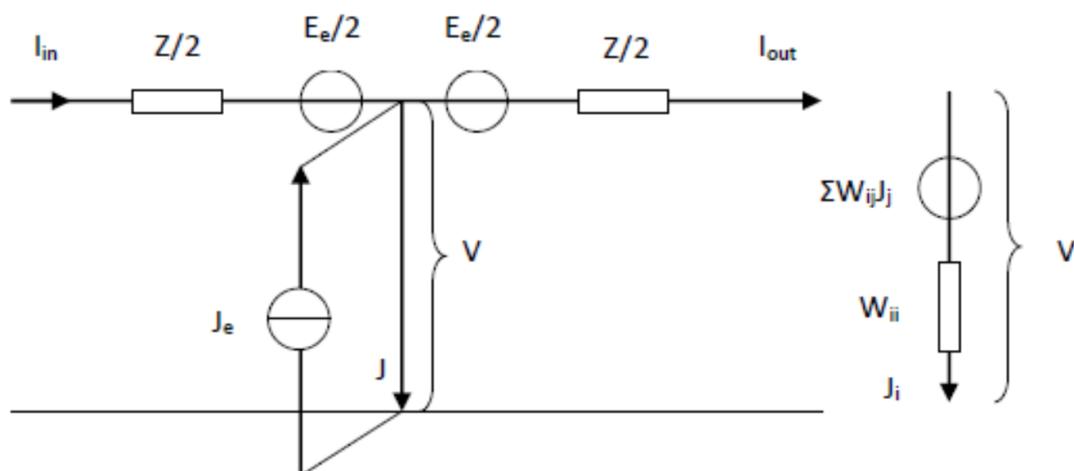


Figura 4.4 – Circuito equivalente de cada elemento modelo “T”, fonte: (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016)

I_{in} e I_{out} são as correntes de entrada e saída respectivamente, J a corrente de dispersão e V o potencial no meio do elemento.

Os sistemas lineares resultantes podem ser escritos conforme as equações abaixo:

$$\begin{cases} \{V\} = [W]\{J\} \\ \{E_z\} + \{E_e\} = -([Z] + [M])\{I\} \\ \{J\} = [A]\{I\} + \{J_e\} \end{cases} \text{ eq. 4.27}$$

Onde:

[W] = Matriz de coeficientes de potenciais parciais próprias e mútuas

[Z] = Matriz das impedâncias próprias

[M] = Matriz de impedâncias mútuas parciais

[A] = Matriz de incidência que expressa a conectividade dos elementos

{V} = vetor dos potenciais

{I} = Vetor das correntes

{J} = Vetor das correntes de dispersão

{Ez} = Vetor das quedas de tensão

{Ee} = Vetor das forças eletromotrizes

{Je} = Vetor das correntes injetadas

Os sistemas lineares da equação 4.27, podem ser resolvidos e apresentam correntes, potenciais, correntes de dispersão etc. Além disso podem ser também calculados os campos elétricos e magnéticos, (Meppelink, Andolfato, & Cuccarollo, 2016).

Os cálculos acima além de serem realizados no domínio da frequência, também podem ser realizados no domínio do tempo, bastando, neste caso, utilizar as transformadas direta e inversa de Fourier. Realizar os cálculos no domínio da frequência é interessante, pois pode-se incluir os parâmetros do solo variantes com a frequência, com a formulação apresentada no capítulo II.

4.4 Principais vantagens do modelo PEEC

A principal diferença entre o método PEEC em relação ao MoM (Cigré TB 785, 2019) é a possibilidade de extrair circuitos equivalentes das equações integrais. Ao contrário dos métodos baseados em equações diferenciais, o método PEEC fornece menos incógnitas, pois não requer a discretização de todo o espaço de interesse. Assim como as outras técnicas de IE, ressonâncias espúrias podem

acontecer, possivelmente resultantes de malha geométrica pobre, (Cigré TB 785, 2019).

A principal vantagem deste método é a possibilidade de incorporar à solução de componentes elétricos baseados na teoria de circuitos, como os resistores, indutores, capacitores, linhas de transmissão, cabos, transformadores, chaves etc. Outra vantagem na formulação do domínio da frequência é que a matriz de composição que só depende apenas da configuração considerada do sistema e do meio e não depende das fontes, (Cigré TB 785, 2019).

Por fim a terceira vantagem do método PEEC é que o potencial em um condutor é calculado diretamente de um nó de potencial, o que dispensa a necessidade de um pós-processamento para o seu cálculo, (Yutthagowith, Ametani, Nagaoka, & Baba, 2011).

CAPÍTULO V - MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Neste capítulo são apresetados todos os componentes utilizados na modelagem deste trabalho e modelos que foram tomados como base para o próximo capítulo.

5.1 Modelos geoeletrico

A fim de observar o comportamento dos transitórios eletromagnéticos com diferentes modelos de solos e respectivas respostas no sistema de aterramento, trabalhamos com modelos de solo uniforme, com as seguintes resistividades 500, 1.000, 3.000 e 5.000 $\Omega.m$. Estes modelos de solo são considerados constantes e com parâmetros variantes com a frequência, este último apresentado em maiores detalhes no item 2.2 do presente trabalho.

Por definição da (NBR ABNT 7117-1, 2020) o solo de 500 $\Omega.m$ é um solo de média resistividade, já os de 1.000 $\Omega.m$ e acima são de alta resistividade.

5.2 Sistema de aterramento

O aterramento dos aerogeradores é provido de dois anéis concêntricos com cabos de cobre nu 70 mm² (diâmetro de 10,6 mm), de diâmetros de 8,6 metros e

23,1 metros, interligados entre si com o aço da fundação estrutural do aerogerador com quatro hastes verticais de $\frac{3}{4}$ " x 3000 mm.

O ferro estrutural da fundação é modelado em três dimensões, por condutores de aço com diâmetro de 20 mm. Esta fundação tem profundidade máxima de 3,15 metros e diâmetro do topo de 6 metros e do fundo de 21 metros.

Detalhes do sistema de aterramento podem ser observados nas figuras 5.1 e 5.2, onde são apresentados os sistemas interligados e um detalhe do aterramento de cada base.

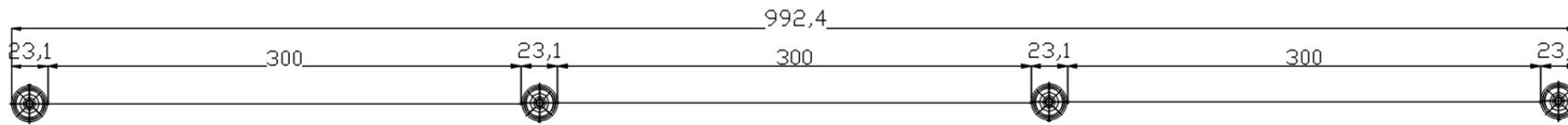


Figura 5.1 – Sistema de Aterramento de quatro aerogeradores interligados, cotas em metros, fonte: Autor

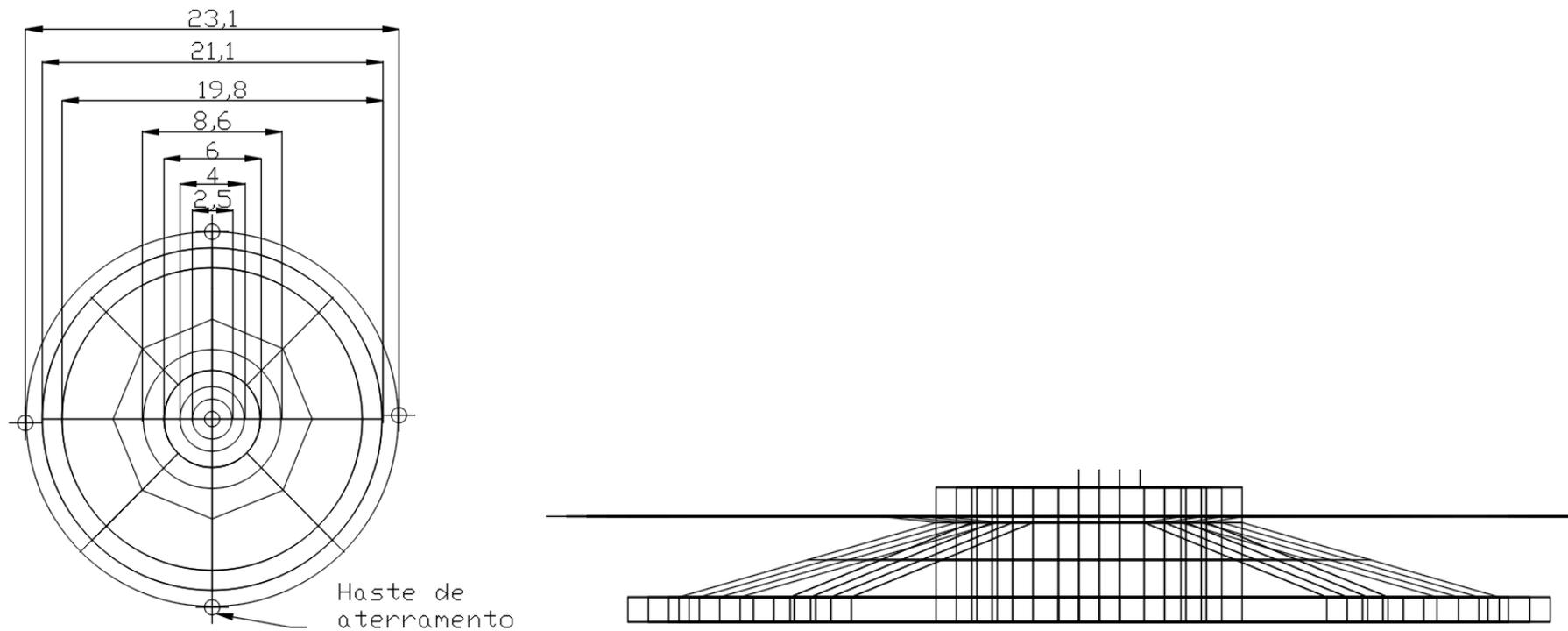


Figura 5.2 – Aterramento de um aerogerador com as dimensões, anéis com diâmetro 23,1 e 8,6 metros, são de cobre, demais aço, cotas em metros, profundidade da base de 3,15 metros, fonte: autor

5.3 Torre do aerogerador

As torres dos aerogeradores são superfícies cônicas, com diâmetro variável. Neste estudo consideramos uma estrutura de metálica, com diâmetro inferior de 4,3 metros e superior de 3,6 metros, com 125 metros de altura, representada por uma estrutura de aço conforme a figura 5.3 e com permeabilidade relativa de 300.

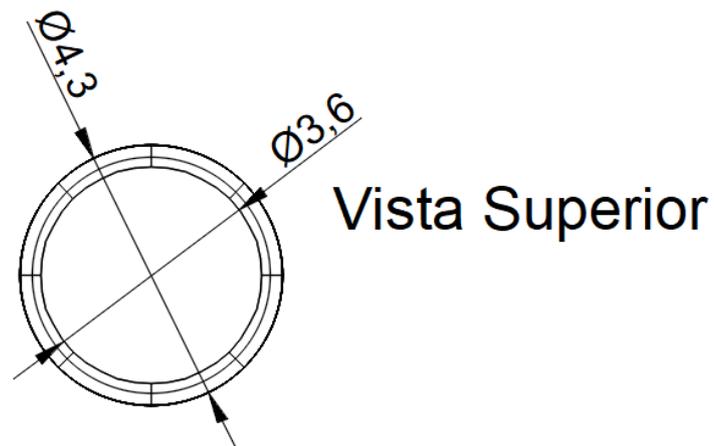


Figura 5.3 – Vista superior da Torre do aerogerador, cotas em metros, Fonte: Autor

5.4 Nacele

A nacele do aerogerador é abriga o transformador e todos os equipamentos elétricos e eletrônicos de conversão, sendo representada por condutores de aço com as dimensões apresentadas na figura 5.4.

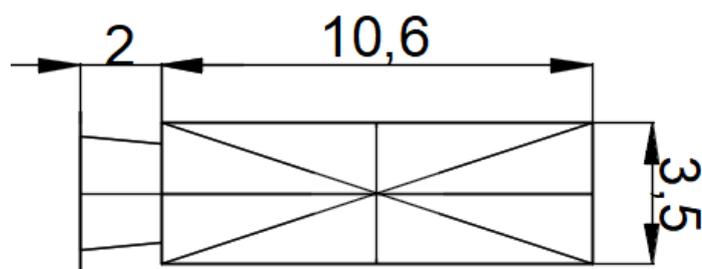


Figura 5.4 – Vista superior da Nacele e eixo da turbina, cotas em metros, Fonte: Autor

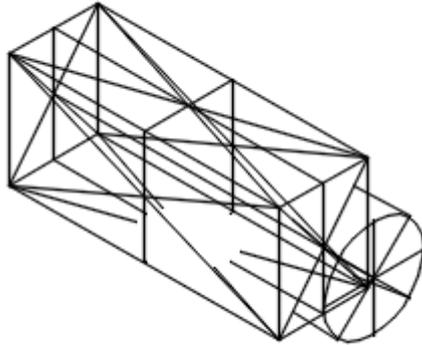


Figura 5.5 – Vista da Nacele e eixo da turbina, em perspectiva, Fonte: Autor

5.5 Pá

A pá foi modelada por um condutor de cobre 70 mm², com diâmetro de 10,6 mm vertical e inclinado, acoplado ao eixo, com comprimento de 80 metros, como mostra a figura 5.6.

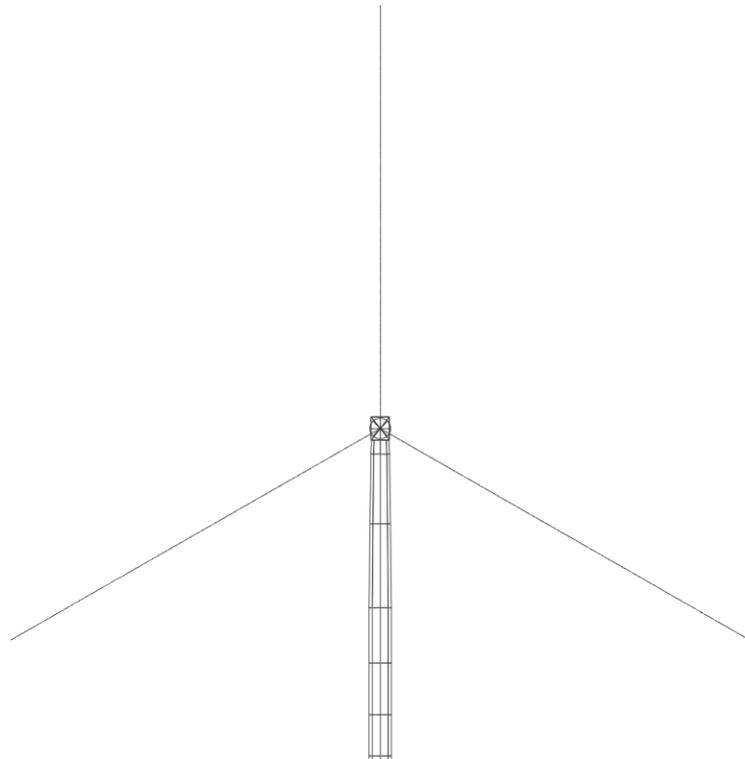


Figura 5.6 – Pá do aerogerador 80 metros de comprimento sem escala, fonte: autor

5.6 Rede de média tensão Isolada

A rede de média tensão interna ao aerogerador que conduz a energia gerada até o poste de transição (aéreo/subterrâneo) foi modelada por um cabo isolado de 20/35 kV de seção transversal do condutor 185 mm², e suas características podem ser visualizadas na figura 5.7 e tabela 5.1. As blindagens dos cabos isolados foram aterradas em apenas uma extremidade neste caso na nacele.

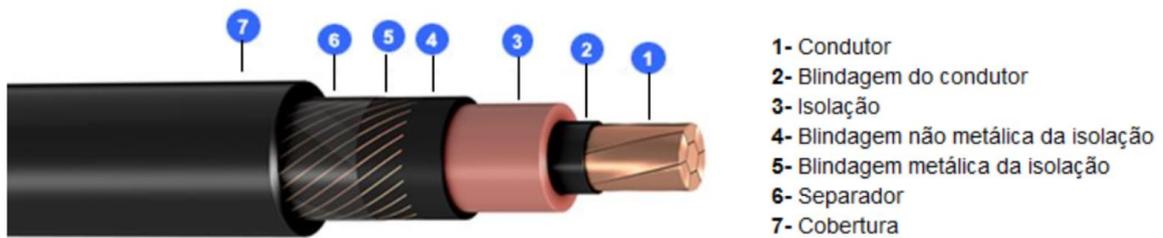


Figura 5.7 – Cabo Isolado de média tensão, Fonte: Catálogo Induscabos

Tabela 5.1 - Dados do cabo isolamento de média tensão 20/35 kV, fonte: Induscabos

Características	Unidade	Dados
Tensão (U0/U)	kV	20/35
Seção Nominal	mm ²	185
Diâmetro Nominal	mm	15,5
Isolamento	-	EPR105
Espessura Isolamento	mm	6,5
Diam. Sobre o Isolamento	mm	29,7
Blindagem Metálica	Nº x mm	24x0,73
Seção da Blindagem	mm ²	10
Espessura da Cobertura	mm	2
Diâmetro Externo Nominal	mm	37,2

5.7 Rede de média tensão aérea

A rede coletora da energia em média tensão, desde os postes de transição até as subestações coletoras que elevam de 34,5 kV para altas tensões (tipicamente > 138 kV), são realizadas através de redes aéreas, onde foi considerado o condutor

Linnet 336,4 MCM, com altura de 12 metros em relação ao nível do solo, espaçados de 1,05 metro entre fases, como apresentado nas figuras 5.7 e 5.8 e com 3 km de extensão.

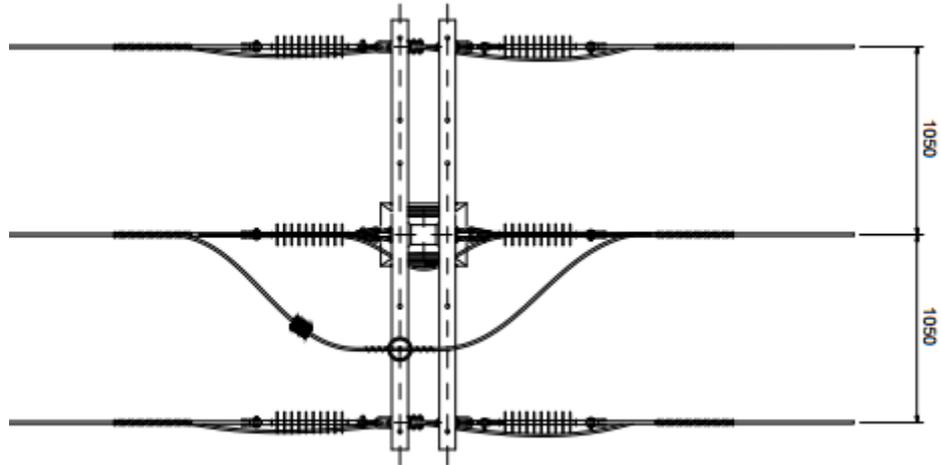


Figura 5.8 – Rede de média tensão 34,5kV, vista superior, cotas em milímetros, fonte: autor

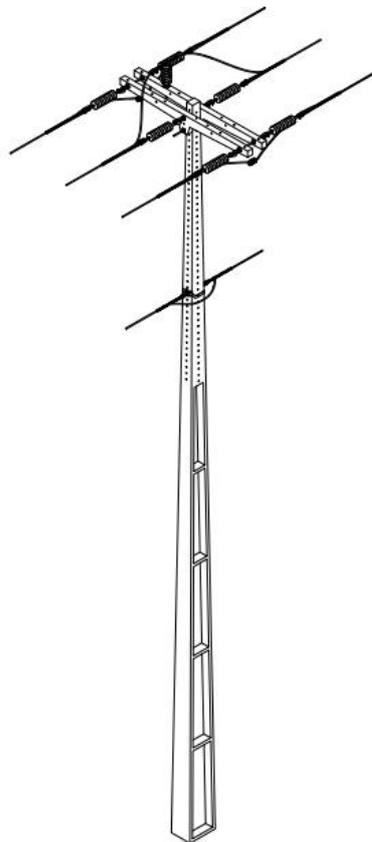


Figura 5.9 – Rede de média tensão 34,5kV, perspectiva, fonte: autor

5.8 Transformador de média tensão

O transformador elevador 0,69/34,5 kV, foi modelado através de uma capacitância 74 pF (fonte: catálogo de transformadores a seco da Siemens) para terra e respectivos para-raios de média tensão.

CAPÍTULO VI – ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho, na primeira parte são apresentadas as descargas atmosféricas nos sistemas de aterramento interligado e sem a modelagem das torres, para as descargas 10/350 μ s e 1/200 μ s, onde o solo é modelado com parâmetros constantes e dependentes da frequência.

Na segunda parte é apresentado o conjunto pá, nacele, torre e sistema de aterramento interligado e suas respectivas sobretensões para as descargas 10/350 μ s e 1/200 μ s, incidindo na pá do aerogerador, a partir deste ponto neste trabalho, todos os parâmetros do solo são variantes com a frequência.

Na terceira parte do trabalho é apresentado o sistema anterior com a inclusão da rede de média tensão, descrita em detalhes no capítulo V deste trabalho para uma descarga direta na pá do aerogerador.

Finalmente é simulada uma descarga atmosférica próxima à rede de média tensão, ou seja, descarga indireta e são apresentadas as sobretensões na rede de média tensão e no aerogerador em frente (mais próximo) ao canal da descarga. Neste item, foi considerado o solo de maior resistividade com parâmetros variantes com a frequência.

6.2 Sistema de aterramento interligado dos aerogeradores

Nesta primeira parte do trabalho, são apresentados os resultados do GPR no sistema de aterramento interligado, espaçado entre si de 300 metros onde é injetada uma descarga atmosférica no aterramento no ponto A (em uma das extremidades),

em solos de 500, 1.000, 3.000 e 5.000 $\Omega.m$, com e sem variações dos parâmetros do solo com a frequência.

Estes casos de injeção de descargas atmosféricas no primeiro aerogerador, considera uma condição mais crítica para o sistema de aterramento, pois as correntes não se dividem e vão apenas para um dos lados. Para as descargas atmosféricas diretas primeira positiva, foi considerada uma corrente de 100 kA, NP III e na primeira negativa, considerou-se 50 kA, como recomenda (IEC 61400-24, 2019). Na figura 6.1 é apresentado o sistema simulado, os detalhes de todos os componentes foram apresentados no capítulo anterior e os resultados nos próximos tópicos.

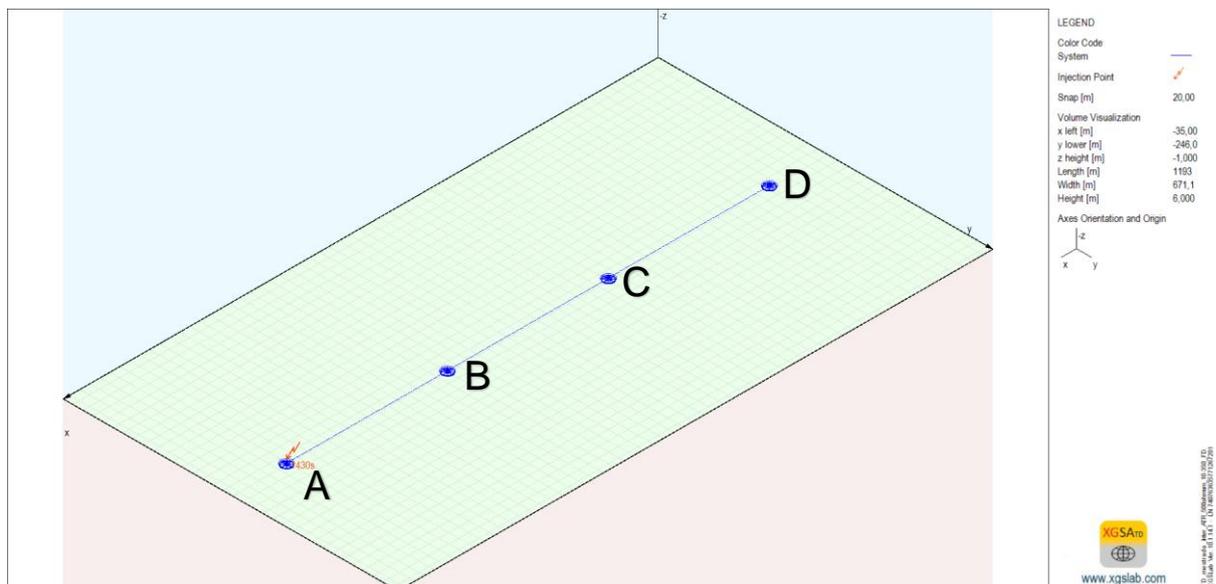


Figura 6.1 – Aterramentos interligados, fonte: autor

6.2.1 Sistema de aterramento interligado onda 10/350 μs

As figuras 6.2.1.1 a 6.2.1.4, apresentam os GPR's nos pontos A, B, C e D, para solos de 500, 1.000, 3.000 e 5.000 $\Omega.m$ respectivamente, para uma descarga atmosférica 10/350 μs no ponto A.

Em solos com resistividade de 500 $\Omega.m$, no ponto A ocorre um aumento de 7 % no GPR, quando não são considerados os parâmetros do solo variantes com a frequência, já nos pontos C e D, o aumento do GPR é desprezível, inferior a 1%. Em solos de baixa resistividade temos uma atenuação e distorção da corrente da

descarga muito rápida, o que faz com que a influência dos aterramentos nos pontos C e D sejam desprezíveis.

Já no caso do solo de resistividade de $1.000 \Omega.m$, no ponto A, temos uma variação do aumento do GPR de 12 %, não considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Neste caso também a influência do aterramento no ponto B há uma variação de 20 % quando se considera os parâmetros de solo variantes com a frequência. Até os 50 μs este aterramento no ponto B passa a ser mais significativo do que no caso anterior, visto que neste caso a atenuação e distorção da corrente é menor, pois temos um solo mais resistivo.

Nos solos de alta resistividade, temos aumento de cerca de 25% e 36%, para os solos de 3.000 e $5.000 \Omega.m$ respectivamente, no ponto A. Nos pontos B, C e D, temos variações significativas nos seus GPR`s, pois quando se considera os parâmetros de solo variantes com a frequência, tem-se uma maior atenuação, devido à melhoria da condutividade do solo que resulta uma dissipação de corrente mais próxima do ponto de injeção do surto.

Em solos de $3.000 \Omega.m$, nos pontos B, C e D, há um aumento nos GPR`s de 15 %, 38 % e 67 %, respectivamente, quando não é considerada a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Já no caso dos solos de $5.000 \Omega.m$ nos pontos B, C e D, há um aumento nos GPR`s de 18 %, 38 % e 247%, respectivamente. Este fato se dá pelo explanado acima da melhoria da condutividade do solo na condição dos parâmetros variantes com a frequência, além do fato que em solos de mais alta resistividade, a atenuação da corrente é mais lenta e distante do ponto de injeção da corrente, devido ao aumento do comprimento efetivo devido aos solos de maiores resistividades.

A importância da consideração dos parâmetros do solo com a frequência principalmente em solos de alta resistividade em transitórios no sistema de aterramento é fundamental para avaliação dos GPR`s e sobretensões, aspecto que será apresentado mais adiante neste trabalho. As sobretensões nos equipamentos internos, redes de média tensão e nos aerogeradores são fortemente dependentes da resistividade do solo.

Outro fato importante observado nesta análise dos aterramentos interligados é que a redução dos GPR`s não ocorrem apenas nas proximidades dos pontos de injeções de correntes, mas também nos aterramentos vizinhos que teve uma maior redução chegando aos 61 % no ponto D, no caso de $5.000 \Omega.m$, justamente devido a

melhoria da condutividade do solo com a consideração dos parâmetros variantes com a frequência.

Nos gráficos apresentados após cerca de 100 μs observamos que as caudas das ondas dos GPR's, com e sem parâmetros variantes com a frequência, acabam convergindo para o mesmo ponto, pois as componentes de alta frequência das descargas atmosféricas já não são significativas. Outro ponto importante que pode ser observado é que a frente da onda se torna um pouco mais lenta, principalmente nos aterramentos vizinhos, isso ocorre pois nos casos que se consideram os parâmetros variantes com a frequência, há uma contribuição mais significativa da parcela indutiva dos condutores de aterramento.

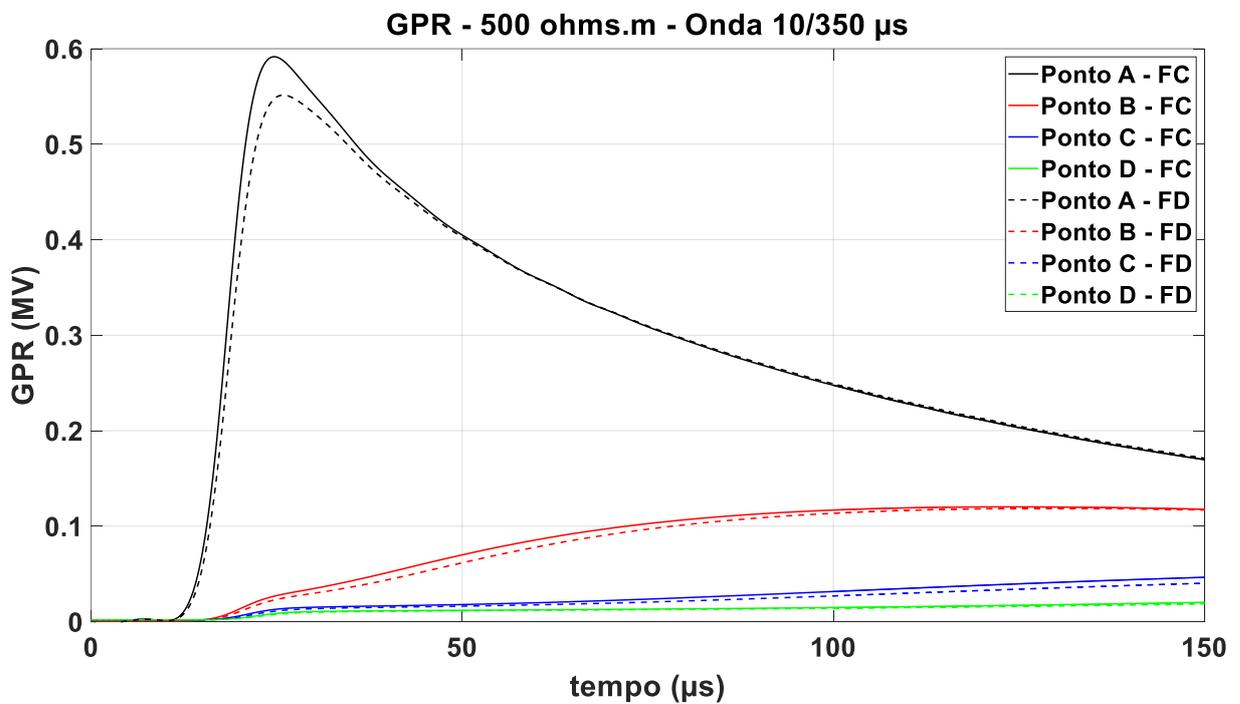


Figura 6.2.1.1 – GPR onda 10/350 μs – Solo de 500 $\Omega\cdot\text{m}$, fonte: autor

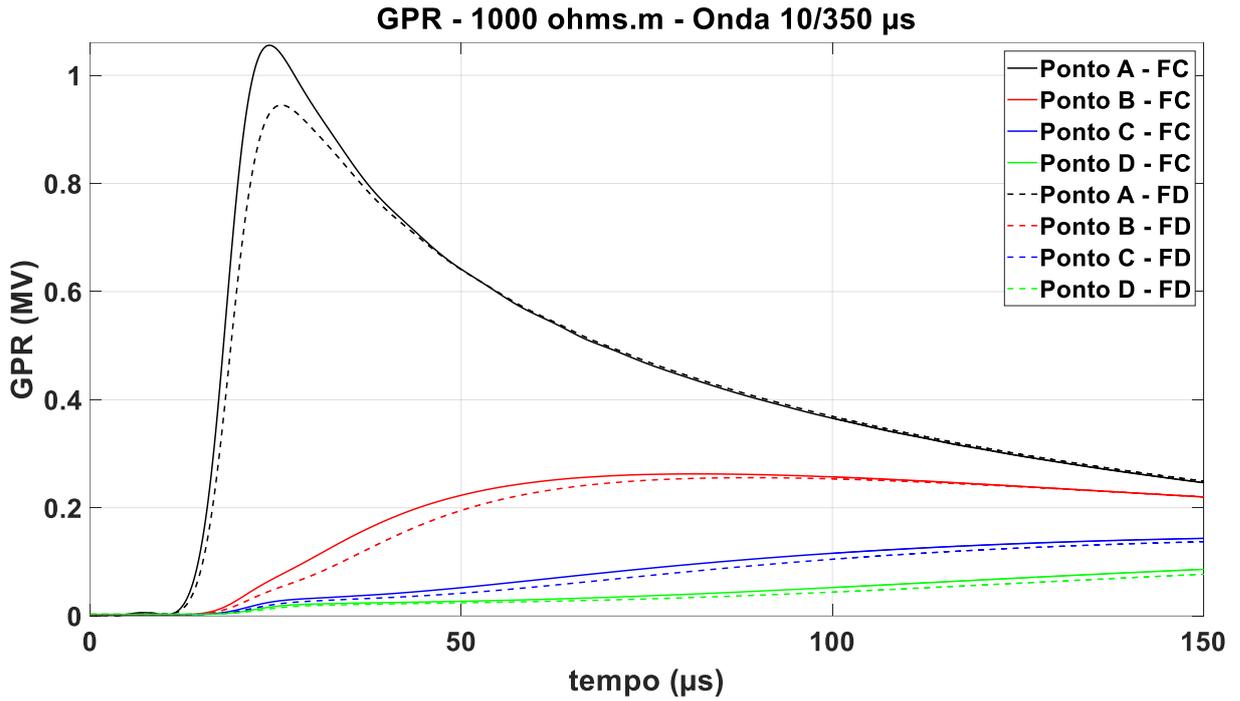


Figura 6.2.1.2 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor

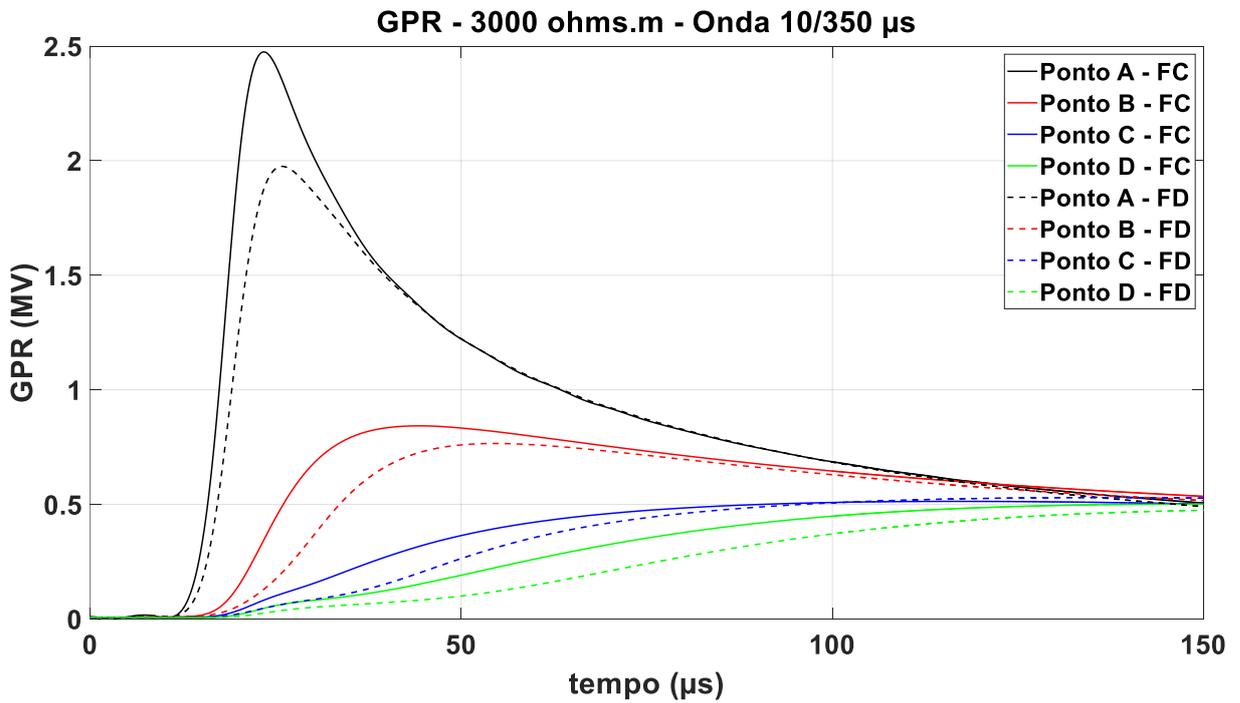


Figura 6.2.1.3 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 3.000 Ω .m, fonte: autor

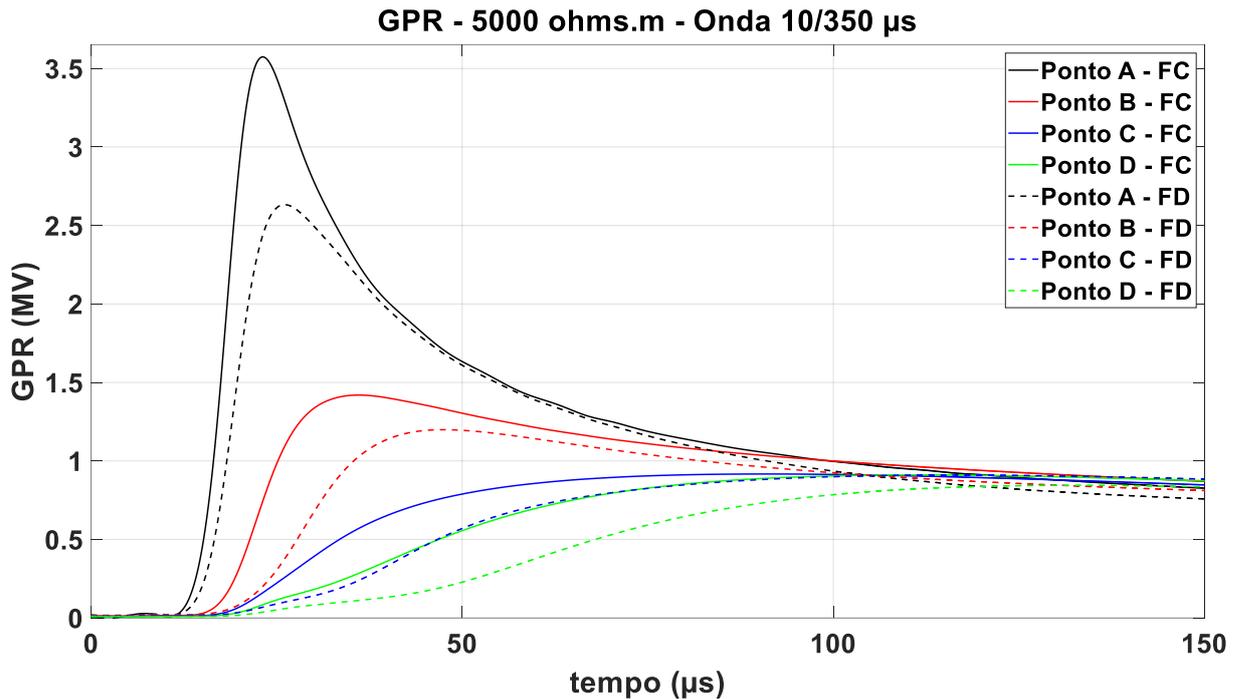


Figura 6.2.1.4 – GPR onda 10/350 μ s – Solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

6.2.2 Sistema de aterramento interligado onda 1/200 μ s

Neste segundo item, consideramos o mesmo sistema do item anterior, porém com uma corrente com uma taxa de subida dez vezes maior que a anterior, ou seja, uma maior variação de corrente na frente de onda (di/dt), o que causa um acréscimo nas componentes de maiores frequências.

Os resultados são apresentados nas figuras 6.2.2.1 a 6.2.2.4, em solos de 500, 1.000, 3.000 e 5.000 Ω .m, respectivamente.

No solo de 500 Ω .m, o ponto A, apresentou um aumento de 26 %, no valor do GPR, quando não se considera os parâmetros de solo variantes com a frequência, mesmo em solo de resistividade média, o que é diferente por exemplo, do apresentado na referência (Cigre 781 WG C4.33, 2019), que estabelece que não é relevante abaixo de 700 Ω .m. Como neste tipo de descarga há componentes de frequências maiores, a dissipação ocorre muito mais rápida e basicamente no primeiro sistema de aterramento, onde foi injetada a corrente da descarga atmosférica, sendo que no segundo e demais aterramentos há uma contribuição muito pequena, ou quase desprezível.

Já no solo de 1.000 $\Omega.m$ há um aumento no GPR de 35 %, no ponto A, quando não são considerados os parâmetros do solo com a frequência, já o aterramento do ponto B, C e D, não temos uma contribuição significativa, porém maior que o caso anterior.

No caso de 3.000 $\Omega.m$, temos um aumento no GPR de 71 %, quando não é considerado os parâmetros de solo variante com a frequência e o aterramento do ponto B já passa a ter uma maior contribuição no GPR's pois neste caso com o aumento da resistividade do solo e uma atenuação e distorção reduzida da corrente da descarga atmosférica, no aterramento do ponto B, por exemplo temos um aumento de 68%.

Em solos de 5.000 $\Omega.m$ temos um aumento de 96 % de quando não consideramos as variações dos parâmetros do solo, bem como o aterramento do ponto B, passa a ter um peso maior, pois a atenuação e distorção da corrente neste caso é ainda mais reduzida do que no caso de 3.000 $\Omega.m$, começando a aparecer uma certa contribuição do sistema de aterramento no ponto C.

A descarga atmosférica 1/200 μs , devido suas componentes de maiores frequências, há uma atenuação mais rápida da corrente, além disso, mesmo com 5.000 $\Omega.m$, o ponto D, quase não tem influência, pois a descarga atmosférica foi quase toda atenuada, ou chegou em sua área efetiva, (Grcev L. , 2003), (Grcev & Grcevski, 1998), (Araújo, Azevedo, Annibale, Silva, & Filho, 2021).

Neste tópico apresentamos a importância da utilização da variação dos parâmetros do solo com a frequência, mesmo em solos de baixa resistividade, este último mais pronunciado em descargas atmosféricas com taxas de subida (di/dt) mais rápida. Daqui para frente em nosso trabalho só iremos considerar os parâmetros do solo variante com a frequência, nos próximos tópicos.

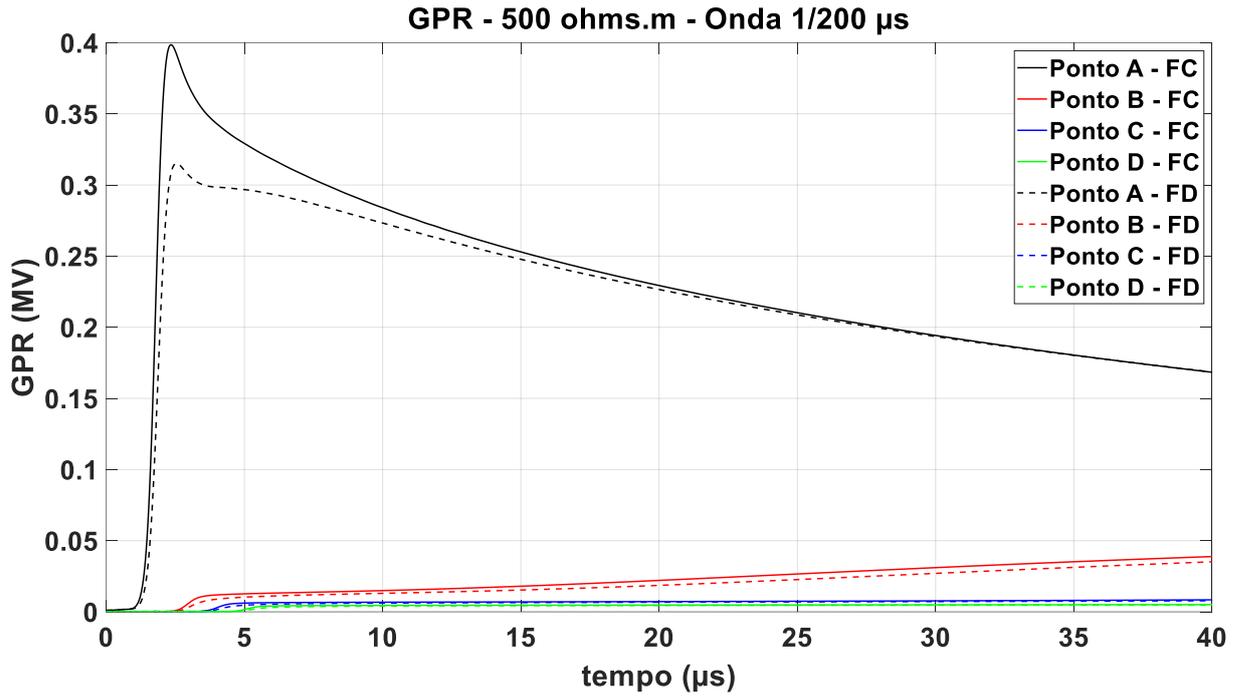


Figura 6.2.2.1 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 500 Ω .m, fonte: autor

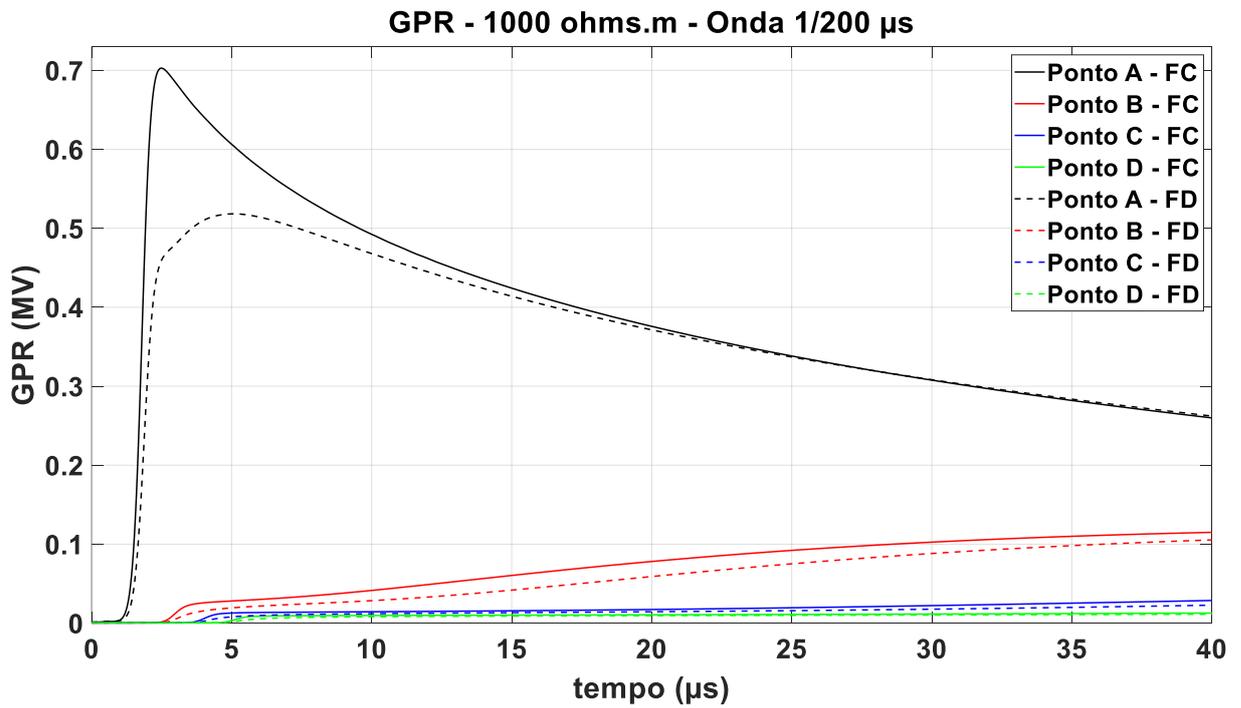


Figura 6.2.2.2 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor

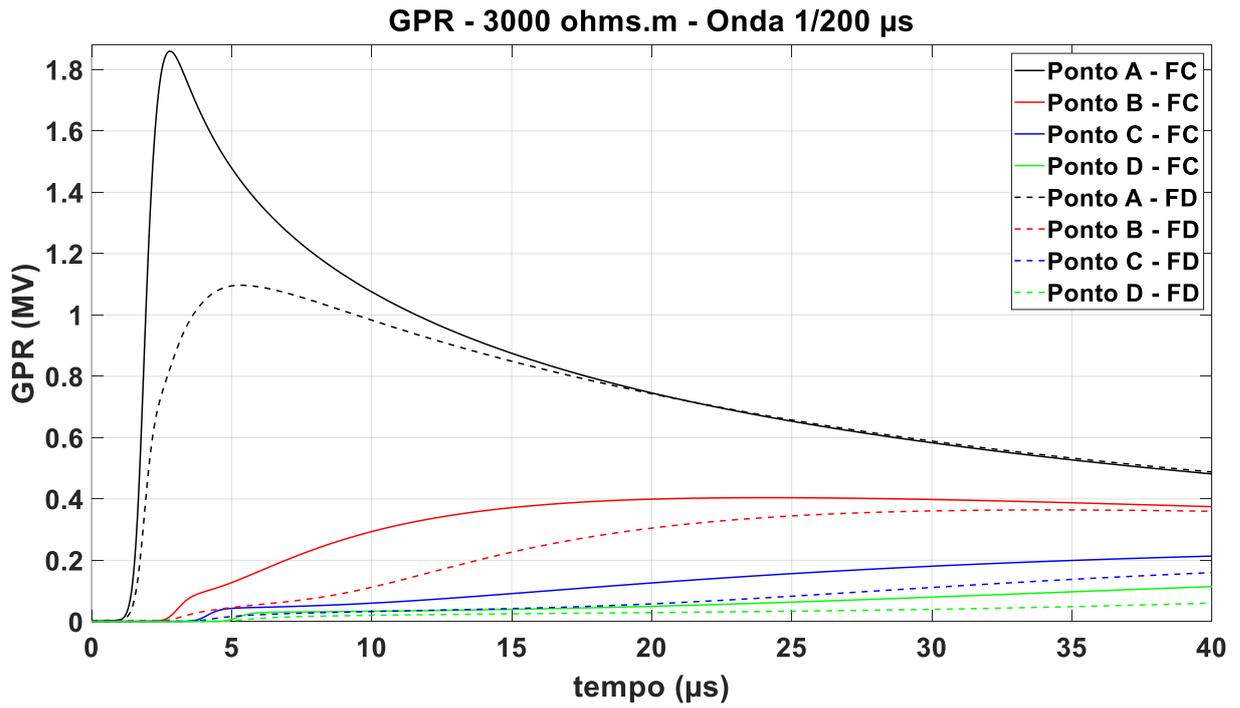


Figura 6.2.2.3 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 3.000 Ω .m, fonte: autor

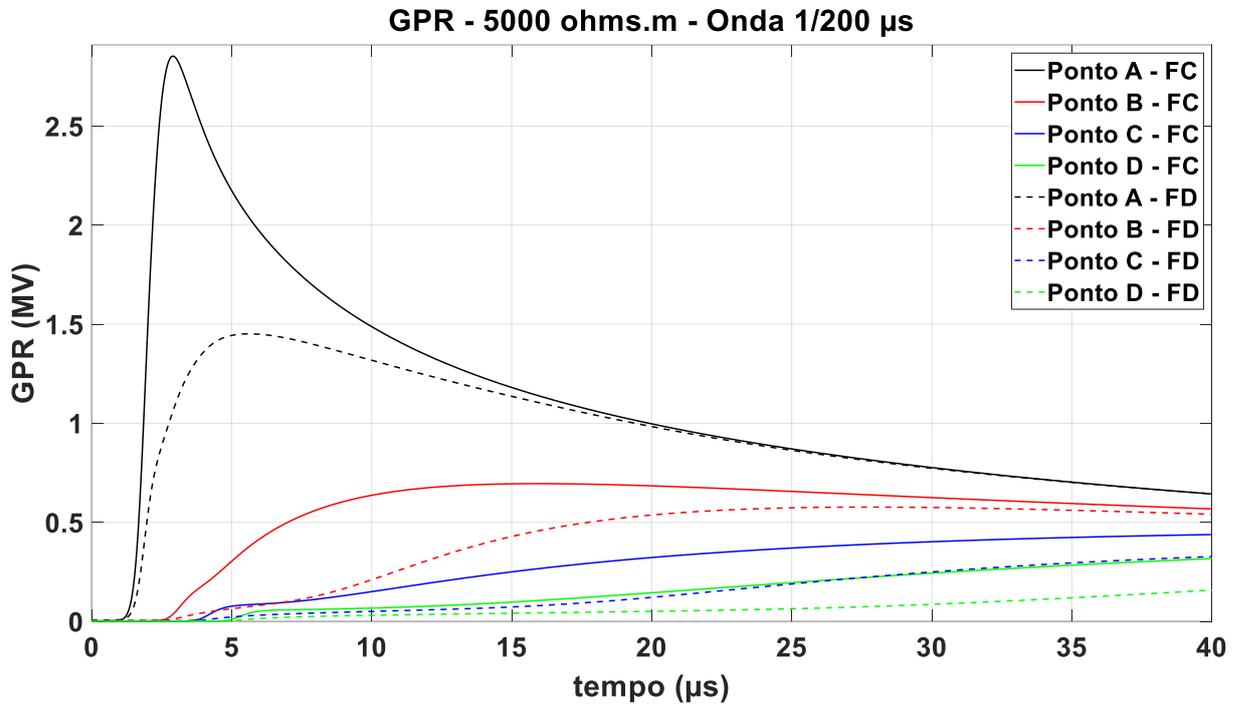


Figura 6.2.2.4 – GPR onda 1/200 μ s – Solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

6.3 Sistema de aterramento e aerogeradores

Nesta primeira parte do nosso trabalho trabalharemos com quatro, sistemas de aterramentos interligados, espaçado entre eles de 300 metros onde é injetada uma descarga atmosférica na extremidade da pá do aerogerador, que compões o aterramento do ponto A, indicado por um raio na figura 6.3.1. Nesta parte do trabalho iremos inserir as turbinas dos aerogeradores e observar os GPR`s para os solos de 500, 1.000, 3.000 e 5.000 $\Omega.m$ e as sobretensões na pá, nacele e base do aerogerador, com as ondas 10/350 μs e 1/200 μs .

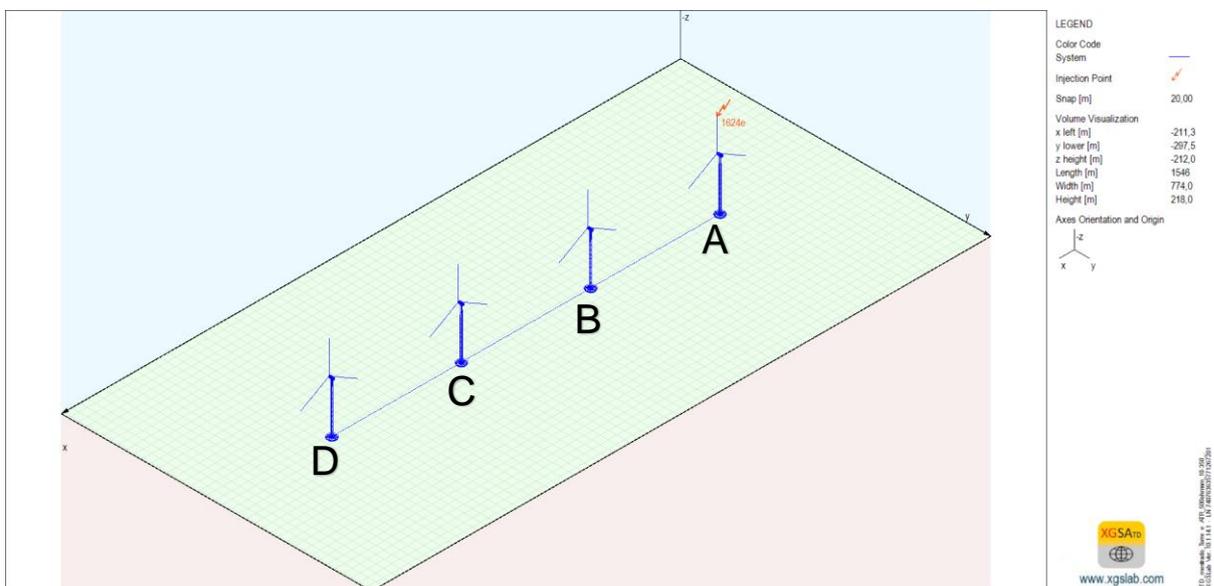


Figura 6.3.1 – Aerogeradores e aterramentos interligados, fonte: autor

6.3.1 Sistema de aterramento e aerogeradores onda 10/350 μs

Inicialmente iremos comparar para a descarga 10/350 μs na influência do sistema de aterramento, com a adição da torre, nacele e pá do aerogerador, que são apresentados, nas figuras 6.3.1.1 a 6.3.1.4.

Em solos de 500, 1.000 e 3.000 $\Omega.m$ observamos um aumento no valor do GPR, de 8%, 7% e 6%, respectivamente, já no solo de 5.000 $\Omega.m$, temos essa diferença inferior a 0,5%, ou seja, desprezível, nos casos que são considerados apenas os sistemas de aterramento. Estes aumentos se dão devido aos indutivos dos condutores da pá, nacele e torre que nos casos anteriores, não estão sendo considerados. Vale ressaltar que os em solos de menores resistividade este per se torna levemente superior.

Devido o tempo de propagação da descarga na pá, nacele, torre, aproximadamente 200 metros, até o aterramento temos um atraso no GPR em relação aos casos que não consideram estes componentes.

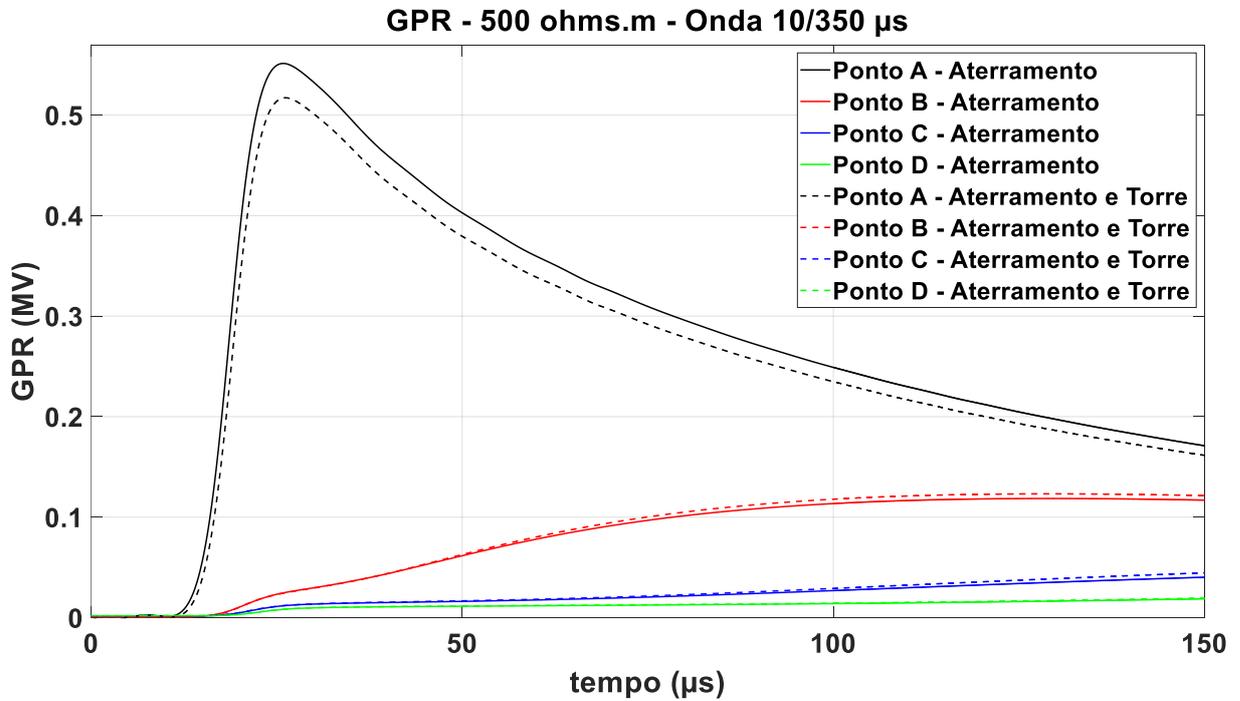


Figura 6.3.1.1 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 500 Ω .m, fonte: autor

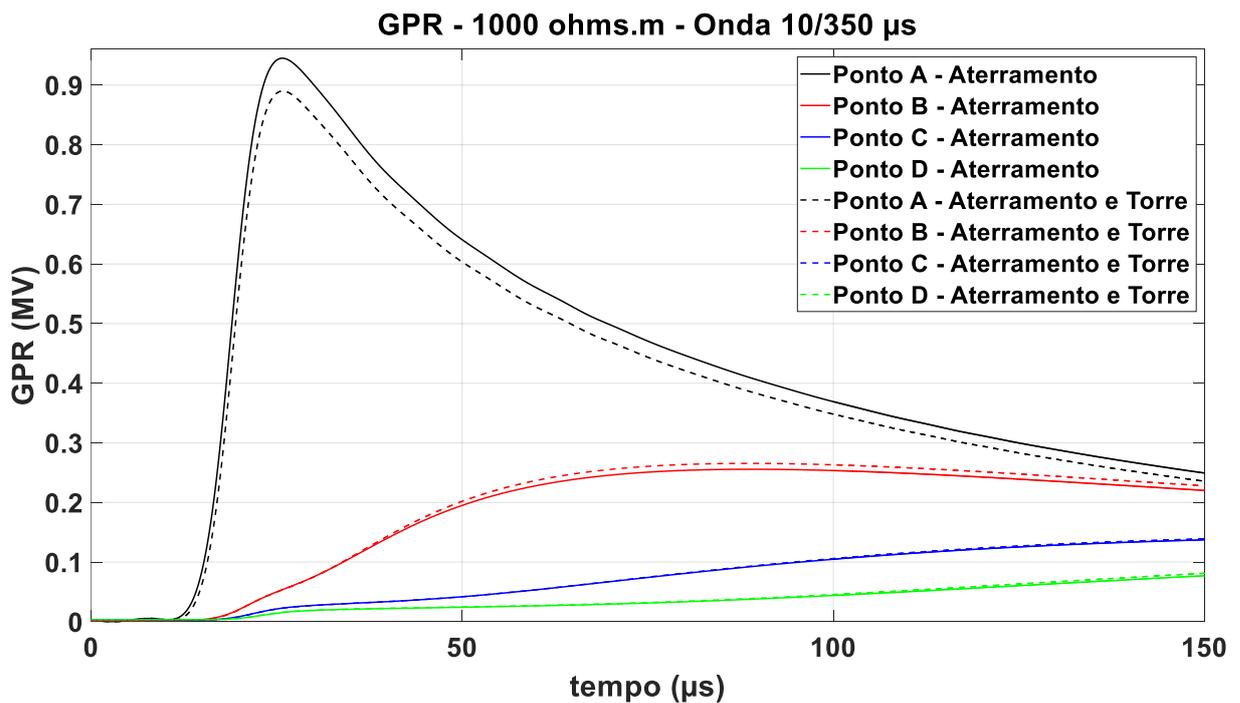


Figura 6.3.1.2 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 1.000 Ω .m, fonte: autor

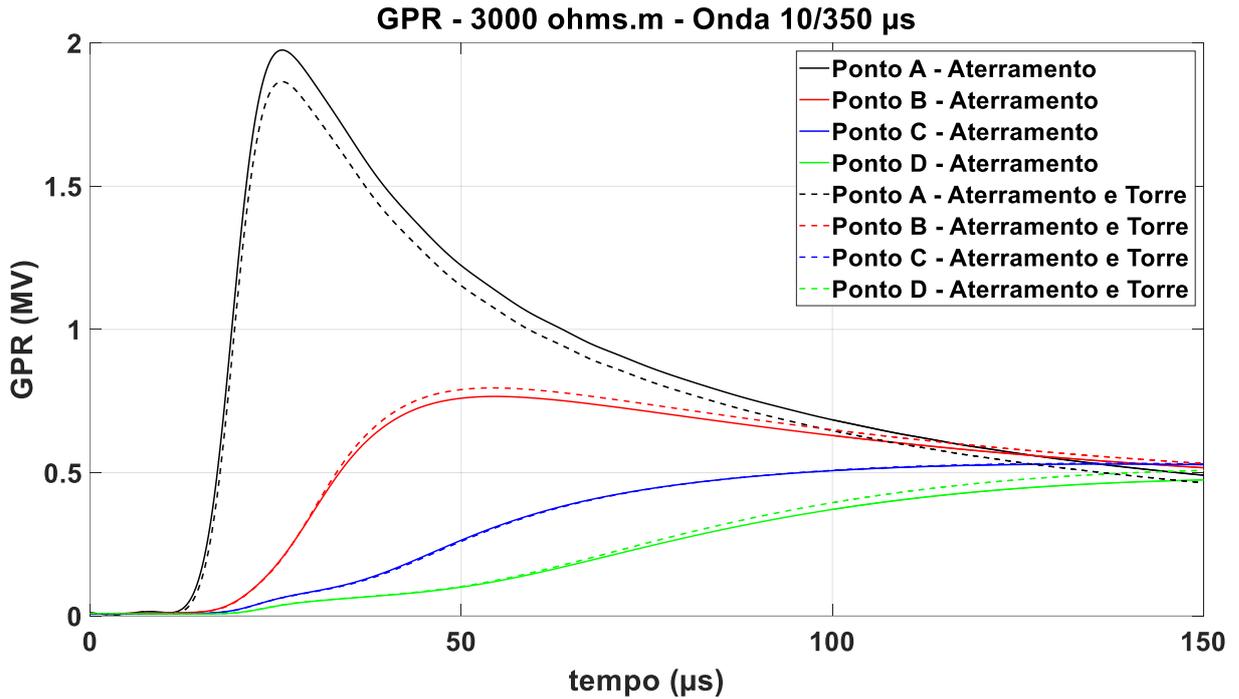


Figura 6.3.1.3 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 3.000 Ω .m, fonte: autor

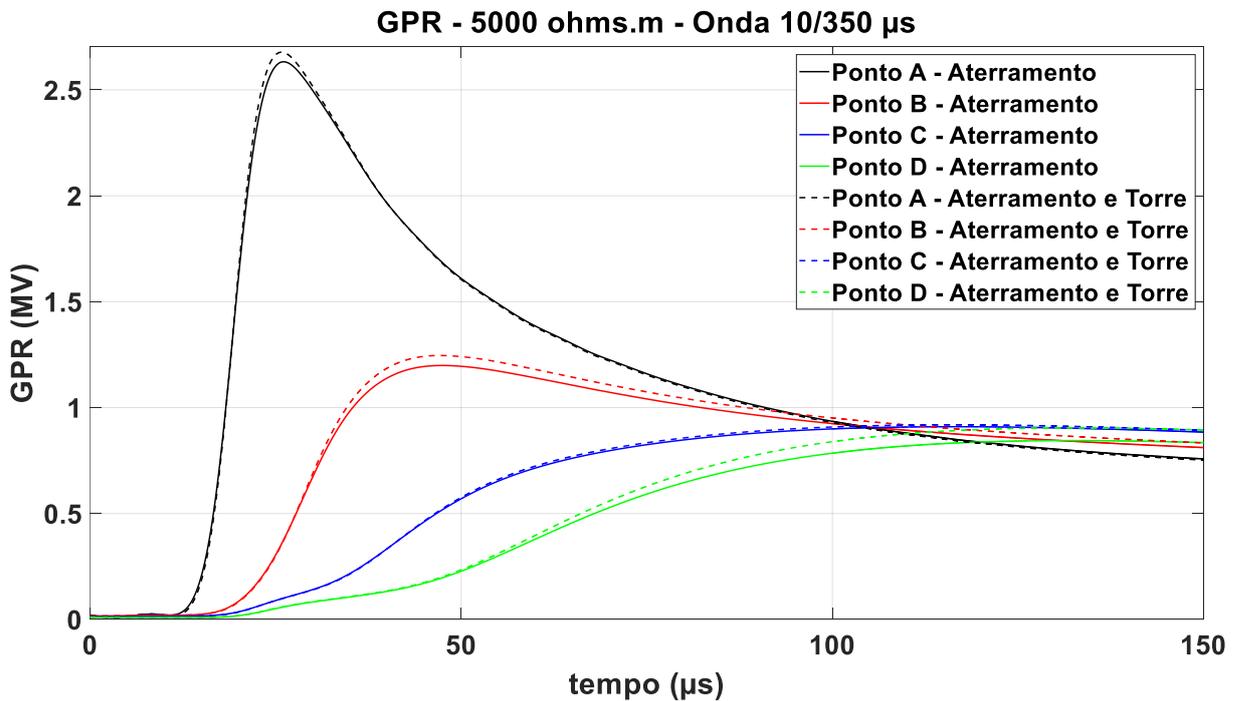


Figura 6.3.1.4 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 5.000 Ω .m, fonte: autor

Os valores das sobretensões nos componentes principais dos aerogeradores, como pá, nacele e base, são apresentados nas figuras 6.3.1.5 a 6.3.1.7, respectivamente, para as resistividades 500, 1.000, 3.000 e 5.000 Ω .m.

A pá, mesmo estando distante da base do aerogerador é influenciada pela resistividade do solo, pois as reflexões e sobretensões são de maiores magnitudes, quando há solos de maior resistividade, o que pode ser observado na figura 6.3.1.5, onde há um aumento de 24 % nas sobretensões, no solo de maior resistividade comparado ao de menor resistividade.

No solo de 1.000 Ω .m, não há um aumento significativo em relação ao de 500 Ω .m ficando em 5% de aumento. Já o de 3.000 Ω .m ficou cerca de 6% menor que no caso do solo de maior resistividade.

Como a pá dos aerogeradores é um dos itens de maior dificuldade de manutenção, a análise das sobretensões e cumprimento das recomendações da (IEC 61400-24, 2019), são de suma importância para integridade deste componente.

A figura 6.3.1.6, apresenta as sobretensões encontradas na nacela, que se mostrou um aumento de 53 % no solo de maior resistividade em relação ao de menor resistividade. As reflexões encontradas no sistema de aterramento de maior resistividade são de maiores magnitudes, devido a maior impedância impulsiva que a descarga “enxerga” no aterramento da torre. O solo de 1.000 Ω .m, teve um aumento na sobretensão em torno de 10% que no caso de solo com 500 Ω .m.

As sobretensões nos equipamentos de média tensão como os geradores, transformador elevadores, cabos isolados e componentes eletrônicos podem ser estimadas com os estudos de coordenação de isolamento e são importantes para o correto funcionamento das turbinas eólicas, recomendações e tipos de sobretensões, podem ser encontradas em, (Cigré Working Group C4.30, 2017).

A variação das sobretensões encontradas na base do aerogerador é fortemente dependente do valor das resistividades do solo, como era de se esperar, que chegam a quintuplicar no caso da maior resistividade em relação menor resistividade e chegando a quase 3 MV, já no caso de 1.000 Ω .m temos uma sobretensão em torno de 1 MV.

Em solos de 3.000 Ω .m observa-se um pico na ordem de 2 MV, o que é o dobro do solo de 1000 Ω .m. Na base dos aerogeradores geralmente temos equipamentos de manobra, como cubículos de média tensão, seccionadores, terminações, o qual tais equipamentos nas bases devem ser também avaliados suas respectivas suportabilidades, para proteção destes no momento de uma descarga atmosférica na torre do aerogerador.

Interessante observar também, que nos casos que o solo de mais baixa resistividade, temos uma maior contribuição dos indutivos dos condutores, o que faz com que a sobtensão na base a subida seja um pouco mais suave, o que reduz as componentes de maiores frequências no transitório.

Por fim na figura 6.3.1.8, são apresentados os valores das magnitudes das sobretensões na pá em função da frequência, por esta ser uma onda mais lenta com tempo de subida de 10 μs , temos as maiores magnitudes abaixo dos 100 kHz.

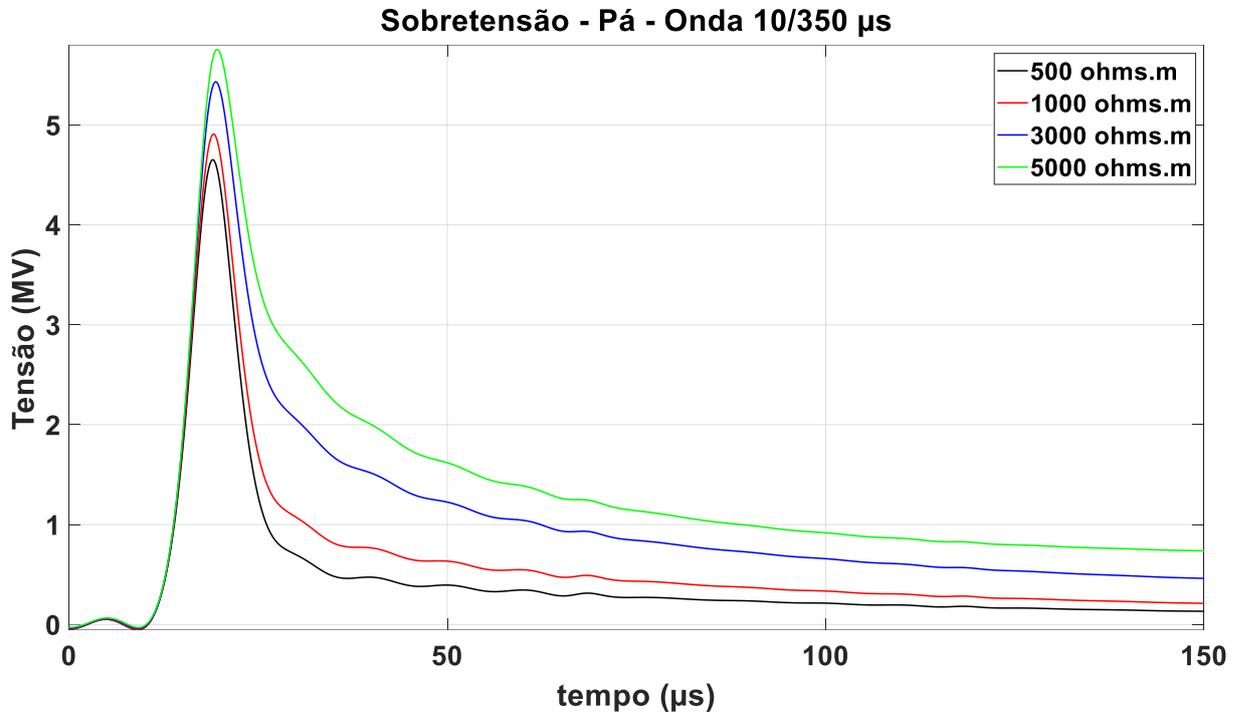


Figura 6.3.1.5 – Sobretensão na pá, onda 10/350 μs , fonte: autor

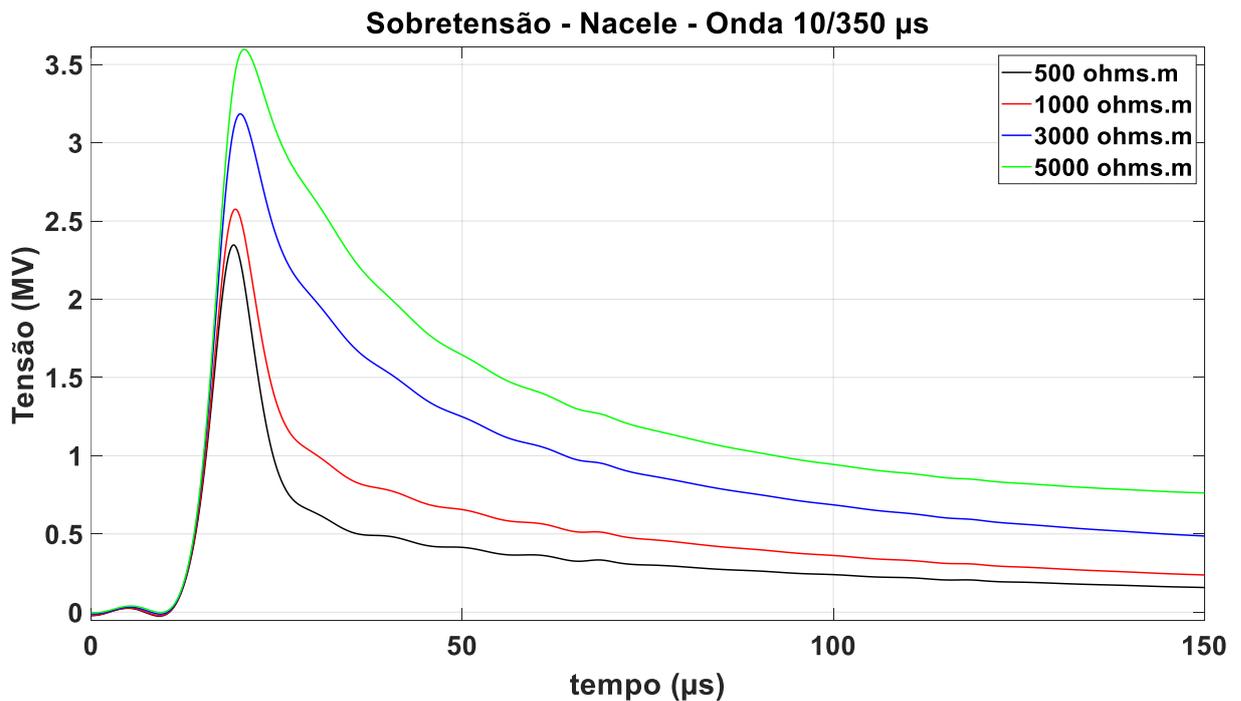


Figura 6.3.1.6 – Sobretensão na nacele, onda 10/350 μs , fonte: autor

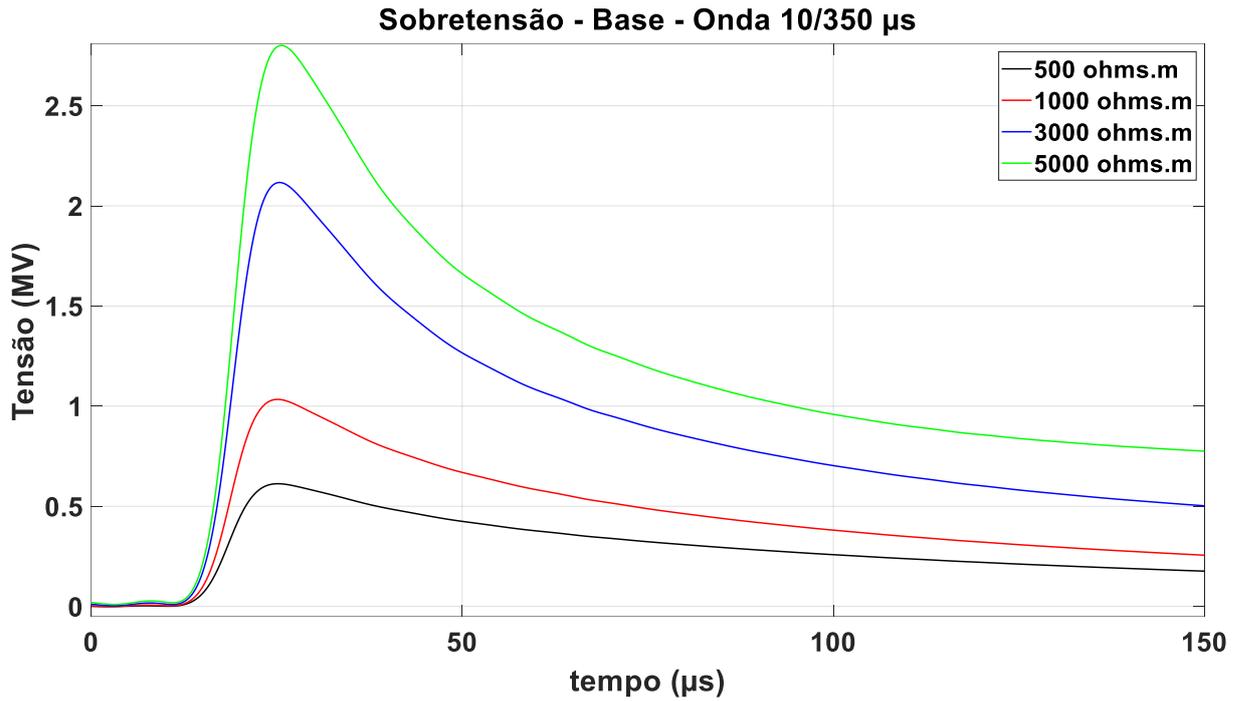


Figura 6.3.1.7 – Sobretensão na base, onda 10/350 μ s, fonte: autor

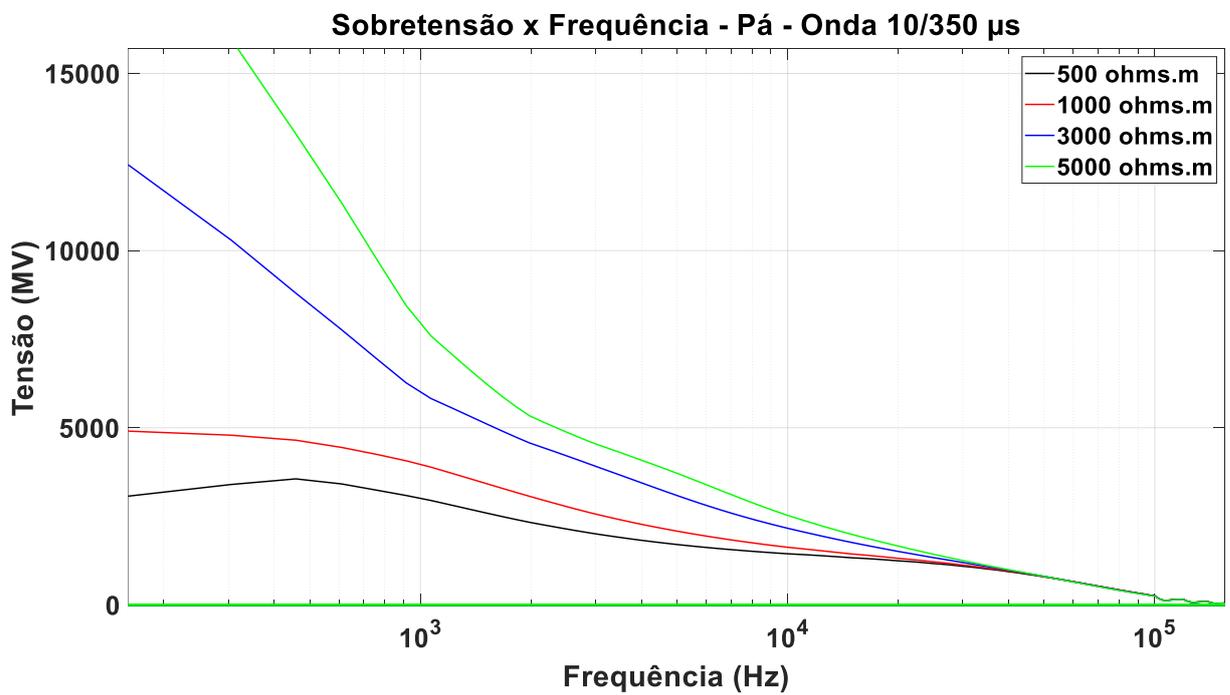


Figura 6.3.1.8 – Espectro de frequência da tensão na pá para onda 10/350 μ s, fonte: autor

6.3.2 Sistema de aterramento e aerogeradores onda 1/200 μs

Utilizando a mesma comparação do item anterior, agora com uma onda de 1/200 μs , plotamos os GPR's com e sem a consideração das torres dos aerogeradores, apresentados nas figuras 6.3.2.1 a 6.3.2.4, em solos de 500, 1.000, 3.000 e 5000 $\Omega\cdot\text{m}$ respectivamente.

Diferentemente da onda 10/350 μs , temos um comportamento completamente diferente quando são considerados as torres eólicas, como por exemplo uma magnitude maior dos GPR's, com acréscimos de 41%, 42%, 48% e 23% respectivamente para solos de 500, 1.000, 3.000 e 5.000 $\Omega\cdot\text{m}$.

Nestes tipos de descarga, como já comentamos anteriormente, por ter um maior componente de frequências mais elevadas, apenas a partir de 3.000 $\Omega\cdot\text{m}$ passa a ser mais significativas as torres B e C. Quando se consideram as torres eólicas, temos um transitório oscilatório, em torno das curvas dos casos que foram considerados apenas os sistemas de aterramento, com período de 3 μs nos quatro pontos considerados em nosso estudo.

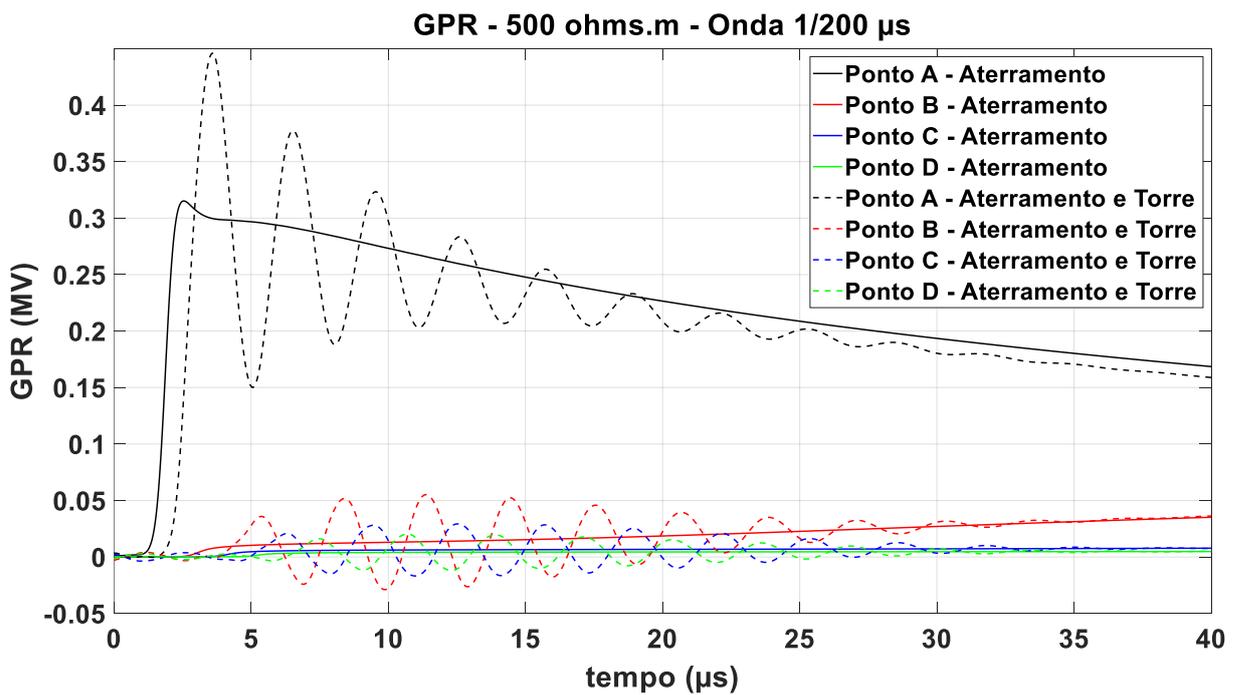


Figura 6.3.2.1 – GPR Onda 1/200 μs , resistividade 500 $\Omega\cdot\text{m}$, fonte: autor

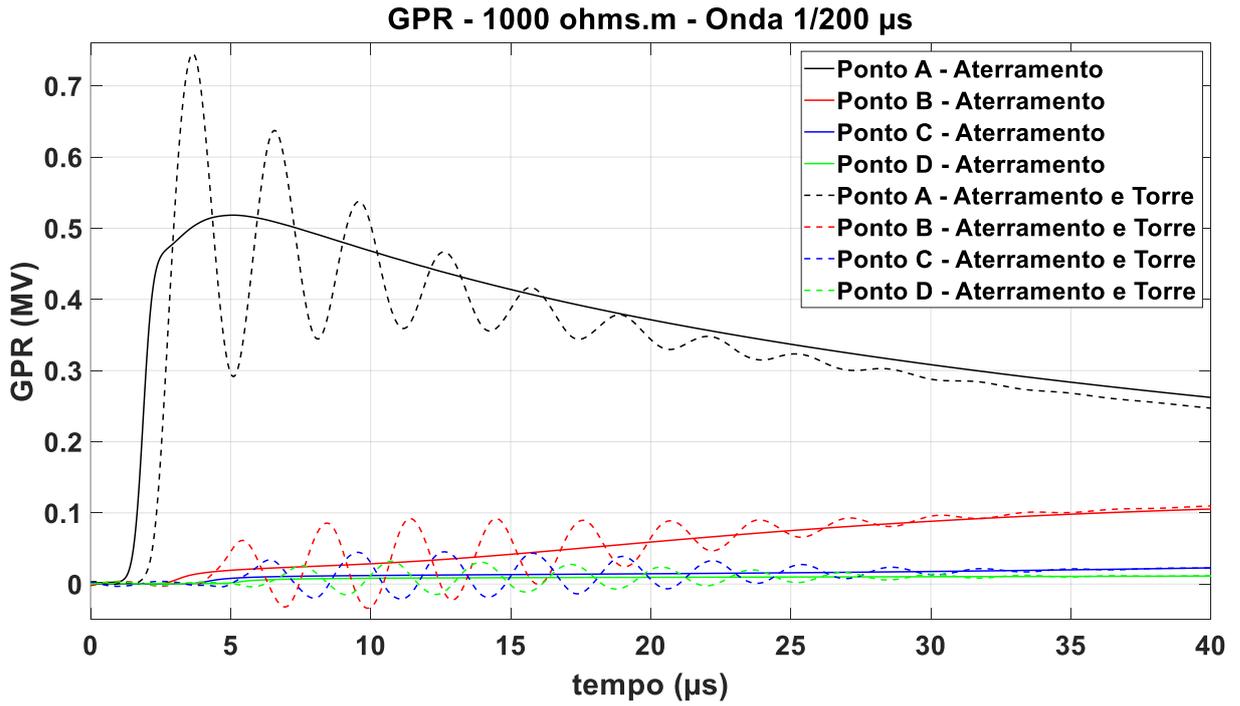


Figura 6.3.2.2 – GPR Onda 10/350 μ s, resistividade 1.000 Ω .m, fonte: autor

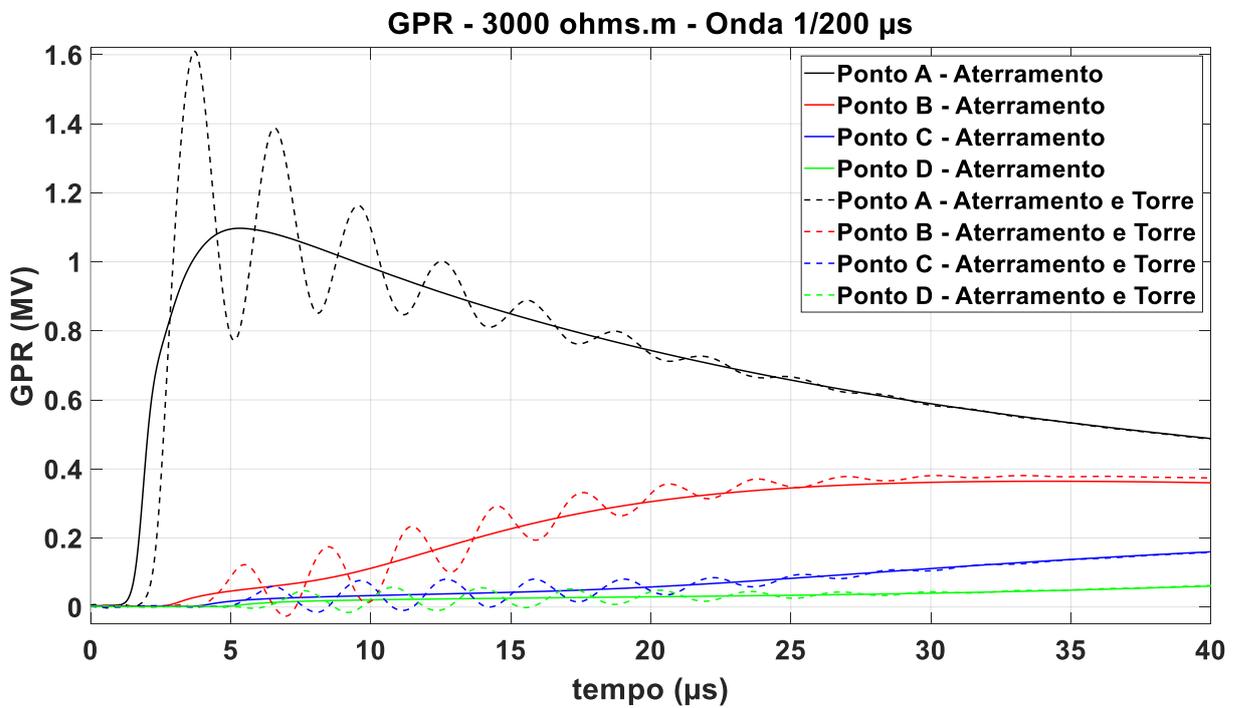


Figura 6.3.2.3 – GPR Onda 1/200 μ s, resistividade 3.000 Ω .m, fonte: autor

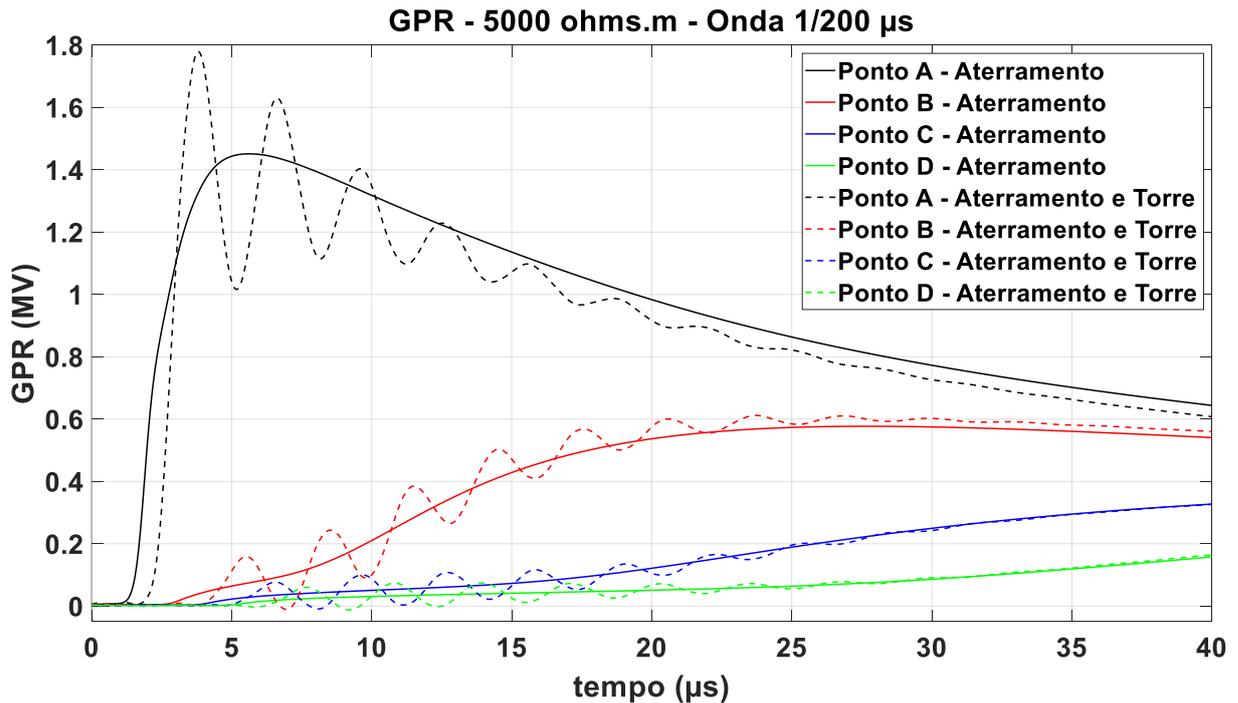


Figura 6.3.2.4 – GPR Onda 1/200 μ s, resistividade 5.000 Ω .m, fonte: autor

As figuras 6.3.2.5 a 6.3.2.7, apresentam as sobretensões na pá, nacele e base do aerogerador, respectivamente, onde claramente são observados que as sobretensões são oscilatórias, com períodos de 3 μ s. As variações pouco significativas, com relação a resistividade do solo, no caso da pá e nacele, isso se dá devido a taxa de subida ser muito rápida, ou seja, 1 μ s. O que não acontece por exemplo no caso da base que este tem variações significativas em relação as variações da resistividade do solo, até por causa das reflexões nos sistemas de aterramento, com oscilações de período de 3 μ s.

As variações das sobretensões na base do aerogerador chegam a valores de 2 MV, no caso de 5000 Ω .m, ou seja, cerca de quatro vezes maior que no caso do solo de menor resistividade, já no solo de 3.000 Ω .m, tivemos uma sobretensão de 1,65 MV e no solo de 1.000 Ω .m 0,9 MV, também oscilatória.

Observamos em nossa análise acima que tanto nos GPR's quando nas sobretensões da pá, nacele e base tivemos um comportamento oscilatório, diferente de quando não são considerados estes componentes, causa típica de uma ressonância no transitório. Na figura 6.3.2.8 é apresentada o espectro de frequência da sobretensão na pá do aerogerador em função da frequência, onde ao longo dos 312 kHz, há uma ressonância na frequência do sistema de torre, nacele e pá (em torno de 210 metros) que é proporcionada pelo conteúdo das componentes das frequências da descarga atmosférica e apresentada um período de 3 μ s, como comentado acima.

O que enfatiza a necessidade de modelagem de todos os componentes, tanto para estudos de sobretensões, quanto para os GPR's, visto que dependendo das dimensões físicas de interesse e os tipos das descargas atmosféricas, podemos ter ressonâncias nos sistemas, o que pode ocasionar numa subestimação das sobretensões e/ou impedâncias impulsivas.

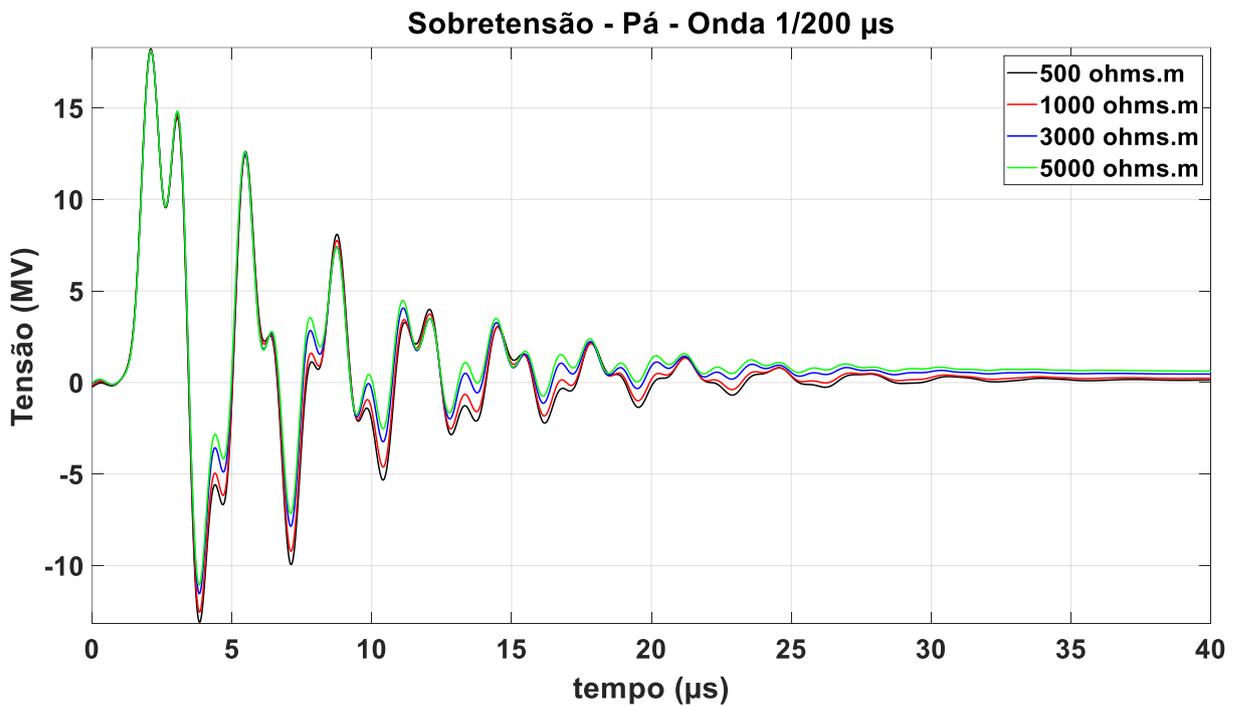


Figura 6.3.2.5 – Sobretensão na pá, onda 1/200 μ s, fonte: autor

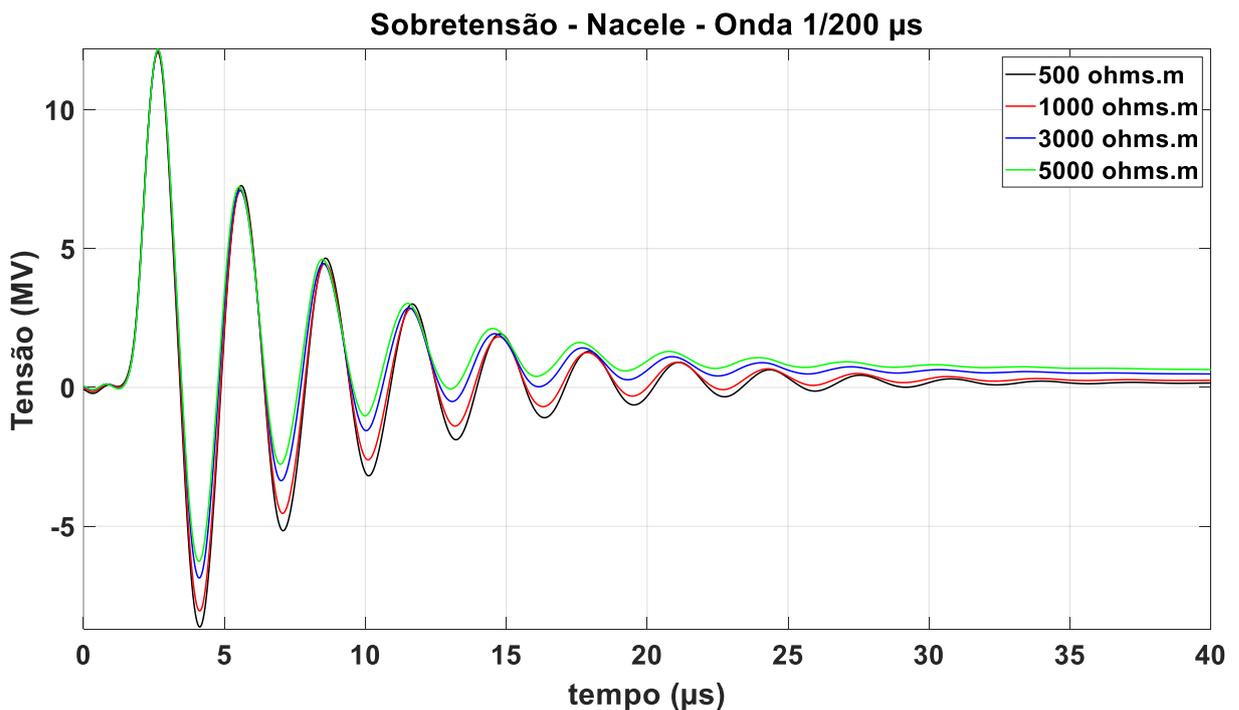


Figura 6.3.2.6 – Sobretensão na nacele, onda 1/200 μ s, fonte: autor

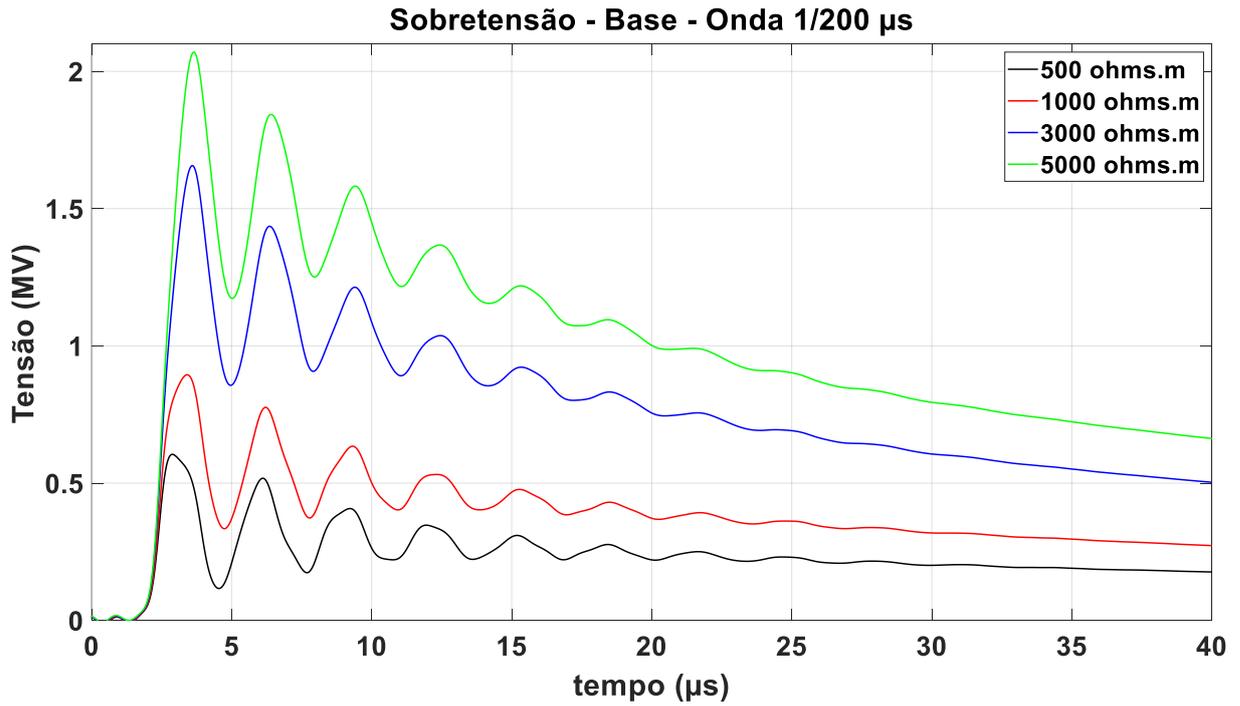


Figura 6.3.2.7 – Sobretensão na base, onda 1/200 μ s, fonte: autor

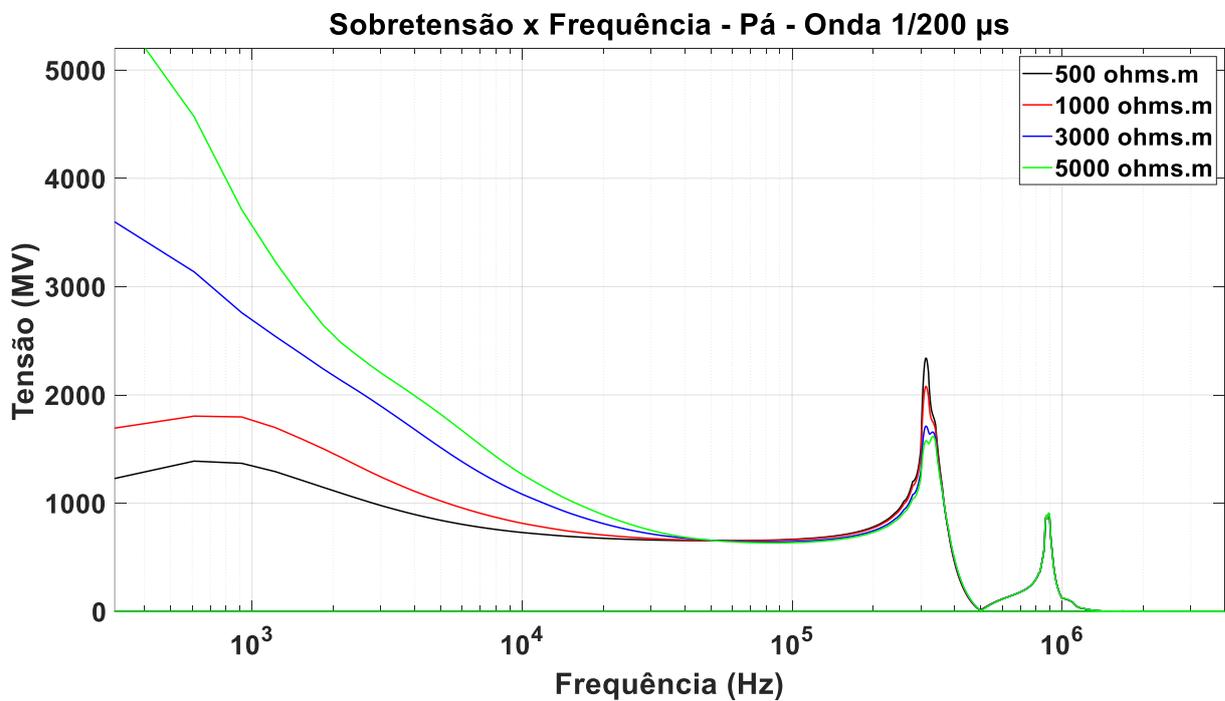


Figura 6.3.2.8 – Espectro de frequência da tensão na pá para onda 1/200 μ s, fonte: autor

6.4 Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão descarga direta no aerogerador

Nesta penúltima parte do nosso trabalho iremos apresentar o sistema anterior, com a adição da rede de média tensão isolado e aérea, como apresentado em detalhes no capítulo V. Serão apresentados os resultados em solos de 1.000 e 5.000 $\Omega.m$, mostrando as sobretensões no cabo isolado na nacele, base, poste de transição e rede de média tensão aérea para as ondas 10/350 μs e 1/200 μs , no aerogerador que foi atingido pela descarga atmosférica, como apresentado na figura 6.4.1 e 6.4.2, esta última apresentação detalhada do ponto de injeção da descarga atmosférica e a rede de média tensão.

6.4.1 Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão onda 10/350 μs

As figuras 6.4.1.1 e 6.4.1.3, apresentam as correntes no cabo de média tensão para solos de 1.000 e 5.000 $\Omega.m$, respectivamente, na nacele e base do aerogerador, poste de transição e da rede de média tensão aérea.

Observa-se claramente que as correntes de maiores magnitudes estão no caso de solos de maiores resistividades, o que apresenta uma energia de 26 kJ no caso de 1.000 $\Omega.m$ e 32 kJ no solo de 5.000 $\Omega.m$, ou seja, um aumento de 23% na energia do para-raios a ser instalado. Nestes casos conseguimos observar a importância na resistividade do solo nas energias a serem especificadas dos para-raios nos estudos de coordenação de isolamento de parques eólicos.

Nas figuras 6.4.1.2 e 6.4.1.4, mostram as sobretensões no cabo de média tensão na nacele, base, poste de transição e rede de média tensão. A nacele, tem uma maior sobretensão chegando a 3 MV no caso de 5.000 $\Omega.m$ e 2,4 MV no caso de 1.000 $\Omega.m$, um acréscimo de 25% no caso do solo de maior resistividade, já no caso da base, tivemos um aumento de 207% nas sobretensões, este é o ponto muito impactado pela resistividade do solo. Este ponto da base merece um ponto de atenção visto que neste local temos a instalação de equipamentos de seccionamento conforme comentado nos itens anteriores, que pode gerar queima de equipamentos, bem como nos postes de transição que há uma modificação na impedância de surto, pois temos uma mudança de cabo isolado para uma rede

aérea, ou até a avaliação neste caso da necessidade da utilização do para-raios também na base dos aerogeradores.

Com este tipo de onda, conseguimos apresentar claramente a importância da resistividade do solo, em relação as energias a serem consideradas nos para-raios, que em nosso exemplo, houve um acréscimo de 23%, bem como as sobretensões nos cabos de média tensão que aumentaram consideravelmente com o aumento da resistividade do solo.

Outro fato interessante que devido a modelagem de todas as fases dos cabos de média tensão, temos uma divisão de corrente praticamente iguais entre as fases, que caso tivéssemos simulado apenas uma fase, haveria um aumento da energia dos para-raios da Nacele.

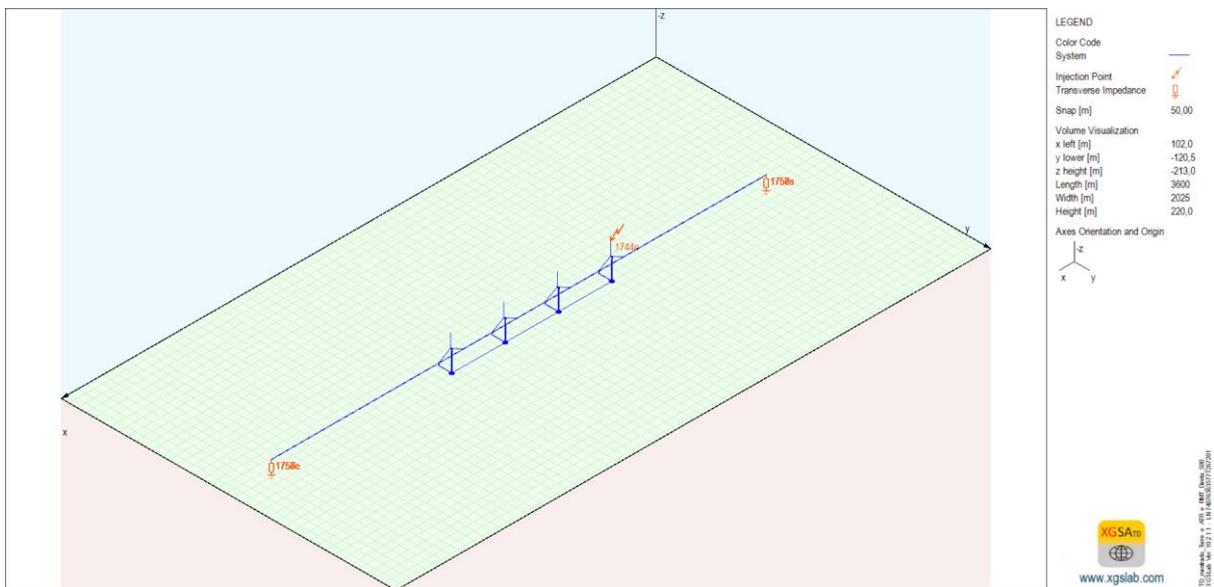


Figura 6.4.1 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, fonte: autor

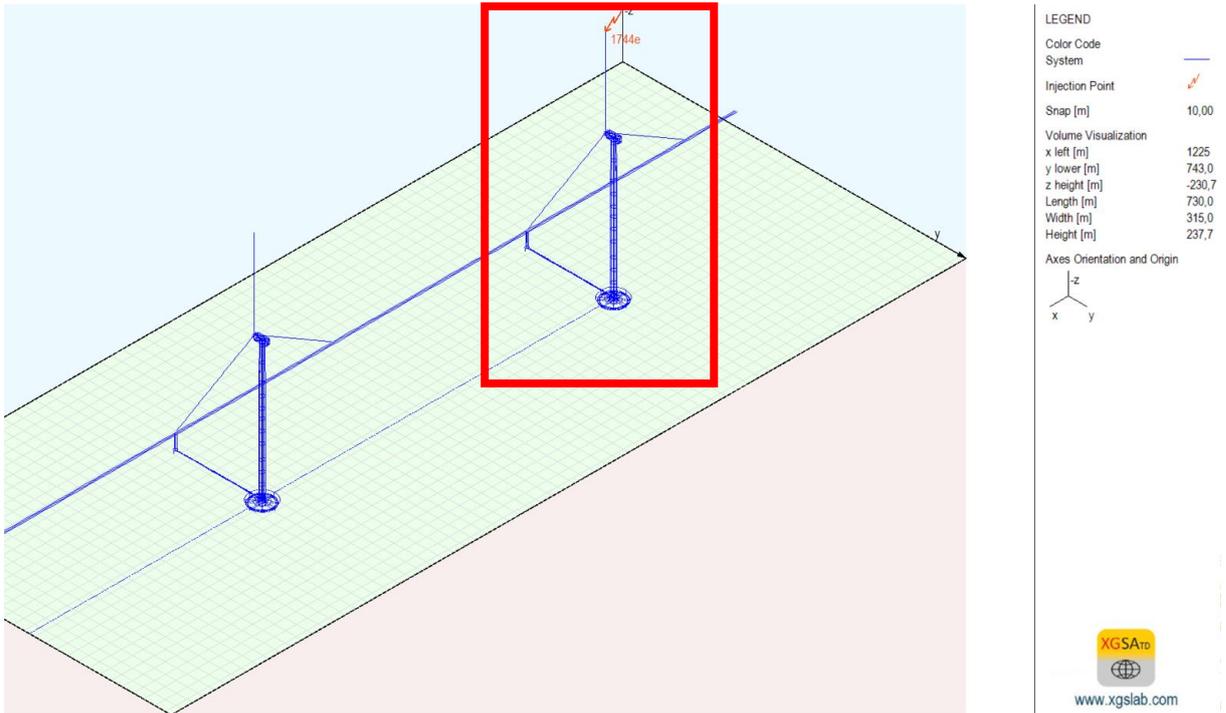


Figura 6.4.2 – Aterramentos interligados com rede de média tensão detalhe em vermelho da área de interesse, fonte: autor

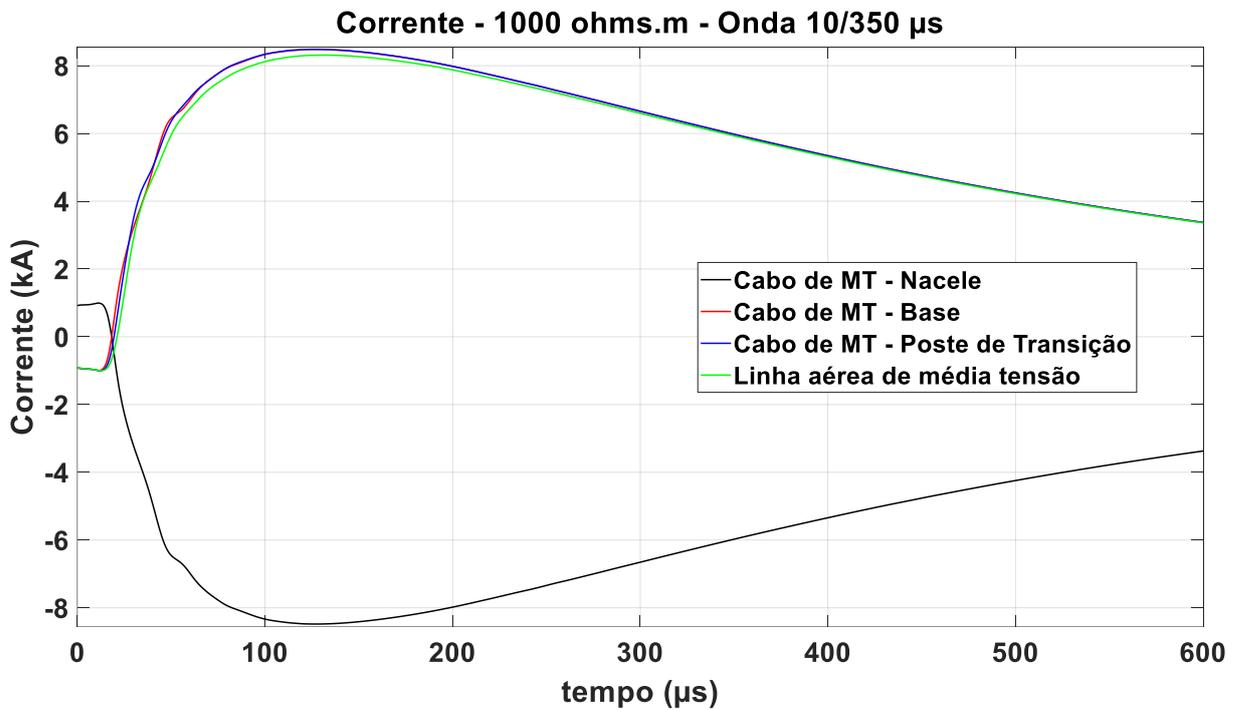


Figura 6.4.1.1 – Correntes onda 10/350 μ s, solo de 1000 Ω .m, fonte: autor

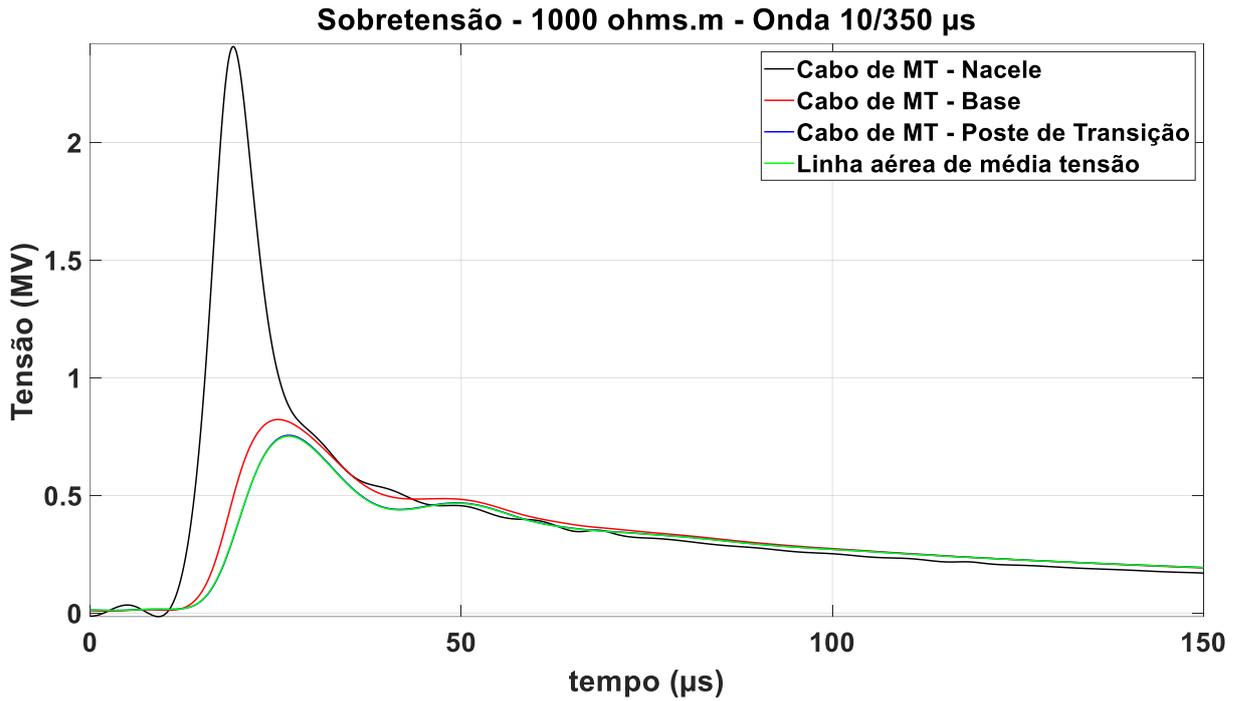


Figura 6.4.1.2 – Sobretensão onda 10/350 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor

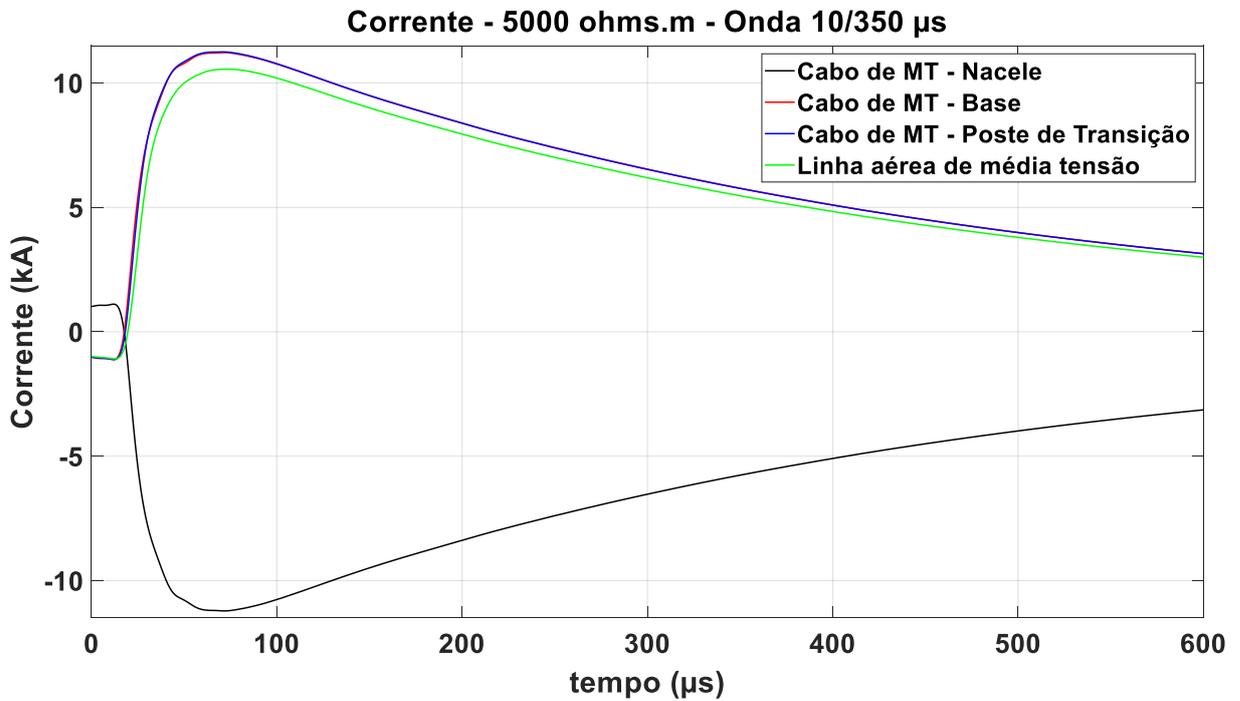


Figura 6.4.1.3 – Correntes ondas 10/350 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

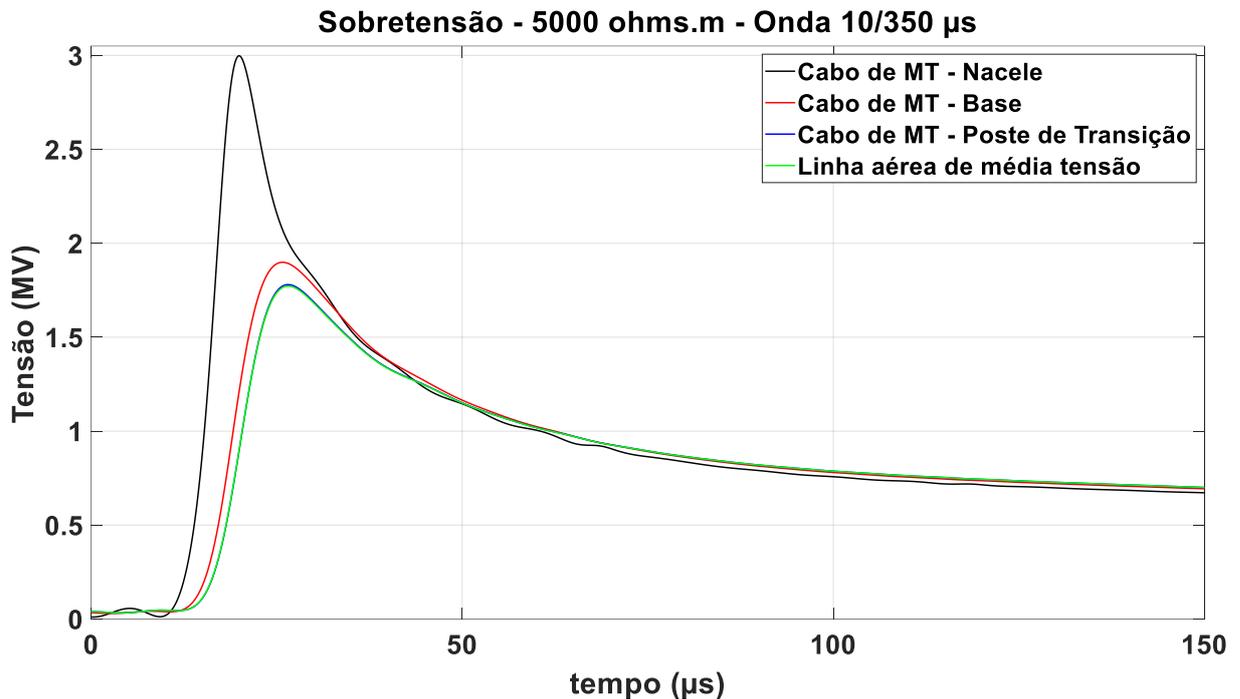


Figura 6.4.1.4 – Sobretensão onda 10/350 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

6.4.2 Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão onda 1/200 μ s

As figuras 6.4.2.1 e 6.4.2.3, apresentam as correntes no cabo de média tensão para solos de 1.000 e 5.000 Ω .m, respectivamente, na nacele e base do aerogerador, poste de transição de rede de média tensão aérea, para uma descarga atmosférica 1/200 μ s.

Como já comentado no item anterior, as correntes de maiores magnitudes estão no caso de solos de maiores resistividades, o que apresenta uma energia de 3,8 kJ no caso de 1.000 Ω .m e 4,8 kJ no solo de 5.000 Ω .m, ou seja, um aumento de 26%, porém com uma energia inferior a onda 10/350 μ s, devido sua menor magnitude e menor tempo de cauda, porém há um aumento significativo na energia em comparação aos dois tipos de solo. Cabe salientar também a oscilação inicial na corrente que comentamos no item 6.3 deste trabalho, em relação a ressonância neste tipo de onda, com período de 3 μ s.

Nas figuras 6.4.2.2 e 6.4.2.4, conseguimos observar as sobretensões para solos de 1.000 e 5.000 Ω .m, respectivamente. A sobretensão no cabo de média tensão na nacele é pouco impactado pela resistividade do solo neste tipo de onda, algo similar o que comentamos no item 6.3, desta mesma onda na pá do aerogerador. Os valores muito maiores das sobretensões, devido a rápida taxa de subida da onda 1/200 μ s em sua frente.

Já a base temos um aumento de 380% na sobretensão no solo de maior resistividade em relação ao de menor. No poste de transição temos uma sobretensão de 0,41 MV no solo de 1000 Ω .m e 1,15 MV no solo de 5.000 Ω .m, já os valores de sobretensões nas RMT's são aproximadamente iguais nos postes de transição no caso de 5.000 Ω .m e inferior no caso de 1.000 Ω .m.

Diferentemente da onda 10/350 μ s, os valores de energia nos pontos de instalações de equipamentos, são inferiores, devido ao menor pico da corrente, como a sua cauda. As sobretensões na nacele são extremamente elevadas, alcançando valores de 12 MV, onde a influência da resistividade do solo é desprezível, devido a taxa de subida rápida ou seja 1 μ s, diferente da onda anterior. Já próximo a base do aerogerador, temos uma forte influência da resistividade do solo, bem como no poste de transição.

Este tipo de onda por ter componentes de maiores frequências, como comentado anteriormente, há um transitório oscilatório nos primeiros 20 μ s, tanto nas correntes, quanto nas tensões, por causa da ressonância em torno na frequência de 312 kHz.

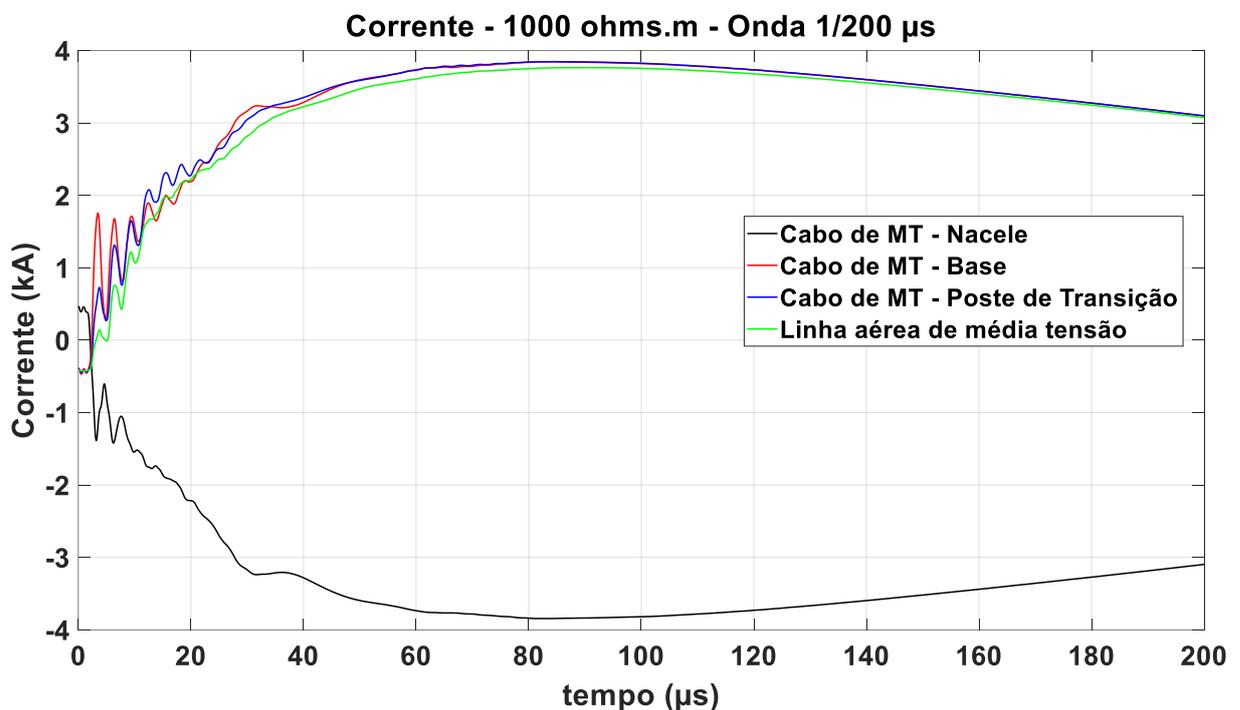


Figura 6.4.2.1 – Correntes onda 1/200 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor

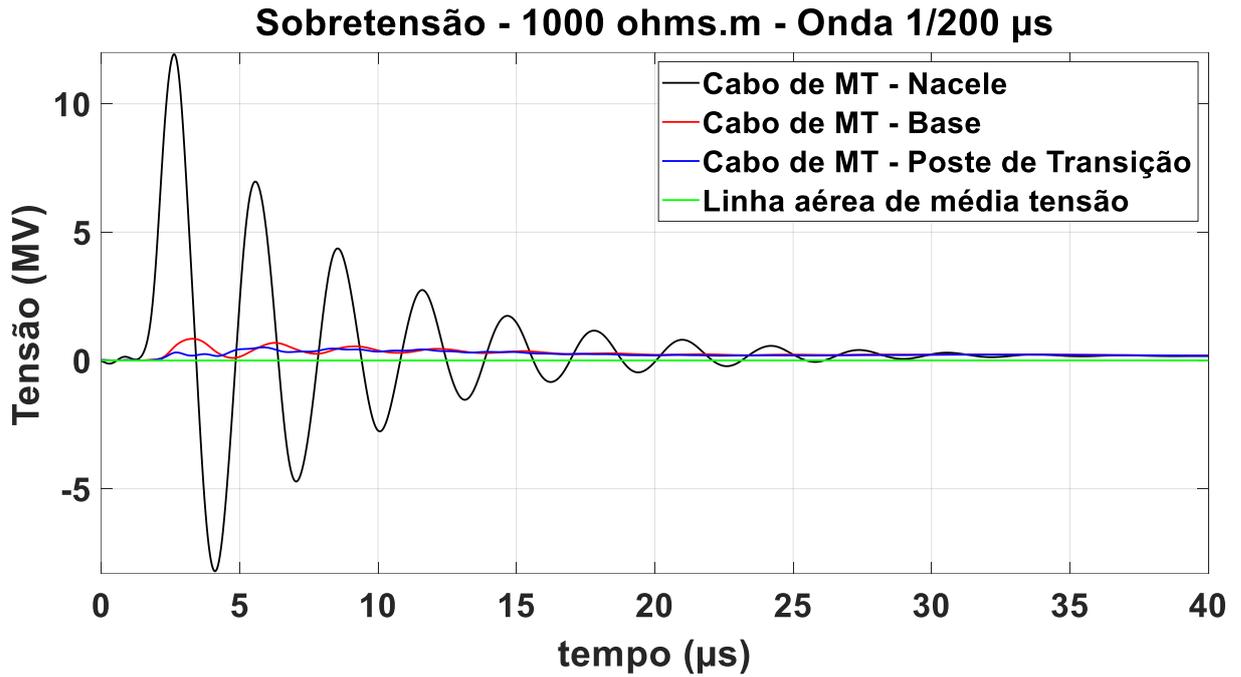


Figura 6.4.2.2 – Sobretensão onda 1/200 μ s, solo de 1.000 Ω .m, fonte: autor

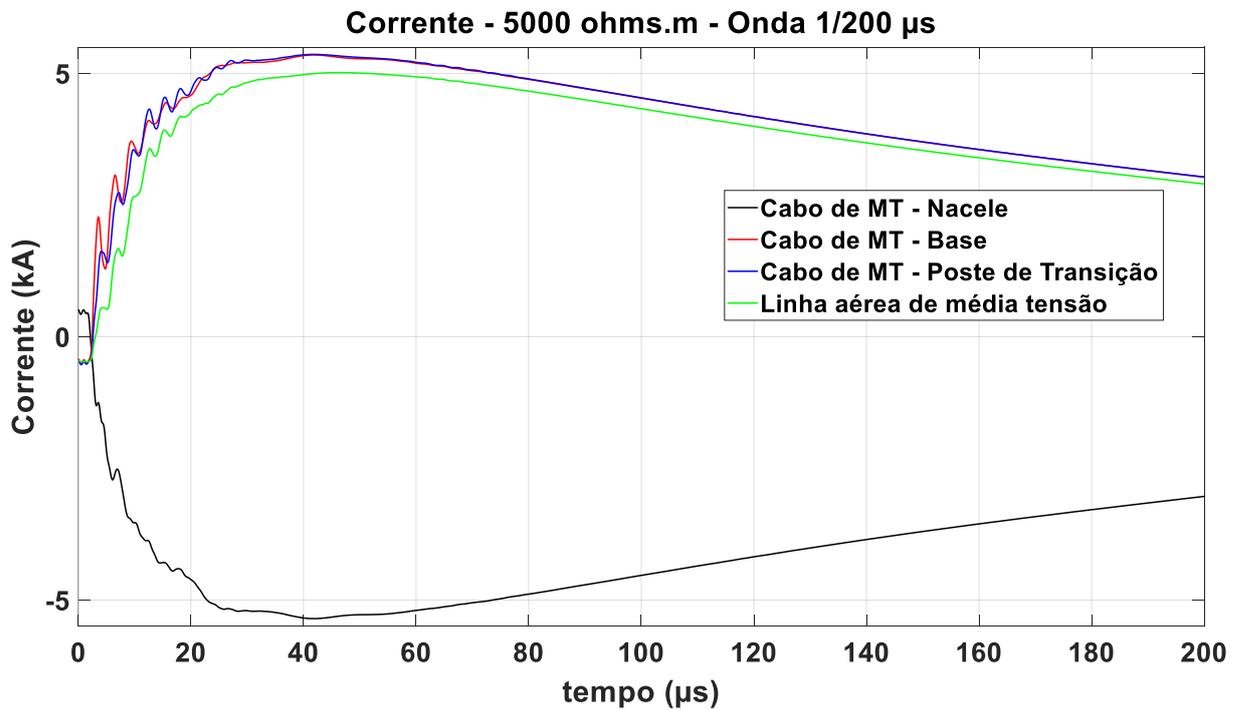


Figura 6.4.2.3 – Correntes onda 1/200 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

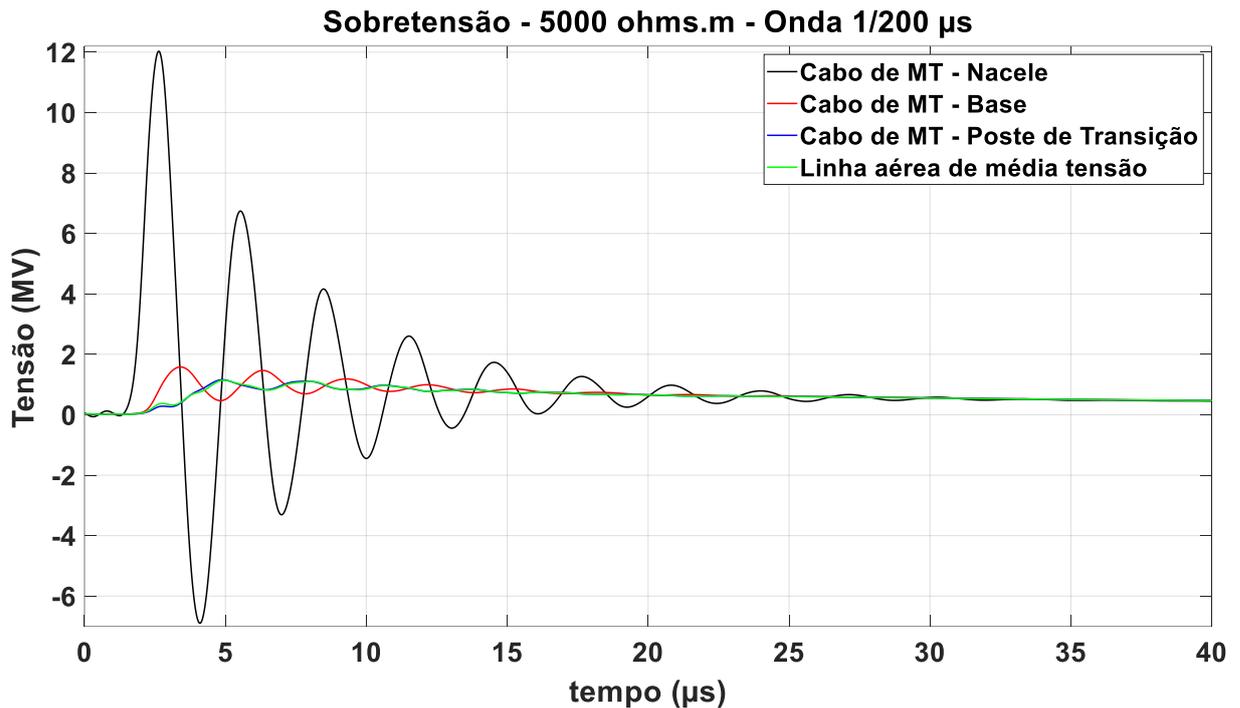


Figura 6.4.2.4 – Sobretensão onda 1/200 μ s, solo de 5.000 Ω .m, fonte: autor

6.5 Sistema de aterramento, aerogeradores e rede de média tensão Descarga próxima a rede de média tensão aérea

Nesta última parte do nosso trabalho iremos apresentar o sistema anterior, mas agora com uma descarga que cai próxima a rede de média tensão a uma distância de 50 metros, neste caso uma onda de duplo pico, com pico de 12,3 kA, apresentada na figura 2.3. A figura 6.5.1 e 6.5.2, apresenta o sistema considerado, para um solo de 5.000 Ω .m, com seus canais de descargas modelados com 3.000 metros de altura.

A figura 6.5.3, apresenta as correntes na RMT, poste de transição e base do aerogerador, a corrente no cabo de MT é maior que na RMT, devido sua menor impedância de surto já a corrente na base do aerogerador é atenuada, devido as mútuas com os demais cabos e suas respectivas blindagens no caminho até a base.

As sobretensões apresentadas na figura 6.5.4, são maiores 28 % na RMT do que no cabo isolado, pois este último como comentado tem impedância de surto menor, já na base do aerogerador esta sobretensão é mais atenuada, alcançando valores de pico de 30 kV.

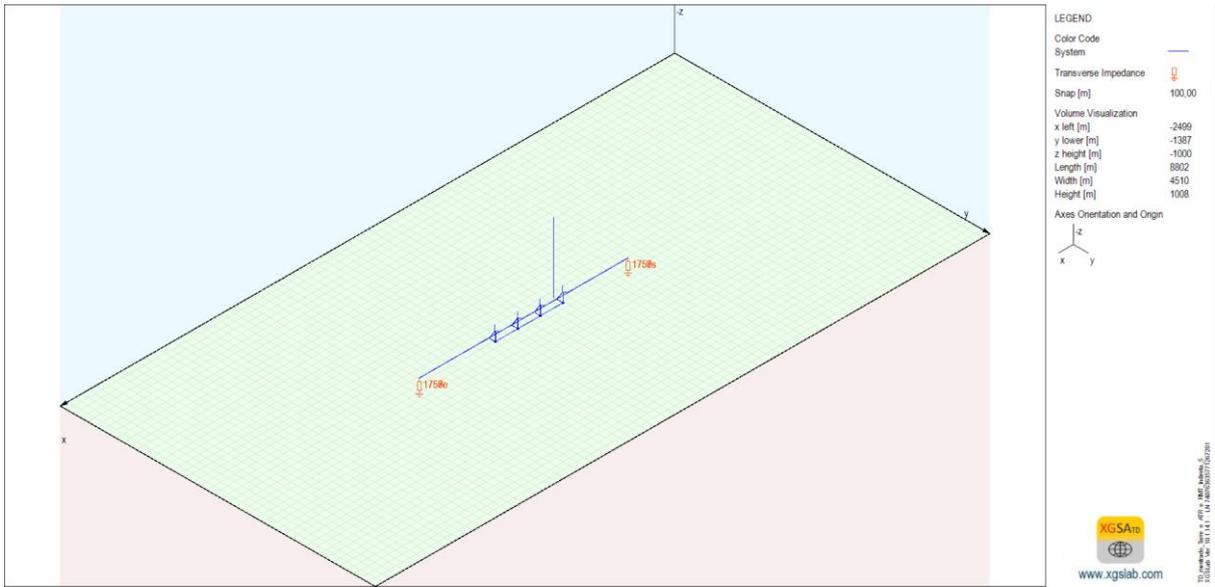


Figura 6.5.1 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, descarga próxima a rede de média tensão, fonte: autor

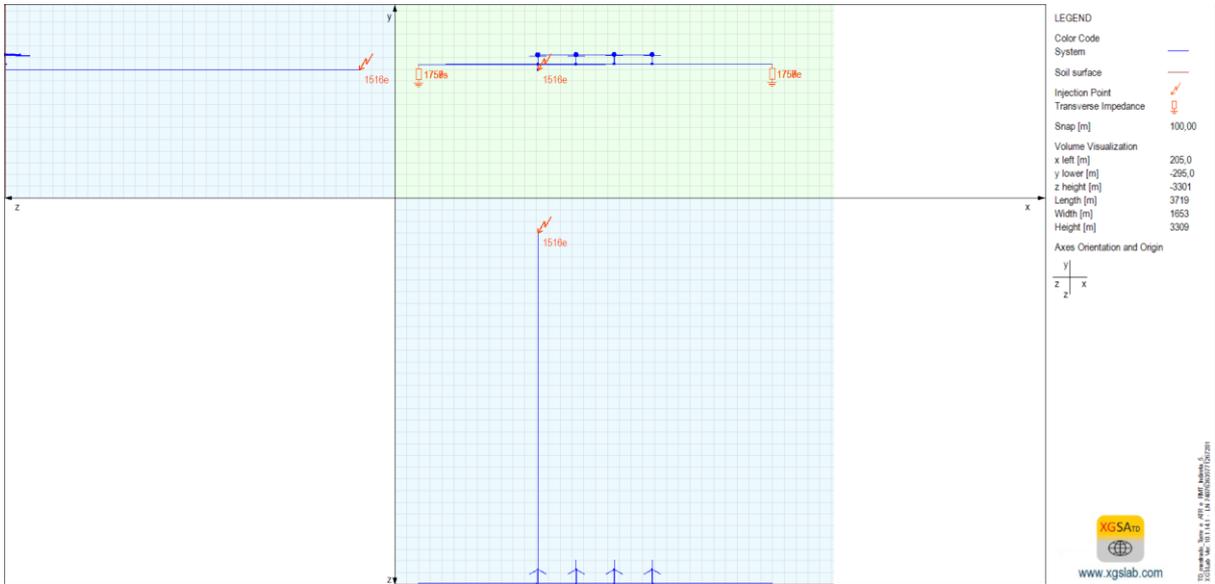


Figura 6.5.2 – Aterramentos interligados com rede de média tensão, descarga próxima a rede de média tensão, detalhe, fonte: autor

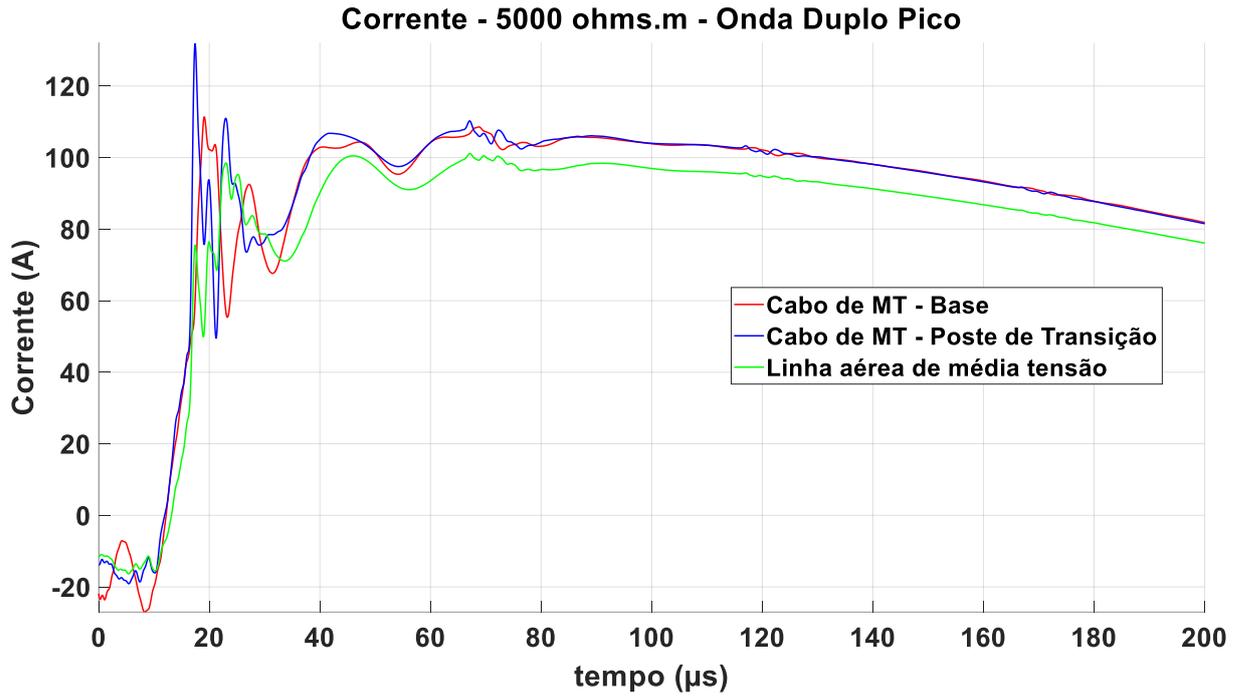


Figura 6.5.3 – Correntes onda de duplo pico, solo de 5.000 $\Omega\cdot\text{m}$, fonte: autor

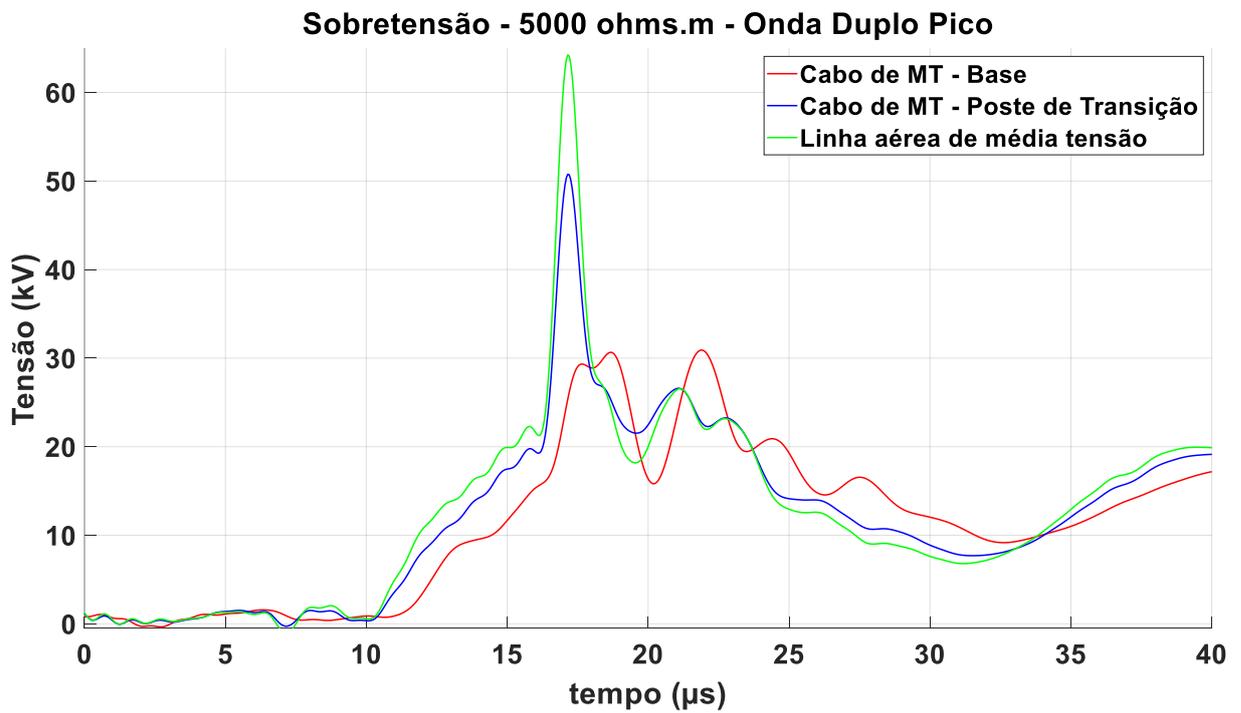


Figura 6.5.4 – Sobretensões onda de duplo pico, solo de 5.000 $\Omega\cdot\text{m}$, fonte: autor

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 Considerações finais e conclusões

Este trabalho, foi motivado devido ao aumento significativo de parques eólicos no Brasil e a literatura escassa na apresentação de um parque eólico, completo utilizando métodos numéricos e considerando as redes de média tensão nos estudos de sobretensões e coordenação de isolamento.

Iniciamos nosso trabalho falando de uma abordagem geral de um parque eólicos e seus devidos componentes, fizemos uma revisão bibliográfica em artigos de periódicos relevantes e livros, onde foram tomados como referência para desenvolvimento deste trabalho. Em seguida apresentamos em detalhes o método numérico utilizado em nosso trabalho, que no caso é o PEEC. Após isso, apresentamos todos os itens a serem considerados em nosso trabalho, desde o sistema de aterramento, torre, nacelle, pás e rede de média tensão aérea e subterrânea.

Iniciamos nosso trabalho com uma análise de sensibilidade nos sistemas de aterramentos interligados de aerogeradores, reais os quais mostramos a influência das bases vizinhos na redução dos GPR`s para vários de tipos de solo. Dois tipos de descarga atmosférica foram considerados e a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Mostramos que quanto maior a resistividade do solo e menor taxa de subida da onda, temos uma maior influência do aterramento vizinho, devido ao aumento do comprimento efetivo.

No caso das descargas com frete mais rápidas como a $1/200 \mu\text{s}$, tivemos uma menos influência dos aterramentos vizinhos, principalmente em solos de baixa resistividades, já em solos acima de $3.000 \Omega\cdot\text{m}$ passamos a ter uma maior influência. Apresentamos que a redução dos GPR`s com os parâmetros do solo variantes com a frequência, também são significativas, mesmo em solos de $500 \Omega\cdot\text{m}$, onde tivemos um aumento de 26 %, quando não são consideramos os parâmetros de solos variantes com a frequência, diferente do que recomenda a (Cigre 781 WG C4.33, 2019).

Na segunda parte dos nossos resultados apresentamos a importância da modelagem da torre, nacelle, pá e sistemas de aterramentos juntos, dependendo do tipo de onda a ser utilizada, pois no caso da onda de $1/200\mu\text{s}$, tivemos uma

influência significativa nos GPR's e uma solução oscilatória, ocasionada por uma ressonância devido ao comprimento físico do conjunto. As sobretensões na nacele e pá tem uma influência desprezível dos parâmetros de resistividade do solo, para a onda 1/200 μ s.

No caso da onda 1/200 μ s, devido seus componentes de maiores frequências, temos uma ressonância em torno de 312 kHz, ocasionada pelo comprimento do conjunto pá, nacele e torre, o que causa um aumento significativo nos GPR's, chegando a ter magnitudes acrescidas em cerca de 48%. As sobretensões nos componentes, chegam a ter o mesmo comportamento oscilatório dos GPR's, com período de 3 μ s, que após alguns microssegundos se atenua, devido a presença de frequências menores na cauda da onda e dissipação da corrente no solo.

Em nossa terceira parte de resultados, apresentamos as sobretensões encontradas nos cabos isolados, com as blindagens aterradas em apenas uma extremidade, no lado na nacele. Nos casos das ondas 10/350 μ s mostramos que as energias a serem dimensionadas os para-raios têm uma forte influência da resistividade do solo, com um aumento de 23 % nos solos de maiores resistividades e as sobretensões têm um aumento significativo principalmente na base dos aerogeradores e na nacele um aumento de 25%.

A descarga 1/200 μ s, apresentou energias menores, devido ao seu menor pico da corrente e cauda mais curto, porém apresentou sobretensões na nacele, muito maiores que a onda 10/350 μ s, devido sua subida rápida e a contribuição da resistividade do solo foi desprezível. Já na base do aerogerador, tivemos um aumento significativo de sobretensão.

Por fim apresentamos um caso de descarga atmosférica indireta na rede de média tensão, num solo de 5.000 Ω .m, que mostrou sobretensão e correntes muito menores que no caso das descargas diretas na pá do aerogerador. A severidade das descargas diretas na pá dos aerogeradores é muito maior do que no caso das descargas indiretas na rede de média tensão, estas últimas têm magnitudes de correntes muito menores, energias associadas as ondas de correntes menores e sobretensões nos equipamentos, menores. Este tipo de descarga atmosférica deve ser avaliado sempre, principalmente por causa dos para-raios geralmente instalados poste de transição e dos equipamentos da base dos aerogeradores e possível ressonância na resposta das sobretensões devido aos componentes de maiores frequências das descargas atmosféricas indiretas.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros em sistemas de aterramento

Assim como todo trabalho, há sempre possibilidades de extensões para outras ideias relacionadas ao tema de proteções contra descargas atmosféricas em parques eólicos. Um deles seria a análise das sobretensões nos componentes de baixa tensão (sistemas de controle, comunicação, energia e sinais) principalmente na nacela, devido ao forte acoplamento indutivo, pois a descarga atmosférica tem uma maior probabilidade de atingir as pás do aerogerador, o que torna mais severo este tema.

Este tema tende a envolver muitos sistemas eletrônicos, além das sobretensões conduzidas através do transformador média para baixa tensão há também os acoplamentos existentes. Cabe também avaliar uma descarga que incide direto na nacela, não muito frequente, mas possível.

Outro tema sugerido seria uma análise das sobretensões considerando os sistemas interligados via cabo para-raios na rede de média tensão e a não interligação entre os sistemas de aterramentos dos aerogeradores, ou seja, sistemas de aterramentos isolados, como se comportariam os GPR's e as sobretensões nos equipamentos e nas redes de média tensão. Outro tipo de interligação dos aterramentos seria através das blindagens dos cabos isolados, que seria um comportamento diferente dos demais citados anteriormente.

Por último mais uma sugestão seria uma análise das sobretensões nos cabos isolados de média tensão considerando os diferentes tipos de aterramentos das suas respectivas blindagens. Nos pontos de instalações de equipamentos, ou seja, aterrada em ambas as extremidades da nacela e base, já entre a base e poste de transição apenas no lado da base e avaliar a redução ou aumento das sobretensões nos vários casos em diferentes resistividades do solo.

REFERÊNCIAS

- Aghabarati, A., Nazari, M., Moini, R., Fortin, S., Li, Y., & Dawalibi, F. P. (2017, October 28). Lightning susceptibility analysis of cables in a wind turbine. *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, p. 1-6.
- Alipio, R., Guimaraes, M., Passos, L., & Conceição, D. (2021, January 10). Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning. *Electric Power Systems Research*, p. 1-12.
- Alipio, R., Guimaraes, M., Passos, L., & Conceição, D. (2021, February 24). Ground Potential Rise in Wind Farms due to Direct Lightning. *Electric Power Systems Research*.
- Araújo, A. R., Azevedo, W. L., Annibale, J. L., Silva, W. C., & Filho, J. P. (2021, September 10). Transient Analysis of Interconnected Grounding Grids Under Physically Damaged Conditions. *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, p. 739-745.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. (2022, Julho 29). *DADOS ABEEÓLICA*. Tratto da ABEEólica: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>
- Azevedo, W. L., Silva, W. C., Araújo, A. R., & Filho, J. P. (2021, November 19). Computation of Transient Voltages on Wind Turbines on Frequency-Dependent Soil Caused by Lightning Strikes. *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, p. 1-6.
- Balanis, C. A. (2009). *Teoria de Antenas*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC.
- Bewley, L. V. (1933). *Traveling Waves On Transmission Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cardoso, J. R. (2011). *Engenharia Eletromagnética*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Cigré 549, WG C4.407. (2013, August 1). Lightning Parameters for Engineering Applications. *Lightning Parameters for Engineering Applications*, p. 118.
- Cigré 578 WG C4.409. (2014, June 1). Lightning Protection of Wind Turbine Blades. *Working Group C4.409*, p. 1-42.
- Cigre 781 WG C4.33. (2019, October 1). Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems. *Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems*, p. 67.
- Cigré TB 785. (2019, December 1). Electromagnetic computation methods for lightning surge studies with emphasis on the FDTD method. *WG C4.37*, p. 1-192.
- Cigré Working Group C4.30. (2017, November 1). EMC IN WIND ENERGY SYSTEMS. *WG C4.30*, p. 1-85.
- David K, C. (2014). *Field and Wave Electromagnetics*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Dawalibi, F., & Southey, R. (1989, July 1). Analysis of Electrical Interference from Power Lines to Gas Pipelines - Part I: Computation Methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1840-1846.
- De Conti, A., & Visacro, S. (2007, May 1). Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 49*, p. 1-4.

- E. RUEHLI, A., ANTONINI, G., & JIANG, L. (2017). *CIRCUIT ORIENTED ELECTROMAGNETIC MODELING USING THE PEEC TECHNIQUES*. Hoboken, New Jersey: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- FREIRE, P. D. (2022, June 1). Ground modeling for the design of electrical grounding systems - The determination of the geoelectric model depth. *Ground modeling for the design of electrical grounding systems - The determination of the geoelectric model depth*, p. 1-15.
- Freire, P. E., & Pereira, S. Y. (2016, March 1). WINDFARM GROUNDING. *2016 CIGRE C4 International Colloquium on EMC, Lightning and Power Quality Considerations for Renewable Energy Systems*, p. 1-5.
- Fuchs, R. D. (2015). *Transmissão de Energia Elétrica*. Uberlândia: Editora da Universidade Federal de Uberlândia.
- Governo do Estado do Ceará e Camargo Schubert. (2019). *Atlas Eólico e Solar*. Fortaleza: Camargo Schubert Engenheiros Associados.
- Grcev, L. (2003, February 18-20). DYNAMIC BEHAVIOR OF GROUNDING GRIDS. *Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 569-574.
- Grcev, L., & Grcevski, N. (1998, April 1). SOFTWARE METHODS FOR INTERACTIVE OPTIMIZATION OF HIGH FREQUENCY AND TRANSIENT PERFORMANCE OF COMPLEX GROUNDING SYSTEMS. *International Conference on Grounding and Earthing*, p. 68-73.
- Gustavsen, B., & Semlyen, A. (1999, July 3). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1052-1061.
- IEC 60099-5. (2018, January 01). IEC - International Electrotechnical Commission. *Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations*, p. 1-194.
- IEC 61400-24. (2019, 07 01). Wind energy generation systems – Part 24: Lightning protection. *Wind energy generation systems – Part 24: Lightning protection*, p. 196.
- IEC 62305-1. (2010, December 1). Protection against lightning – Part 1: General principles. *Protection against lightning – Part 1: General principles*, p. 142.
- IEC 62858. (2019, October 01). Lightning density based on lightning location systems – General principles. *International Electrotechnical Commission (IEC)*, p. 1-34.
- IEEE Standard Association 2760. (2020, September 24). Guide for Wind Power Plant Grounding System Design for Personnel Safety. *IEEE Power and Energy Society*, p. 1-29.
- IEEE Std 1410 - 2010. (2010, January 28). Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. *Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, p. 73.
- IET ENERGY ENGINEERING. (2020). *Lightning Interaction with Power Systems Volume 1: Fundamentals and modelling*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Johns, P. B., & Beurle, R. L. (1971, September 1). Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. *Proceedings of the IEEE*, p. 1203-1208.

- Meppelink, J., Andolfato, R., & Cuccarollo, D. (2016, June 27-29). Calculation of Lightning Effects in the Frequency Domain with a Program based on Hybrid Methods. *International Colloquium on Lightning and Power Systems*, p. 1-19.
- Moein Nazari, R. M., & Dawalibi, F. P. (2020, February 21). Impact of Frequency-Dependent Soil Models on Grounding System Performance for Direct and Indirect Lightning Strikes. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, p. 1-11.
- NBR ABNT 5419-2. (2015, Junho 22). Proteção contra descargas atmosféricas. *Parte 2: Gerenciamento de risco*, p. 104.
- NBR ABNT 7117-1. (2020, Novembro 01). Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. *Parte 1: Medição da Resistividade e Modelagem Geoelétrica*, p. 22.
- Neoenergia. (2022, Setembro 19). *Complexo Eólico Oitis*. Tratto da Neoenergia Renováveis: <https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-de-negocios/renovaveis/renovaveis-eolica/Paginas/complexo-oitis.aspx>
- ONU Brasil. (2022, Setembro 19). *Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. Tratto da Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. (2022, Setembro 19). *EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA*. Tratto da Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx
- Pinto, M. (2013). *Fundamentos de Energia Eólica*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ramo, S., Whinnery, J., & Duzer, T. V. (1965). *Fields and Waves in Communication Electronics*. New York and London: Wiley International Edition.
- S. Wang, J. H. (2010, February 1). A time-domain multiport model of thin-wire system for lightning transient simulation. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, p. 128-135.
- Sadiku, M. N. (2012). *Elementos de Eletromagnetismo*. Porto Alegre: Bookman.
- Sekioka, S., Otaguro, H., & Funabashi, T. (2019, April 2). A Study on Overvoltages in Windfarm Caused by Direct Lightning Stroke. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, p. 671-679.
- Shulzhenko, E., Yamamoto, K., & Rock, M. (2021, September 1). Modeling Lightning Current Distribution in Tower Base of Wind Turbine. *SIPDA*, p. 1-8.
- The Institution of Engineering and Technology. (2020). *Lightning Interaction with Power Systems Volume 2: Applications*. London: Institution of Engineering and Technology.
- Visacro, S., & Soares, A. (2005, April 1). HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1206-1208.
- Visser, H. J. (2015). *Teoria e Aplicação de Antenas*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos.
- WEG. (2022, Julho 29). *Notícias WEG*. Tratto da Site da WEG: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-lanca-novo-aerogerador-de-7-mw>

Working Group Cigré C4.501 TB 543. (2013, June 1). GUIDE FOR NUMERICAL ELECTROMAGNETIC ANALYSIS METHODS: APPLICATION TO SURGE PHENOMENA AND COMPARISON WITH CIRCUIT THEORY-BASED APPROACH. *Working Group Cigré C4.501*, p. 1-106.

XGSLab Software. (2022, Dezembro 10). *XGSLab*. Tratto da XGSLab Grounding Software: <https://www.xgslab.com/>

YAMAMOTO, K., HONJYO, N., YOKOYAMA, S., YASUDA, Y., SEKIOKA, S., & YAMABUKI, K. (2020, August 1). Technologies developed to operate wind turbines reliably and safely in a lightning-prone environment. *Cigre Session 48*, p. 1-11.

Yutthagowith, P., Ametani, A., Nagaoka, N., & Baba, Y. (2011, August 1). Application of the Partial Element Equivalent Circuit Method to Analysis of Transient Potential Rises in Grounding Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, p. 726-736.

Zhang, L., Fang, S., Wang, G., Zhao, T., & Zou, L. (2017, December 1). Studies on an Electromagnetic Transient Model of Offshore Wind Turbines and Lightning Transient Overvoltage Considering Lightning Channel Wave Impedance. *Energies*, p. 1-15.

ANEXO A

O XGSLab © (ou abreviadamente XGS) é um dos mais poderosos softwares de simulação eletromagnética para sistemas de energia, aterramento e proteção contra raios e tem sido escolhido por muitas Universidades e empresas de Engenharia Elétrica de renome em todo o mundo (XGSLab Software, 2022).

XGS inclui os módulos (XGSLab Software, 2022):

- GSA (Grounding System Analysis) para aplicação básica (equipotencial) com sistemas enterrados
- GSA_FD (Grounding System Analysis in the Frequency Domain) para aplicações gerais com sistemas enterrados
- XGSA_FD (Over and Underground System Analysis in the Frequency Domain) para aplicações gerais com sistemas aéreos e enterrados
- XGSA_TD (Over and Underground System Analysis in the Time Domain) para aplicações gerais com sistemas aéreos e subterrâneos
- NETS (Network Solver) para redes em malha completa multicondutores e multifásicas
- SHIELD (Lightning Shielding) para projeto de proteção contra raios com base em modelo numérico

Os módulos GSA, GSA_FD, XGSA_FD e XGSA_TD são baseados na teoria do campo eletromagnético e incluem as seguintes ferramentas auxiliares (XGSLab Software, 2022):

- SRA (Soil Resistivity Analysis) para modelagem de solo a partir de medições de resistividade do solo
- SA (Seasonal Analysis) para variação de modelagem de solo conforme as estações mudam
- FA (Fourier Analysis direct / inverse) para passar da frequência para o domínio do tempo e vice-versa (somente para XGSA_TD)

O campo de aplicação dos módulos GSA, GSA_FD, XGSA_FD e XGSA_TD é amplo porque são baseados no método PEEC (Partial Element Equivalent Circuit), um método numérico para aplicações gerais poderoso, flexível e perfeitamente adequado para fins de engenharia. Este método permite a análise de cenários complexos incluindo parâmetros externos como tensões, correntes e impedâncias. O método PEEC implementado resolve as equações de Maxwell em condições de onda completa levando em consideração as funções de Green para propagação, as integrais de Sommerfeld para a reação da terra, as equações de Jefimenko para campos elétricos e magnéticos e passando do domínio da frequência para o domínio do tempo por meio do transformada de Fourier.