



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG**

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DPPG

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA - PPGEL**

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ATERRAMENTOS DE TURBINAS EÓLICAS FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Aluna: Daiane Conceição Rafael

Orientador(a): Rafael Silva Alípio

Coorientador(a): Rosilene Nietzsche Dias

Belo Horizonte, 25 de abril de 2018



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG**

**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA - PPGE**

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ATERRAMENTOS DE TURBINAS EÓLICAS FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Daiane Conceição Rafael

Texto da Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Rafael Silva Alípio

Coorientador(a): Rosilene Nietzsche Dias

Belo Horizonte, 25 de abril de 2018

Rafael, Daiane Conceição

R136r Análise do desempenho de aterramentos de turbinas eólicas frente a descargas atmosféricas / Daiane Conceição Rafael. – 2018.

xiii, 96 f.: il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.

Orientador: Rafael Silva Alípio.

Coorientadora: Rosilene Nietzsche Dias.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Energia eólica – Teses. 2. Aterramento elétrico – Teses. 3. Eletricidade atmosférica – Teses. 4. Solo – Impacto ambiental – Teses. I. Alípio, Rafael Silva. II. Dias, Rosilene Nietzsche. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.312136

Dedico este trabalho:

A minha mãe Vilma e ao professor e amigo Rafael Alípio, que nunca duvidaram um instante sequer da minha capacidade, até mesmo quando eu própria duvidava.

Agradecimentos

Agradeço:

- ao Prof. Rafael pela orientação, atenção, conselhos e cuidados ao longo de todo esse mestrado. Não tenho palavras para agradecer nem para mensurar a imensa gratidão que sinto pelo privilégio de ter tido você como orientador do meu mestrado. Obrigada pelos inúmeros conhecimentos transmitidos, assim como pela paciência e habilidade brilhante de os transmitir de forma clara, simples e, ao mesmo tempo, com riqueza de detalhes teóricos e técnicos. Obrigada por me inspirar através de sua dedicação e entusiasmo inabaláveis durante as disciplinas lecionadas; muito da minha certeza em seguir a carreira acadêmica eu devo a você. Obrigada também por fazer os olhos dos alunos “brilharem” ao ver seu domínio e fascínio pelo conteúdo apresentado; você é fonte de inspiração para alunos da graduação e pós-graduação. É comum dentro do mestrado no CEFET, chamarmos carinhosamente nossos orientadores de pais. Essa denominação é pouco para você que exerceu, com maestria, inúmeras vezes não somente esse papel, mas também o papel de psicólogo, ouvinte e, sobretudo, um amigo excepcional. Tenho orgulho e me sinto honrada por ter me tornado sua amiga ao longo dessa trajetória. Por fim, obrigada por tudo! Sem você toda essa jornada de aprendizado não seria possível!
- à Profa. Rosilene, minha coorientadora, que por tantas vezes também exerceu o papel de ouvinte e psicóloga. Obrigada pela orientação e conhecimento transmitido, pelos ensinamentos, dicas e conselhos não só a respeito do texto como também, a respeito de carreira e de vida.
- ao Prof. Márcio Matias, que mesmo com tantas atribuições sempre cuidou com muito carinho de todos os alunos do mestrado.

- ao CEFET-MG, que durante estes sete anos me proporcionou não somente base científica e profissional como também experiência de vida e maturidade. Sou extremamente grata aos professores, servidores e amigos que conheci durante todo o meu percurso dentro da instituição. Espero um dia, ser capaz de retribuir ao menos parte de todo aprendizado obtido.
- aos meus pais, aos quais não tenho palavras suficientes para agradecer. Por todo apoio, carinho, cuidado, incentivo e sobretudo pelo amor sem medidas que nunca me faltou. Agradeço em especial minha mãe, Vilma, que mesmo passando por momentos extremamente difíceis durante o período do mestrado, nunca um dia sequer perdeu o sorriso no rosto e o bom humor. Sempre com sua confiança inabalável na minha capacidade, com palavras de carinho e de conforto nos momentos difíceis, sendo minha eterna ouvinte atenta mesmo sem muitas vezes compreender os assuntos discutidos. Obrigada pelas orações e me desculpe se muitas vezes o stress e a ansiedade falaram mais alto. Obrigada pelos cuidados, por muitas vezes até em excesso, sempre com um amor sem tamanho. Se hoje cheguei onde cheguei, você foi diretamente responsável!
- aos meus amigos da graduação que tornaram minha caminhada mais fácil e leve, sempre transmitindo alegria, incentivo e conselhos. Amigos que permanecem independentemente dos diferentes caminhos escolhidos, sempre apoiando minha jornada. Agradeço sempre pela oportunidade de ter vocês como amigos.
- aos amigos do mestrado, os Mestres da Resenha, que não somente tenho o prazer de chamar de amigos mas também de família. Em especial Novack, meu amigo, irmão e afilhado que desde os tempos de graduação tem sido meu companheiro incansável de jornada acadêmica e de vida. Obrigada por todo carinho, cuidado, preocupação e conselhos sempre dados com tanto carinho! Meu obrigada também a Audine, um dos melhores presentes que o mestrado e a vida poderiam me proporcionar. Obrigada pela amizade, carinho, incentivos, puxões de orelha e por tanto aprendizado e crescimento pessoal proporcionado. Tenha a certeza que nenhuma distância física jamais será capaz de nos separar! Obrigada a Matheus, Pedro, Deishi, Isabel e Rafael por terem sido companheiros incríveis não somente de estudos mas também de resenha! Obrigada por serem tão incríveis, cada um à sua maneira e sempre com muito amor.

- aos amigos feitos fora do CEFET, que mesmo não vivenciando a realidade da graduação e do mestrado sempre apoiaram e compreenderam incondicionalmente todos os momentos vivenciados nesta trajetória.
- a Deus, que sempre me guiou e cuidou em todos os instantes!

Resumo

Esta dissertação é dedicada ao estudo da resposta transitória de aterramentos elétricos de turbinas eólicas frente a descargas atmosféricas e do impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo nessa resposta. Tal resposta é avaliada por meio de simulações computacionais empregando-se um rigoroso modelo eletromagnético, validado com resultados experimentais, e considerando condições típicas do Brasil em termos de valores de resistividade elétrica e ondas de corrente de descargas atmosféricas. De acordo com os resultados, dada a natureza concentrada de arranjos de aterramento típicos de aerogeradores, eles apresentam comportamento predominantemente capacitivo, considerando-se resistividades iguais ou superiores a $300 \Omega\text{m}$. Mostra-se que as elevações de potencial nas terminações de terra podem ser bastante severas, particularmente no caso de solos de resistividade elevada e incidência de primeiras descargas de retorno; nesses casos, medidas complementares podem ser necessárias no sistema de aterramento. Ainda de acordo com os resultados, o fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo é responsável pela redução dos níveis de elevação de potencial no aterramento, da impedância impulsiva e do coeficiente de impulso, sendo que tais reduções são mais significativas para solos de maior resistividade e para correntes de descargas subsequentes. Finalmente, mostra-se que, para dimensões típicas de sistemas de aterramentos de turbinas eólicas, considerando resistividades iguais ou superiores a $300 \Omega\text{m}$ e parâmetros do solo dependentes da frequência, o desempenho impulsivo do aterramento de um aerogerador individual é melhor do que o seu desempenho em baixa frequência (impedância impulsiva menor do que a resistência de aterramento).

Abstract

This master thesis is dedicated to the study of the transient response of grounding systems of wind turbines and also to the impact of the frequency dependence of the electrical parameters of soil on this response. The transient behavior of the grounding systems is determined by means of computational simulations using a rigorous electromagnetic model, validated with experimental results, and considering typical conditions of Brazil in terms of values of soil resistivity and lightning current waves. According to the results, due to the concentrated nature of typical grounding arrangements of wind turbines, they have a predominantly capacitive behavior, considering values of soil resistivity equal to or larger than $300 \Omega\text{m}$. It is shown that the grounding potential rises in the earth terminations can be quite severe, especially in the case of high resistivity soils and incidence of first stroke currents; in such cases, additional measures may be required to improve the performance of the grounding system. It is shown that the frequency dependence of soil is responsible for decreasing the grounding potential rise of the grounding system and, thus, their impulse impedance and their impulse coefficient. This effect is more pronounced with increasing the low-frequency soil resistivity and for typical currents of subsequent strokes. Finally, it is shown that, for typical wind turbine grounding system dimensions, and considering values of soil resistivity equal to or larger than $300 \Omega\text{m}$ and frequency-dependent soil parameters, the impulse performance of an individual wind turbine grounding system is better than its low-frequency performance (impulse impedance lower than low-frequency grounding resistance).

Sumário

Resumo	viii
Abstract.....	ix
Sumário.....	x
Lista de Símbolos.....	xii
Lista de Abreviações	xiii
Capítulo 1 Introdução	14
1.1. Relevância do tema e contextualização.....	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Organização do texto	16
Capítulo 2 Interação de descargas atmosféricas com sistemas eólicos	17
2.1 Introdução	17
2.2 Sistemas Eólicos: Aspectos Básicos	18
2.2.1 Histórico	19
2.2.2 Potencial Eólico no Brasil e no Mundo.....	20
2.3 Interação de descargas atmosféricas com aerogeradores: aspectos básicos	27
2.3.1 Descargas atmosféricas: aspectos básicos.....	28
2.3.2 Proteção de sistemas eólicos contra descargas atmosféricas.....	31
2.3.2.1 Avaliação dos riscos de dano da descarga atmosférica a uma turbina eólica	33
2.3.2.2 Proteção das pás da turbina eólica	35
2.3.2.3 Proteção dos sistemas elétricos e de controle	35
2.3.2.3.1 Zonas de proteção contra descargas atmosféricas	37
2.3.2.3.2 Aterramento e proteção dos sistemas elétrico e de controle	39
2.4 Considerações Finais	40
Capítulo 3 Modelagem de aterramentos elétricos de turbinas eólicas.....	42
3.1 Introdução	42
3.2 Arranjos de aterramento típicos de turbinas eólicas.....	43
3.3 Aspectos básicos do comportamento de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas	45

3.4	Modelagem do comportamento impulsivo de aterramentos de turbinas eólicas: Estado da Arte	47
3.4.1	Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)	48
3.4.2	Método dos Momentos (MoM)	49
3.5	Modelagem do comportamento impulsivo de aterramentos de turbinas eólicas utilizando o Hybrid Electromagnetic Model (Modelo Híbrido Eletromagnético – HEM)...	50
3.5.1	Aspectos matemáticos básicos do Modelo Eletromagnético Híbrido (HEM).....	52
3.6	Considerações Finais	56
Capítulo 4	Resultados.....	57
4.1	Introdução	57
4.2	Avaliação da aplicabilidade do HEM para simulação de arranjos de aterramentos de turbinas eólicas considerando resultados experimentais	58
4.3	Desenvolvimentos.....	62
4.3.1	Elevação de Potencial no Aterramento – GPR (<i>Grounding Potential Rise</i>).....	65
4.3.2	Impedância transitória - $z(t)$	71
4.3.3	Impedância Impulsiva Z_p	76
4.3.4	Coeficiente de Impulso - I_C	84
4.4	Considerações Finais	86
Capítulo 5	Conclusões e Propostas de Continuidade	89
Referências Bibliográficas		91

Lista de Símbolos

ω - velocidade angular

σ - condutividade

ε - permissividade elétrica

μ - permeabilidade magnética

γ - constante de propagação

α - constante de atenuação

β - constante de defasamento

ρ - resistividade do solo

Lista de Abreviações

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

PDE - Plano Decenal de Energia

IEC-International Electrotechnical Commission-Comissão eletrotécnica internacional

LPZ - Lightning Protection Zone - Zonas de Proteção contra Descargas

DPS - Dispositivo de Proteção contra Surtos

GPR - Grounding Potential Rise - Elevação de Potencial no aterramento

HEM - Hybrid Electromagnetic Model - Modelo Eletromagnético Híbrido

Capítulo 1 Introdução

1.1. Relevância do tema e contextualização

A energia eólica tem crescido e conquistado cada vez mais espaço na matriz energética brasileira, sendo considerada como excelente alternativa aos combustíveis fósseis, tornando-se uma fonte de energia elétrica cada vez mais relevante [1], [2], [3]. Em virtude disso, estudar o seu desempenho frente a ocorrências transitórias se torna uma atividade extremamente importante, sendo uma maneira de conhecer as limitações do sistema e assegurar a confiabilidade e qualidade da energia elétrica gerada por essa fonte de energia. Um dos problemas recorrentes em parques e torres eólicas são falhas e danos causadas por descargas atmosféricas diretas ou indiretas em suas estruturas [4].

As turbinas eólicas têm aumentado a sua capacidade de produção de energia e, conseqüentemente, as estruturas mecânicas, constituídas basicamente pelas torres, nacelles¹ e pás, tem se tornado cada vez mais robustas e, também, mais altas [5], [4]. Isso deixa os parques eólicos cada vez mais suscetíveis à incidência de descargas atmosféricas devido à altura pronunciada de suas estruturas com relação aos elementos no entorno, o que as torna pontos preferenciais de incidência.

A situação dos parques eólicos localizados no Brasil se torna ainda mais crítica quando comparada a parques eólicos localizados em outras regiões do mundo devido a dois fatores principais: alta densidade de descargas atmosféricas para terra e solos com elevados valores de resistividade [6]. No Brasil, a maior parte dos parques eólicos estão instalados em regiões costeiras que, em geral, possuem solos com valor elevado de resistividade, o que dificulta a obtenção de um sistema de aterramento de boa qualidade (baixa impedância). Isto aumenta os

¹ Nacelle: estrutura onde a hélice é fixa e acomoda, normalmente, o gerador. É a peça que fica por trás da hélice, no topo da torre.

desafios relativos à proteção dos sistemas elétricos da turbina eólica, uma vez que o sistema de aterramento apresenta importância fundamental nessa proteção.

Segundo inúmeras referências, por exemplo [5] e [4], a maior parte das falhas e/ou mau funcionamento de equipamentos no interior da turbina são devido à elevação de potencial no aterramento produzida pela circulação de correntes de descargas que descem pela torre e são dispersas para o solo através do sistema de aterramento. Além disso, as elevações de potencial resultantes podem ser transferidas para a rede de média tensão através de transformadores usualmente instalados em cubículos na base de cada torre, que tem a função de elevar a tensão produzida pelo aerogerador. Considerando esses aspectos, a investigação da resposta transitória de aterramentos elétricos de torres eólicas é de fundamental importância.

Com esses comentários iniciais, denota-se a relevância do tema em investigação, qual seja, *resposta de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas*. O presente trabalho tem o intuito de gerar uma contribuição no tema que possa subsidiar a definição de práticas efetivas de proteção de parques eólicos contra descargas atmosféricas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a resposta transitória de arranjos típicos de aterramento de torres de parques eólicos, frente a descargas atmosféricas. Adicionalmente, pretende-se investigar o impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo nesse comportamento, uma vez que o Brasil apresenta solos de elevada resistividade, nos quais tal fenômeno é bastante importante.

Levando-se em consideração o contexto e o objetivo principal deste trabalho, as seguintes atividades podem ser definidas como norteadoras:

- Estabelecimento de um modelo eletromagnético para representação de arranjos de aterramento típicos de aerogeradores que contemple de forma fisicamente consistente os principais fenômenos decorrentes da incidência de descargas atmosféricas.
- Avaliação da aplicabilidade da modelagem estabelecida, tendo-se como base resultados experimentais.
- Aplicação sistemática da modelagem desenvolvida com o intuito de avaliar a resposta transitória de aterramentos típicos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas e,

adicionalmente, o impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo nessa resposta.

1.3. Organização do texto

Este texto está estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório. Na organização desses capítulos busca-se apresentar os aspectos básicos e panorama eólico no Brasil e no Mundo, as características principais do sistema de aterramento de torres eólicas assim como sua modelagem e, por fim, analisar o desempenho do aterramento frente a fenômenos impulsivos.

O capítulo 2 apresenta os principais aspectos de funcionamento de aerogeradores, uma descrição de aspectos históricos da energia eólica, além do potencial da implantação desta fonte no Brasil e no Mundo. Adicionalmente, apresenta-se uma descrição básica da interação entre os aerogeradores e descargas atmosféricas, os efeitos advindos dessa interação e as formas de proteção mais comumente utilizadas contra esse fenômeno.

No capítulo 3, são apresentados os arranjos típicos de aterramento usualmente empregados para turbinas eólicas, além das principais modelagens utilizadas na literatura para analisar e representar o comportamento impulsivo dos mesmos. São abordadas três técnicas: Diferenças Finitas no Domínio do Tempo, Método dos Momentos e Modelo Eletromagnético Híbrido, com ênfase neste último que é o modelo utilizado neste trabalho.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e as suas respectivas análises a respeito do comportamento transitório de aterramentos de sistemas eólicos frente a descargas atmosféricas. Parâmetros como a elevação de potencial no aterramento, impedância transitória, impedância impulsiva e o coeficiente de impulso são avaliados, considerando as hipóteses de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência, e utilizadas ondas representativas de primeiras descargas e descarga subsequentes medidas no Brasil.

Por fim, no capítulo 5 são destacadas as principais realizações e contribuições deste trabalho e apresentadas as propostas de continuidade.

Capítulo 2 Interação de descargas atmosféricas com sistemas eólicos

Este capítulo apresenta alguns aspectos de funcionamento e histórico da energia eólica, o potencial da implantação desta fonte no Brasil e no Mundo, a interação entre aerogeradores e descargas atmosféricas, os efeitos advindos dessa interação e as formas de proteção mais comumente utilizadas contra esse fenômeno.

2.1 Introdução

Nos últimos anos o Brasil vem enfrentando problemas de geração de energia elétrica. Os reservatórios das hidrelétricas estão com níveis abaixo do esperado devido à crise hídrica existente e, assim, o abastecimento de energia elétrica é comprometido. Em virtude disto, a geração de energia vem sendo complementada pelo uso cada vez mais constante de usinas termelétricas, uma fonte de energia mais cara e mais poluente. Com o consumo de energia elétrica crescente e problemas na geração, a energia eólica vem ganhando relevância como uma fonte de energia limpa e renovável, aumentando a cada ano sua participação na matriz energética brasileira. O plano decenal de energia com projeções para 2024, PDE 2024, prevê um aumento de capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil, da ordem de 73 mil MW. Cerca de metade desta expansão será baseada em fontes renováveis, principalmente eólica e solar, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética, EPE [1].

A fonte eólica tem conquistado cada vez mais espaço como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Esse tipo de energia é muito empregada como um complemento da matriz energética de diversos países. É uma possibilidade de conciliar o crescimento da indústria com uma forma de consumo sustentável [7].

A energia elétrica advinda da fonte eólica já representava 4,7% da matriz energética mundial ao final de 2016; este percentual pode dobrar até 2030 [3]. O Brasil se destaca por

possuir uma capacidade de produção de energia eólica total de 143,5 GW; destes, 75 GW somente na Região Nordeste do país, onde há o maior potencial de produção eólica [6].

Dados os locais descampados em que os parques eólicos estão localizados, tais instalações podem ser classificadas como de exposição crítica aos efeitos de descargas atmosféricas. As torres que sustentam os aerogeradores possuem altura pronunciada com relação aos elementos no entorno e constituem-se, portanto, pontos preferenciais de incidência de descargas. Quando a torre eólica é atingida por uma descarga atmosférica, surgem sobretensões que podem levar a falhas ou danos de equipamentos instalados no interior da torre, em especial aqueles localizados nos cubículos de média tensão. A falha desses equipamentos pode comprometer a confiabilidade e o desempenho do sistema eólico.

Este capítulo apresenta uma descrição dos aspectos básicos de aerogeradores e sua interação com descargas atmosféricas. Abrange também, os métodos de proteção utilizados para atenuar os efeitos da incidência de descargas sobre os equipamentos elétricos localizados no interior da torre. Adicionalmente, mostra-se que a maior parte dos danos em aerogeradores são consequências de sobretensões causadas por descargas atmosféricas. Estas afetam os sistemas eletrônicos, de controle e de comunicação, podendo comprometer a confiabilidade do fornecimento da energia produzida em parques eólicos.

2.2 Sistemas Eólicos: Aspectos Básicos

Turbinas eólicas (aerogeradores) são sistemas capazes de converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. O funcionamento de um aerogerador divide-se basicamente em duas partes: o rotor, que capta energia cinética do vento e a converte através de um conjugado mecânico e o gerador elétrico, que converte esta energia em eletricidade. Um aerogerador é formado por uma turbina eólica, um multiplicador mecânico, um gerador elétrico, sistemas elétricos (eletrônica de potência) e sistemas de controle. A Figura 2.1 ilustra o princípio de funcionamento básico de um sistema de geração de energia elétrica através de aerogeradores [8].

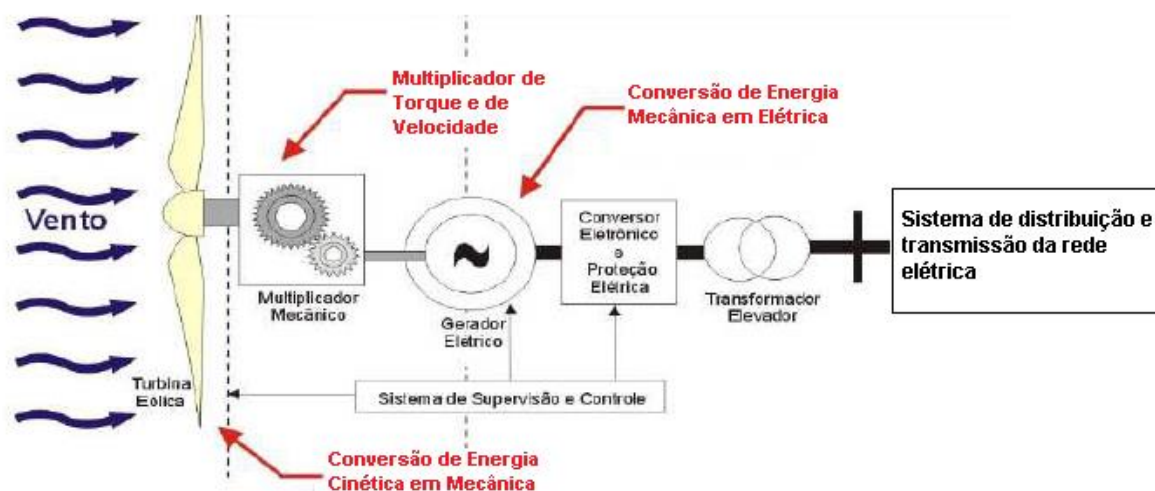


Figura 2.1 Princípio geral de funcionamento de um aerogerador adaptado de [9].

A energia elétrica é obtida através da conversão da energia mecânica por meio do gerador elétrico, que pode ser de indução ou síncrono. O gerador pode ser ligado diretamente à rede elétrica por intermédio de um transformador ou conectado ao transformador através de conversores estáticos de frequência [8].

2.2.1 Histórico

Há vários séculos a força mecânica dos ventos vem sendo utilizada pelo homem, impulsionando velas acopladas a embarcações, moinhos de grãos e aparatos de bombeamento de água. Os primeiros registros oficiais do emprego da energia eólica para utilização na agricultura encontram-se na Pérsia, há aproximadamente 200 a.C. Há fortes indícios dessa utilização na China (2000 a.C.) e pelo Império Babilônico (1700 a.C.) com cata-ventos primitivos para a irrigação [10].

O desenvolvimento dos moinhos de vento sofreu interrupção com o início da Revolução Industrial. A força motriz neste período foi direcionada para outras fontes, como o vapor, a eletricidade e a queima de combustíveis fósseis.

O primeiro moinho de vento utilizado para a produção de energia elétrica foi construído na Escócia, em 1887, pelo professor James Blyth, numa torre de 10 m de altura instalada no jardim de sua casa, em Marykirk. A geração carregava acumuladores que alimentavam a iluminação da casa de campo [2].

Para a geração de energia elétrica, nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural. Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países. A produção dessas máquinas foi desativada gradualmente nas décadas de 1950 e 1960, à medida que as redes de eletricidade passaram a dominar o atendimento rural [6].

Em termos de aerogerador de grande potência, da ordem de megawatts, somente em 1941 ocorreu a primeira experiência acima de 1 MW, conectado à rede elétrica de Vermont – USA (onde 1.000 residências foram atendidas) [2].

A partir de experiências de estímulo ao mercado realizadas na Califórnia, Dinamarca e Alemanha nas décadas de 1980 e 1990, o aproveitamento da energia eólica atingiu uma escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economicidade. Graças a esses estímulos a energia eólica obteve o impulso que precisava para ser mais estudada e desenvolvida.

O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas novas indústrias do setor, em regime de competição, alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo, especialmente via comercialização da energia produzida [6].

2.2.2 Potencial Eólico no Brasil e no Mundo

a) Potencial Eólico no Brasil

O primeiro levantamento preliminar do potencial eólico nacional foi iniciado em 1979 pela ELETROBRÁS. Com a aceleração em escala mundial do aproveitamento eólico-elétrico e a instalação das primeiras usinas eólicas no Brasil, no final da década de 1990, iniciaram-se as primeiras medições anemométricas específicas para estudos de viabilidade, como uso de torres de 30 a 50 m e equipamentos com precisão e procedimentos requeridos para essa finalidade [6].

Nas Figuras 2.2 a 2.4 são apresentadas a velocidade média anual do vento no Brasil, o potencial eólico brasileiro sazonal e o potencial eólico estimado para vento médio anual no Brasil, respectivamente. Através das figuras é possível observar quais regiões do Brasil possuem as maiores velocidades de vento, os maiores potenciais eólicos e em que período do ano.

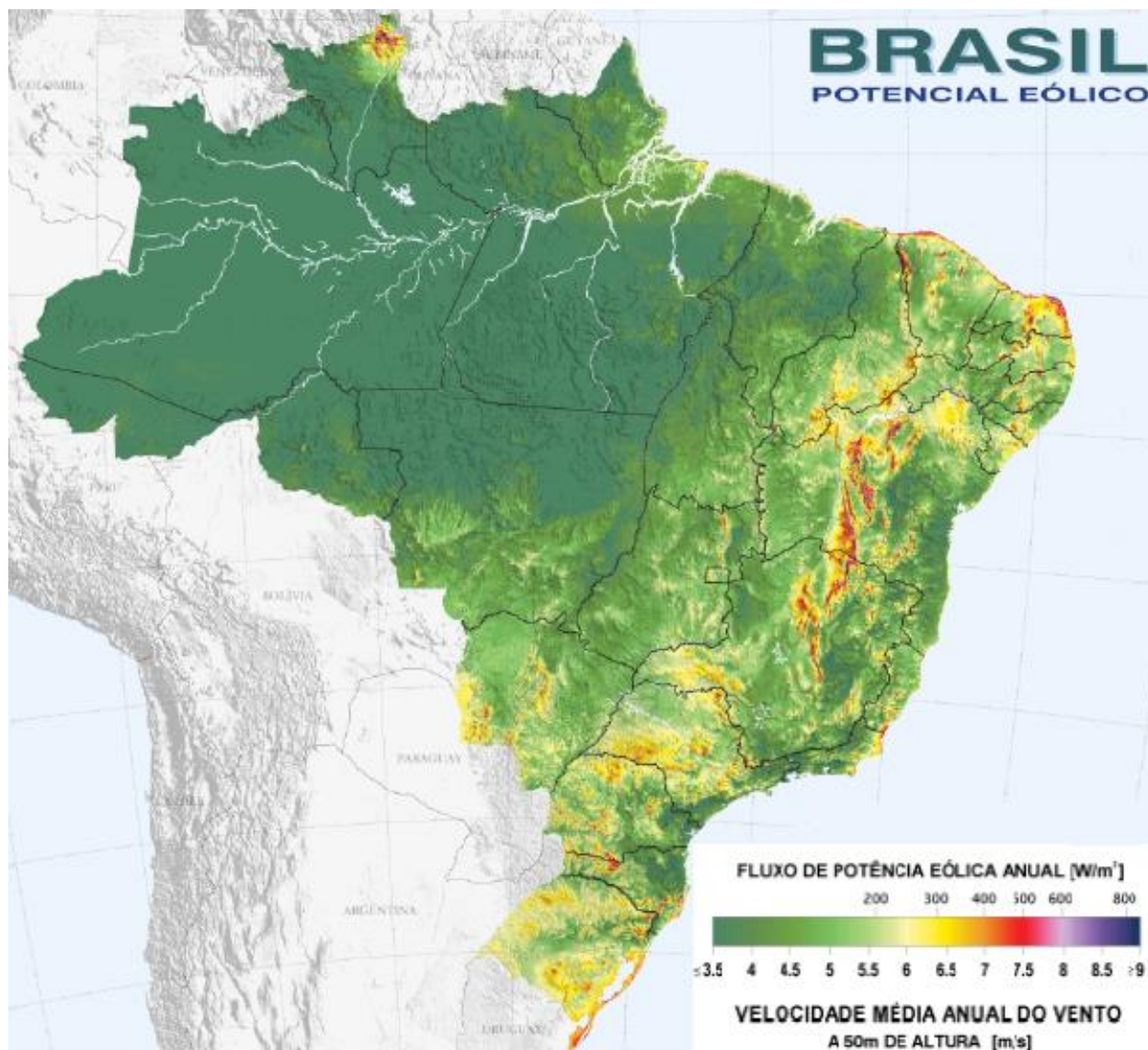


Figura 2.2 Velocidade Média Anual do Vento no Brasil [6].

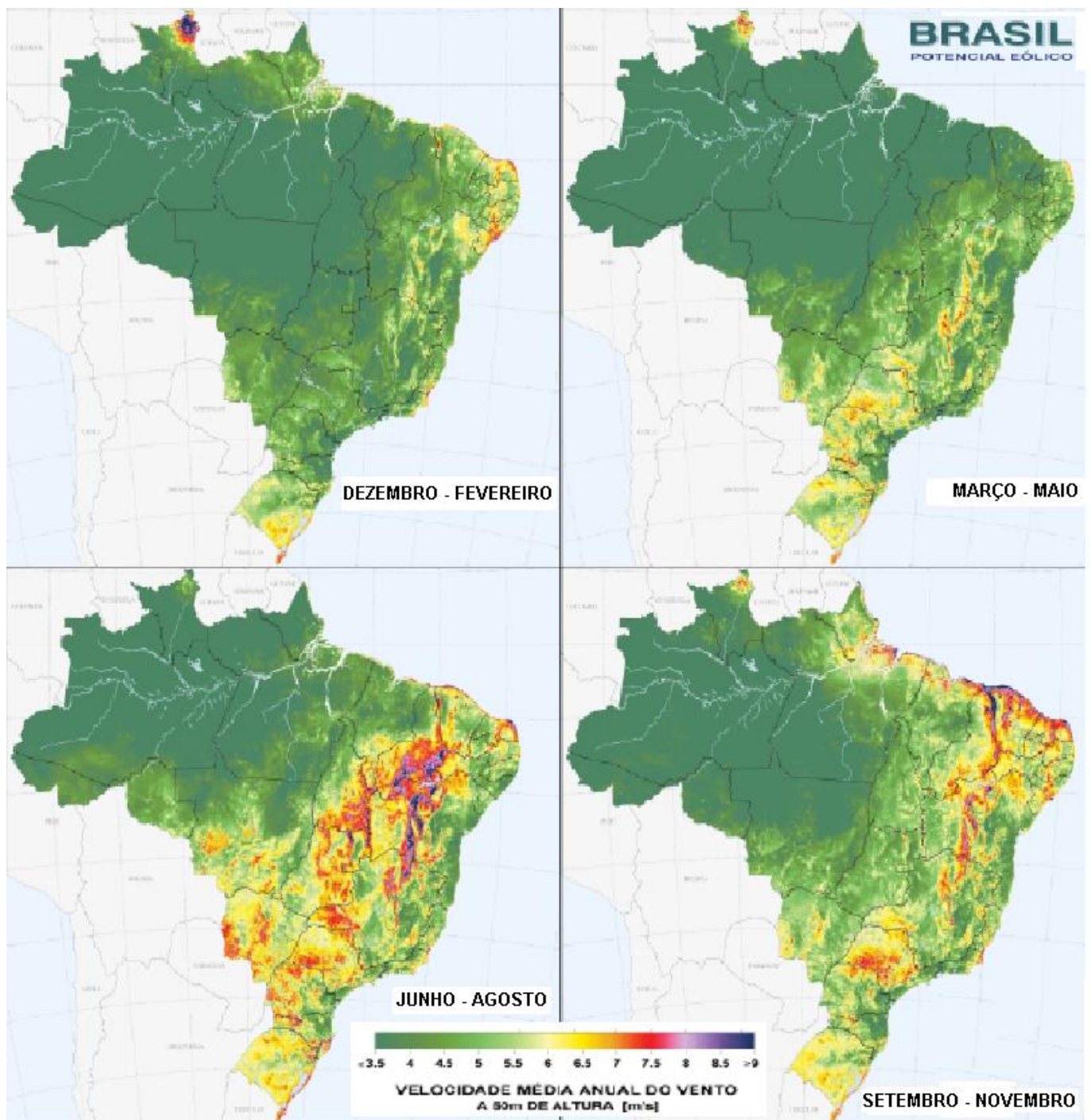


Figura 2.3 Velocidade Média Anual do Vento no Brasil [6].

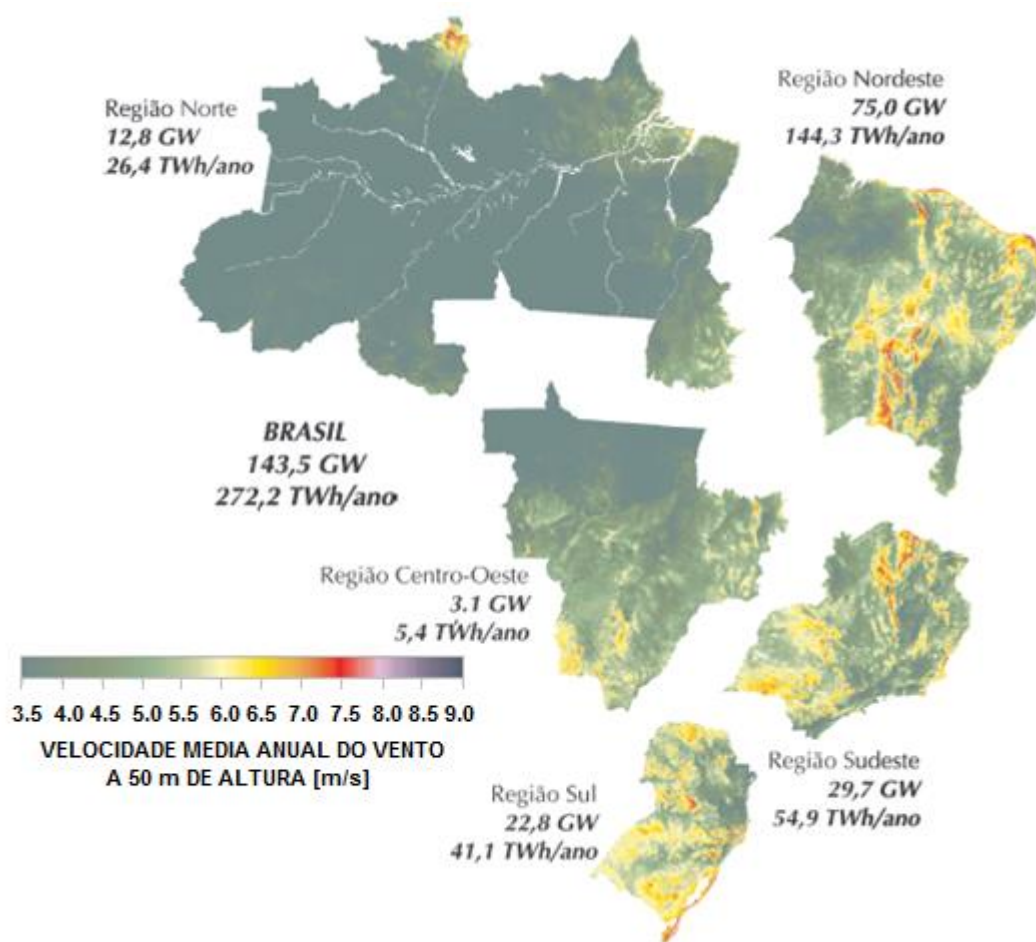


Figura 2.4 Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s [6].

A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 21.626 GWh em 2015, equivalente a um aumento de 77,1% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 12.210 GWh. A evolução da capacidade instalada de geração de energia eólica no Brasil de 2006 a 2015 pode ser observada na Tabela 2.1. É possível também visualizar a rápida expansão dessa fonte de energia nos últimos anos. Dentre as fontes de energia elétrica da matriz energética brasileira, a eólica foi a que mais expandiu sua capacidade instalada no ano de 2015 (39,5%), conforme Figura 2.5.

Tabela 2.1 Expansão da capacidade instalada anualmente [1].

Energia Eólica (GWh)										
Fluxo	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Geração Total ¹	237	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626
Consumo Total	237	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626
¹ Para estimar dados não informados, foi considerado o fator de capacidade médio do parque eólico nacional de 32%										

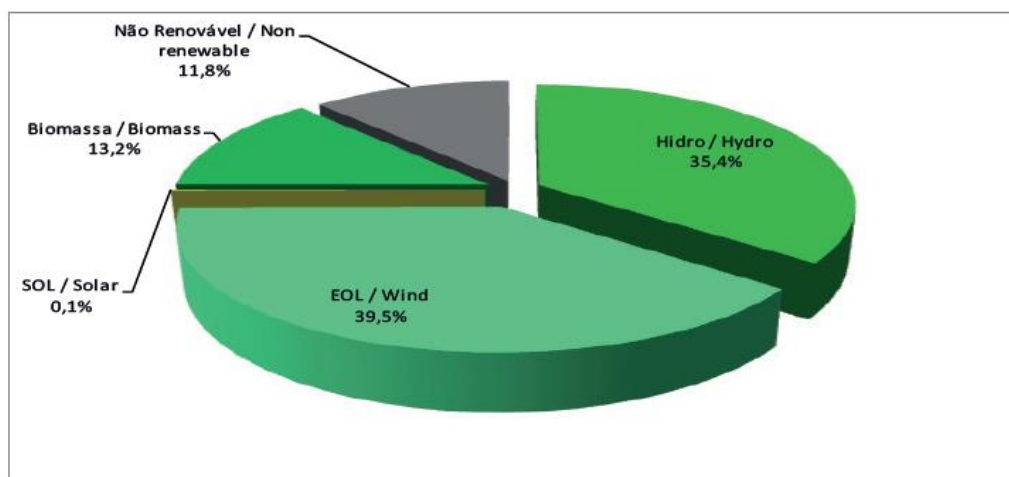


Figura 2.5 Participação das fontes renováveis na expansão da capacidade instalada [1].

Parques Eólicos no Brasil

No final de 2016, o Brasil chegou a produzir cerca de 10,79 GW de potência por ano através da fonte eólica. Esse montante corresponde a cerca de 4% da matriz energética brasileira. São cerca de 459 parques com mais de 5,2 mil aerogeradores em operação. A região Nordeste é a que mais gera energia eólica no Brasil, sendo o Rio Grande do Norte e a Bahia os maiores estados produtores deste importante tipo de energia renovável.

A capacidade eólica no Brasil vem crescendo nos últimos anos, a Tabela 2.2 caracteriza os principais complexos e parques eólicos em operação no Brasil:

b) Potencial Eólico no Mundo

No final de 2016, a capacidade instalada mundial proveniente de fonte eólica atingiu 500 GW, o que atendia a 4,7% da demanda mundial de energia elétrica à época. O setor continua em franca ascensão e expansão. A Figura 2.6 apresenta o crescimento da capacidade instalada no mundo entre os anos de 2012 e 2016 [3].

Tabela 2.2 Principais parques e complexos eólicos em operação no Brasil [1].

Parques Eólicos	Capacidade Instalada (MW)*	Localização
Parque Eólico de Osório	300	Osório (RS)
Complexo Eólico do Alto do Sertão I	293,6	Caetité, Guanambi e Igaporã (BA)
Parque Eólico Giribatu	258	Santa Vitória do Palmar (RS)
Complexo Eólico Calango	150	Bodó (RN)
Parque Eólico de Praia Formosa	104,4	Camocim (CE)
Complexo Eólico Desenvix Bahia	95,2	Macaúbas, Novo Horizonte e Seabra (BA)
Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70	Tramandaí (RS)
Parque Eólico Sangradouro	50	Arroio Sangradouro (RS)
Parque Eólico Bons Ventos	50	Aracati (CE)

* Foram selecionados parques e complexos eólicos com capacidade instalada acima de 50 MW.

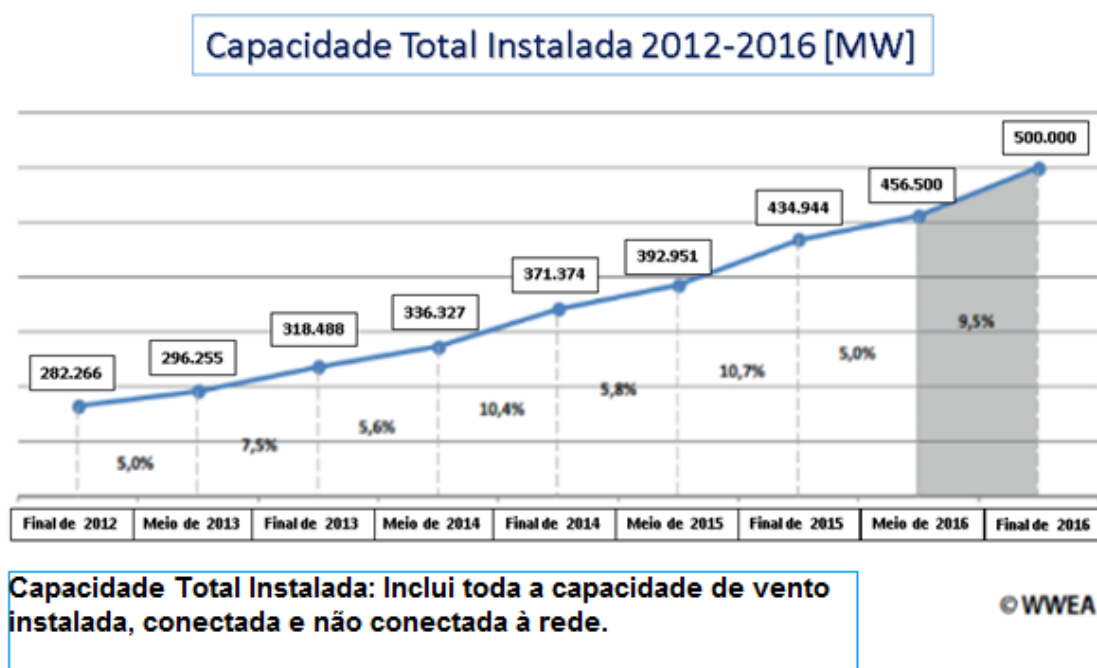


Figura 2.6 Capacidade Total Instalada entre 2012-2016 [3].

Os cinco países tradicionais no segmento de energia eólica, China, EUA, Alemanha, Índia e Espanha, representam juntos uma participação de 67% da capacidade eólica instalada global. No primeiro semestre de 2016, quatro países instalaram mais de 1 GW de potência

advinda de geração eólica: China (10 GW), Índia (2,4 GW), Alemanha (2,4 GW) e Brasil (1,1 GW). Esses países vêm apresentando um desempenho mais forte do que em 2015 no que diz respeito a novas instalações eólicas construídas [3].

Na Tabela 2.3 é possível observar a evolução da capacidade instalada dos países com maior produção de eletricidade advinda de fonte eólica, no período de junho de 2013 até junho de 2016. São apresentados os dados dos 15 países com maior capacidade eólica instalada.

Tabela 2.3 Capacidade Instalada por país [3].

Posição	País	Capacidade Total Junho 2016 [MW]	Capacidade Total Final 2015 [MW]	Capacidade Total Final 2014 [MW]	Capacidade Total Final 2013 [MW]	Capacidade Total Junho 2013 [MW]
1	China	158.000	148.000	114.763	91.324	80.827
2	Estados Unidos	74.696	73.867	65.754	61.108	59.884
3	Alemanha	47.420	45.192	40.468	34.660	32.458
4	Índia	27.151	24.759	22.465	20.150	19.564
5	Espanha	22.987	22.987	22.987	22.959	22.918
6	Reino Unido	13.940	13.614	12.440	10.711	9.776
7	Canadá	11.298	11.205	9.694	7.698	6.578
8	França	10.861	10.293	9.296	8.254	7.697
9	Brasil	9.810	8.715	5.962	3.466	2.788
10	Itália	9.101	8.958	8.663	8.551	8.417
11	Suécia	6.338	6.029	5.425	4.470	4.271
12	Polônia	5.300	5.100	3.834	3.390	2.798
13	Turquia	5.146	4.718	3.763	2.959	2.619
14	Dinamarca	5.089	5.064	4.883	4.772	4.578
15	Portugal	5.040	5.034	4.953	4.724	4.547
	Resto do Mundo	44.309	41.409	35.968	29.718	26.861
	Total	456.486	434.944	371.317	318.914	296.581

2.3 Interação de descargas atmosféricas com aerogeradores: aspectos básicos

O Brasil é um país com um número elevado de incidência de descargas atmosféricas; em virtude disso, o cenário dos parques eólicos brasileiros se torna mais delicado do que parques situados na Europa, por exemplo, onde a incidência de raios é menor e o solo, usualmente, tem como característica valores mais baixos de resistividade [11].

Com o aumento da capacidade, da altura dos aerogeradores e, também, as escalas das dimensões dos parques eólicos, a atenção para se garantir uma operação segura aumentou. Como um dos fatores que influenciam na segurança de operação, as descargas atmosféricas são muito importantes; entretanto os estudos a respeito de descargas incidindo sobre turbinas eólicas são raros e não triviais [12].

A evolução das dimensões e potência das turbinas eólicas ao longo dos anos é apresentada na Figura 2.7. Observa-se que no período de 1980 para 2005 as turbinas saíram de uma altura média de 15 metros para 124 metros, sendo que atualmente o tamanho das pás varia entre 60 e 80 metros de comprimento (conforme manuais dos fabricantes).

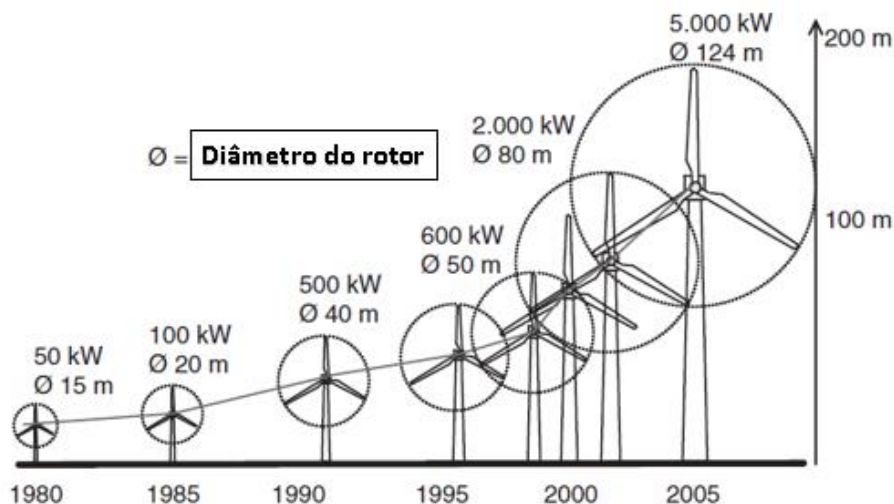


Figura 2.7 Evolução das dimensões e potências das turbinas eólicas ao longo dos anos [4].

Nos últimos anos, tem aumentado o número de acidentes associados ao uso de turbinas eólicas, especialmente devido a descargas atmosféricas. Danos causados em sistemas de

geração eólica afetam a segurança e confiabilidade dessa fonte de energia. A maioria das quebras e faltas que ocorrem nos sistemas elétricos e de controle são ocasionadas por sobretensões transitórias próximas à torre [13].

2.3.1 Descargas atmosféricas: aspectos básicos

A descarga atmosférica consiste em uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. O fenômeno se expressa por meio do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da terra; este último podendo ser observado na Figura 2.8 [11].

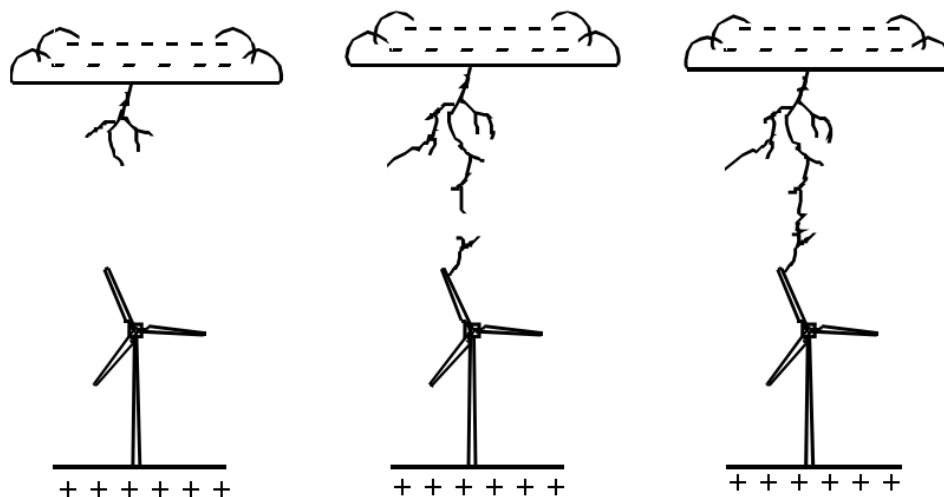


Figura 2.8 Processo de formação de uma descarga nuvem-solo [13].

O formato impulsivo da onda típica da corrente de descarga atmosférica é ilustrado na Figura 2.9. É possível observar que em alguns milissegundos ou pouco mais de uma dezena de microssegundos a corrente atinge um valor máximo, o qual é nomeado como valor de pico da onda. É importante observar também a magnitude da corrente apresentada na Figura 2.9; a onda em questão atinge um elevado valor de pico em um tempo muito reduzido.

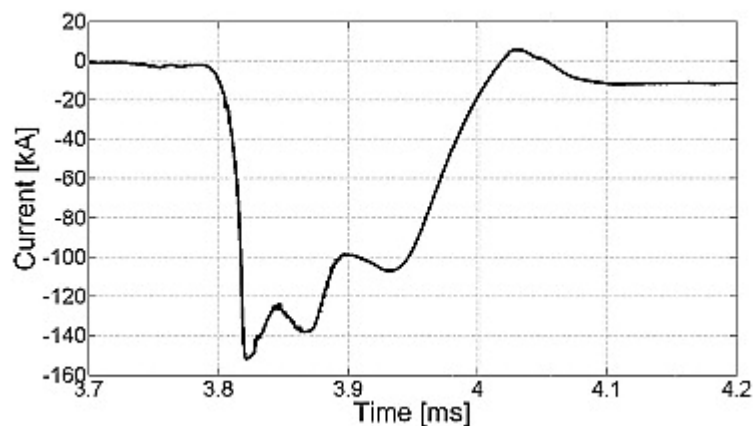


Figura 2.9 Intensidade de corrente de primeira descarga negativa, descarga única [14].

No caso específico apresentado na Figura 2.9, a onda de corrente impulsiva tem sinal negativo, o que indica um fluxo de cargas negativas para o solo; também, sabe-se que a descarga é descendente, ou seja, da nuvem para o solo.

As descargas atmosféricas da nuvem para o solo são aquelas que despertam maior interesse, pois o fluxo da corrente nesse caso em particular é capaz de ocasionar condições críticas de risco para seres vivos e equipamentos próximos ao local de incidência da descarga.

É possível classificar as descargas descendentes quanto à sua polaridade. Conceitualmente a classificação é realizada em virtude do sinal da carga efetivamente transferida da nuvem para a terra pelo canal de descarga da onda de corrente. As descargas podem ser classificadas como [11]:

- Descarga positiva – a parte da nuvem conectada ao solo pelo canal de descarga está carregada positivamente.
- Descarga negativa – o canal de descarga conecta a base negativa da nuvem com o solo.

Afirma-se que a grande maioria das descargas nuvem-solo descendentes são negativas, correspondendo a percentuais em torno de 90% do total de descargas. Em virtude disso, é mais interessante realizar análises considerando esse tipo de descarga atmosférica [5].

Ainda considerando-se as descargas negativas e descendentes, há um outro tipo de descarga que ocorre com muita frequência: as descargas subsequentes. Após a primeira descarga atmosférica, há uma sequência de processos elétricos. Isso leva a ocorrência de novas descargas através do mesmo canal onde ocorreu a primeira descarga, as chamadas descargas negativas subsequentes ou descargas subsequentes. Em aproximadamente 80% dos casos há

uma descarga subsequente. Sendo assim este um fenômeno muito importante e que deve ser considerado e estudado.

2.3.1.1 Principais parâmetros das descargas

Os conceitos abordados nesta seção baseiam-se principalmente na referência [15]. Uma descarga atmosférica, por definição, consiste em uma onda de corrente impulsiva. Para um melhor entendimento a respeito de descargas é importante caracterizar alguns parâmetros desta onda. Um parâmetro significativo, que contém muitas informações a respeito da descarga, é a forma de onda da corrente.

A caracterização de formas de onda de corrente associada a descargas é tipicamente realizada com a utilização de um conjunto de parâmetros, os quais são descritos a seguir e podem ser visualizados na Figura 2.10.

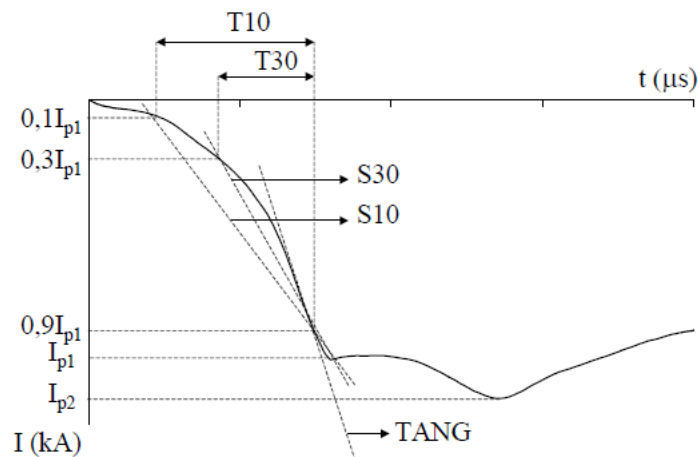


Figura 2.10 Forma de onda de corrente típica associada a primeiras descargas de retorno negativas descendentes [15].

- I_{p1} : Valor do primeiro pico da corrente de retorno;
- I_{p2} : Valor máximo da corrente de retorno;
- I_{10} , I_{30} e I_{90} : valores correspondentes, respectivamente, a 10%, 30% e 90% de I_{p1} ;
- $T10$: tempo para que a onda de corrente atinja I_{90} a partir de I_{10} ;
- $T30$: tempo para que a onda de corrente atinja I_{90} a partir de I_{30} ;

- $S10$: taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 10% e 90% na frente de onda (em relação a I_{p1});
- $S30$: taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 30% e 90% na frente de onda (em relação a I_{p1});
- $TANG(di / dt_{máx})$: inclinação máxima da onda de corrente na frente.

A partir de $T10$, pode-se calcular um dos possíveis tempos de frente virtuais da onda de corrente, denominado $Td10$, traçando-se uma reta imaginária unindo os valores I_{10} e I_{90} localizados sobre a curva da Figura 2.10. Essa reta é prolongada em ambos os sentidos até que encontre o eixo das abscissas e a reta imaginária que intercepta I_{p1} , paralela ao eixo das abscissas. Seu valor aproximado pode ser obtido com a relação $Td10 = T10 / 0,8$. De forma correlata, pode ser obtido o outro tempo de frente virtual, denominado $Td30$. Para tal, basta considerar o traçado de uma reta imaginária passando pelos valores I_{30} e I_{90} localizados sobre a curva de corrente. Obtém-se o valor de $Td30$ através da expressão $Td30 = T30 / 0,6$.

2.3.2 Proteção de sistemas eólicos contra descargas atmosféricas

A proteção de turbinas eólicas modernas encerra algumas complexidades, normalmente não encontradas em outras estruturas. Tais complexidades são resultado, principalmente, dos seguintes aspectos:

- as turbinas eólicas são estruturas altas (comumente possuem alturas superiores a 100 m);
- as turbinas são geralmente instaladas em regiões onde elas são os pontos preferenciais de incidência (locais em que a altura das mesmas se destaca com relação aos elementos no entorno);
- os componentes mais expostos das turbinas eólicas, pás e nacele, possuem cobertura de materiais compostos, não condutores de eletricidade, que são incapazes de sustentar descargas diretas ou conduzir a corrente associada;

- a corrente de descarga deve ser conduzida através da estrutura da turbina eólica até o aterramento, de modo que uma parcela significativa da corrente de descarga passa ou através, ou muito próxima de praticamente todos os componentes da turbina eólica;
- no Brasil, as turbinas eólicas são instaladas predominantemente em regiões de solos com elevada resistividade (regiões montanhosas ou costeiras).

Sabe-se que estruturas muito elevadas influenciam o processo de evolução do canal de descarga atmosférica. Em particular, com o aumento da altura da estrutura, há um correspondente aumento da probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas *ascendentes*, cuja origem do canal precursor ocorre a partir da parte superior da estrutura e cuja extensão é, em sua maior parte, de natureza ascendente. Adicionalmente, no caso de estruturas elevadas, além das descargas para o topo da estrutura, também podem ocorrer descargas laterais. Tais descargas também podem percorrer grande parte da estrutura da turbina eólica e danificar os seus componentes.

As pás de grandes turbinas eólicas modernas são feitas de materiais compostos, tais como fibras de vidro reforçadas com epóxi. A incidência de descargas em pás desprotegidas e fabricadas com estes materiais, invariavelmente causam severos danos, uma vez que tais materiais não são bons condutores de eletricidade. Portanto, a proteção das pás é essencial. A carcaça de algumas naceles também é feita de fibras de vidro reforçada com epóxi e também deve, portanto, ser protegida contra a incidência direta de descargas.

Ainda, vale mencionar que o fato de as turbinas eólicas serem máquinas rotativas encerra problemas adicionais. Tendo em conta o processo discreto de formação do canal de descarga atmosférica, há o risco de ocorrer o fechamento (*attachment*) da descarga para mais do que um ponto da pá rotativa. Considerando a multiplicidade das descargas atmosféricas, podem ocorrer, inclusive, incidências em mais de uma pá. Por exemplo, pode ocorrer o fechamento de uma primeira descarga para uma pá e de uma descarga subsequente para outra pá.

Usualmente, como já mencionado, parques eólicos são instalados em regiões montanhosas ou em regiões costeiras, que possuem condições favoráveis de vento. Tais regiões normalmente possuem solos com valor elevado de resistividade, o que dificulta a obtenção de um sistema de aterramento de boa qualidade (baixa impedância). Isto amplia os desafios relativos à proteção dos sistemas elétricos e de controle da turbina eólica, uma vez que o sistema de aterramento apresenta importância fundamental nessa proteção.

As técnicas de proteção de sistemas elétricos contra descargas atmosféricas estão descritas nas séries da IEC 61024 e IEC 61312 [5]. Vale salientar que a corrente da descarga atmosférica circula muito próxima dos sistemas elétricos de uma turbina eólica, em comparação às instalações elétricas de outras estruturas, por exemplo, edificações.

Nas subseções a seguir apresenta-se uma síntese dos aspectos gerais relativos à proteção de turbinas eólicas contra descargas atmosféricas. Não é objetivo deste trabalho esgotar esse tema, mas simplesmente apresentar os elementos gerais e permitir uma contextualização com o tema específico dessa dissertação, que corresponde aos sistema de aterramento de turbinas eólicas. Os aspectos específicos de proteção de turbinas eólicas contra descargas atmosféricas podem ser encontrados na IEC 61024-24 [5].

2.3.2.1 Avaliação dos riscos de dano da descarga atmosférica a uma turbina eólica

O projeto de qualquer sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve levar em conta o risco de incidência na estrutura e o risco de dano associado. O risco de incidência de uma descarga em uma estrutura é função de sua altura, da topografia do local e da atividade atmosférica da região. O dano associado à incidência de uma descarga atmosférica em uma dada estrutura pode ser de dois tipos: i) dano humano, decorrente de tensões de passo e toque ou explosões e incêndios provocados pela incidência de uma descarga; ii) dano físico à estrutura ou ao seu conteúdo.

O objetivo de um sistema de proteção é reduzir o dano a um limite tolerável. O nível tolerável é baseado em um risco aceitável se a segurança de seres vivos estiver envolvida. Se a segurança de seres vivos não precisa ser considerada, ou se o risco de dano é inferior ao risco aceitável para seres vivos, então a análise é puramente econômica. Isso é realizado, basicamente, avaliando-se o custo do sistema de proteção em comparação com o custo do eventual dano que esse sistema impediria.

O primeiro passo na análise de risco associado à incidência de descargas atmosféricas em uma estrutura consiste na estimativa da frequência média anual de descargas para a estrutura. Essa estimativa é obtida pelo produto da densidade de descargas atmosféricas para a terra pela área de exposição equivalente da estrutura, conforme detalhado em IEC 61400-24 [5].

Uma vez estimada a frequência de descargas para a estrutura, um sistema de proteção adequado deve ser selecionado. Uma falha do sistema de proteção contra descargas resulta no que é chamado de “evento crítico”. Se uma falha do sistema de proteção pode resultar em perda de vida, o número anual permitido de eventos críticos deve ser estabelecido por órgãos e/ou autoridades reguladoras nacionais. Quando as perdas devido à incidência de descargas forem puramente econômicas, o número anual permitido de eventos críticos pode ser estabelecido pelo proprietário da estrutura.

O número permitido de eventos críticos geralmente varia de acordo com o tipo de ocupação e de construção da estrutura, a localização e conteúdo da mesma, além da topografia da região. Conforme o número permitido de eventos críticos, define-se o chamado nível do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, que varia de nível I a nível IV, sendo o nível I o mais rigoroso e o nível IV o menos rigoroso².

Fisicamente, um sistema com nível de proteção mais rigoroso tem condutores com maior seção e sistemas de aterramento mais extensos, além de serem projetados com um maior número de captosres, de modo a melhorar a eficiência de interceptação de descargas. O valor de pico de corrente, a energia específica, a taxa de crescimento da corrente e a carga transferida associados a cada nível de proteção estão apresentados na Tabela 2.4. Por exemplo, um sistema de proteção nível I deve ser capaz de conduzir uma corrente com valor de pico de 200 kA sem provocar danos à estrutura.

Tabela 2.4 Valores máximos de parâmetros de descargas correspondendo aos níveis de proteção [5].

Nível de Proteção	Pico de corrente (kA)	Dissipação de Energia (kJ)	Taxa de crescimento da corrente (kA / μ s)	Total de carga transferida (C)
I	200	10.000	200	300
II	150	5.600	150	225
III	100	2.500	100	150
IV	< 100	< 2.500	< 100	< 150

² Entende-se por mais rigoroso aquele nível em que o número permitido de eventos críticos é o menor.

2.3.2.2 Proteção das pás da turbina eólica

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epóxi. As pás são fixadas à torre da turbina eólica através de flanges em uma estrutura metálica à frente do aerogerador, denominada cubo.

Os danos típicos em pás ocorrem quando há o fechamento do canal de descarga; isso ocasiona a delaminação e/ou incineração do material da superfície e, ainda, o aquecimento ou a fusão de componentes metálicos que servem como ponto de *attachment*, ou ponto de conexão. No entanto, os danos mais severos às pás de turbinas eólicas são provocados quando a descarga incidente dá origem a arcos no interior das pás. Tais arcos internos são geralmente formados entre o ponto de conexão da descarga atmosférica na pá e algum componente condutor em seu interior. A onda de choque de pressão causada por esses arcos internos pode literalmente explodir a pá, danificando permanentemente toda a sua superfície.

O problema genérico de proteção contra descargas atmosféricas das pás de uma turbina eólica consiste em conduzir de forma segura a corrente da descarga do ponto de *attachment* até o cubo, parte onde as pás se conectam à torre do aerogerador, de modo a evitar a formação de arcos no interior da pá. Um meio de se fazer isso é desviar a corrente da descarga do ponto de incidência ao longo da superfície da pá até o cubo, utilizando condutores metálicos fixados na superfície da pá ou localizados em seu interior.

Outro método consiste em adicionar material condutor ao material que constitui a superfície das pás, tornando-as suficientemente condutoras para conduzir a corrente de modo seguro até a torre. Variações de ambos os métodos são utilizados com as pás de turbinas eólicas [5]. Maiores detalhes sobre os métodos comumente utilizados podem ser encontrados nas referências [5] e [16].

2.3.2.3 Proteção dos sistemas elétricos e de controle

A Figura 2.11 ilustra de forma simplificada o esquema elétrico de um aerogerador com velocidade variável. A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador e adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais. É

composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora, utilizando-se máquinas de múltiplos pólos as quais não necessitam de caixas de engrenagens.

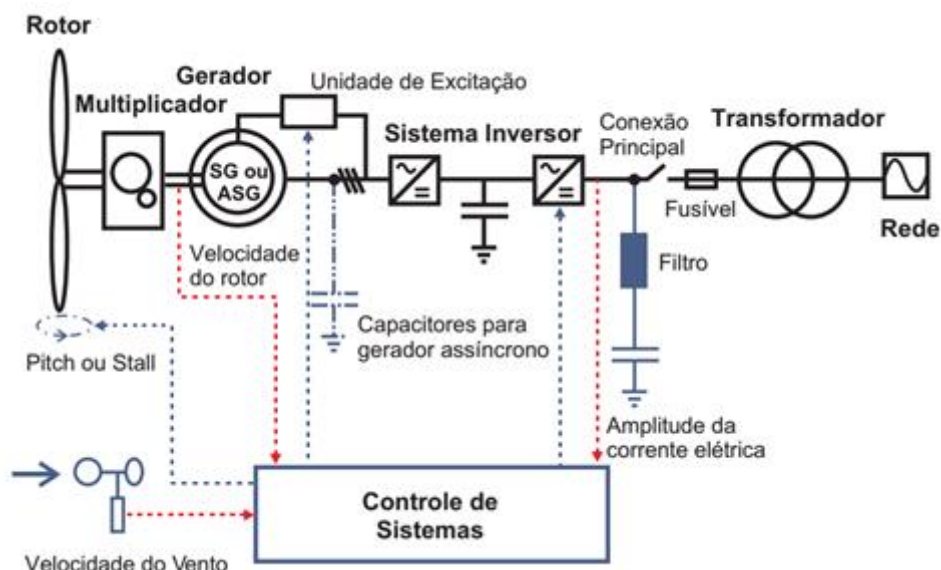


Figura 2.11 Esquema elétrico de um aerogerador com velocidade variável [17].

A conexão ao sistema elétrico é realizada por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle da frequência de saída sendo realizada eletronicamente por meio de tiristores. Embora a frequência produzida pelo gerador dependa de sua rotação, ou seja, da velocidade do vento, a frequência da energia elétrica efetivamente fornecida pelo aerogerador é constante e sincronizada com o sistema elétrico, por meio do conversor de frequência eletrônico.

O transformador tem a função de elevar a tensão fornecida pelo gerador, normalmente uma tensão baixa (~ 1 kV ou inferior), para o nível de média tensão. Tipicamente, esse transformador é conectado em estrela no lado de baixa tensão e em delta no lado de média tensão. O ponto centro-estrela é conectado ao sistema de aterramento da instalação. O transformador é colocado em um cubículo externo, juntamente com o sistema de distribuição de baixa tensão, localizado na base da torre, ou no interior da nacele.

O sistema de controle é composto por um extenso sistema de cabeamento que percorre a nacele, a torre e o rotor. A alimentação dos cubículos do sistema de controle é fornecida pelo transformador auxiliar através de fusíveis automáticos no painel de alimentação auxiliar. A

alimentação é convertida para um nível de tensão apropriado para alimentação de microprocessadores, sensores, transdutores e equipamentos similares que formam o sistema de controle. A maior parte do sistema de controle está localizada na parte inferior da torre ou na nacelle. Em alguns casos, um sistema descentralizado é colocado no cubo para controle e supervisão do movimento das pás. É importante salientar que o sistema de controle opera em tensões significativamente menores do que o sistema de potência sendo, portanto, bem mais vulnerável a danos devido à incidência de descargas atmosféricas.

2.3.2.3.1 Zonas de proteção contra descargas atmosféricas

Uma turbina eólica pode ser dividida em áreas físicas, que definem aproximadamente a natureza da influência de uma descarga atmosférica nos componentes localizados no interior de cada área específica. A divisão da turbina eólica em zonas de proteção é uma ferramenta para garantir proteção sistemática e suficiente de todos os componentes da turbina eólica. Essas zonas de proteção contra descargas (chamadas LPZ, do inglês, *Lightning Protection zones*) são definidas de acordo com a probabilidade de incidência direta (ou indireta) sobre o componente, a magnitude da corrente e os campos eletromagnéticos esperados na zona específica.

A Tabela 2.5 apresenta cada zona de proteção de acordo com os parâmetros mencionados. Os métodos de proteção contra descargas são então aplicados para garantir que os componentes, por exemplo, máquinas ou sistemas de controle, possam suportar o campo eletromagnético e a corrente de descarga que possam afetar a zona em que os mesmos estão localizados.

Tabela 2.5 Zonas de proteção contra descargas [5].

$LPZ\ 0_A$	Descarga direta, corrente total, campo eletromagnético não atenuado
$LPZ\ 0_B$	Descarga indireta, corrente total, campo eletromagnético não atenuado
$LPZ\ 1$	Descarga indireta, corrente reduzida, campo eletromagnético atenuado
$LPZ\ 2$	Corrente adicionalmente reduzida, campo adicionalmente eletromagnético atenuado

A fronteira entre as zonas $LPZ\ 0_A$ e $LPZ\ 0_B$ é determinada por meio do método das esferas rolantes, como ilustrado na Figura 2.12 (considerando um dado valor de pico de corrente

de descarga). As áreas destacadas em cinza são LPZ 0_B, onde a probabilidade de conexão direta de uma descarga é muito baixa, e o restante da superfície da turbina eólica corresponde à zona LPZ 0_A. Locais sobre os quais a esfera não pode rolar são protegidas contra a incidência direta de descargas.

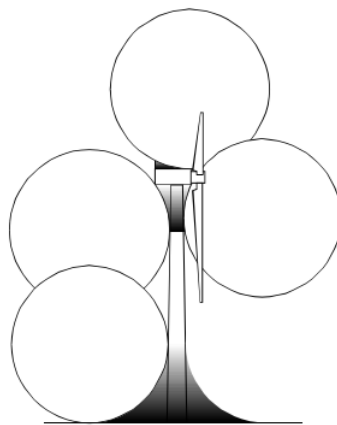


Figura 2.12 Método das esferas rolantes [5].

Como pode ser observado, a maior parte da superfície da turbina eólica está susceptível a incidências diretas— tais zonas são consequentemente LPZ 0_A. Por meio de terminações aéreas (por exemplo, captos) colocadas na borda traseira da cobertura da nacele, uma zona LPZ 0_B pode ser criada de modo a proteger instrumentos meteorológicos contra a incidência direta de descargas. Na base da turbina, também há uma zona LPZ 0_B onde um cubículo de transformador, se existir, estará protegido contra incidências diretas. Pode-se considerar que a carcaça metálica da torre e da nacele da turbina eólica constitui-se o limite entre as zonas LPZ 0_A ou LPZ 0_B e a zona LPZ 1; ou seja, a cobertura metálica da estrutura da turbina funciona como uma gaiola de Faraday para os componentes em seu interior.

A Figura 2.13 mostra um exemplo de como o interior da turbina eólica pode ser dividido em zonas de proteção LPZ 1 e LPZ 2. A nacele, a torre e o cubículo do transformador são zonas de proteção LPZ 1. Os dispositivos no interior de gabinetes metálicos na zona LPZ 1 estão na zona de proteção LPZ 2. Por exemplo, sistemas de controle dentro de um gabinete metálico no interior da torre metálica estão na zona LPZ 2, porém um gabinete metálico fora da torre está na zona LPZ 1. Eventualmente, equipamentos eletrônicos de grande sensibilidade podem ser colocados em uma zona ainda mais protegida, LPZ 3, em outro nível de gabinetes metálicos.

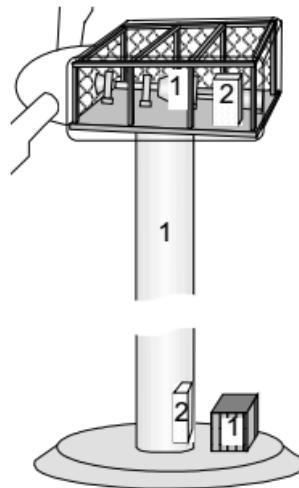


Figura 2.13 Exemplo de divisão em zonas de proteção no interior de uma turbina eólica [5].

2.3.2.3.2 Aterramento e proteção dos sistemas elétrico e de controle

O sistema de aterramento é o principal componente do sistema de proteção contra descargas atmosféricas dos sistemas elétrico e de controle. Para dispersar de forma segura a corrente de uma descarga que eventualmente incida diretamente sobre a turbina eólica, é necessária uma terminação adequada para terra, de modo a limitar as elevações de potencial que podem ser perigosas para seres vivos e equipamentos. Isso é obtido por meio de um sistema de aterramento com baixo valor de impedância.

Um aterramento de baixa qualidade (alto valor de impedância) não limita a elevação de potencial, que é transmitida para toda a turbina eólica (torre e nacelle). Dependendo dos níveis de sobretensão, podem ocorrer arcos elétricos, criando caminhos condutivos entre a carcaça metálica exterior da turbina eólica e componentes em seu interior, provocando mau funcionamento, danos e, eventualmente, destruição de equipamentos sensíveis. Adicionalmente, o sistema de aterramento exerce papel relevante na limitação de sobretensões transferidas para a rede de média tensão por meio do transformador de elevação de tensão.

Práticas adicionais de proteção, tais como equipotencialização, blindagem e utilização de dispositivos de proteção contra surtos (DPSs), também são usualmente empregadas na proteção dos sistemas elétrico e de controle da turbina eólica. No entanto, a efetividade de tais práticas está intimamente associada à existência de um bom sistema de aterramento. De acordo com a IEC 61400-24, cada turbina deve ser equipada com seu próprio sistema de aterramento, ainda que a turbina esteja conectada a um sistema de aterramento maior do parque eólico.

Maiores detalhes sobre os tipos de arranjos de aterramento típicos de turbinas eólicas são apresentados no Capítulo 3 deste trabalho.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados aspectos gerais sobre o desempenho de uma turbina eólica, o histórico de evolução dessa energia, a situação atual no Brasil e no mundo. Conhecer essas questões é essencial para que seja possível avaliar a relevância de se estudar essa energia e a sua importância na matriz energética nacional e mundial.

Posteriormente foram apresentados alguns conceitos básicos a respeito de descargas atmosféricas e a interação das mesmas com os aerogeradores, a causa de essas estruturas serem mais susceptíveis a esse fenômeno, além de parâmetros importantes para a correta caracterização de uma descarga.

A incidência de descargas atmosféricas em sistemas eólicos afeta a segurança e a confiabilidade dos mesmos. A maioria das falhas e funcionamento inadequado de sistemas em turbinas eólicas são causadas direta ou indiretamente por correntes elevadas, campos eletromagnéticos e/ou elevação de potencial na torre ou nas proximidades da mesma em virtude de descargas.

A incidência de uma descarga atmosférica em uma dada estrutura pode causar dois tipos de danos: danos humanos e danos físicos à estrutura ou ao seu conteúdo, seja por incidência direta ou sobreensões transitórias.

Estatísticas apontam que 70% das faltas elétricas em sistemas eólicos são consequências de elevações de potencial transitórias, em virtude da incidência de descargas atmosféricas, que afetam os sistemas de potência e controle do aerogerador. A Figura 2.14 apresenta a distribuição de danos mais comuns em turbinas eólicas: 51% das avarias são nos sistemas de controle e 12% nos sistemas de potência; juntos, somam 63% dos danos mais comuns em turbinas devido a descargas atmosféricas [4].

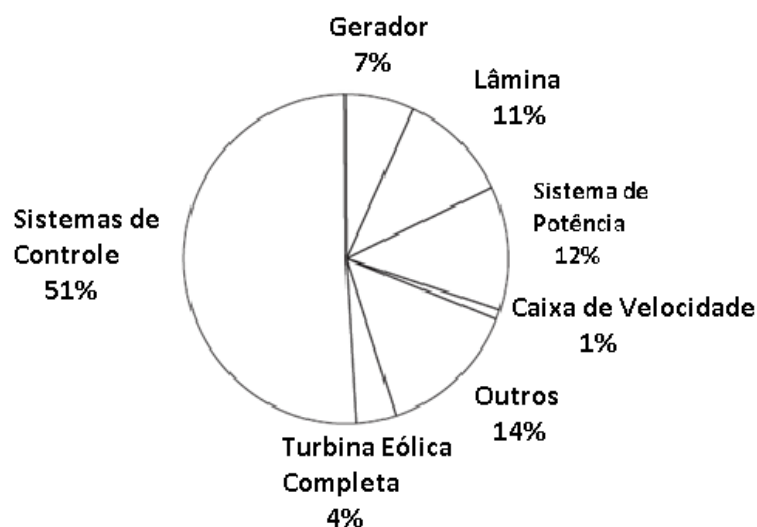


Figura 2.14 Distribuição dos danos em componentes em um total de 900 turbinas afetadas por descargas na Dinamarca no período de 1990 e 1999, adaptado de [16].

Alguns aspectos relacionados à proteção de turbinas eólicas também foram expostos. A proteção de turbinas modernas encerra algumas complexidades, normalmente não encontradas em outras estruturas. Um sistema de aterramento com baixo valor de impedância é o principal componente do sistema de proteção contra descargas atmosféricas dos sistemas elétrico e de controle.

O desempenho do aterramento de uma turbina eólica é avaliado de forma rigorosa no Capítulo 4 desta dissertação. Antes, porém, é de fundamental importância responder a seguinte questão: como os sistemas de aterramento de turbinas eólicas têm sido modelados por outros autores na literatura? A resposta a essa pergunta é o objetivo do capítulo seguinte.

Capítulo 3 Modelagem de aterramentos elétricos de turbinas eólicas

Este capítulo apresenta os arranjos típicos de aterramento para turbinas eólicas, os aspectos básicos do comportamento de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas e as principais modelagens utilizadas na literatura para analisar o comportamento impulsivo dos mesmos: Diferenças Finitas no Domínio do Tempo, Método dos Momentos e Modelo Eletromagnético Híbrido.

3.1 Introdução

Conforme descrito no Capítulo 2, turbinas eólicas são estruturas altamente suscetíveis à incidência de descargas atmosféricas. Os principais danos advindos desse evento consistem em avarias nos sistemas de controle e de potência dos aerogeradores. Para minimizar os efeitos transitórios provocados pelas descargas, é importante conhecer e avaliar o desempenho e comportamento do aterramento das turbinas eólicas frente a esse fenômeno.

Como a descarga atmosférica tem natureza impulsiva, é importante avaliar o comportamento impulsivo do aterramento dos aerogeradores para uma análise assertiva do desempenho do sistema eólico frente a esse fenômeno. Para isso, é de fundamental importância a modelagem rigorosa do aterramento.

A modelagem rigorosa do aterramento permite compreender e também prever o seu comportamento, possibilitando a implementação de ações que minimizem as sobretensões geradas e os danos causados pelas descargas. A modelagem adequada viabiliza a elaboração de um projeto de aterramento mais efetivo, preservando a segurança de seres vivos e os equipamentos localizados no interior da torre eólica.

Neste capítulo são apresentados arranjos típicos de aterramentos para turbinas eólicas, assim como técnicas usuais de modelagem do comportamento impulsivo desses arranjos.

3.2 Arranjos de aterramento típicos de turbinas eólicas

O sistema de aterramento é elemento essencial nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Ele tem a função de dispersar para o solo, de forma segura, a corrente da descarga atmosférica, limitando as elevações de potencial que podem ser perigosas para seres vivos e equipamentos. A mitigação das elevações de potencial é tão mais eficiente quanto menor for a impedância do sistema de aterramento.

Tipicamente, o aterramento de aerogeradores é composto pela própria fundação da torre de sustentação. A fundação é composta por uma série de ferragens interconectadas entre si e, tipicamente, abrange uma área entre 10 m² e 20 m², dependendo da altura da torre de sustentação e do diâmetro das pás do aerogerador. A geometria da fundação pode assumir formas diversas, embora as mais comuns sejam octogonal, quadrada e circular - exemplificadas, respectivamente, nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. Complementar à fundação, eletrodos horizontais e verticais, além de anéis de aterramento, podem ser empregados, dependendo do nível de proteção requerido. Normalmente, é prática comum de engenharia utilizar esses eletrodos adicionais naqueles casos em que a resistência de aterramento é superior a 10 Ω [5].

O arranjo de aterramento descrito no parágrafo anterior corresponde ao aterramento de um aerogerador individual. Considerando um parque eólico, composto por vários aerogeradores, cada um deles deve ter um aterramento similar ao descrito. Adicionalmente, é prática usual conectar os aterramentos individuais de cada aerogerador de um parque eólico por meio de eletrodos horizontais de aterramento. Tal interligação visa, sobretudo, obter uma melhoria global do desempenho do aterramento elétrico do parque eólico. Em particular, tal interligação leva a uma redução bastante significativa da resistência de aterramento total do parque, embora não implique necessariamente em uma melhoria do desempenho impulsivo do aterramento de cada aerogerador individualmente.



Figura 3.1 Fundação octogonal de uma turbina eólica [18].



Figura 3.2 Fundação retangular de uma turbina eólica [19].



Figura 3.3 Fundação circular de uma turbina eólica [20].

3.3 Aspectos básicos do comportamento de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas

Para solicitações lentas, tais como os curtos-circuitos e a maior parte dos transitórios de manobra, os efeitos reativos no aterramento, capacitivo e indutivo, são desprezíveis e o aterramento pode ser representado por uma resistência pura, normalmente chamada resistência de aterramento de baixa frequência (R_{LF}). No caso de solicitações lentas, o solo é modelado como um meio heterogêneo estratificado em camadas, cada uma com uma resistividade elétrica uniforme, ou por meio de uma resistividade equivalente também uniforme.

Quando submetido a correntes advindas da incidência de descargas atmosféricas, o comportamento no aterramento não é unicamente determinado por sua resistência de aterramento, e a sua resposta transitória deve ser avaliada [21] [22]. A corrente associada às descargas atmosféricas apresenta formato impulsivo, com um rápido crescimento em seus instantes iniciais seguido de uma variação mais lenta após ter atingido o seu valor de pico (usualmente na faixa de dezenas de kA). Em função desse formato impulsivo, tal corrente apresenta um espectro representativo de frequências que vai desde 0 Hz até alguns MHz. Nessa faixa de frequências, os efeitos capacitivo e indutivo tornam-se relevantes para a análise do comportamento impulsivo do sistema eólico; o primeiro, associa-se à corrente capacitiva ou de deslocamento que dispersa dos eletrodos para o solo; o segundo à queda de tensão induzida pela corrente que circula longitudinalmente nos condutores. Durante o período transitório, o comportamento do aterramento é mais bem representado por meio de uma impedância complexa, no domínio da frequência, ou simplificada por meio de uma impedância impulsiva, no domínio do tempo, determinada pela razão entre os valores de pico da elevação de potencial (GPR – *Grounding Potential Rise*) no ponto de injeção de corrente e da corrente injetada.

Uma vez que, durante o período transitório, além dos fenômenos condutivos, tornam-se relevantes os efeitos capacitivos e indutivos no aterramento, além da resistividade, são também importantes os parâmetros permissividade e permeabilidade do solo. Adicionalmente, deve-se considerar a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, que variam de forma significativa ao longo do espectro característico de descargas atmosféricas (até alguns MHz) [23]. O valor da permeabilidade magnética pode ser considerado constante e igual à permeabilidade do vácuo, na quase totalidade das aplicações [24]. Também, devido aos elevados valores de corrente associados às descargas atmosféricas,

o campo elétrico próximo aos eletrodos do aterramento pode ser bastante elevado e provocar a ionização do solo.

Adicionalmente, considerando os componentes de alta frequência da descarga atmosférica, os efeitos de propagação são significativos e a onda de corrente injetada no aterramento pode ser vista como uma onda eletromagnética guiada pelos eletrodos que estão imersos em um meio com perdas (solo). Devido a essas perdas, a onda de corrente sofre atenuação à medida que se propaga a partir do ponto de injeção e, portanto, a corrente que dispersa dos eletrodos para o solo apresenta uma distribuição não uniforme [25] [26].

Das considerações anteriores deriva-se o importante conceito de comprimento efetivo (L_{EF}), que corresponde a um comprimento limite do eletrodo de aterramento. Eletrodos com comprimento superior a esse valor limite não implicam em redução da impedância impulsiva de aterramento [25]. Este comportamento é explicado pelo fato de que além deste limiar, os componentes de alta frequência da corrente de descarga (associadas à frente da onda) estão tão atenuados que, a despeito da disponibilidade de comprimento adicional do eletrodo, este praticamente não mais contribui para dispersão de corrente para o solo [25]. O valor do comprimento efetivo depende basicamente da resistividade do solo e do tempo de frente da onda de corrente injetada, sendo tão maior quanto maiores forem esses dois parâmetros [23] [27].

O conceito de comprimento efetivo leva a alguns aspectos importantes de ordem prática. Um primeiro aspecto fundamental é que nos primeiros microssegundos do transitório, geralmente associados à frente da onda, a corrente de descarga “enxerga”, a partir do ponto de injeção, apenas uma parcela limitada do aterramento. Para se ter uma estimativa dessa parcela, pode-se traçar uma circunferência a partir do ponto de injeção com raio igual ao comprimento efetivo. Nesse período inicial do transitório, o aterramento é caracterizado por sua impedância impulsiva, que pode ser bastante diferente da resistência de aterramento.

Na cauda da onda, associada aos componentes de baixa frequência, os efeitos de propagação são desprezíveis e toda a extensão do aterramento é “enxergada” pela corrente. Adicionalmente, nesse período do transitório os efeitos capacitivo e indutivo são desprezíveis e, portanto, o aterramento pode ser representado por sua resistência de aterramento.

Ainda, é importante destacar uma consequência importante do conceito de comprimento efetivo, tendo-se em conta especificamente os sistemas de aterramento de parques eólicos. Como já mencionado, em parques eólicos os aterramentos individuais de cada aerogerador são interligados, com o intuito de melhorar o desempenho global do sistema. No entanto, para um

aerogerador individual, durante o período transitório, o aumento da área coberta por seu aterramento, por exemplo, pela interligação com arranjos adjacentes, fica limitado pelo comprimento efetivo. Dito de outra forma, considerando a incidência de uma descarga atmosférica em um aerogerador individual, dependendo das características do solo e da descarga, a corrente pode ser atenuada de tal maneira a partir de seu ponto de injeção, normalmente o centro da fundação, que o impacto dos aterramentos adjacentes no desempenho do aterramento do aerogerador atingido pode ser desprezível. Tendo em conta o exposto, note-se que a usual prática de interligação dos aterramentos das torres de um parque eólico, embora leve a uma redução bastante pronunciada da resistência de aterramento do parque, pode não impactar, ou impactar muito pouco, o desempenho impulsivo do aterramento de cada aerogerador individual.

3.4 Modelagem do comportamento impulsivo de aterramentos de turbinas eólicas: Estado da Arte

Para avaliação do comportamento de aterramentos elétricos frente a ocorrências elétricas generalizadas, é necessário o estabelecimento de modelos eletromagnéticos precisos que contemplem os principais aspectos do fenômeno em questão, descritos na seção anterior. Existe um grande número de trabalhos na literatura que propõe modelos para análise do comportamento transitório de aterramentos elétricos. Entretanto, uma análise geral permite a divisão desses trabalhos em três grupos principais de metodologias adotadas [28]: 1) métodos baseados na teoria de circuitos; 2) métodos baseados na teoria de linhas de transmissão; e 3) métodos baseados na teoria de campo.

As metodologias baseadas na teoria de circuitos modelam os eletrodos de aterramento por meio de associações simples de elementos concentrados de circuitos R, L e C, desconsiderando os efeitos de propagação. Tal aproximação limita a aplicabilidade dessa metodologia a frequências da ordem de poucos kHz.

As metodologias baseadas na teoria de linhas de transmissão modelam os eletrodos de aterramentos por meio de parâmetros distribuídos e resolvem as equações clássicas de ondas trafegantes em linhas de transmissão. Implicitamente, essa abordagem adota a hipótese de modo de propagação transversal elétrico e magnético (TEM), restringindo a sua aplicação a arranjos compostos por eletrodos horizontais.

As metodologias baseadas diretamente na teoria de campo aplicam diretamente as equações de Maxwell ao problema de modelagem do aterramento, incluindo os acoplamentos eletromagnéticos e os efeitos de propagação. A abordagem pela teoria de campo é considerada a mais exata, uma vez que não adota as hipóteses simplificadoras das metodologias de circuitos elétricos e de linhas de transmissão.

Tendo em conta as complexidades envolvidas na resposta de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas, conforme seção 3.3, as metodologias baseadas diretamente na teoria de campo são as mais adequadas para investigação do comportamento transitório dessas configurações. Nessa frente, identifica-se na literatura basicamente a aplicação de duas técnicas, considerando especificamente aterramentos de aerogeradores: o Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD do inglês *Finite-Difference Time-Domain*) e o Método dos Momentos (MoM do inglês *Method of Moments*).

3.4.1 – Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

O método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo é um dos vários métodos computacionais que visam resolver numericamente as equações diferenciais de Maxwell. O FDTD, criado em 1966 por Yee [29], foi baseado em um método de resolução numérica de equações, já existente, conhecido como método das diferenças finitas (FDM do inglês *Finite Difference Method*). O método FDM consiste em uma técnica de aproximações sucessivas que transforma as equações diferenciais em equações discretizadas ou finitas. A diferença entre este método e o FDTD é que este último é acrescido do incremento temporal e expandido em série de Taylor até atingir um erro estipulado pelo truncamento, após um dado número de iterações. Na aplicação do FDTD, o meio onde se deseja calcular os campos eletromagnéticos é dividido em uma série de células, chamadas células de Yee. Nessas células, as equações rotacionais de Maxwell são discretizadas e os campos elétrico e magnético são solucionados no tempo e espaço simultaneamente. No caso de aterramentos elétricos, a fonte dos campos eletromagnéticos é a corrente de falta, os elementos emissores são os eletrodos de aterramento, modelados pela técnica de fio fino, e o meio é o solo.

É importante destacar algumas características do FDTD, especificamente com relação à sua utilização para avaliação de problemas de aterramento. O método permite modelar com certa facilidade meios heterogêneos, por meio da modificação dos parâmetros eletromagnéticos

de cada célula. Também, uma vez que o método é desenvolvido diretamente no domínio do tempo, a modelagem de fenômenos não lineares dependentes do tempo, por exemplo, ionização do solo, é facilitada. Por outro lado, a consideração de meios dispersivos, cujos parâmetros eletromagnéticos dependam da frequência, é tarefa complexa. Ainda, o custo computacional do método para problemas de aterramento, que são problemas abertos, é elevado, embora possa ser reduzido utilizando-se fronteiras com condições absorventes.

As referências [30] e [31] empregam o FDTD para avaliação do comportamento transitório de aterramentos de aerogeradores submetidos à incidência de descargas atmosféricas. Dentre esses trabalhos, merecem destaque aqueles desenvolvidos por Yamamoto e colaboradores, que apresentam além de resultados de simulação, resultados experimentais de aterramentos reais de aerogeradores submetidos a correntes impulsivas. Em particular, em [32] e [33] Yamamoto e colaboradores apresentam resultados experimentais de GPR de aterramentos reais de aerogeradores, a partir dos quais validam resultados de simulação utilizando o FDTD. Neste trabalho específico, as análises se concentram em resistividades de até 100 Ωm , que corresponde a uma condição típica de solo no Japão (baixos valores de resistividade). De um modo geral, os trabalhos que avaliam o comportamento transitório de aterramentos elétricos de aerogeradores utilizando o FDTD não consideram o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

3.4.2 Método dos Momentos (MoM)

O Método dos Momentos é uma outra técnica numérica baseada diretamente na Equações de Maxwell para solução de problemas de eletromagnetismo. Na Aplicação do MoM, o elemento fonte de campos eletromagnéticos é discretizado em diversos segmentos e a interação eletromagnética, ou o acoplamento eletromagnético entre eles é determinada(o) via aplicação das equações básicas do eletromagnetismo. Na abordagem do método, chega-se a uma equação integral, sendo o integrando a incógnita do problema. Essa equação integral é reduzida a um sistema de equações lineares cuja solução pode ser obtida por meio de algoritmos numéricos. A solução do sistema de equações fornece a incógnita do problema (integrando da equação integral). No caso de aterramentos elétricos, a incógnita corresponde à distribuição de corrente nos eletrodos. A partir dessa distribuição, determina-se o vetor intensidade de campo elétrico e, finalmente, a elevação de potencial no aterramento por meio da integral de linha

desse campo. A partir da elevação de potencial, várias outras grandezas de interesse podem ser determinadas.

É importante destacar algumas características do MoM, especificamente com relação à sua utilização para avaliação de problemas de aterramento. O método é particularmente adequado para modelagem de estruturas do tipo “fio fino”, como é o caso de eletrodos de aterramento. Adicionalmente, é a técnica numérica mais robusta para tratamento de problemas de eletromagnetismo abertos, como é o caso do problema de aterramento. Além disso, tradicionalmente, o MoM é desenvolvido no domínio da frequência, o que permite a inclusão direta de meios dispersivos, cujos parâmetros variam com a frequência. Por outro lado, a inclusão de fenômenos não lineares dependentes do tempo é feita de forma indireta e aproximada. O custo computacional do MoM para problemas de aterramento é, em geral, menor em comparação ao do FDTD, sendo a maior parte deste custo associado à solução dos sistemas lineares resultantes, particularmente no caso de aterramentos muito extensos que devem ser discretizado em muitos elementos.

As referências [34] e [35] empregam o MoM para avaliação do comportamento transitório de aterramentos de aerogeradores submetidos à incidência de descargas atmosféricas. Em [34], o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo não é considerado. Em [35], considera-se a influência do fenômeno de variação dos parâmetros do solo no GPR desenvolvido por um arranjo de aterramento de aerogeradores frente a uma corrente impulsiva. No entanto, a análise é realizada para um único arranjo de aterramento, uma única resistividade e uma única onda de corrente.

Recentemente, o Modelo Eletromagnético Híbrido, cuja formulação guarda semelhança com o Método dos Momentos, tem sido empregado para avaliação do comportamento transitório de aterramentos elétricos de aerogeradores frente a correntes de descargas atmosféricas [36], [37], [38]. Este é o modelo empregado neste trabalho, sendo descrito em mais detalhes na seção seguinte.

3.5 Modelagem do comportamento impulsivo de aterramentos de turbinas eólicas utilizando o Hybrid Electromagnetic Model (Modelo Híbrido Eletromagnético – HEM)

Os sistemas de aterramento de aerogeradores são normalmente constituídos pelas próprias fundações das torres de sustentação. Tais fundações são formadas por uma série de

ferragens interconectadas, que podem ser modeladas do ponto de vista eletromagnético como condutores cilíndricos. Nesse contexto, adota-se neste trabalho uma forma compacta de representação dos eletrodos de aterramento, baseada em simplificações consistentes, sem perda de informações físicas essenciais do fenômeno investigado.

Nessa forma compacta de representação, o comportamento global do aterramento é obtido a partir da superposição dos efeitos transversais e longitudinais para uma geometria cilíndrica correspondente aos eletrodos. Segundo essa abordagem, o sistema de aterramento é particionado em uma série de elementos, sendo que cada um é considerado fonte de uma densidade de corrente transversal I_T / L (sendo L o comprimento do segmento) que dispersa do eletrodo em direção ao solo e de uma corrente longitudinal I_L que circula ao longo do eletrodo, conforme ilustra a Figura 3.4. Essas duas fontes de corrente permitem contemplar as condições físicas impostas pelas equações de Maxwell.

A fonte de corrente transversal, devido ao fato de possuir natureza divergente, apresenta efeito elétrico, mas não magnético. A cada fonte de corrente transversal está associado um campo elétrico de natureza conservativa. Esse campo gera elevação de potencial em relação ao infinito em pontos genéricos no meio em que o elemento se encontra inserido, inclusive nos demais elementos em que o aterramento foi particionado. Por outro lado, a fonte de corrente longitudinal, devido ao fato de possuir natureza solenoidal, apresenta efeito eletromagnético. A cada fonte de corrente longitudinal está associado um campo magnético que, por sua vez, gera um campo elétrico de natureza não-conservativa. O efeito desse campo elétrico de natureza solenoidal se traduz na força eletromotriz induzida em outros elementos e nele próprio.

A representação dos efeitos eletromagnéticos de eletrodos de aterramento por meio dessas duas fontes de corrente foi originalmente proposta por Visacro e Portela em [39], [40]. Posteriormente, essa representação foi expandida por Visacro, Soares Jr. e Schroeder [26], [41], [42] para representação de componentes aéreos excitados por correntes de descargas atmosféricas. Esses desenvolvimentos culminaram com o estabelecimento do Modelo Eletromagnético Híbrido (HEM, do inglês *HybridElectromagneticModel*), cujos detalhes são apresentados em [43].

Apresenta-se a seguir, de forma sucinta, os aspectos gerais do HEM, que é o modelo utilizado nesta dissertação para representação dos arranjos de aterramento de aerogeradores. Mais detalhes sobre esse modelo podem ser consultados em [26], [41], [43], [44].

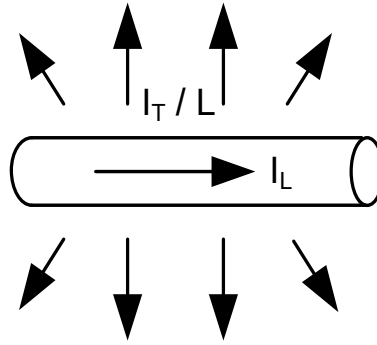


Figura 3.4 Fontes de corrente associadas a cada elemento do sistema de aterramento.

3.5.1 Aspectos matemáticos básicos do Modelo Eletromagnético Híbrido (HEM)

Na aplicação do HEM, considera-se que o sistema de aterramento, de geometria genérica, é particionado em N elementos. Por simplicidade e com fins didáticos, sejam dois desses elementos, imersos em um meio linear, homogêneo e isotrópico infinito em todas as direções, caracterizado, em uma dada frequência angular ω , por sua condutividade (σ), permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ), conforme representado na Figura 3.5. A constante de propagação, em uma dada frequência ω , nesse meio é dada por

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (3.1)$$

em que α e β são, respectivamente, a constante de atenuação e de defasamento.

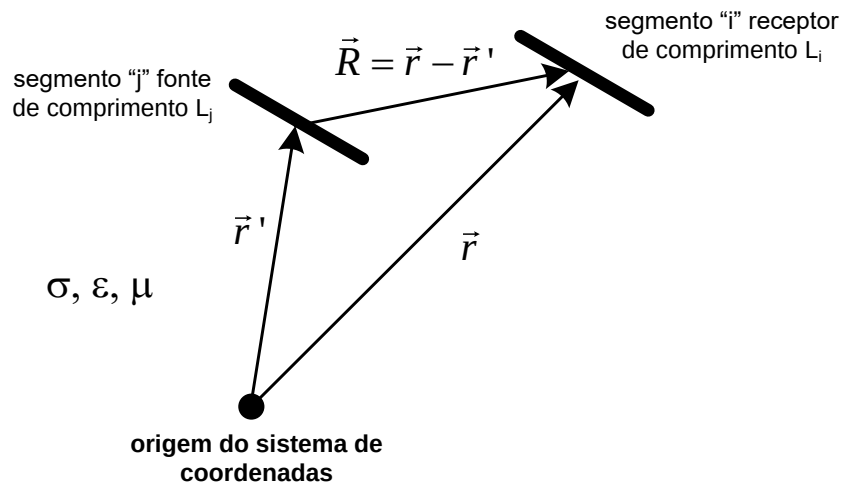


Figura 3.5 Interação entre dois elementos do aterramento imersos em um meio caracterizado por σ, ϵ e μ , em uma dada frequência ω .

A partir do HEM, quantificam-se as interações eletromagnéticas entre esses N segmentos, por meio da utilização dos potenciais escalar elétrico e vetor magnético [43]. Considerando um elemento fonte de corrente “j” e um elemento receptor “i”, conforme Figura 3.5, a Eq. (3.2) quantifica a elevação de potencial média gerada no elemento “i”, devido à corrente transversal I_{Tj} que dispersa do elemento “j”; de modo similar, a Eq. (3.3) quantifica a queda de tensão induzida no elemento “i”, devido à corrente longitudinal I_{Lj} que circula ao longo do elemento “j”.

$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_jL_i} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{Tj} \frac{e^{-\gamma R}}{R} dl_j dl_i \quad (3.2)$$

$$\Delta V_{ij} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{Lj} \frac{e^{-\gamma R}}{R} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i \quad (3.3)$$

Em (3.2) e (3.3):

- dl_i e dl_j correspondem aos elementos diferenciais de comprimentos dos elementos fonte (j) e receptor (i), respectivamente;
- $d\vec{l}_j$ e $d\vec{l}_i$ correspondem aos vetores diferenciais de comprimentos dos elementos fonte (j) e receptor (i), respectivamente;
- L_j e L_i correspondem aos comprimentos dos elementos fonte (j) e receptor (i), respectivamente;
- R corresponde ao módulo do vetor separação entre os elementos fonte (j) e receptor (i), $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$.

A aplicação sistemática das equações (3.2) e (3.3) aos N elementos nos quais o aterramento é particionado, permite o estabelecimentos de dois sistemas de equações lineares

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_T \mathbf{I}_T \quad (3.4)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_L \quad (3.5)$$

Em (3.4), $\mathbf{V}$ corresponde ao vetor elevação de potencial médio em relação ao infinito em cada elemento, $\mathbf{I}_T$ ao vetor de corrente transversal em cada elemento e $\mathbf{Z}_T$ é definida como matriz de impedância transversal. Em (3.5), $\Delta\mathbf{V}$ corresponde ao vetor de queda de tensão em cada elemento, $\mathbf{I}_L$ ao vetor de corrente longitudinal em cada elemento e $\mathbf{Z}_L$ é definida como matriz de impedância longitudinal.

A definição dos sistemas de equações (3.4) e (3.5) e, particularmente, das expressões para cálculo dos termos das matrizes $\mathbf{Z}_T$ e $\mathbf{Z}_L$, passa pela aplicação do Métodos dos Momentos (MoM), conforme [44], [45], [46]. Na aplicação do MoM, um passo importante corresponde à definição de funções de base para representação de variáveis desconhecidas como, por exemplo, a distribuição de correntes (transversal e longitudinal) no aterramento. Para representação dessas correntes, adota-se nesse trabalho, conforme [45], as funções de base “pulso”, em que se assume um valor uniforme para as correntes ao longo de um elemento, embora tais correntes possam variar de um elemento para outro.

Considerando o descrito, os termos da matriz de impedância transversal $\mathbf{Z}_T$ são dados por:

$$z_{Tij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_jL_i} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma R}}{R} dl_j dl_i \quad (3.6)$$

Os termos z_{Tij} correspondem à impedância transversal entre dois elementos, sendo um deles determinado elemento fonte de corrente (j) e outro receptor (i). A impedância z_{Tij} é igual ao potencial médio no elemento receptor, devido à fonte de corrente transversal no elemento emissor, dividido pela corrente transversal deste último. Ela representa a interação eletromagnética entre os diversos elementos e traduz fisicamente os acoplamentos elétricos (capacitivo e condutivo) próprio e mútuo entre eles.

De modo similar, os termos da matriz de impedância longitudinal $\mathbf{Z}_L$ são dados por:

$$z_{Lij} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma R}}{R} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i \quad (3.7)$$

Os termos z_{Lij} correspondem à impedância longitudinal entre dois elementos. A impedância z_{Lij} é igual à queda de tensão induzida no elemento receptor, devido à fonte de

corrente longitudinal no elemento emissor, dividido pela corrente longitudinal deste último. Ela representa a interação eletromagnética entre os diversos elementos e traduz fisicamente os acoplamentos magnéticos (indutivo) próprio e mútuo entre eles.

Ressalta-se que as impedâncias z_{Tij} e z_{Lij} dependem apenas da geometria do aterramento e das características eletromagnéticas do solo, uma vez que o sistema sob estudo é considerado linear. No cálculo dessas impedâncias, o efeito da interface solo-ar é levado em consideração mediante aplicação do método das imagens complexas, conforme proposto por Schroeder em [26].

As equações (3.4) e (3.5) podem ser reduzidas a uma única equação matricial a partir do estabelecimento de relações nodais entre as grandezas sob estudo [43]. Primeiro, considera-se o potencial médio em cada elemento igual à média aritmética entre os potenciais nodais e a queda de tensão igual à diferença entre eles. Segundo, a lei de Kirchhoff das correntes é aplicada a cada nó do sistema sob estudo, ou seja, a somatória das correntes que entram (ou que deixam) um determinado nó é nula. Da aplicação dessas relações, as equações (3.4) e (3.5) podem ser reduzidas a uma única equação matricial da forma $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{N1} \\ V_{N2} \\ \vdots \\ V_{Np} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

em que:

- $\mathbf{A}$ é a matriz resultante da aplicação das relações nodais, de dimensão $p \times p$, em que p é o número de nós do sistema. Em linhas gerais, ela é resultado de uma combinação das matrizes originais $\mathbf{Z}_T$ e $\mathbf{Z}_L$, o que significa que seus termos dependem apenas da geometria do aterramento e das características eletromagnéticas do meio.
- $\mathbf{x}$ é o vetor dos potenciais nodais V_N , de dimensão $p \times 1$.
- $\mathbf{b}$ é o vetor correspondente à injeção de correntes externas, de dimensão $p \times 1$. No caso de (3.9), considerou-se, por simplicidade, a injeção de uma corrente harmônica de 1 A no nó 1.

A solução do sistema (3.9) fornece os fasores de tensão nodais para uma frequência específica. A partir de tais fasores é possível, para uma frequência, determinar a impedância harmônica de aterramento, definida como a relação entre o fasor de elevação de potencial no ponto de injeção de corrente e o fasor da corrente injetada. A determinação da impedância harmônica ao longo de uma faixa de frequências, definida de acordo com o fenômeno transitório em análise, permite caracterizar unicamente o sistema de aterramento. Note-se que, uma vez que os cálculos são realizados diretamente no domínio da frequência, a inclusão de meios dispersivos, cujos parâmetros tenham dependência com a frequência, é imediata. Essa foi a principal motivação para escolha do HEM para simulação do comportamento transitório de aterramentos de aerogerados, foco deste trabalho. Finalmente resultados no domínio do tempo podem ser obtidos por meio de transformada numérica de Fourier ou de Laplace ou, ainda, via representação do sistema de aterramento por meio de um circuito equivalente e posterior simulação utilizando programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo do tipo ATP/EMTP.

3.6 Considerações Finais

Apresentou-se neste capítulo os aspectos básicos do comportamento transitório de aterramentos de turbinas eólicas frente a descargas atmosféricas. Adicionalmente, apresentou-se um breve estudo do estado da arte das principais técnicas empregadas na literatura para avaliação da resposta transitória de aterramentos de aerogeradores. Por fim, descreveu-se o Modelo Eletromagnético Híbrido, que será utilizado neste trabalho para modelagem eletromagnética de arranjos de aterramento típicos de aerogeradores. No próximo capítulo são apresentados resultados da aplicação sistemática desse modelo a um sistema de aterramento usual de turbinas eólicas, enterrado em solos de resistividades típicas no Brasil e submetido a ondas de corrente representativas de primeiras descargas e descargas subsequentes.

Capítulo 4 Resultados

Este capítulo apresenta a avaliação do uso do Método Eletromagnético Híbrido, HEM, para simulação de arranjos de turbinas eólicas considerando resultados experimentais e um extenso conjunto de resultados de simulação avaliando-se o comportamento de um arranjo típico de aterramento de aerogeradores frente a descargas atmosféricas.

4.1 Introdução

No capítulo 2 foram explicitados a relevância do estudo da energia eólica, os principais aspectos de funcionamento de um aerogerador e a interação deste com descargas atmosféricas, assim como os efeitos dessa interação. No capítulo 3 foram apresentados os arranjos típicos de aterramento para turbina eólica, o comportamento de aterramentos elétricos de turbinas eólicas frente a descargas atmosféricas, assim como as principais modelagens utilizadas na literatura para analisar o comportamento impulsivo dos mesmos.

Com base nos desenvolvimentos dos capítulos anteriores, nesse capítulo é apresentada a validação da técnica de modelagem HEM para simulação de aterramentos elétricos de aerogeradores. Definida, validada e desenvolvida a técnica de modelagem, são apresentados resultados referentes ao desempenho de um arranjo de aterramento típico de aerogeradores frente a descargas atmosféricas levando em conta quatro resistividades, 300, 1000, 3000 e 10000 Ωm , três dimensões do arranjo de aterramento, 10 m $\times$ 10 m, 14 m $\times$ 14 m e 20 m $\times$ 20 m, ondas de corrente representativas para primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, e as hipóteses de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

Os resultados apresentados explicitam alguns dos principais parâmetros referentes a aterramentos elétricos, como elevação de potencial, impedância transitória, impedância impulsiva e coeficiente de impulso, levando-se em conta todas as condições citadas anteriormente.

4.2 Avaliação da aplicabilidade do HEM para simulação de arranjos de aterramentos de turbinas eólicas considerando resultados experimentais

É relativamente rara a disponibilidade de resultados experimentais de resposta impulsiva de aterramentos elétricos. Tais resultados experimentais são de fundamental importância para validação de ferramentas computacionais de simulação. Para validação da ferramenta computacional empregada neste trabalho, foram consideradas medições de uma configuração real de aterramento de aerogeradores. Tais medições foram obtidas por meio de uma cooperação internacional entre os pesquisadores envolvidos neste trabalho e o Prof. Kazuo Yamamoto, do Departamento de Engenharia Elétrica da *Chubu University*, Japão.

A Figura 4.1 ilustra o sistema de aterramento em questão, que corresponde a um arranjo típico de turbinas eólicas localizadas no parque de Hokigamine, Japão. A torre metálica de sustentação está conectada à fundação, que possui formato quadrado, dimensões $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ e altura de $2,1\text{ m}$. A fundação é constituída de uma série de ferragens interconectadas entre si, formando uma densa malha de condutores. À parte inferior da fundação está conectada uma malha complementar de aterramento, de dimensões $12\text{ m} \times 12\text{ m}$ e reticulados quadrados de $6\text{ m} \times 6\text{ m}$. Oito hastes de $1,5\text{ m}$ estão conectadas ao longo dessa malha complementar, conforme ilustrado na Figura 4.1.

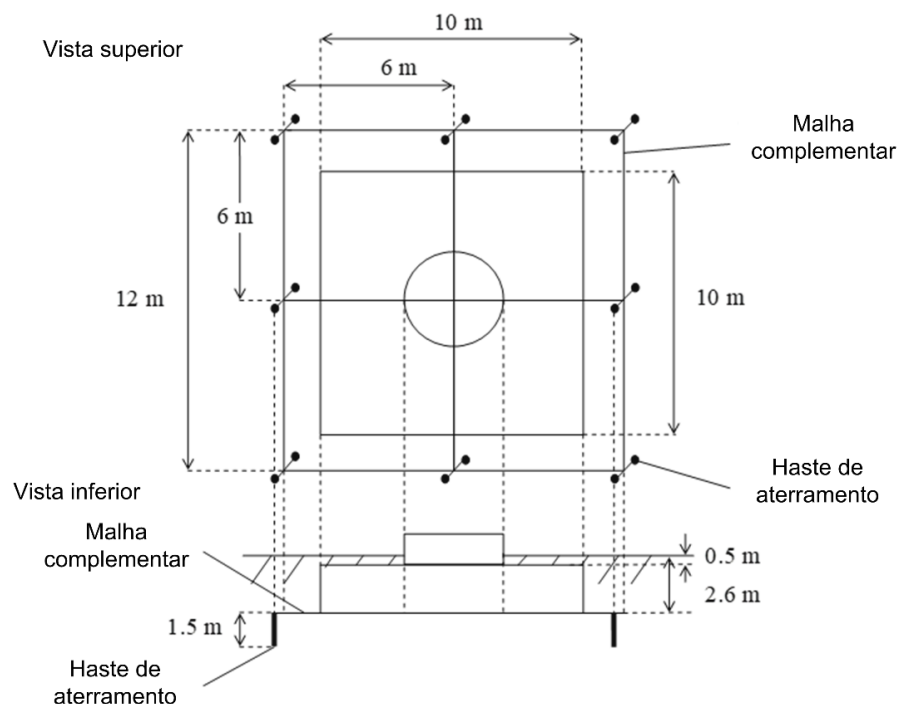


Figura 4.1 Detalhes do aterramento de turbina eólica do parque de Hokigamine, Japão.

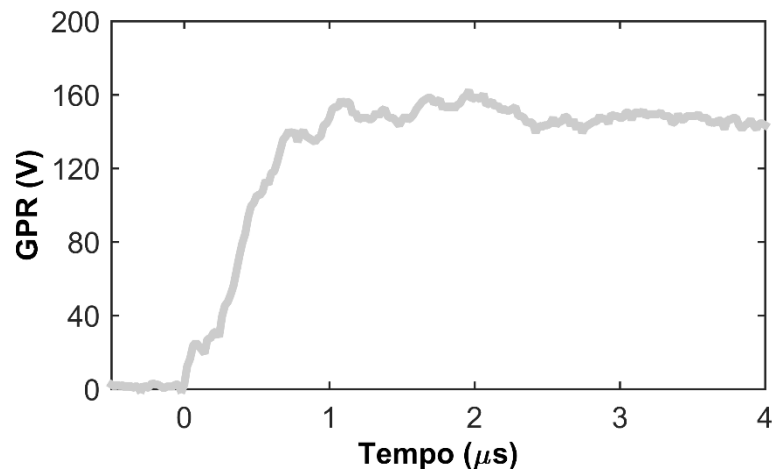


Figura 4.4 GPR medido no aterramento em resposta à injeção da corrente da Figura 4.3.

Para simulação do arranjo de aterramento ilustrado na Figura 4.1, utilizou-se uma implementação do HEM [43], descrito na seção 3.5 do Capítulo 3, cujos detalhes computacionais estão descritos em [43]. A fundação foi representada por uma série de condutores paralelos, cobrindo toda a sua extensão. Adicionalmente, foram incluídas a malha complementar e as hastes distribuídas em sua periferia. A Figura 4.5 ilustra a geometria simulada utilizando a implementação computacional do HEM.

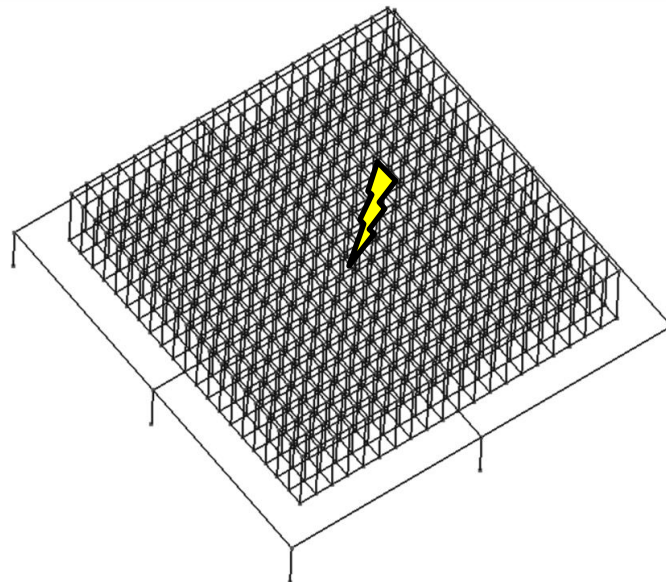


Figura 4.5 Sistema de aterramento simulado utilizando o HEM.

Nas simulações, injetou-se a corrente ilustrada na Figura 4.3 no centro do arranjo de aterramento e determinou-se o GPR resultante. Foram consideradas duas hipóteses para os parâmetros elétricos do solo:

- Consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes, sendo a resistividade igual ao estimado em baixa frequência, 600 Ωm , e a permissividade relativa igual a 10;
- Consideração dos parâmetros elétricos variáveis com a frequência, sendo tal variação determinada por meio do modelo causal Alipio-Visacro, expresso pelas equações (4.1) e (4.2).

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^n \Leftrightarrow \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi n/2) \times 10^{-3}}{2\pi \varepsilon_0 (1 \text{ MHz})^n} \sigma_0 \times h(\sigma_0) f^{n-1} \quad (4.2)$$

Em (4.1) e (4.2), σ é a condutividade em mS/m, σ_0 é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) em mS/m, ε_r é a permissividade relativa, $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$ é a permissividade relativa em altas frequências, ε_0 é a permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 \cong 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e f é a frequência em Hz. Segundo recomendação em [25], os seguintes parâmetros são adotados de modo a se ter um efeito médio do fenômeno de dependência da frequência: $n = 0,54$, $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0 = 12$ e $h(\sigma_0) = 1,26 \times \sigma_0^{-0,73}$.

A Figura 4.6 ilustra os resultados de simulação de GPR obtidos para as duas hipóteses de solo e, adicionalmente, a curva de GPR medido. Os resultados obtidos evidenciam alguns aspectos relevantes. Primeiro, a curva de GPR simulado considerando-se a variação dos parâmetros do solo com a frequência está em excelente concordância com a curva de GPR medido. Isso denota a consistência do modelo eletromagnético empregado nas simulações e, adicionalmente, a consistência física do modelo causal empregado para se ter em conta a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. Outro aspecto importante é que os resultados mostram que a simulação decorrente da hipótese de parâmetros do solo constantes leva a valores de GPR superiores aos medidos: cerca de 100% superior nos primeiros microssegundos, entre ~ 0 – $0,8 \mu\text{s}$, e cerca de 20% superior após $\sim 1 \mu\text{s}$. Isso denota a importância

da consideração do efeito de variação dos parâmetros elétricos do solo, em estudos que envolvam a resposta transitória de aterramentos elétricos. Um estudo mais detalhado do impacto da dependência da frequência do solo na resposta de aterramentos elétricos de aerogeradores é apresentado na seção a seguir.

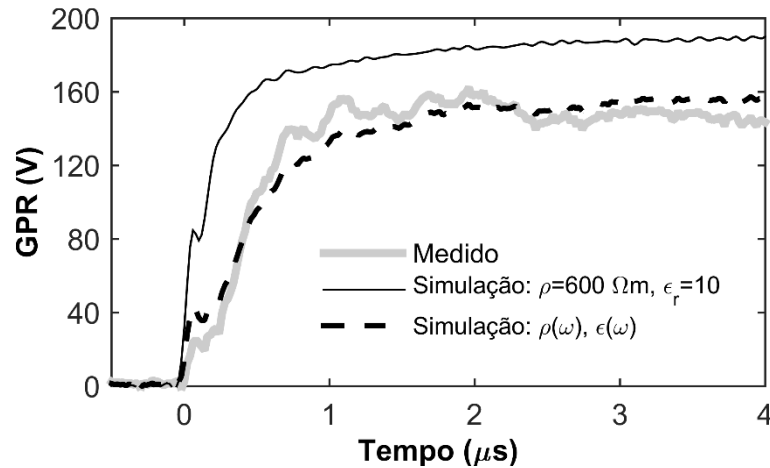


Figura 4.6 Comparação entre GPRs medido e simulados utilizando o HEM e considerando duas hipóteses para o solo: parâmetros elétricos constantes e dependentes da frequência.

4.3 Desenvolvimentos

Como já mencionado, em geral, as próprias armaduras e ferragens da fundação da torre eólica são utilizadas como eletrodos naturais de aterramento. As formas mais usuais dessa fundação são quadrada/retangular, hexagonal, octogonal ou circular. Embora as formas geométricas das fundações sejam distintas, todas elas apresentam uma característica comum em termos de aterramento, qual seja, uma configuração concentrada. Nesse sentido, desde que a área ao longo do perímetro seja a mesma, espera-se que os diferentes tipos de fundação apresentem o mesmo desempenho ou muito similar, em termos de aterramentos elétricos. Neste trabalho, considera-se uma fundação quadrada de dimensões $L \times L$ e altura fixa igual a 2 m, conforme ilustrado na Figura 4.7. Foram consideradas três dimensões L (10 m, 14 m e 20 m), de modo a abranger dimensões típicas de fundações de torres eólicas, tendo-se em conta as diferentes alturas que essa estrutura podem assumir. Em todos os casos, considera-se que os arranjos estão enterrados a uma profundidade de 1 m.

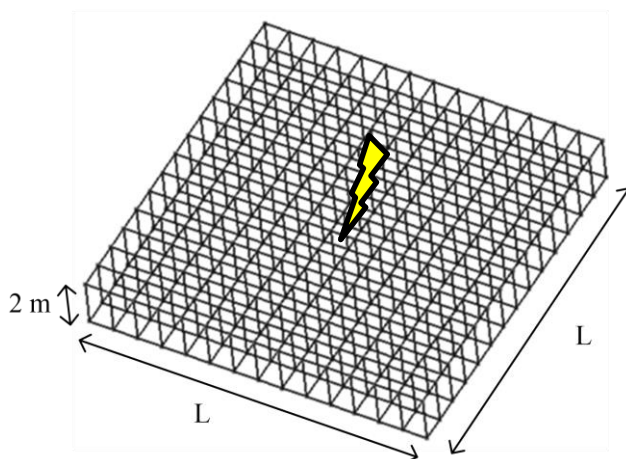


Figura 4.7 Sistema de aterramento simulado de um aerogerador, constituído por uma fundação quadrada de altura 2 m e dimensões $L \times L$, considerando $L=10, 14$ e 20 m. O arranjo especificamente ilustrado na figura corresponde a $L=10$ m.

Na avaliação do comportamento impulsivo/transitório de aterramentos elétricos, dentre outros fatores, é importante que a corrente de descarga atmosférica seja adequadamente representada, uma vez que a qualidade dos resultados de simulação é condicionada à representatividade das ondas de corrente utilizadas. De acordo com [47] as formas de onda típicas das primeiras descargas de retorno têm um formato inicial côncavo seguido de um crescimento abrupto próximo ao primeiro pico e diversos picos adicionais, sendo, em geral, o segundo pico o maior deles. As ondas típicas de descargas subsequentes apresentam usualmente um único pico e uma forma relativamente suave. As formas de onda da Figura 4.8 procuram reproduzir essas características e consideram os principais parâmetros medianos de ondas de corrente reais de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, medidas na estação do Morro do Cachimbo, localizada em Minas Gerais [48] e [49]. Em todas as simulações, considera-se a injeção da corrente no centro da fundação.

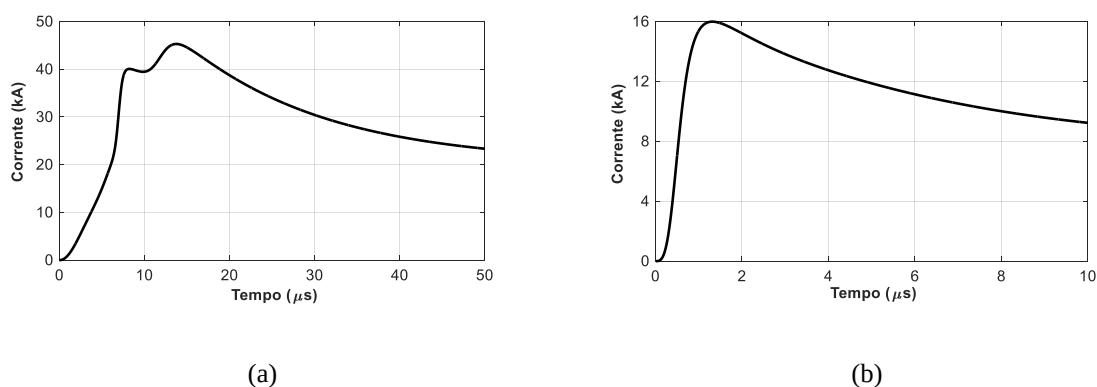


Figura 4.8 Ondas de correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes, medidas na Estação do Morro do Cachimbo. Formas de onda obtidas como uma soma de funções Heidler, conforme [49].

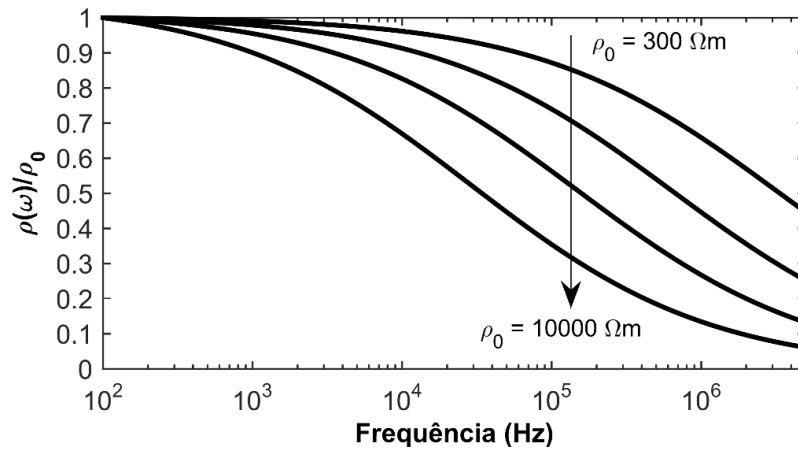
Nas simulações, são considerados quatro valores de resistividade em baixa frequência (ρ_0): 300, 1000, 3000 e 10000 Ωm . Esses valores contemplam condições tipicamente encontradas em regiões brasileiras. Duas hipóteses são adotadas para os parâmetros elétricos do solo:

- Parâmetros constantes com a frequência, sendo a resistividade considerada igual à resistividade de baixa frequência ($\rho=\rho_0$) e permissividade relativa ϵ_r constante e igual a 10.
- Parâmetros dependentes da frequência, de acordo com o modelo causal desenvolvido por Alipio e Visacro [23] e expresso resumidamente por (4.1) e (4.2) - vide seção 4.2. A Figura 4.9 ilustra a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, considerando as resistividades avaliadas neste trabalho.

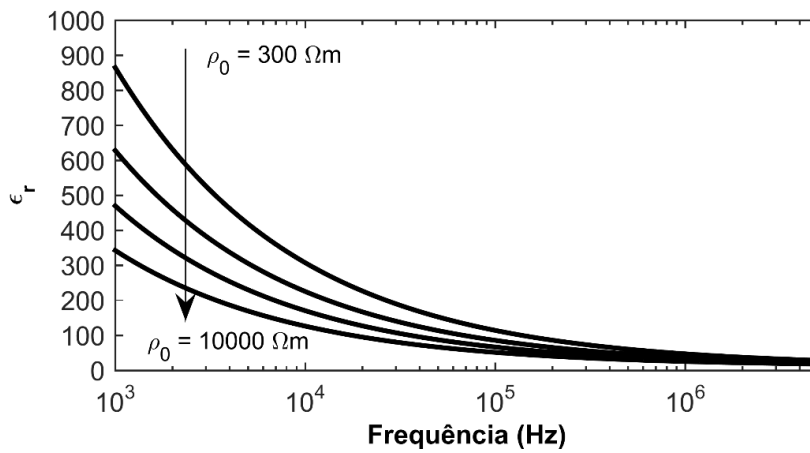
Em todas as simulações, a permeabilidade magnética do solo é considerada constante e igual a do vácuo, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Os efeitos de ionização do solo foram desprezados.

Tendo em conta o descrito, o modelo HEM foi sistematicamente utilizado para simular a resposta impulsiva do arranjo da Figura 4.7, em termos da elevação de potencial (*GPR – Grounding Potential Rise*) desenvolvida em resposta à injeção das correntes ilustradas na Figura 4.8. A partir do GPR, outras grandezas de interesse são calculadas, quais sejam, impedância transitória, impedância impulsiva, resistência de aterramento e coeficiente de impulso.

Como caráter complementar, é importante mencionar que as fundações foram representadas por meio de uma série de condutores paralelos, espaçados entre si de 1 m, e conectando a face superior e a face inferior da fundação. Isso resulta em $L \times L$ reticulados quadrados de dimensão 1 m $\times$ 1 m nas faces superior e inferior, e $4L$ reticulados retangulares de dimensão 1 m $\times$ 2 m ao longo das faces laterais. A partir de uma série de simulações sistemáticas, verificou-se que esse arranjo denso permite representar com exatidão as fundações reais de turbinas eólicas.



(a)



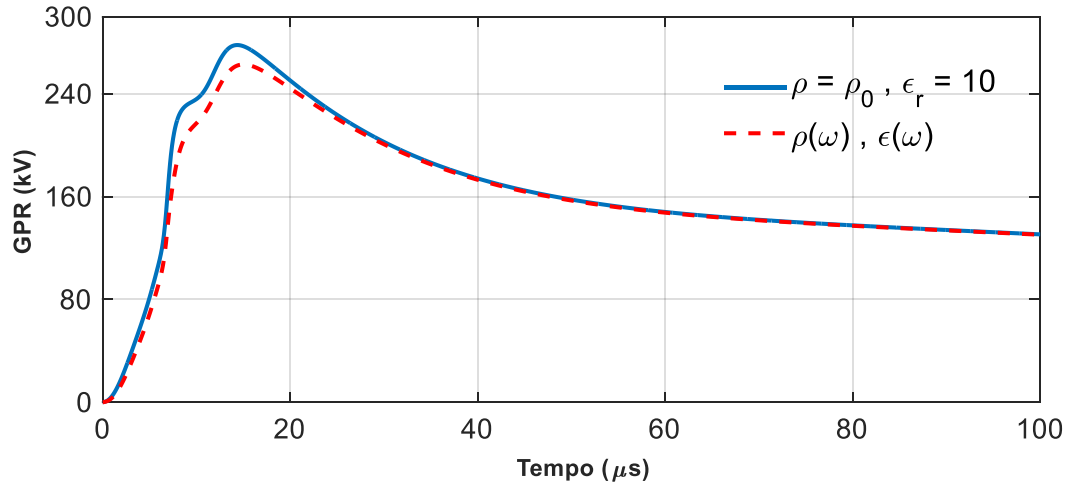
(b)

Figura 4.9 Dependência da frequência da (a) resistividade relativa, ρ/ρ_0 , e (b) permissividade relativa do solo, considerando quatro valores de resistividade do solo em baixa frequência $\rho_0=1/\sigma_0$: 300, 1000, 3000 e 10000Ωm. As curvas foram obtidas aplicando-se o modelo causal Alipio-Visacro expresso por (4.1) e (4.2).

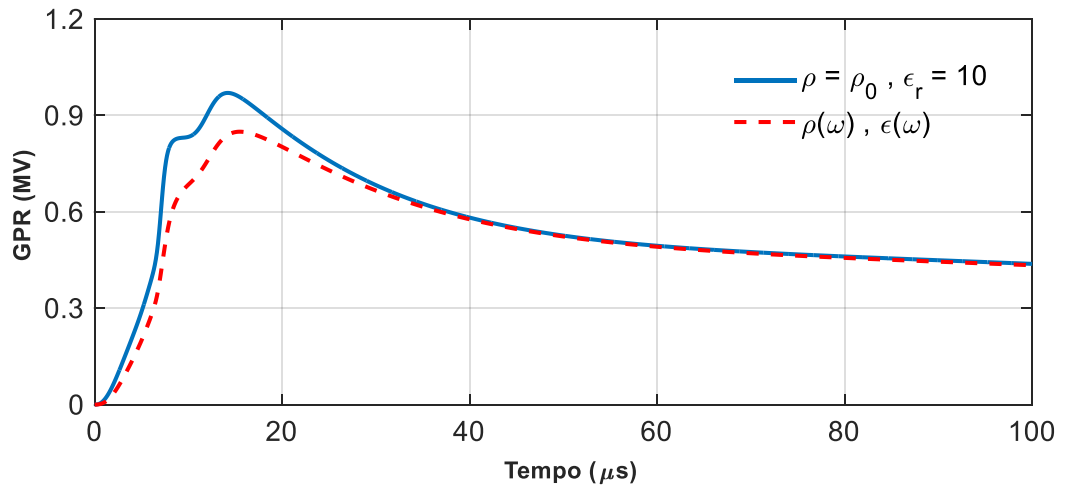
4.3.1 Elevação de Potencial no Aterramento – GPR (*Grounding Potential Rise*)

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam as elevações de potencial desenvolvidas por uma fundação de turbina eólica de 14 m × 14 m, respectivamente em resposta à injeção de correntes representativas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, considerando quatro valores de resistividade em baixa frequência, 300, 1000, 3000 e 10000 Ωm, e as hipóteses de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência. Resultados de GPR também foram obtidos para os arranjos de dimensões 10 m × 10 m e 20 m × 20 m; no entanto, em termos de comportamento qualitativo, esses resultados são similares aos obtidos para a fundação de 14 m × 14 m. Por isso, com o intuito de evitar a apresentação de um volume

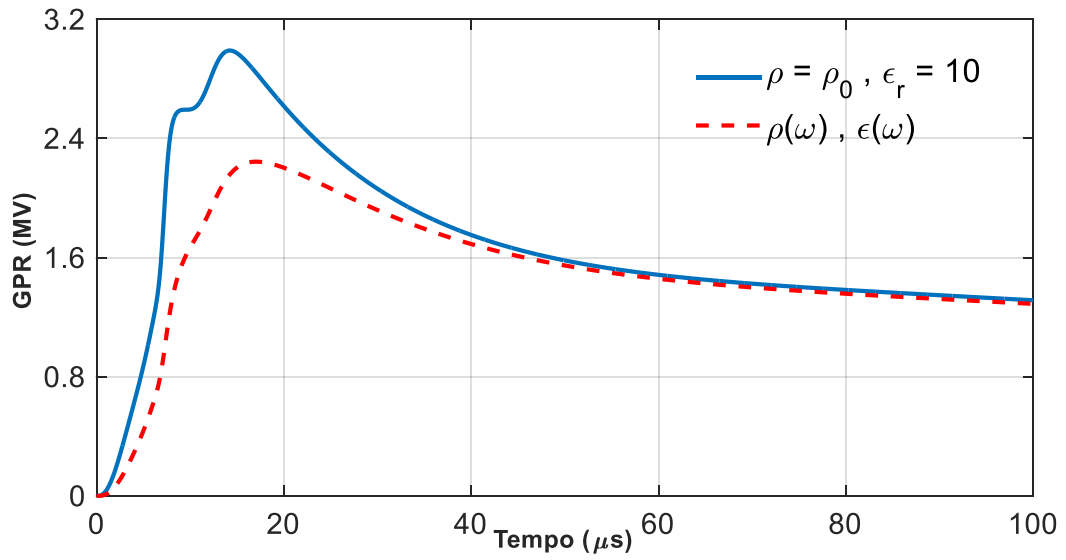
desnecessário de curvas e, também, com o objetivo de focar nos aspectos físicos relativos ao impacto da dependência da frequência no comportamento de aterramento de aerogeradores, preferiu-se nesta seção apresentar os resultados de GPR apenas para a dimensão de $14\text{ m} \times 14\text{ m}$.



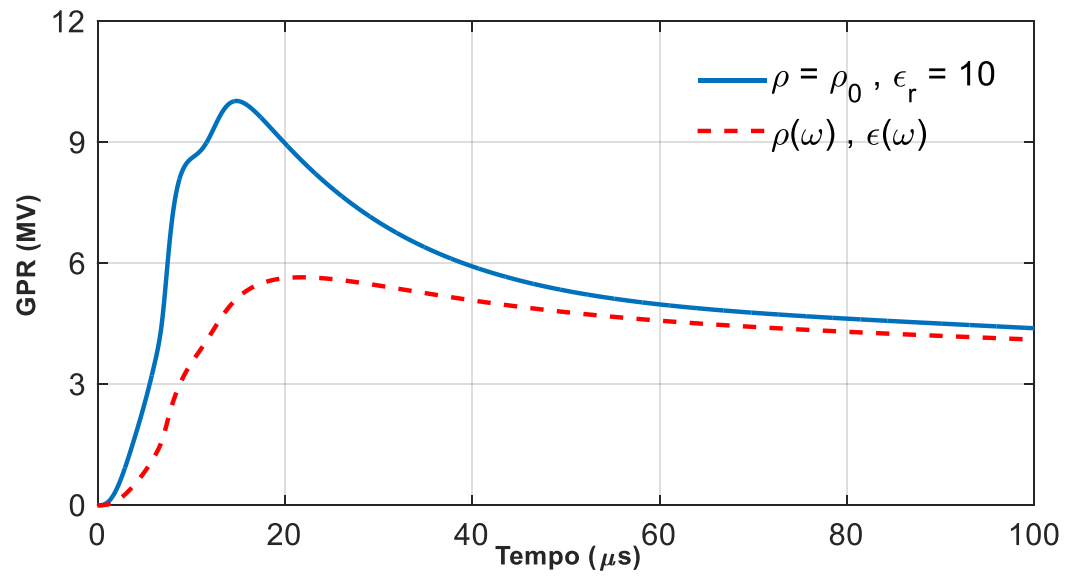
(a)



(b)

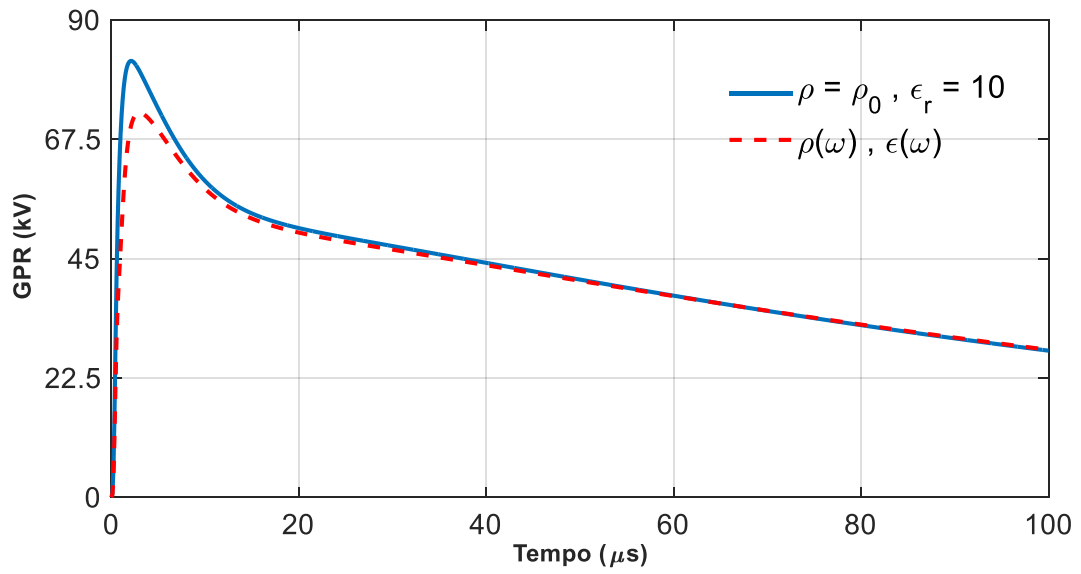


(c)

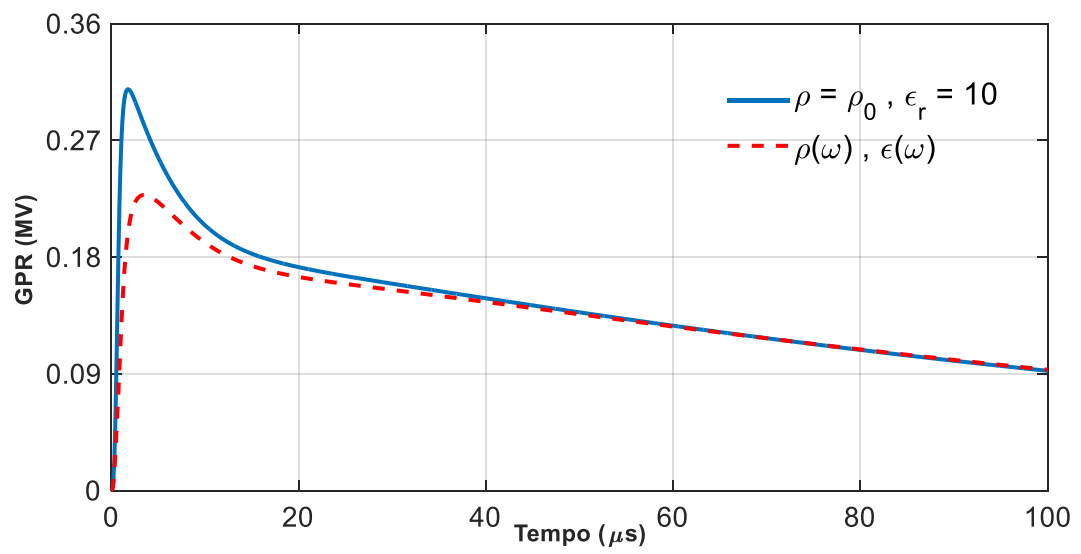


(d)

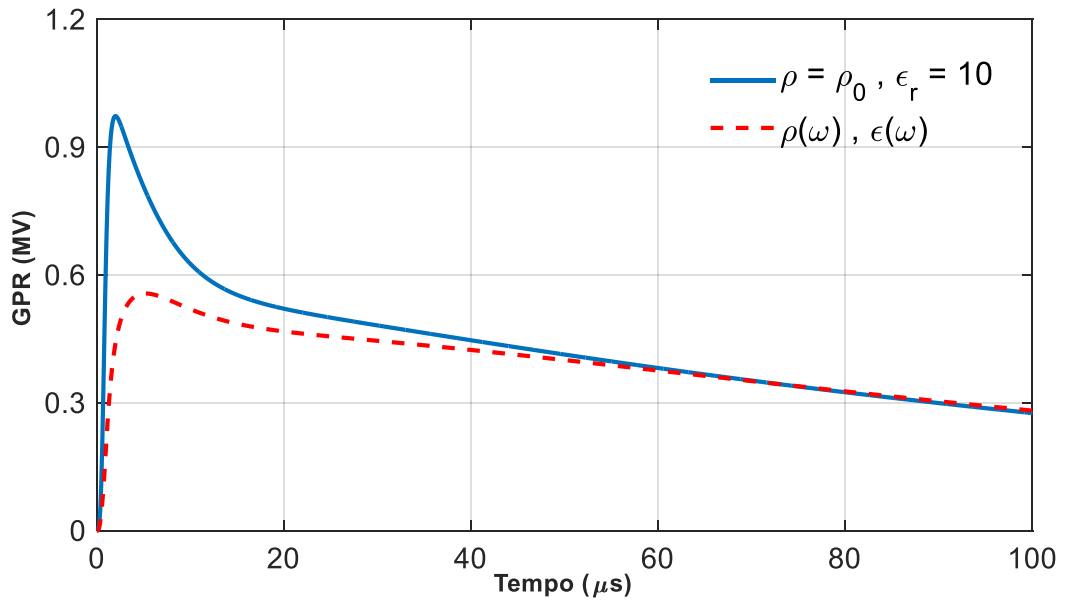
Figura 4.10 GPR simulado do sistema de aterramento de turbina eólica submetido a corrente representativa de primeira descarga de retorno para solos de (a) $300 \Omega\text{m}$ (b) $1000 \Omega\text{m}$ (c) $3000 \Omega\text{m}$ (d) $10000 \Omega\text{m}$.



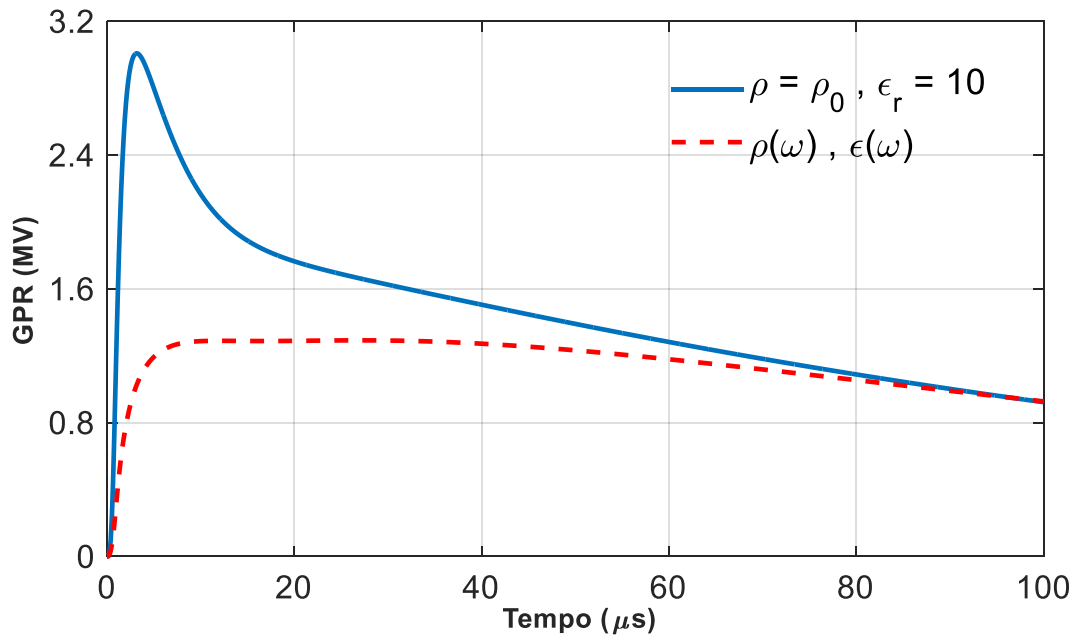
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.11 GPR simulado do sistema de aterramento de turbina eólica submetido a corrente representativa de descarga subsequente para solos de (a) 300 Ωm (b) 1000 Ωm (c) 3000 Ωm (d) 10000 Ωm .

De acordo com os resultados, independentemente da hipótese assumida para os parâmetros do solo (constantes ou variáveis com a frequência), os valores de pico atingidos pelo GPR são elevados, especialmente para o caso de primeiras descargas e solos de resistividade mais elevada, em que se observam valores da ordem de 1 MV, 2,5 MV e 6 MV,

respectivamente para os solos de 1000, 3000 e 10000 Ωm . Essas elevações de potencial acentuadas podem provocar danos aos componentes localizados no interior do sistema eólico, principalmente equipamentos sensíveis relacionados aos sistemas de controle e comunicação. Tais equipamentos possuem níveis de tensão de operação muito inferiores quando comparados aos valores de sobretensão transitória alcançados pelo aterramento da torre quando da incidência de descargas atmosféricas.

É importante lembrar que mais de 50% das falhas em turbinas eólicas correspondem a avarias provocadas nos sistemas de controle e comunicação, como consequência de elevadas sobretensões transitórias causadas pela incidência direta de descargas atmosféricas. Além de ocasionar danos a equipamentos sensíveis localizados no interior do sistema eólico, as elevações de potencial resultantes podem ser transferidas para a rede de média tensão através de transformadores usualmente instalados em cubículos na base de cada torre, que tem a função de elevar a tensão produzida pelo aerogerador, afetando diretamente a qualidade e confiabilidade da energia gerada.

Outro aspecto importante a ser destacado nos resultados das Figuras 4.10 e 4.11, é que a consideração do efeito de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo provoca uma redução do GPR resultante no aterramento. Embora tal redução seja desprezível para o solo de baixa resistividade, 300 Ωm , ela se torna relevante para o solo de 1000 Ωm e bastante significativa para os solos de 3000 e 10000 Ωm . É importante notar que o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo é mais acentuado para as correntes de descargas subsequentes, em comparação ao mesmo efeito para as primeiras descargas. Isso ocorre porque as descargas subsequentes, que apresentam tempo de frente mais curto, possuem componentes de frequência na faixa superior do espectro de maior amplitude, em relação àqueles associados às correntes de primeiras descargas. Em síntese, as maiores reduções de GPR são observadas para solos de maior resistividade e descargas subsequentes. Nessas condições, e considerando-se o solo de 10000 Ωm , observa-se uma redução do valor de pico do GPR superior a 50%.

Os resultados também indicam que o efeito de redução do GPR é mais acentuado na frente da onda e tende a se atenuar ao longo da cauda. Isso ocorre porque à frente da onda estão associados os componentes de alta frequência e é justamente nas faixas superiores do espectro que o efeito da variação dos parâmetros do solo, sobretudo a redução da resistividade, é mais significativo. Por outro lado, ao longo da cauda, as curvas de GPR obtidas para as duas hipóteses de parâmetros do solo se sobrepõem. Isso acontece porque à cauda da onda estão associados os componentes de baixa frequência e, ao longo dela, o comportamento do

aterramento é governado apenas por sua resistência de aterramento, parâmetro este que não é influenciado pela dependência da frequência dos parâmetros do solo [25].

Finalmente, vale mencionar que o fenômeno de variação dos parâmetros do solo com a frequência influencia não apenas a amplitude, mas também as formas de onda das sobretensões transitórias. Isso é particularmente importante na avaliação de ruptura de isolamento, por exemplo, no estabelecimento de arcos elétricos que podem criar caminhos condutivos entre a carcaça metálica exterior da turbina eólica e componentes localizados em seu interior.

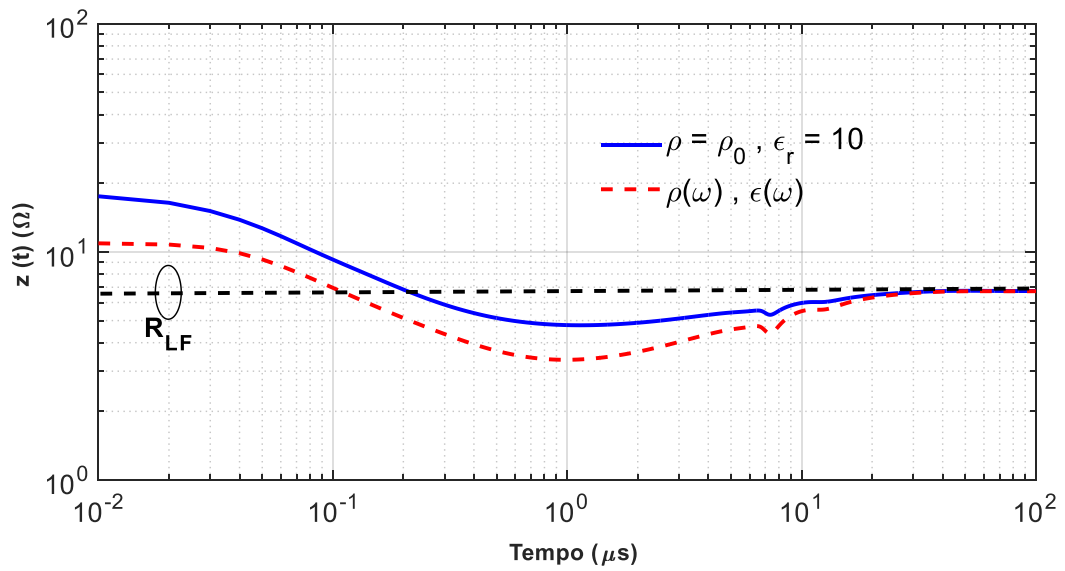
4.3.2 Impedância transitória - $z(t)$

A impedância transitória $z(t)$ corresponde à relação entre os valores instantâneos da elevação de potencial no ponto de injeção e da corrente injetada, $z(t) = v(t)/i(t)$. Segundo [21] a impedância transitória permite a definição de dois períodos distintos da resposta transitória do aterramento, período dinâmico e permanente. No período dinâmico, os efeitos associados a fenômenos de alta frequência, especificamente os efeitos capacitivo, indutivo e de propagação, são acentuados. No período permanente, tais efeitos são pouco significativos e o comportamento do aterramento é caracterizado pelo parâmetro de baixa frequência R_{LF} .

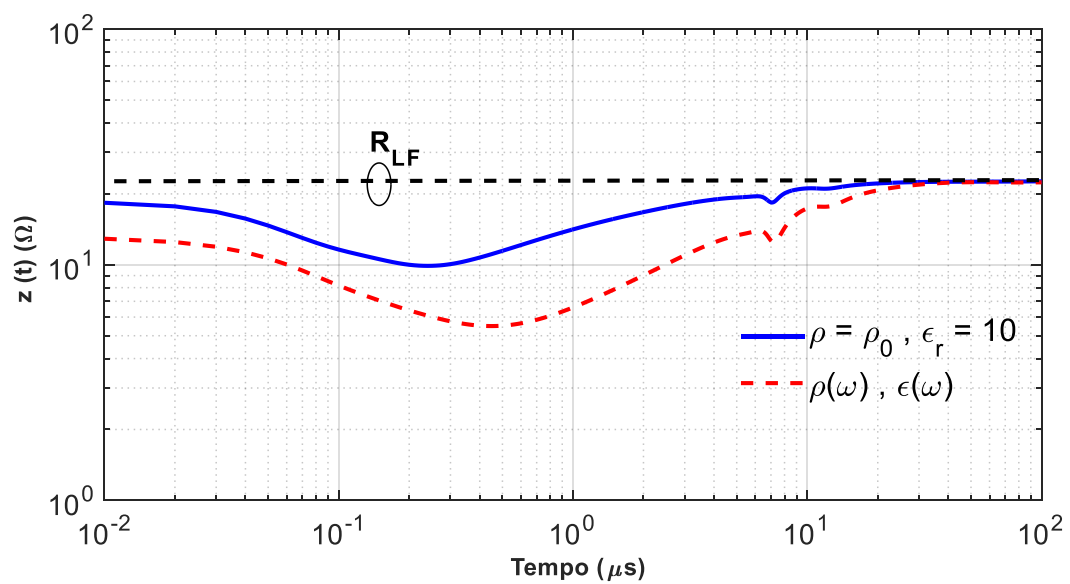
A partir dos resultados da seção anterior, a impedância transitória foi calculada para o arranjo de dimensões 14 m $\times$ 14 m. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente para ondas representativas de primeiras descargas e descargas subsequentes. Nessas mesmas figuras, inclui-se uma reta que corresponde ao valor da resistência de baixa frequência, R_{LF} . Também, vale mencionar novamente que, embora sejam apresentados resultados apenas para o arranjo de aterramento de dimensões 14 m $\times$ 14 m, resultados similares foram obtidos para as outras duas dimensões consideradas neste capítulo.

Analisando-se as Figuras 4.12 e 4.13 verifica-se, de um modo geral, que a impedância transitória, $z(t)$, apresenta uma variação rápida durante o período inicial do transitório e, após alguns microssegundos, tende ao valor da resistência de aterramento, R_{LF} . Para os solos de resistividade mais elevada, 1000 Ω m ou superior, observa-se que a impedância transitória apresenta valores inferiores à resistência de aterramento, antes de tender para ela, para ambas as hipóteses, parâmetros constantes e parâmetros dependentes da frequência. Isso ocorre em decorrência da natureza concentrada do aterramento, sendo o seu comportamento

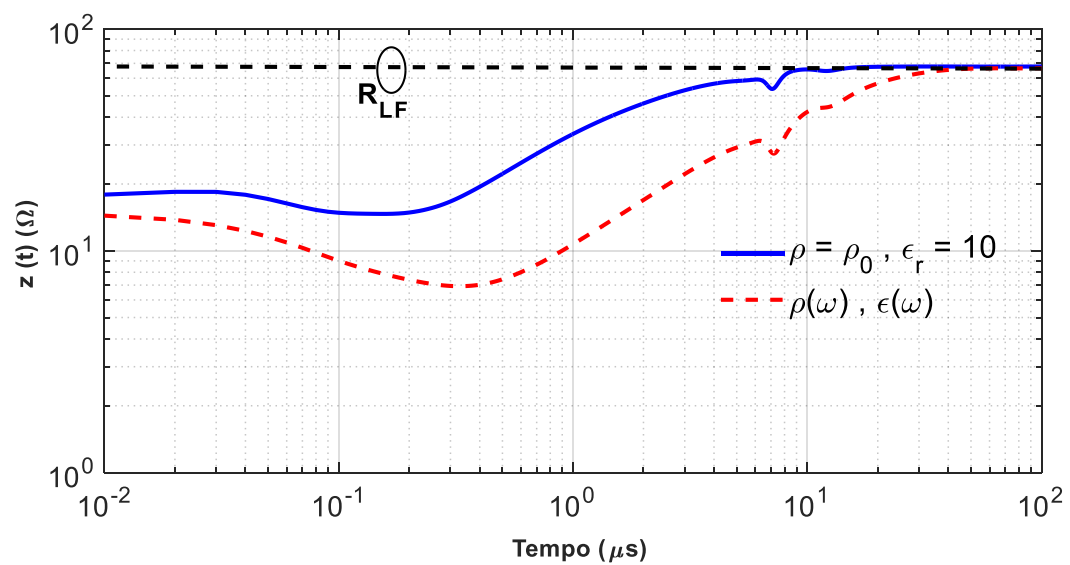
predominantemente capacitivo durante a fase inicial do transitório, sobretudo no caso de solos mais resistivos. Para o solo de resistividade mais baixa, 300 Ωm , nos primeiros instantes do transitório, a impedância transitória apresenta valores superiores a R_{LF} , o que indica uma leve influência de efeito indutivo. Nesse curto intervalo de tempo, a tensão apresenta crescimento mais rápido do que a corrente. De qualquer maneira, durante a maior parte do intervalo de tempo do transitório, mesmo para o caso de 300 Ωm , o aterramento apresenta comportamento predominantemente capacitivo. Aqui é importante mencionar que, considerando os casos analisados neste trabalho, o único em que o efeito indutivo é mais relevante corresponde à fundação de 20 m $\times$ 20 m e solo de 300 Ωm .



(a)



(b)



(c)

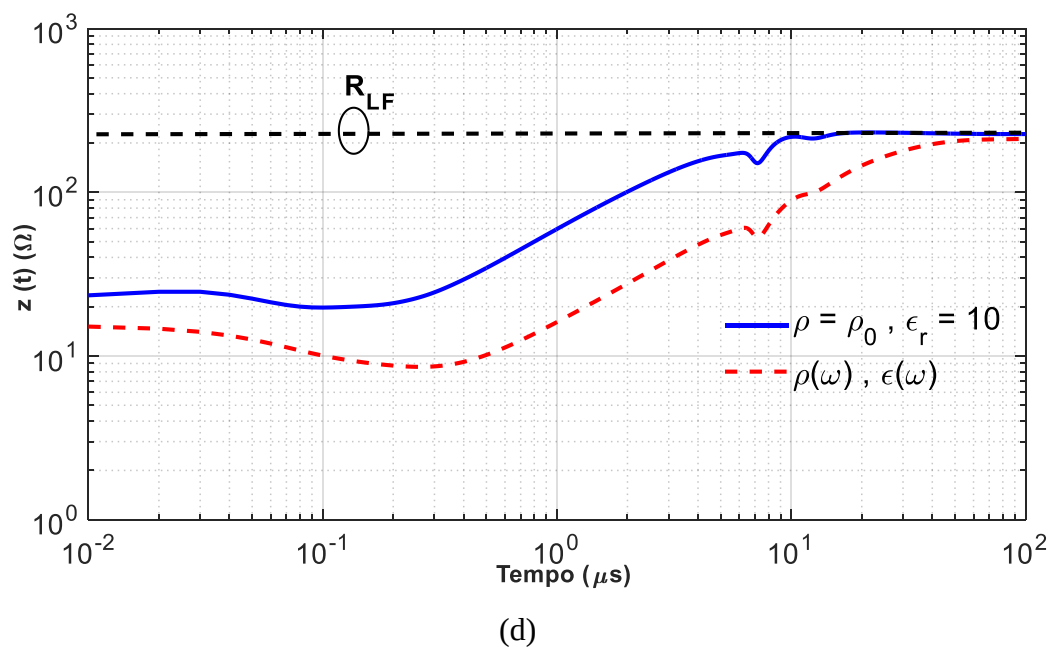
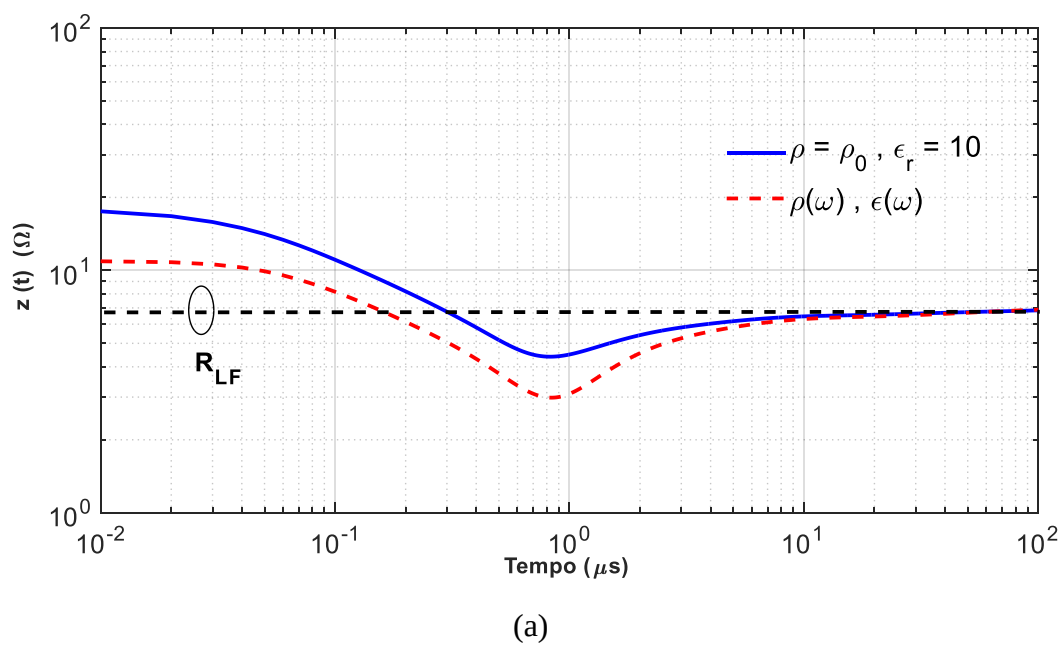
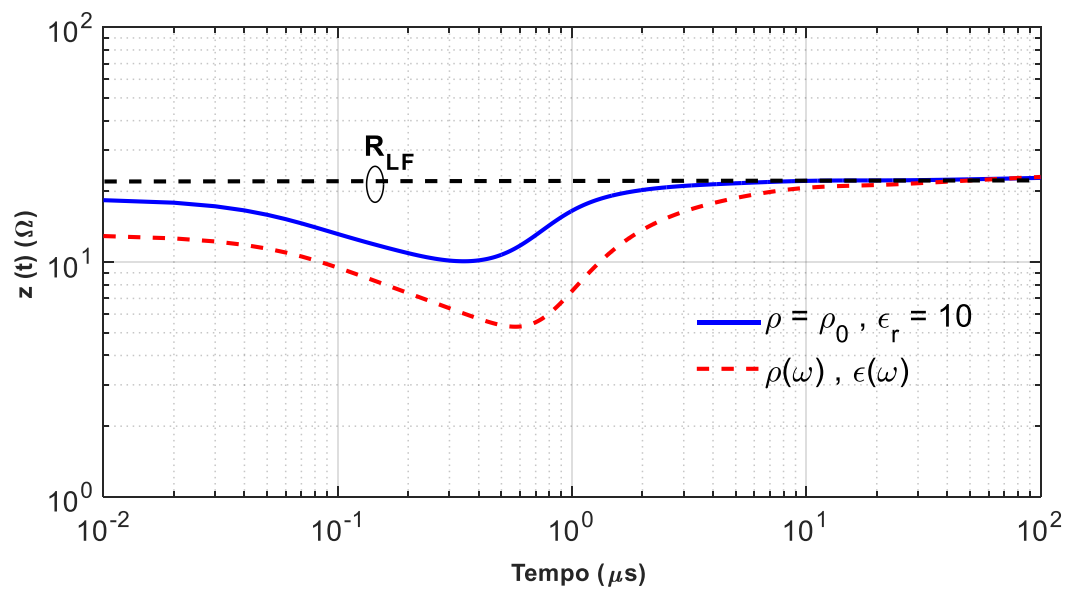
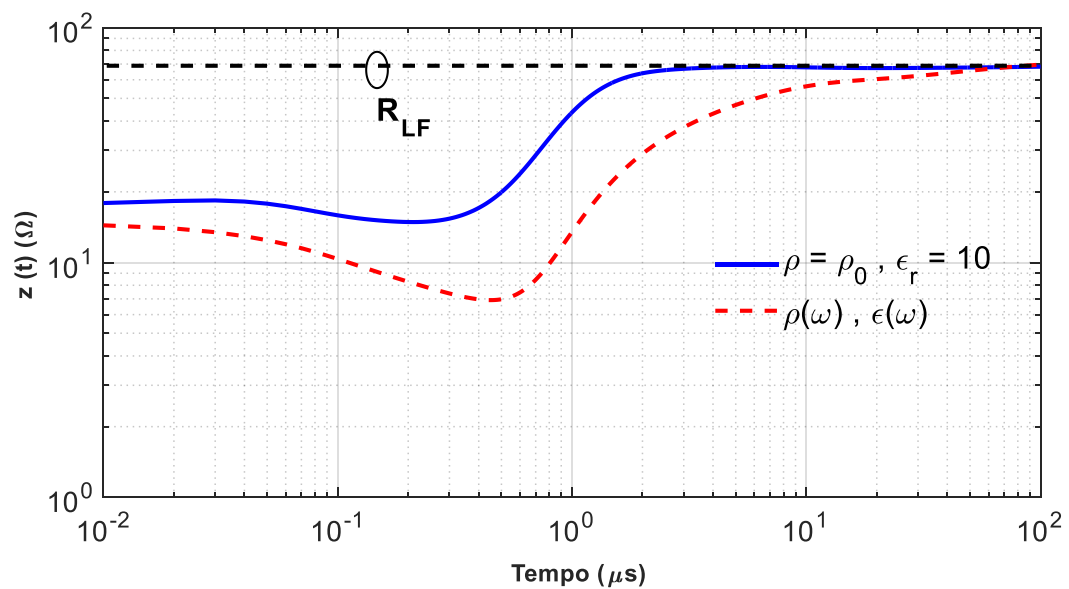


Figura 4.12 Impedância transitória de aterramento, considerando corrente representativa de primeiras descargas de retorno para solos de (a) 300 Ωm (b) 1000 Ωm (c) 3000 Ωm (d) 10000 Ωm .





(b)



(c)

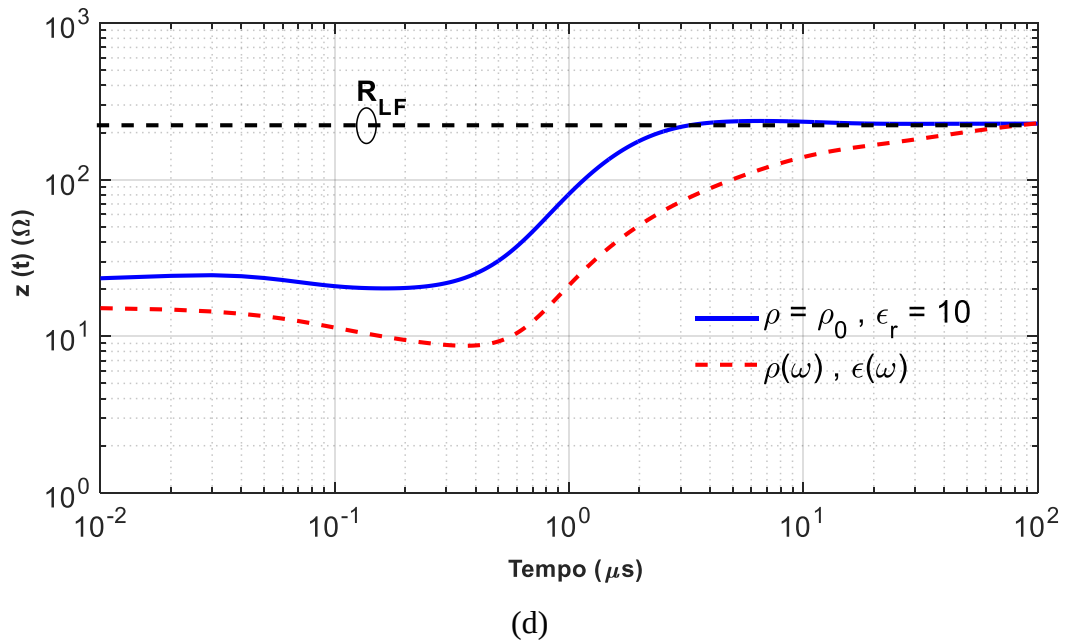


Figura 4.13 Impedância transitória de aterramento, considerando corrente representativa de descargas subsequentes para solos de (a) 300 Ωm (b) 1000 Ωm (c) 3000 Ωm (d) 10000 Ωm .

Os resultados também mostram que, considerando a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, os valores de impedância transitória são menores em relação aos valores obtidos considerando-se parâmetros constantes. Isso ocorre devido à redução dos valores de GPR quando se considera tal dependência.

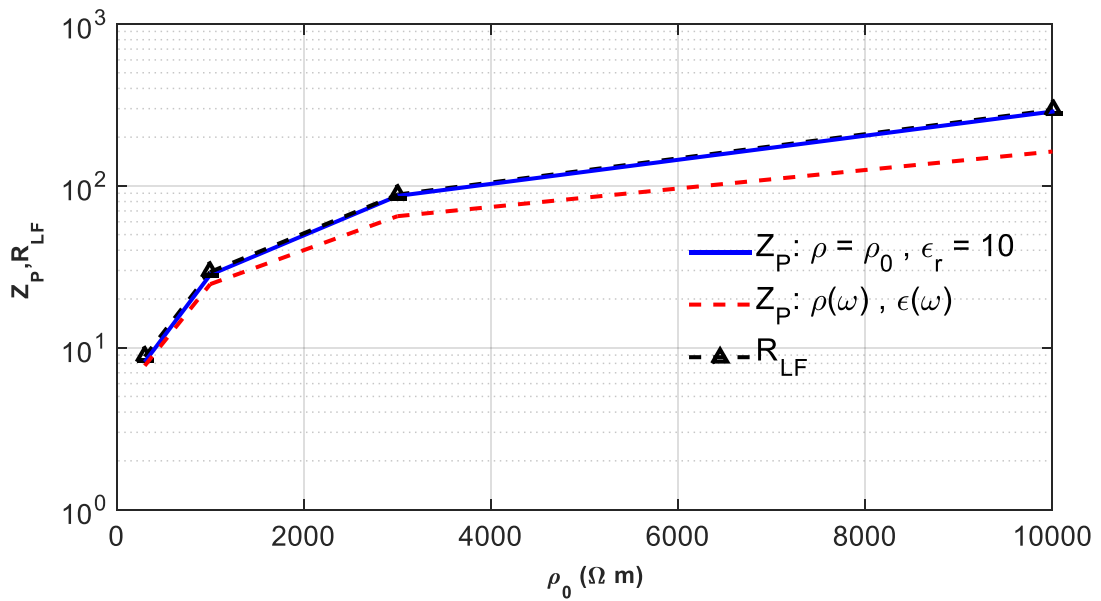
Finalmente, independentemente da consideração realizada para o solo, parâmetros constantes ou variáveis, a impedância transitória tende para o valor da resistência de aterramento R_{LF} após alguns microssegundos. Note-se que o valor da resistência de aterramento, considerados fixos o arranjo de aterramento e a resistividade do solo e desprezando os efeitos de ionização do solo, não varia com o tempo, nem com a onda de corrente injetada, sendo um parâmetro que caracteriza unicamente o aterramento em baixas frequências [22].

4.3.3 Impedância Impulsiva Z_p

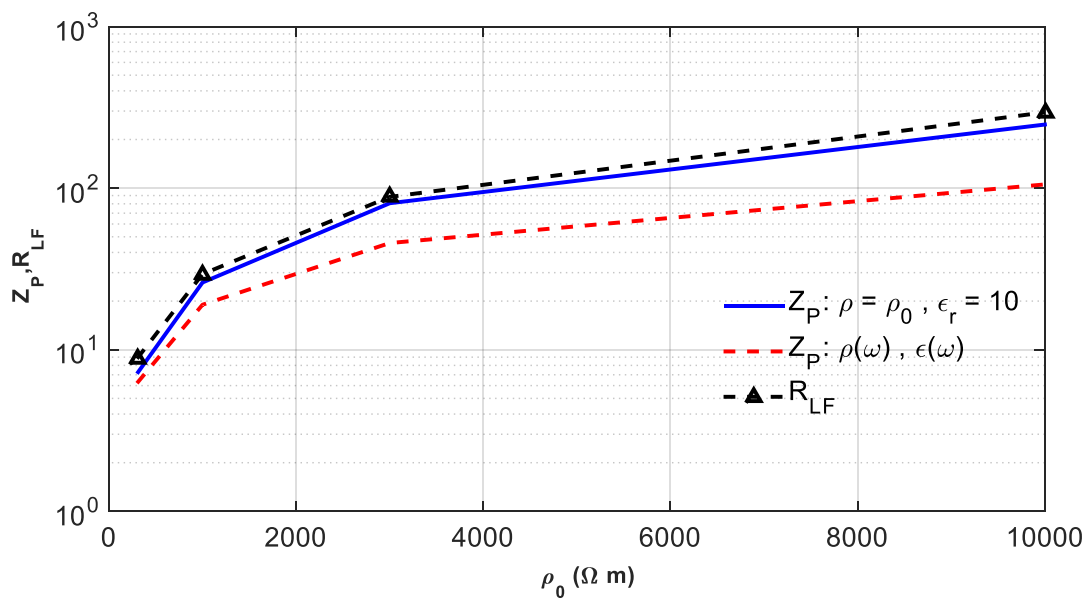
A impedância impulsiva de aterramento (Z_p) é definida como a relação entre os valores de pico da elevação de potencial no aterramento e a corrente injetada, $Z_p = V_p / I_p$. Note-se que a partir da impedância impulsiva pode-se estimar o valor máximo (condição crítica) de GPR a

que o aterramento fica submetido quando da incidência de uma descarga atmosférica - basta multiplicar Z_p pelo valor de pico da corrente, que é estatisticamente caracterizado e disponibilizado em normas, brochuras e *standards* de engenharia.

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam as curvas de impedância impulsiva *versus* resistividade do solo, respectivamente para as dimensões do aterramento de 10 m × 10 m, 14 m × 14 m e 20 m × 20 m, considerando correntes representativas de primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b). A curva de resistência de aterramento também é incluída nos gráficos.

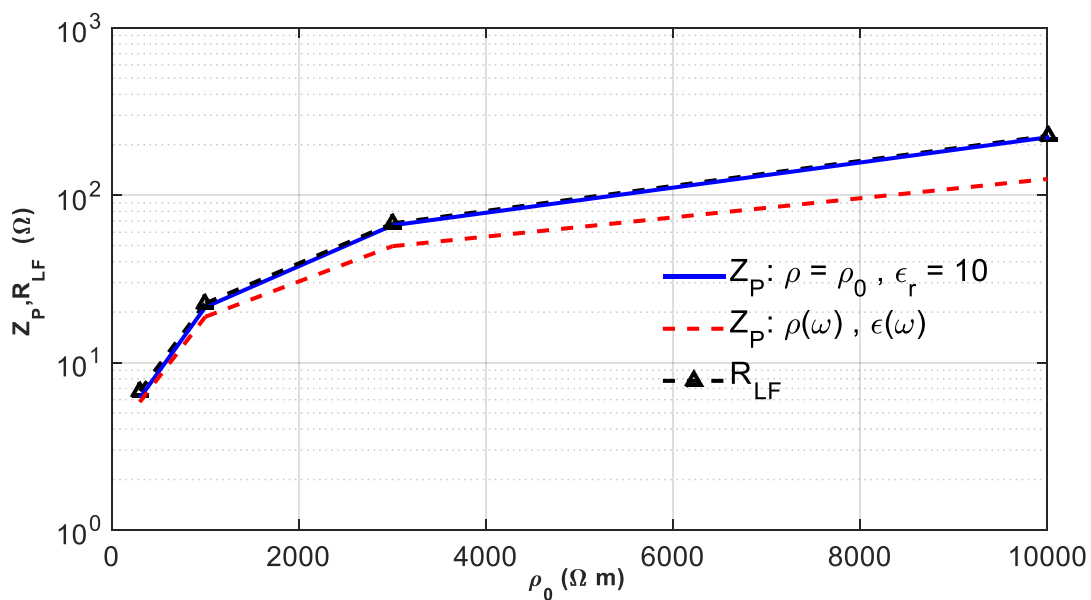


(a)

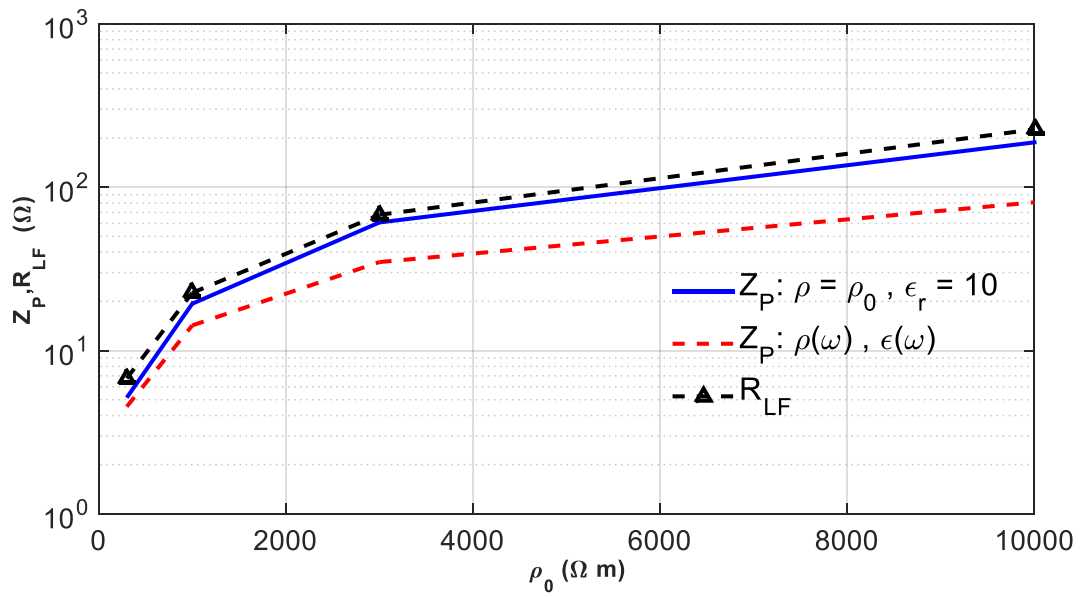


(b)

Figura 4.14 Impedância Impulsiva do sistema de aterramento de 10 m x 10 m de turbina eólica, em função da resistividade do solo, submetido a correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes.

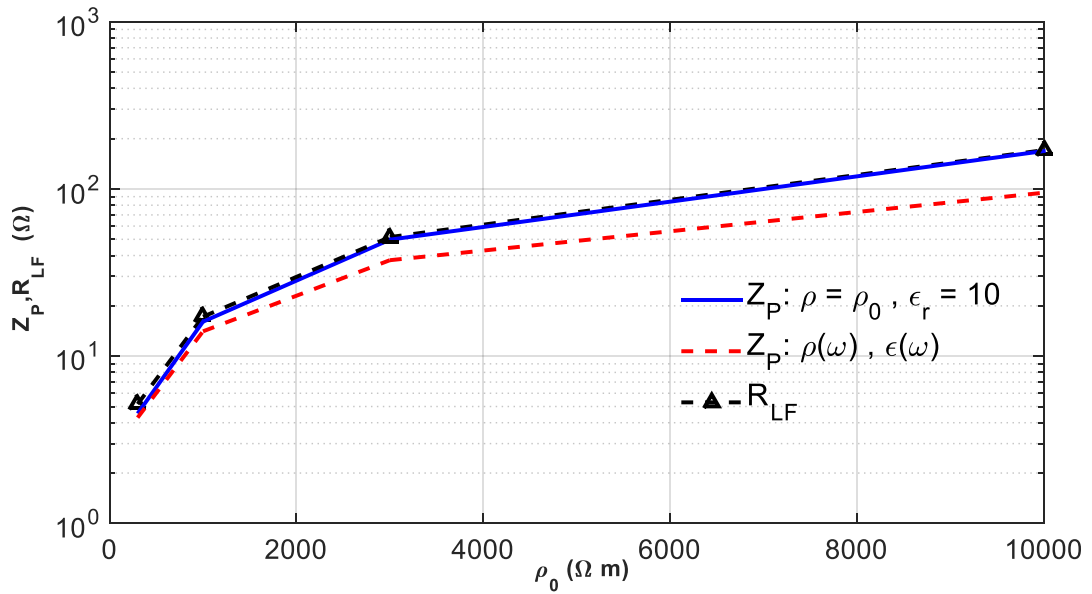


(a)

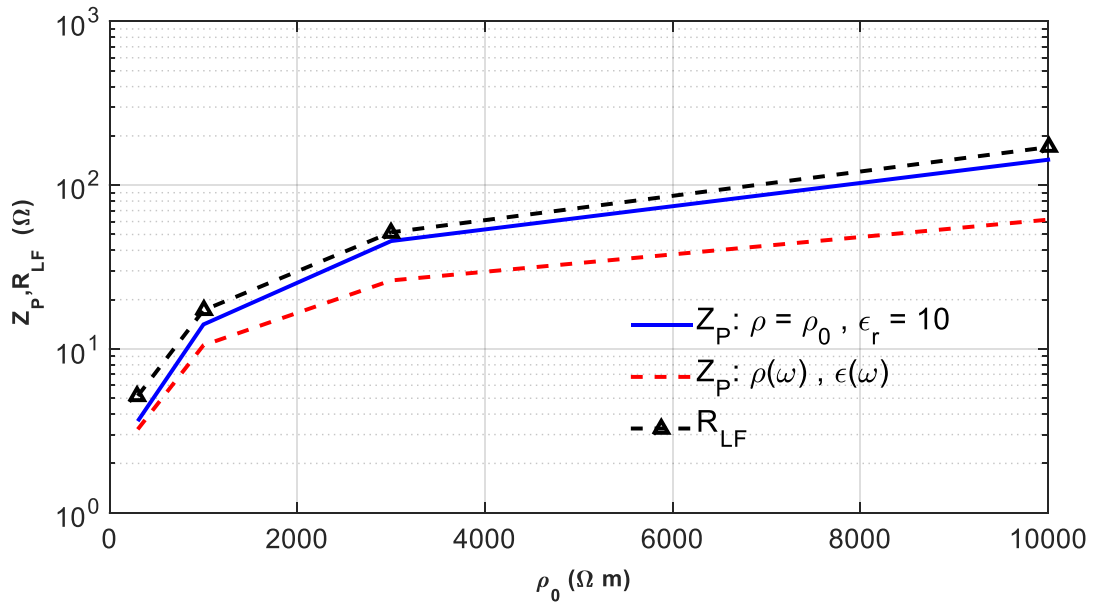


(b)

Figura 4.15 Impedância Impulsiva do sistema de aterramento de 14 m x 14 m de turbina eólica, em função da resistividade do solo, submetido a correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes.



(a)



(b)

Figura 4.16 Impedância Impulsiva do sistema de aterramento de 20 m x 20 m de turbina eólica, em função da resistividade do solo, submetido a correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes.

De acordo com os resultados, sob a hipótese de parâmetros constantes do solo, as curvas de Z_P e R_{LF} são basicamente coincidentes, para ambas as descargas (primeiras e subsequentes). Apenas no caso de descarga subsequente, o valor de Z_P é ligeiramente inferior a R_{LF} , devido ao papel mais pronunciado exercido pelo efeito capacitivo, em decorrência do espectro mais amplo de frequências das descargas subsequentes, de acordo com [24]. Segundo [23], [24], [25], considerando-se sistemas de aterramento tais como eletrodos horizontais, hastes e malhas quadradas, se as dimensões do arranjo forem inferiores ao comprimento efetivo ou pouco superiores, $Z_P \approx R_{LF}$, desde que os parâmetros elétricos do solo sejam considerados constantes. Os resultados apresentados mostram que tal comportamento é mantido mesmo no caso do complexo arranjo de aterramento de aerogeradores. Como referência, os valores de comprimento efetivo, considerando eletrodos horizontais, valem aproximadamente 25 m e 12 m, 50 m e 23 m, respectivamente para primeiras descargas e descargas subsequentes, e solos de 300 e 1000 $\Omega \text{ m}$. Para as outras resistividades consideradas neste trabalho, 3000 e 10000 $\Omega \text{ m}$, os valores de comprimento efetivo são muito superiores às dimensões dos arranjos de aterramento avaliados.

A consideração do efeito de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo provoca uma redução da impedância impulsiva. Essa redução é mais expressiva para solos de

maior resistividade, sendo da ordem de 15% e 20%, 25% e 45%, e 45% e 60%, respectivamente para primeiras descargas e descargas subsequentes, e solos de 1000, 3000 e 10000 Ωm . A redução da impedância impulsiva é mais significativa para o caso de descargas subsequentes pelas mesmas razões descritas no caso do GPR, já que a redução daquela decorre diretamente da diminuição do valor de pico deste, quando se considera a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

Das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 depreende-se outro resultado importante e de impacto. Quando se considera o efeito da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, a impedância impulsiva de aterramento do aerogerador é menor do que a sua resistência de baixa frequência. Resultados similares, ou seja, $Z_P < R_{LF}$, foram obtidos para outros arranjos de aterramento, tais como eletrodos, hastes e, malhas, desde que as dimensões sejam inferiores ao comprimento efetivo ou pouco superiores [25], [21], [24]. Tendo em conta os resultados obtidos, nota-se que, considerando as dimensões típicas dos aterramentos de cada aerogerador individual, espera-se que a impedância impulsiva seja inferior à resistência de aterramento, de cada aerogerador individual, especialmente naqueles casos em que o efeito da dependência da frequência do solo é importante (solos de maior resistividade). Essa constatação tem importante impacto em termos práticos, considerando a resposta impulsiva de aterramentos de aerogeradores. Além das análises de caráter físico apresentadas anteriormente, também é importante, do ponto de vista de engenharia aplicada, avaliar os valores numéricos de impedância calculados para as distintas dimensões de fundação e os diferentes valores de resistividade do solo. Segundo a IEC 61400-24, recomenda-se um valor de *resistência de aterramento* de 10 Ω para cada terminação de terra de um aerogerador individual. Esse valor de resistência de aterramento também é “consagrado” no meio técnico da engenharia brasileira, muito provavelmente em face à mesma recomendação presente na antiga NBR 5419 (2005). Embora tal sugestão não esteja mais presente na nova NBR 5419 (2015), é bastante provável que o valor de 10 Ω permaneça no meio técnico durante muito tempo ainda. Independentemente do valor sugerido, e de sua origem questionável, o fato é que a resistência de aterramento não é um parâmetro adequado para representação do comportamento do aterramento de aerogeradores frente a descargas atmosféricas. Um parâmetro mais apropriado corresponde à impedância impulsiva. Com o intuito de avaliar os valores de impedância impulsiva para os arranjos analisados, a Figura 4.17 apresenta as curvas de Z_P versus resistividade do solo para as três dimensões de fundações consideradas e correntes de primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b). As curvas se referem a resultados determinados considerando-se a

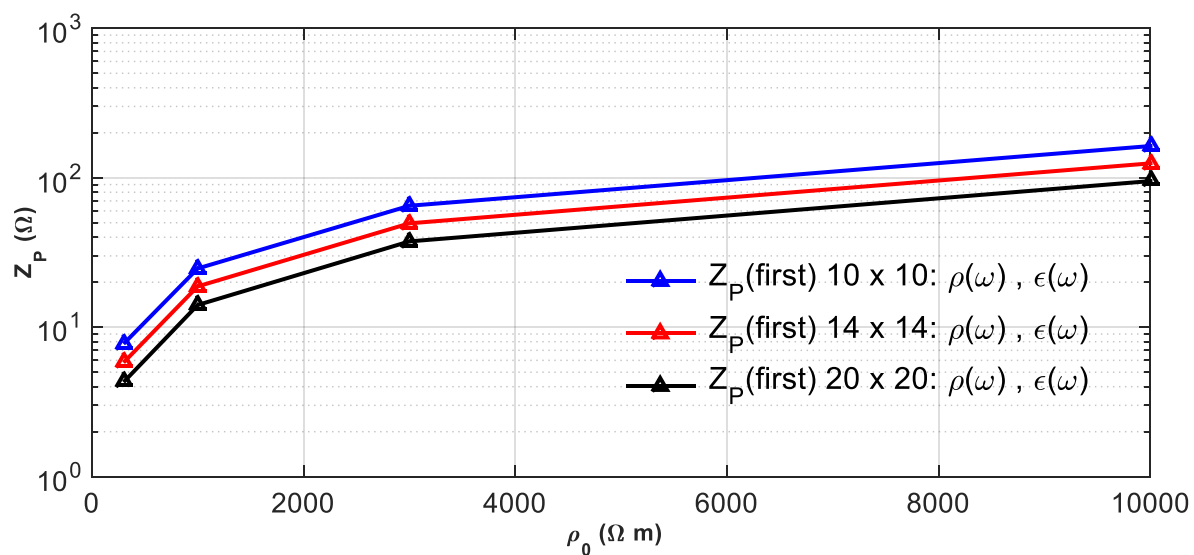
dependência da frequência dos parâmetros do solo, que corresponde a uma hipótese mais realista para modelagem do solo.

De acordo com os resultados, de modo geral, o valor da impedância impulsiva aumenta com o crescimento da resistividade do solo e diminui com o aumento das dimensões da fundação. Tal comportamento é fisicamente esperado, uma vez que com o aumento da resistividade há também um aumento da dificuldade de dispersão de correntes para o solo. Adicionalmente, um aumento da área coberta pelo sistema de aterramento leva a uma redução de sua impedância impulsiva, desde que as dimensões do arranjo não sejam superiores ao comprimento efetivo.

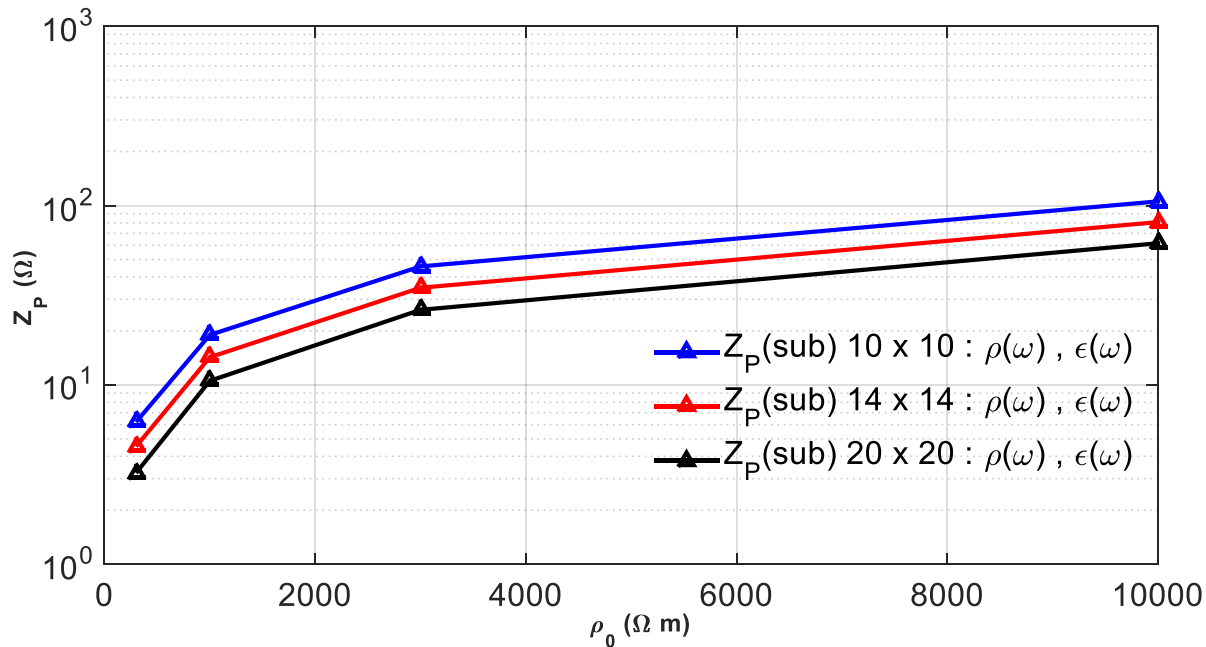
Também, observa-se que os valores de impedância, para uma mesma dimensão do arranjo de aterramento e resistividade do solo, são menores para as descargas subsequentes, em comparação com as primeiras descargas. Isso é uma consequência natural de resultados já discutidos, que mostram que o impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo é mais acentuado para descargas subsequentes.

Com relação aos valores numéricos de impedância e considerando especificamente as descargas subsequentes, para a resistividade de $300 \Omega\text{m}$, independentemente da dimensão do arranjo, a impedância é inferior a 10Ω . Para $1000 \Omega\text{m}$, a impedância varia entre aproximadamente 20Ω e 10Ω , considerando o menor e o maior arranjo de aterramento. Para solos de resistividade mais elevada, 3000 e $10000 \Omega\text{m}$, para nenhuma das dimensões de aterramento consideradas, alcança-se o valor de 10Ω para impedância impulsiva. Em particular, para o solo de $10000 \Omega\text{m}$, os valores de Z_P são superiores a 50Ω para o arranjo de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ e da ordem de 100Ω para o de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$. Para primeiras descargas de retorno, a situação é ainda mais severa (valores de Z_P maiores).

É importante ressaltar que os valores de impedância impulsiva calculados se referem a simulações que contemplam o aterramento de um aerogerador individual. Em parques eólicos, em que os aterramentos de cada aerogerador individual são interligados entre si, os valores de impedância impulsiva podem ser menores. No entanto, a interligação dos aterramentos deve ser vista com cautela considerando-se o desempenho impulsivo do sistema, uma vez que o impacto dessa interligação na redução da impedância impulsiva é limitado pelo comprimento efetivo, especialmente no caso de ondas de corrente com tempo de frente curto. De qualquer maneira, os resultados apresentados na Figura 4.17 fornecem um indicativo de que em parques eólicos localizados em regiões de alta resistividade, podem ser necessárias medidas complementares, de modo a melhorar o desempenho impulsivo do sistema de aterramento dos aerogeradores.



(a)



(b)

Figura 4.17 Impedância impulsiva do sistema de aterramento de turbina eólica, em função da resistividade do solo, considerando as dimensões de aterramento de 10 m x 10 m, 14 m x 14 m e 20 m x 20 m, submetido a correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes.

4.3.4 Coeficiente de Impulso - I_C

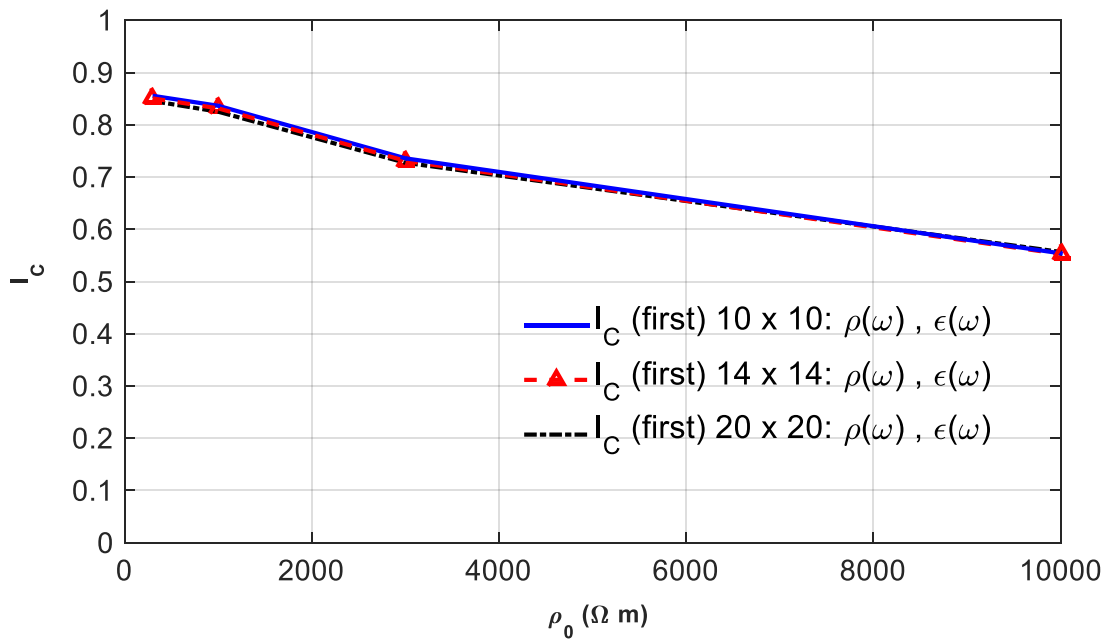
Com base nas curvas das Figuras 4.15 e 4.16, é possível calcular outro importante parâmetro para aplicações de proteção contra descargas atmosféricas, que corresponde ao coeficiente de impulso I_C , dado pela razão entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento. Esse parâmetro é de grande interesse prático, uma vez que a determinação da impedância impulsiva é complexa, seja via medições, seja via simulações. Por outro lado, a determinação da resistência de aterramento é viável, seja via medição, seja via cálculos, utilizando técnicas consagradas e já bem estabelecidas. Assim, de posse de R_{LF} e conhecendo-se o coeficiente de impulso, $I_C = Z_P/R_{LF}$, é possível determinar Z_P , que é um parâmetro mais adequado para avaliação do aterramento frente a descargas atmosféricas.

De acordo com os resultados da subseção anterior, sob a hipótese de parâmetros constantes do solo, as curvas de Z_P e R_{LF} são basicamente coincidentes, o que implica que $I_C = Z_P/R_{LF} \cong 1$, particularmente no caso de primeiras descargas. No caso de descargas subsequentes, o valor de I_C é um pouco inferior à unidade, mesmo sob a hipótese de parâmetros constantes, em decorrência do efeito capacitivo que tem impacto muito significativo nos sistemas de aterramento em análise, dada a natureza concentrada. Valores de I_C iguais ou próximos à unidade são típicos no caso de arranjos de aterramento cujas dimensões são inferiores ou muito próximas ao comprimento efetivo, quando se desconsidera a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo [50] [22] [24]. Novamente, enfatiza-se que esse comportamento foi observado para outros arranjos de aterramento e os resultados deste trabalho ilustram que comportamento similar é verificado no caso dos complexos sistemas de aterramento de aerogeradores.

Por outro lado, quando se considera a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, são observados valores de Z_P inferiores a R_{LF} , o que implica $I_C < 1$. A Figura 4.18 ilustra as curvas de coeficiente de impulso *versus* a resistividade do solo para as três dimensões analisadas no presente trabalho e correntes representativas de primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b), sob a hipótese de parâmetros dependentes da frequência.

De acordo com os resultados, o fenômeno de dependência da frequência leva a coeficientes de impulso inferiores à unidade em toda a faixa de resistividade analisada. Os valores se distanciam mais da unidade para descargas subsequentes e solos de maior resistividade.

Note-se, adicionalmente, que o valor do coeficiente de impulso basicamente não depende da dimensão do arranjo de aterramento, tendo-se em conta os casos analisados. Isso corrobora a ideia, já destacada em [25], de que o impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo não depende do arranjo em si, mas sim do meio em que os eletrodos estão inseridos, desde que as dimensões do arranjo não sejam superiores ao comprimento efetivo. De fato, os valores de I_C determinados para os sistemas de aterramento de aerogeradores, e considerando as resistividades avaliadas neste trabalho, são muito próximos dos valores obtidos para arranjos mais simples, tais como eletrodos horizontais, inseridos nos mesmos solos e com comprimentos inferiores ao efetivo [24], [23], [51]. Os valores aqui obtidos são ligeiramente inferiores em decorrência do efeito capacitivo pronunciado, característico de sistemas de aterramentos concentrados.



(a)

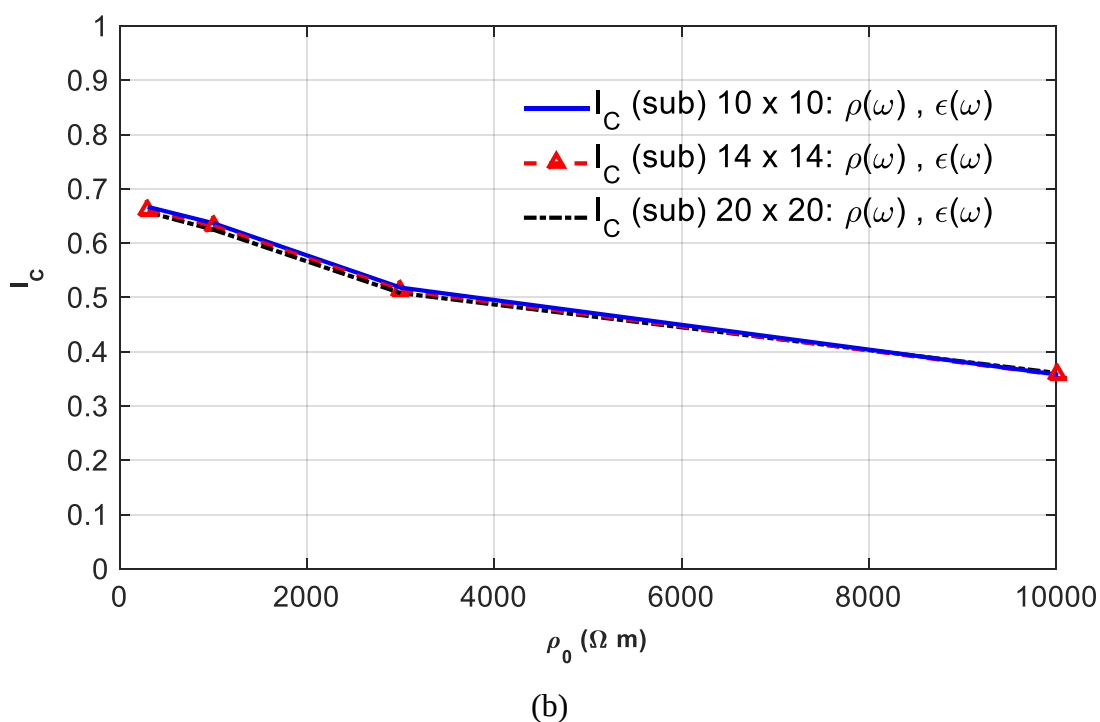


Figura 4.18 Coeficiente de impulso do sistema de aterramento de turbina eólica, em função da resistividade do solo, considerando as dimensões de aterramento de 10 m x 10 m, 14 m x 14 m e 20 m x 20 m, submetido a correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes.

4.4 Considerações Finais

Avaliou-se neste capítulo o comportamento frente a descargas atmosféricas de um arranjo de aterramento típico de turbinas eólicas, considerando diferentes dimensões do arranjo e resistividades do solo. Em particular, investigou-se o impacto do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo nesse comportamento, tendo-se em conta condições típicas brasileiras em termos de descargas atmosféricas e resistividades do solo. A partir dos resultados, as seguintes principais conclusões podem ser esboçadas.

- Independentemente da hipótese assumida para os parâmetros do solo (constantes ou variáveis com a frequência), quando da incidência de descargas atmosféricas, ocorrem severas elevações de potencial na terminação de terra, que são transmitidas para toda a estrutura metálica do sistema eólico (torre, nacelle e pás). Tais elevações de potencial são especialmente severas no caso de incidência de primeiras descargas de retorno e solos de resistividade mais elevada, e podem provocar danos aos componentes

localizados no interior do sistema eólico, principalmente equipamentos sensíveis relacionados aos sistemas de controle e comunicação. Ainda, essas elevações de potencial podem ser transferidas para a rede de média tensão através de transformadores, usualmente instalados em cubículos na base de cada torre, impactando a qualidade da energia gerada.

- Dada a natureza concentrada de arranjos de aterramento típicos de aerogeradores, eles apresentam comportamento predominantemente capacitivo. Isso faz com que, no ponto de injeção de corrente, o crescimento da tensão seja, de modo geral, mais lento do que o da corrente, levando a valores de impedância transitória inferiores à resistência de aterramento durante a maior parte do período dinâmico do transitório.
- Os valores de GPR e de Z_p apresentam reduções quando se considera a dependência da frequência dos parâmetros do solo, em relação aos resultados obtidos sob a hipótese de parâmetros constantes. Considerando as resistividades analisadas, tais reduções são pouco significativas para o solo de $300 \Omega m$, relevantes para o solo de $1000 \Omega m$ e bastante expressivas para os solos de 3000 e $10000 \Omega m$. De um modo geral, o efeito da dependência da frequência é mais acentuado para as descargas subsequentes.
- Para solos de resistividade muito elevada, a impedância impulsiva de aterramento de cada aerogerador individual pode assumir valores muito elevados. Nesses casos, a fundação da torre pode não ser suficiente para se ter um aterramento de qualidade e medidas complementares podem ser necessárias.
- Considerando-se as dimensões de aterramento e as resistividades avaliadas neste trabalho, para a hipótese de parâmetros do solo constante, os valores de impedância impulsiva são muito próximos dos de resistência de aterramento, ou seja, $I_C \cong 1$. Por outro lado, quando se consideram parâmetros do solo variáveis com a frequência, o valor de I_C se reduz, sendo tal diminuição mais significativa à medida que a resistividade do solo cresce. Os valores de I_C , para as três dimensões avaliadas, são aproximadamente $0,84$ e $0,63$, $0,73$ e $0,51$, e $0,55$ e $0,35$, respectivamente para primeiras descargas e descargas subsequentes, e solos de 1000 , 3000 e $10000 \Omega m$.

Tendo em conta as conclusões anteriores e, também, os demais resultados e análises apresentados ao longo deste capítulo, outros dois aspectos merecem ser destacados.

- Os efeitos do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, em termos de redução do GPR, Z_P e I_C , determinados para arranjos típicos de aerogeradores são similares ou análogos aos efeitos em arranjos de aterramento mais simples, tais como eletrodos horizontais [24] [50]. Isso reforça a ideia, primeiramente destacada em [25], de que o efeito da dependência da frequência está associado essencialmente aos parâmetros do solo e não à configuração de eletrodos enterrados.
- As dimensões de aterramento avaliadas neste trabalho correspondem a valores típicos, tendo-se em conta alturas usuais de torres eólicas. Para essas dimensões, e considerando-se a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, os valores de impedância impulsiva foram sempre inferiores aos de resistência de aterramento. Isso indica que, para as condições de resistividade em que o fenômeno de dependência da frequência é importante e para descargas medianas típicas, o desempenho impulsivo do aterramento de um aerogerador individual é melhor do que o seu desempenho em baixa frequência ($Z_P < R_{LF}$).

Capítulo 5 Conclusões e Propostas de Continuidade

Esta dissertação concentrou-se na avaliação do comportamento transitório de aterramentos de turbinas eólicas frente a descargas atmosféricas, considerando o impacto da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo nesse comportamento. A principal motivação desse estudo foi apresentar resultados consistentes do comportamento impulsivo do aterramento de torres eólicas, com o intuito de subsidiar a definição de práticas de engenharia, a fim de reduzir o número de falhas e danos nas turbinas causados principalmente por sobretensões transitórias advindas da incidência direta de descargas atmosféricas nos sistemas eólicos. Entende-se que os resultados apresentados nesta dissertação possam auxiliar na melhoria do sistema de proteção do sistema eólico contra descargas atmosféricas, aumentando a qualidade da energia gerada e a confiabilidade do sistema de geração de energia, além de reduzir gastos com manutenção e reparos.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Apresentação de uma análise do panorama da energia eólica no Brasil e no mundo.
- Validação experimental do uso do Modelo Eletromagnético Híbrido, HEM, para simulação de arranjos de aterramento típicos de turbinas eólicas.
- Análise do comportamento impulsivo do aterramento de turbinas eólicas considerando condições típicas do Brasil, em termos de ondas de correntes de descarga atmosférica e valores de resistividade do solo.
- Avaliação sistemática da resposta frente a descargas atmosféricas de um arranjo de aterramento típico de turbinas eólicas, em termos dos principais parâmetros que caracterizam o comportamento impulsivo de aterramento.
- Análise sistemática do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos de turbinas eólicas, empregando-se formulações validadas experimentalmente e sinais de corrente com formas de ondas típicas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes.

Vale mencionar que parte dos resultados obtidos nesta dissertação foram publicados [37] ou aceitos para publicação [38]. Outros trabalhos que contemplam resultados desta dissertação ainda não publicados, ou desenvolvimentos adicionais decorrentes dos resultados aqui apresentados, estão em fase de submissão para periódicos e/ou anais de congressos.

Tendo em vista as realizações deste trabalho e a experiência adquirida durante o desenvolvimento desta pesquisa, julga-se que alguns itens merecem explorações adicionais, podendo-se citar, dentre estes:

- Extensão das análises apresentadas nesse trabalho para outras geometrias de aterramento de turbinas eólicas, por exemplo, a geometria octogonal.
- Avaliação do impacto dos aterramentos adjacentes no desempenho do aterramento de um aerogerador individual, considerando as conexões existentes em um parque eólico entre os aterramentos elétricos individuais de cada aerogerador.
- Análise do efeito de descargas ascendentes no desempenho de aterramentos elétricos de aerogeradores.
- Estabelecimento de modelos multiportas para os aterramentos de turbinas eólicas, baseado em modelos de pólos e resíduos, que possam ser diretamente incluídos em programas de cálculo de transitórios do tipo ATP/EMTP, com o intuito de avaliar o desempenho do parque eólico como um todo frente a descargas atmosféricas.
- Avaliação, considerando a proposta de continuidade anterior, da propagação das sobretensões transitórias advindas de descargas atmosféricas dentro do parque eólico e seus principais efeitos e, adicionalmente, análise das sobretensões transferidas para a rede de média tensão.
- Obtenção de outros resultados experimentais da resposta impulsiva de aterramentos de aerogeradores, considerando solos de resistividades típicas do Brasil.

Referências Bibliográficas

- [1] EPE, “Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional: Ano base 2015,” Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2016.
- [2] MME, “Ministério de Minas e Energia - Estudos Estratégicos de Energia Eólica no Brasil e no Mundo: Ano de referência 2015,” MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, BRASÍLIA, 2016.
- [3] WWEA, “Wind Energy Around the World,” *World Wind Energy Association - Wind Bulletin*, September 2016.
- [4] V. COORAY, *Lightning Protection*, Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [5] IEC61400, Technical Report - Wind Turbine generator systems - Part 24: Lightning protection, IEC, 2002.
- [6] O. A. C. AMARANTE, M. BROWER e A. L. SÁ, “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro,” Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2011.
- [7] L. S. MARROQUES, *Modelagem e Posicionamento de Para-Raios em Redes Subterrâneas de Parques Eólicos conectadas a Redes Aéreas Utilizando o ATP*, P. d. Pós-Graduação, Ed., Uberlândia, Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Elétrica, 2015.
- [8] D. SCHWANZ, *Análise da distorção harmônica de um parque eólico através da sua modelagem no domínio do tempo e da frequência*, P. d. P. e. E. Elétrica, Ed., Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- [9] E. F. PAVINATTO, *Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica*, vol. Dissertação (Mestrado em Engenharia), P. d. P. e. Engenharia, Ed., Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

- [10] N. A. LUNA, A valiação de empresas utilizando a teoria das opções reais: o caso de uma geradora de energia eólica, F. d. C. Econômicas, Ed., Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Programa de Pós-Graduação em Economia, 2011.
- [11] S. VISACRO, Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia, Sao Paulo: Artliber Editora, 2005.
- [12] H. WU e L. ZHANG, "Contrastive analysis of transient potential of wind turbine onshore and offshore in lightning strokes," *IEEE*, 2015.
- [13] K. YAMAMOTO e S. YANAGAWA, "Measurements of Transient Grounding Characteristic at wind turbine and its analyses," *International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects*, 2012.
- [14] S. VISACRO, M. VALE, G. CORREA e A. TEIXEIRA, "Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes.," *Journal of Geophysical Research*, vol. Vol 115, 2010.
- [15] A. R. DE CONTI, *Modelos para definição de ondas de corrente e tensão representativas das solicitações de sistemas de distribuição por descargas atmosféricas.*, Belo Horizonte, Minas Gerais: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE - UFMG, 2006.
- [16] T. SOERENSEN, F. JENSEN, N. RABEN, J. LYKKEGAARD e J. SAXOV, "Lightning protection for offshore wind turbines," *International Conference on Electricity Distribution*, pp. 18-21, Junho 2001.
- [17] B. E. M. MONTEZANO, *Modelo Dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em VRML*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [18] K. YAMAMOTO, Y. KUBO e S. SUMI, "Transient Grounding Characteristic of Wind Turbines Affecting Back-Flow Lightning Current into Distribution System.," *International Conference on Lightning Protection - ICLP*, 25-30 September 2016.
- [19] E. PYRGIOTI e V. BOKOGIANNIS, "Lightning Impulse Performance of a Wind Generator Grounding Grid Considering Soil Ionization.," *Asia-Pacific International Conference on Lightning*, pp. 103-107, 7th November 2011.

- [20] D. GAZZANA, A. SMORGONSKIY, N. MORA, A. SUNJERGA, M. RUBINSTEIN e F. RACHIDI, "An experimental field study of the grounding system response of tall wind turbines to impulse surges," *Electric Power Systems Research* 160, pp. 219-225, 2018.
- [21] R. ALÍPIO, M. A. O. SCHROEDER, M. M. AFONSO e T. A. S. OLIVEIRA, *The Influence of the Soil Parameters Dependence with Frequency on Impulse Grounding Behavior*, Curitiba, 2009.
- [22] R. ALÍPIO, M. M. AFONSO, M. A. O. SCHROEDER e T. A. S. OLIVEIRA, *Resposta Impulsiva de eletrodos de aterramento.*, 2012, pp. 476-488.
- [23] R. ALÍPIO e S. VISACRO, "Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil," *IEEE - Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1163 - 1171, Outubro 2014.
- [24] R. ALÍPIO e S. VISACRO, "Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect on Frequency-Dependent Soil Parameters," *IEEE - Transactions on Power Delivery*, pp. 716-723, Abril 2014.
- [25] R. ALÍPIO, *Dependência da frequência dos parâmetros do solo: efeito no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos.*, Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica., 2013.
- [26] M. A. O. SCHROEDER, *Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do morro do cachimbo*, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), 2001.
- [27] S. VISACRO, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents," *IEEE Transactions on power delivery*, pp. 381-386, Janeiro 2007.
- [28] L. GRCEV e D. HRISTOV, "More accurate modelling of earthing systems transient behaviour," *15th International Telecommunications Energy Conference*, pp. 167-193, 1993.

- [29] J. B. SCHNEIDER, Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method, Washington: University of Washington, 2017.
- [30] Y. IKEDA, N. NAGAOKA, Y. BABA e A. AMETANI, "A frequency dependent circuit model of a wind turbine tower using transient response calculated by FDTD," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1 - 6, 2012.
- [31] K. YAMAMOTO, S. YANAGAWA, K. S. YAMABUKI e S. YOKOYAMA, "Analytical Surveys of Transient and Frequency-Dependent Grounding Characteristics of a Wind Turbine Generator System on the Basis of Field Tests," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp. 3035-3043, OCTOBER 2010.
- [32] K. YAMAMOTO, S. YANAGAWA e T. UEDA, "Verifications os Transient Grounding Impedance Measurements of a Wind Turbine Generator System Using the FDTD Method," *International Symposium on Lightning Protection - XI SIPDA*, pp. 255-260, 3-7 October 2011.
- [33] K. YAMAMOTO, J. NIIHARA e S. YANAGAWA, "Grounding Characteristics of a wind turbine measured immediately afeter is undergrounding," *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 861-864, 2012.
- [34] L. GRCEV, "Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents," *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPABILITY*, pp. 559-571, August 2009.
- [35] D. CAVKA, N. MORA e F. RACHIDI, "A comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grouding Systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 177 - 187, Fevereiro 2014.
- [36] R. ALÍPIO, V. VISACRO e K. YAMAMOTO, "Lightning response of wind-turbine grounding system: experimental and simulated results with frequency-dependent soil parameters," *Asia Pacific International Conference on Lightning*, pp. 453-456, 2015.
- [37] R. ALÍPIO, D. CONCEIÇÃO, R. N. DIAS, S. VISACRO e K. YAMAMOTO, "The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning

performance of typical wind-turbine grounding systems,," *International Symposium on Lightning Protection - XIV SIPDA*, Outubro 2017.

- [38] D. CONCEIÇÃO, R. ALÍPIO e R. N. DIAS, "Lightning Performance of Wind Turbine Grounding Systems Considering Typical Brazilian Soil Conditions," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - VII SBSE (aceito para publicação)*, 2018.
- [39] S. VISACRO e C. PORTELA, "Modeling of earthing systems for lightning protection applications, including propagation effects," *International Conference Lightning Protection (ICLP)*, pp. 129-132, 1992.
- [40] S. VISACRO, *Modelagem de aterramentos elétricos*, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPER/UFRJ), 1992.
- [41] A. SOARES JR., *Modelagem de linhas de transmissão para avaliação de desempenho frente a descargas atmosféricas*, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), 2001.
- [42] A. SOARES JR., M. A. O. SCHROEDER e S. VISACRO, "Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes," *IEEE Transactions on power delivery*, pp. 1447-1452, Abril 2005.
- [43] S. VISACRO e A. SOARES JR., "Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1206-1208, Abril 2005.
- [44] R. ALÍPIO, *Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do tempo e da frequência.*, Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG (PPMMC/CEFET-MG), 2008.
- [45] R. ALÍPIO, M. A. O. SCHROEDER, M. M. AFONSO e T. A. S. OLIVEIRA, "Modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos de alta frequência e comparação com resultados experimentais," *SBA Controle & Automação*, pp. 89 - 102, Janeiro e Fevereiro 2011.

- [46] R. F. HARRINGTON, *Field computation by moment methods*, New York, 1993.
- [47] A. R. DE CONTI e S. VISACRO, "Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms.," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 448-451, June 2007.
- [48] S. VISACRO, A. SOARES, M. A. O. SCHROEDER, L. C. L. CHERCHIGLIA e V. J. SOUSA, "Statistical analysis of lightning current parameters: measurement at Morro do Cachimbo station," *Journal on geophysical research*, vol. 109, pp. 1-11, 2004.
- [49] S. VISACRO, C. R. MESQUITA, A. R. DE CONTI e F. SILVEIRA, "Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station," *Atmospheric Research*, vol. 117, pp. 55-63, 2012.
- [50] S. VISACRO, R. ALÍPIO, C. PEREIRA, M. GUIMARÃES e M. A. O. SCHROEDER, "Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 121 - 127, Fevereiro 2015.
- [51] R. ALÍPIO e S. VISACRO, "Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 132-139, Fevereiro 2013.
- [52] T. MASANOBU, Y. BABA, N. NAGAOKA e A. AMETANI, "FDTD Simulation of a Horizontal Grounding Electrode and Modeling of its Equivalent Circuit," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 817-825, November 2006.