

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS DE CURITIBA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO KAORU YAMANISHI  
MICHAEL RAVANEDA BONFIM**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRETENSÃO CAUSADOS POR  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADORES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2017**

**BRUNO KAORU YAMANISHI**  
**MICHAEL RAVANEDA BONFIM**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE SOBRETENSÃO CAUSADOS POR  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Eloi Rufato Junior

**CURITIBA**  
**2017**

Bruno Kaoru Yamanishi  
Michael Ravaneda Bonfim

## Análise dos efeitos de sobretensão causados por descargas atmosféricas em aerogeradores

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de abril de 2017.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Eloi Rufato Junior, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Antonio Ivan Bastos Sobrinho, Esp.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eloi Rufato Junior, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Joaquim Eloir Rocha, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

## RESUMO

BONFIM, Michael Ravaneda; YAMANISHI, Bruno Kaoru. Análise dos efeitos de sobretensão causados por descargas atmosféricas em aerogeradores. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta uma abordagem teórica sobre os efeitos de sobretensão causados por descargas atmosféricas em aerogeradores, com foco em apresentar as principais variáveis e métodos envolvidos para proteção do aerogerador, para garantir a segurança e confiabilidade do sistema a seus usuários. A discussão sobre avaliação de frequências de raios e nível de proteção contra estes, está de acordo com a Norma IEC 61400. Abordam-se os conceitos físicos sobre as descargas atmosféricas, as perturbações ocasionadas por estas, os dados estatísticos relativos aos danos, seja por impacto direto ou indireto, assim como descreve o sistema de proteção recomendado pela literatura. O estudo analisou a influência da tensão transitória sobre um sistema de aerogeradores impactados por descargas atmosféricas, utilizando o software de simulação digital ATPDraw. Constatou-se a importância do correto dimensionamento da resistência de aterramento da instalação, para tornar essa forma de obtenção de energia cada vez mais segura e confiável.

**Palavras-chave:** Descargas atmosféricas. Sobretensão. Aerogeradores. ATPDraw.

## ABSTRACT

BONFIM, Michael Ravaneda; YAMANISHI, Bruno Kaoru. Overvoltage effects analysis caused by lightning strikes in wind turbines. 2017. Graduation work (Bachelor's degree) - Electrical Engineering Course, Electrical Engineering Department, Federal University of Technology - Paraná, 2017.

This work presents a theoretical approach about the effects of overvoltage caused by lightning strikes in wind turbines, focusing in the presentation of the main variables and methods involved for the protection of the wind turbines, to ensure the safety and the reliability of the system and its users. The discussion about the frequency of lightning strikes and the level of protection against it, agrees with the IEC 61400 standard. The physical concepts of lightning strikes are approached, the disturbance caused by them, the statistical data related to the damages, whether by direct or indirect impact, describing as well the protection system recommended by the literature. The study analyzed the influence of the voltage transient in a wind turbine system impacted by lightning strikes, using the digital simulation software ATPDraw. It was noted the importance of the correct dimensioning of the ground resistance of the installation to make this renewable energy more and more safe and reliable.

**Keywords:** Lightning strikes. Overvoltage. Wind turbines. ATPDraw.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Crescimento do tamanho dos aerogeradores. ....	16
Figura 2 - Aumento de capacidade mundial de geração eólica. ....	17
Figura 3 - Mapa isoceráunico do sul do Brasil.....	18
Figura 4 - Tipos de raios.....	27
Figura 5 - Relação entre pico de corrente (I) e tempo (t) de um raio. ....	28
Figura 6 - Relação entre números de tempestades com raios e falhas elétricas em turbinas eólicas. ....	33
Figura 7 - Distribuição dos danos causados nas estruturas do aerogerador .....	34
Figura 8 - Distribuição global de raios entre 2003 e 2015 .....	36
Figura 9 - Zona com maior exposição a raios de acordo com a altura h do aerogerador e variações do terreno.....	37
Figura 10 - Área de captura de impacto de raios.....	37
Figura 11 - Componentes do aerogerador .....	45
Figura 12 - Método da esfera rolante.....	46
Figura 13 – Representação do modelo eletrogeométrico em um aerogerador genérico; pontos onde a esfera toca a estrutura: são considerados pontos onde é possível o impacto por descarga direta. ....	48
Figura 14 - Zonas de proteção. ....	50
Figura 15 - Raios atingindo aerogeradores no Parque Eólico Central de Kansas, EUA. ....	51
Figura 16 - Divisão dos danos causados por raios nas pás de aerogeradores.....	52
Figura 17 - Exemplo de dano por delaminação em aerogeradores.....	53
Figura 18 - Exemplo de dano por descolamento em aerogeradores.....	53
Figura 19 - Exemplo de dano por separação entre as lâminas das pás em aerogeradores.....	54
Figura 20 - Exemplo de dano causado por separação das pontas da pá de aerogeradores .....	54
Figura 21 - Caminho elétrico percorrido pelo raio na pá do aerogerador .....	58
Figura 22 - Região de proteção de um captor de altura h1 .....	59
Figura 23 - Captor de proteção do sistema meteorológico de aerogeradores.....	60
Figura 24 - Proteção por gaiola de Faraday.....	62
Figura 25 - Sistema de aterramento tipo B. ....	67
Figura 26 - Disposição de sistemas de aterramento 1,2,3 e 4/5.....	69
Figura 27 - Aterramento do aerogerador com estrutura próxima.....	69
Figura 28 - Caracterização elétrica da tensão de toque .....	73
Figura 29 - Representação em circuitos elétricos da tensão de toque . ....	74
Figura 30 - Caracterização elétrica da tensão de passo .....	76
Figura 31 - Representação em circuito elétrico da tensão de passo .....	76
Figura 32 - Conexão das malhas de aterramento de um parque eólico .....	77
Figura 33 – Quadro de valores de tensões máximas de isolamento de acordo com a tensão máxima do equipamento.....	81
Figura 34 - Tela inicial do software de simulação ATPDraw. ....	83
Figura 35 - Modelo da usina eólica com dois aerogeradores. ....	85
Figura 36 - Representação da turbina eólica e demais componentes do sistema. ....	85
Figura 37 - Detalhe do aerogerador.....	86
Figura 38 - Representação da máquina síncrona no software ATPDraw.....	87
Figura 39 - Forma de onda típica para uma descarga atmosférica de impacto direto. ....	88
Figura 40 - Representação do circuito elétrico da descarga atmosférica. ....	88
Figura 41 - Representação da descarga atmosférica no software ATPDraw. ....	89
Figura 42 - Representação do para-raios no software ATPDraw.....	89
Figura 43 - Valores de corrente suportados pelos para-raios. ....	90

Figura 44 - Locais considerados para as descargas atmosféricas.....	91
Figura 45 - Locais considerados para as descargas atmosféricas (figura 36 ampliada).....	92
Figura 46 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 antes do surto. .....	92
Figura 47 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 antes do surto. .....	93
Figura 48 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 antes do surto. ....	93
Figura 49 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto. .....	94
Figura 50 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto. .....	95
Figura 51 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto. ....	95
Figura 52 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto. .....	96
Figura 53 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto. .....	97
Figura 54 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5kV) dos geradores G1 e G2 com o surto. ....	98
Figura 55 - Formas de onda do primário do transformador (600V) do gerador G1 com o surto. .....	99
Figura 56 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto. .....	99
Figura 57 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto. ....	100
Figura 58 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto. .....	101
Figura 59 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto. .....	102
Figura 60 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto. ....	102
Figura 61 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto. .....	103
Figura 62 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto. .....	104
Figura 63 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto. ....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros atuais das descargas atmosféricas para dimensionamento de proteção .....	30
Quadro 2 - Fator Médio Ambiental .....	39
Quadro 3 - Coeficiente devido ao material da estrutura .....	39
Quadro 4 - Coeficiente devido ao material interno inflamável da estrutura .....	40
Quadro 5 - Coeficiente devido a ocupação da estrutura .....	40
Quadro 6 - Coeficientes devido aos efeitos do raio .....	40
Quadro 7 - Eficiência do Nível de Proteção .....	41
Quadro 8 - Valores mínimos de r em função do LPZ e do valor mínimo da corrente do raio .....	47
Quadro 9 - Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descidas. ....	57
Quadro 10 - Parâmetros de tensão de pico e máxima tensão de isolamento dos equipamentos... ..	82
Quadro 11 - Parâmetros da máquina síncrona no software ATPDraw.....	87
Quadro 12 - Pontos de características de Tensão X Corrente usados para modelar o para-raios. ....	90
Quadro 13 – Quadro comparativo dos valores de sobretensão com a resistência de aterramento para o Gerador 1 e 2. ....	107



## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
ATPDraw	<i>Alternative Transient Program Draw</i>
DA	Descargas Atmosféricas
EEP	<i>Electrical Engineering Portal</i>
EMTP	<i>ElectroMagnetic Transient Program</i>
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Ng	Densidade de descargas atmosféricas para terra
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

## LISTA DE ACRÔNIMOS

Rp	Raio de proteção
$\alpha$	Ângulo do cone de proteção
$\rho$	Resistividade do solo
n	Número de cabos radiais
L	Comprimento do cabo radial
S	Espaçamento entre as hastes
D	Diâmetro do eletrodo anular
A	Ampére
V	Volt
Rch	Resistência do corpo humano
Rc	Resistência de toque
Ichoque	Corrente de choque máxima que não causa fibrilação ventricular
Cs	Fator de resistência superficial
$\rho_s$	Resistividade superficial
hs	Espessura da camada superficial
Vtoque	Valor da tensão de toque máxima permitida
Vpasso máx	Tensão de passo máxima permitida
G1	Gerador 1
G2	Gerador 2
Tr	Transformador de alta tensão

## LISTA DE SIGLAS

kV/m <sup>2</sup>	Quilo volt por metro quadrado
kA	Quilo ampère
atm	Atmosfera
km/s	Quilômetro por segundo
ms	Milissegundo
µs	Microsegundo
W/R	Joule por ohm
Ω	Ohm
MJ/Ω	Mega joule por ohm
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
I	Corrente
T1	Tempo de frente de onda
T2	Tempo de meia cauda de onda
Q	Carga
C	Coulomb
di/dt	Corrente de impulso
kJ/Ω	Quilo joule por ohm
kA/µs	Quilo ampère por microsegundo
kV	Quilo volt
kW	Quilo watt
MV	Mega volt
MW	Mega watt
A	Área
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
H	Altura do gerador
Nd	Número médio de impactos diretos de raios no aerogerador por ano
Cd	Fator médio ambiental
Nc	Número de impactos diretos toleráveis na estrutura
C2,...,Cn	Coefficientes estruturais
LPZ	Nível de proteção
rpm	Rotações por minuto
f.e.m.	Força eletromotriz
MER	Método da esfera rolante
r	Raio
R	Raio
mm	Milímetro
m	Metro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 TEMA .....	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	19
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	20
1.4 OBJETIVOS .....	20
1.4.1 Objetivo geral.....	20
1.4.1.1 Objetivos específicos .....	20
1.5 JUSTIFICATIVA .....	21
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2 TEORIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E EXPOSIÇÃO DO AEROGERADOR A RAIOS.....</b>	<b>23</b>
2.1 TEMPESTADES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	23
2.1.1 Processo de formação.....	23
2.1.2 Fase de desenvolvimento .....	24
2.1.3 Fase de amadurecimento .....	24
2.1.4 Fase de dissipação .....	25
2.2 O RAIOS.....	25
2.2.1 Tipos de raio.....	26
2.2.1.1 Intra-nuvem.....	26
2.2.1.2 Nuvem-solo.....	26
2.2.2 Tipos de impacto .....	27
2.2.2.1 Impacto direto .....	27
2.2.2.2 Impacto indireto .....	28
2.2.3 Características .....	28
2.2.3.1 Parâmetros característicos .....	29
2.2.3.1.1 Valor máximo de pico de corrente .....	29
2.2.3.1.2 Carga transferida .....	29
2.2.3.1.3 Energia específica.....	29
2.2.3.1.4 Nível cerâmico.....	29
2.2.3.1.5 Polaridade do raio.....	29
2.3 PERTURBAÇÕES OCASIONADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	31
2.3.1 Acoplamento resistivo.....	31
2.3.2 Acoplamento indutivo.....	31

2.3.3 Acoplamento capacitivo.....	31
2.4 A NATUREZA DE DESCARGAS ELÉTRICAS EM AEROGERADORES .....	32
2.5 ESTATÍSTICAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADORES .....	32
2.6 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RAIOS .....	35
2.7 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS .....	35
2.7.1 Densidade de raios à Terra.....	35
2.7.2 Superfície de captação.....	36
2.7.2.1 Determinação da área de captação de um aerogerador.....	36
2.7.2.2 Determinação da área de captação aplicada a parques eólicos .....	37
2.7.2.2.1 Método IEC 61400-24.....	38
2.8 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO DO AEROGERADOR CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	38
2.8.1 Avaliação do número médio anual de descargas atmosféricas sobre o aerogerador .....	38
2.8.2 Nível de eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas .....	40
<b>3 PROTEÇÃO DE COMPONENTES DO AEROGERADOR CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....</b>	<b>42</b>
3.1 PARTES ELEMENTARES DO AEROGERADOR.....	42
3.1.1 Componentes de captação .....	42
3.1.2 Componentes de transmissão .....	43
3.1.3 Componentes de orientação .....	43
3.1.4 Componentes de geração.....	44
3.1.5 Componentes Estruturais .....	44
3.2 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE IMPACTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NAS ESTRUTURAS DO AEROGERADOR.....	46
3.2.1 Método da esfera rolante .....	46
3.2.1.1 Raio da esfera rolante .....	47
3.3 ZONAS DE PROTEÇÃO APLICADAS AO AEROGERADOR .....	47
3.3.1 Divisão de LPZ .....	48
3.3.1.1 Zona exterior.....	49
3.3.1.2 Zona interior .....	49
3.4 PROTEÇÃO DE COMPONENTES DO AEROGERADOR .....	50
3.4.1 Pás do rotor .....	51
3.4.1.1 Danos nas pás .....	52
3.4.1.2 Métodos de proteção para as pás .....	55
3.4.1.2.1 Sistema de captação externa.....	55
3.4.1.2.2 Sistema de condução interno .....	56
3.4.1.2.3 Conexão das pás com o cubo .....	58

3.4.2 Instrumentos meteorológicos .....	58
3.4.2.1 Sistema de captação .....	58
3.4.2.1.1 Método do ângulo de proteção .....	59
3.4.2.2 Sistema de condução.....	60
3.4.3 Nacele e outros componentes estruturais .....	61
3.4.3.1 Cubo.....	61
3.4.3.2 Nacele .....	61
3.4.3.2.1 Nacele de material isolante.....	61
3.4.4 Torre.....	62
3.4.4.1 Torres metálicas .....	62
3.4.4.2 Torres não metálicas .....	63
3.4.5 Componentes de transmissão e sistemas de orientação .....	63
3.4.5.1 Rolamentos .....	63
3.4.5.2 Sistemas hidráulicos .....	63
3.4.6 Sistema elétrico de alta tensão .....	64
3.4.6.1 Gerador .....	64
3.4.6.2 Transformador .....	64
3.5 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS) .....	64
<b>4 ATERRAMENTO E SEGURANÇA PESSOAL .....</b>	<b>66</b>
4.1 RESISTIVIDADE DO SOLO .....	66
4.2 ELETRODOS DE ATERRAMENTO .....	66
4.2.1 Eletrodos em disposição tipo A .....	67
4.2.2 Eletrodos em disposição tipo B.....	67
4.3 DISPOSIÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO .....	68
4.4 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO .....	70
4.4.1 Condutores em contato com o solo .....	71
4.4.1.1 Curto-circuito fase terra em solo de “terra fértil” .....	72
4.4.1.2 Curto-circuito fase terra sobre grama molhada .....	72
4.4.1.3 Curto-circuito fase terra em pedra brita e cabo de alumínio coberto.....	72
4.5 TENSÃO DE TOQUE E PASSO.....	72
4.5.1 Tensão de toque.....	73
4.5.2 Tensão de passo.....	75
4.5.3 Parques eólicos conectados à malha de aterramento.....	77
4.6 SISTEMA DE LIGAÇÃO EQUIPOTENCIAL .....	78
<b>5 SIMULAÇÃO DE SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADOR .....</b>	<b>79</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	79

5.1.1 PARÂMETROS LIMITES DE SOBRETENSÃO DE GERADORES EÓLICOS .....	79
5.2 SOFTWARE DE MODELAGEM UTILIZADO .....	82
5.3 MODELAGEM DO SISTEMA .....	84
5.3.1 Turbina eólica.....	86
5.3.2 Simulação da Descarga Atmosférica .....	87
5.3.3 Sistema de aterramento e para-raios .....	89
5.4 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO.....	91
5.4.1 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 1.000 $\Omega$ .....	94
5.4.2 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 100 $\Omega$ .....	96
5.4.3 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 40 $\Omega$ .....	98
5.4.4 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 4 $\Omega$ .....	100
5.4.5 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 0,1 $\Omega$ .....	103
5.5 CONSIDERAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....	105
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>108</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

O vento é uma fonte de energia limpa, inesgotável, e acessível, em várias partes do mundo; isto é exatamente o contrário do petróleo, carvão e da energia nuclear. Assim, tanto a energia eólica quanto a solar ganharam mercado (JOHNSON, 2006).

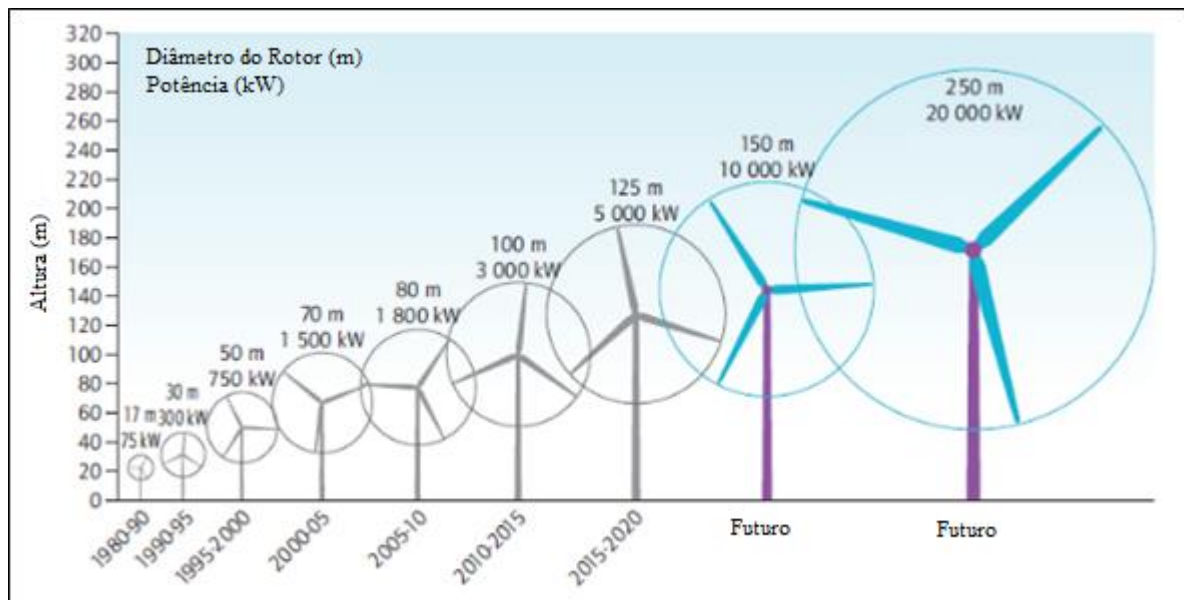
Dados históricos constam o uso do vento para diferentes fins, inclusive em civilizações muito antigas, como os Babilônicos e os Persas. Em 1439, na Holanda, foi construído o primeiro moinho movido pelo vento. A partir de 1600, era comum a utilização de turbinas eólicas em moinhos para a moagem de grãos (JOHNSON, 2006).

No entanto, o índice de descargas atmosféricas que golpeavam moinhos tradicionais de vento não era alto, pois tais moinhos de vento possuíam 10 ou 15 m de altura, comparável à altura das estruturas circundantes e árvores; no entanto, considerando os materiais utilizados na sua construção (madeira, palha, lona, etc.), raios e incêndios sempre foram uma ameaça séria, e, obviamente, proteção contra raios era de interesse para os proprietários, logo que tais técnicas foram disponíveis.

Moinhos de vento modernos utilizados para a geração de energia elétrica, são geralmente chamados de aerogeradores, e têm sido dispostos para realizar variadas tarefas, como a moagem, por exemplo, além da geração de eletricidade (fem - força eletromotriz). No entanto, foram infrutíferas as turbinas eólicas na competição com conjuntos de geradores a diesel e geração de energia centralizada no início do século XX, e foram quase completamente abandonados após a Segunda Guerra Mundial, quando redes de eletricidade em expansão atingiram a maioria dos consumidores, assegurando assim, maior confiabilidade e disponibilidade elétrica. A retomada de investimento nas turbinas eólicas veio após as crises do petróleo em 1973 e 1979, o que estimulou o interesse na energia alternativa, pois o *déficit* de petróleo nesta crise, causada por conflitos entre países do Oriente Médio, forçou principalmente os governos a repensar em uma alternativa de geração elétrica. (COORAY, 2003). Desde então, o desenvolvimento de turbinas eólicas comerciais tem avançado, com um aumento de 100 vezes na potência, e altura total que pode exceder 180 m no futuro, tal como indicado na Figura 1, o que resulta em maior potência gerada ocupando um mesmo espaço físico, comparado a aerogeradores menores.

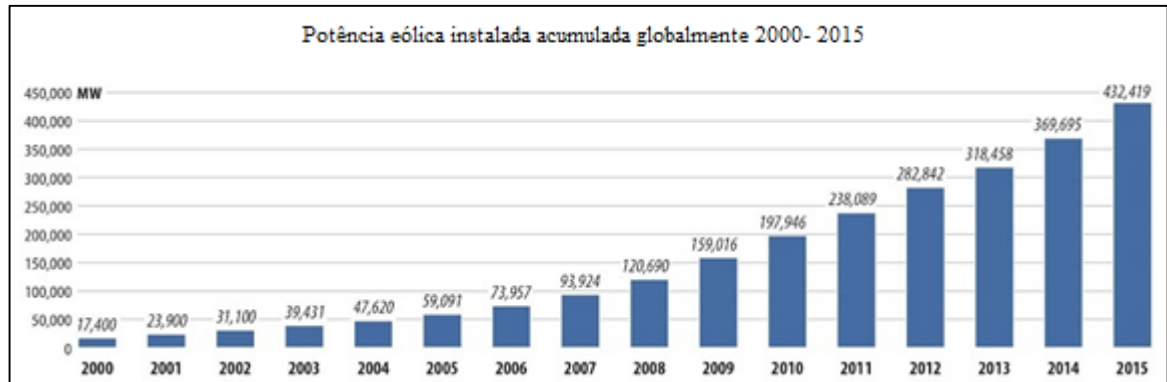


Devido à sua altura e sua localização (áreas isoladas), os aerogeradores estão vulneráveis a descargas atmosféricas, que podem causar sobretensões e transitórios elétricos em seu sistema de produção de energia, que, por consequência, afetam a potência gerada e uma gama de equipamentos dispendiosos, como painel de distribuição geral, centro de controle de potência, e todas as linhas de dados e comunicações, afetando toda rede de usuários da energia gerada pelo parque eólico. É, portanto, crucial anexar aos aerogeradores um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, desde a sua concepção na forma de projeto, até sua execução, garantindo que seja adequado e eficaz contra efeitos indesejados, como sobretensões e sobrecorrentes no sistema de geração eólico.



**Figura 1- Crescimento do tamanho dos aerogeradores.**  
 Fonte: *International Energy Agency (IEA), 2013.*

O aumento da capacidade de potência instalada do aerogerador desde o ano 2000 é mostrado na Figura 2, com um crescimento anual médio, entre 2000 e 2015, chegando a vinte por cento. Com estas taxas de crescimento, a energia eólica já se tornou uma importante fonte de energia elétrica em alguns países.

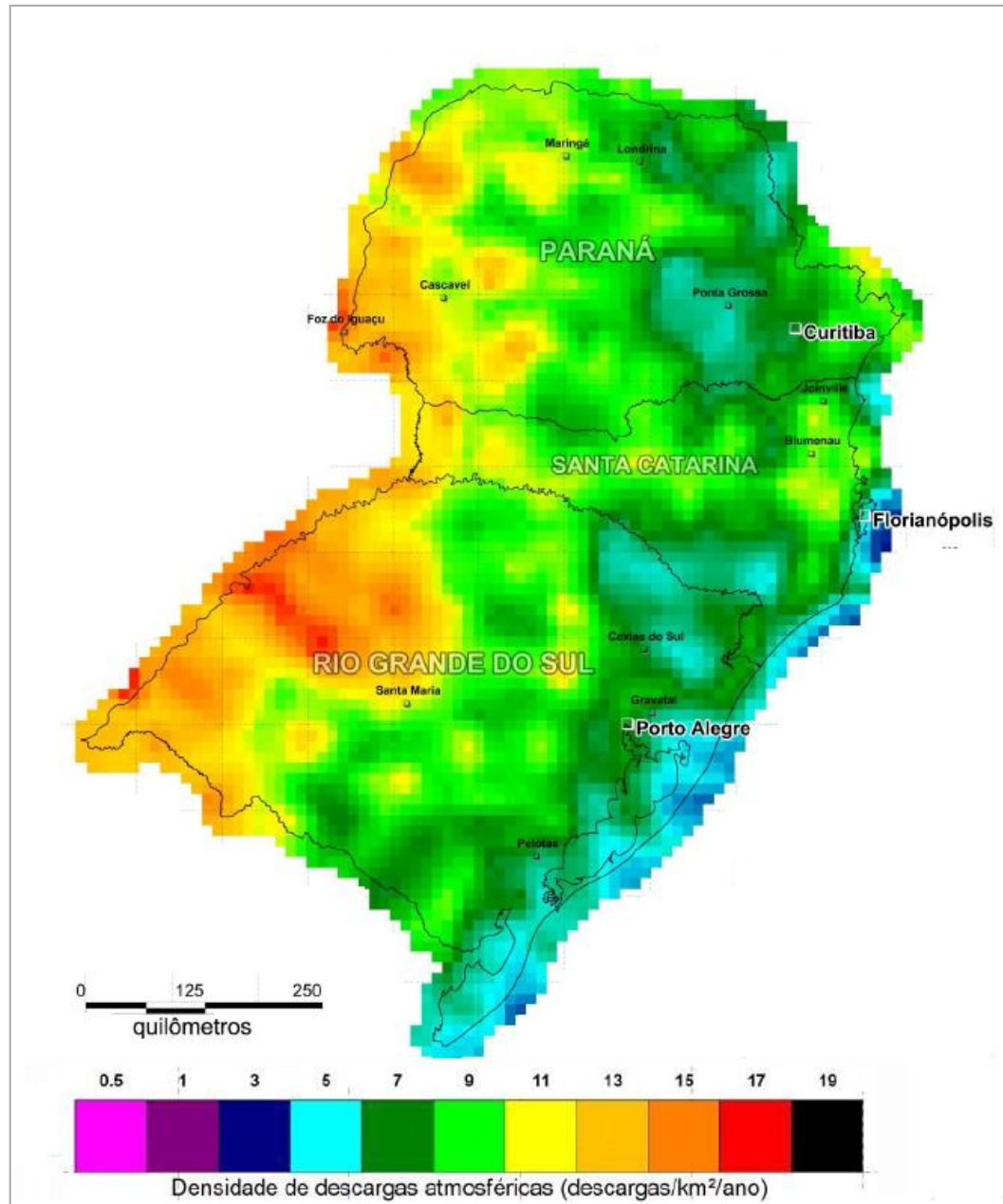


**Figura 2- Aumento de capacidade mundial de geração eólica.**  
**Fonte: GWEC, 2016.**

Estima-se que as descargas atmosféricas causem ao Brasil, prejuízos anuais de aproximadamente um bilhão de reais. Esta é a conclusão do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que realizou um estudo junto às empresas do setor elétrico, telecomunicações, seguros de equipamentos eletroeletrônicos, construção civil, aviação, agricultura, pecuária, entre outras. O maior prejudicado é o setor elétrico, com queima de aparelhos, perda de faturamento, aumento das despesas de manutenção e penalizações.

Na Figura 3 pode-se observar o Mapa Isoceráunico do Sul do Brasil (número de descargas atmosféricas por km<sup>2</sup> durante um ano). Os mapas isoceráunicos das demais regiões do território brasileiro encontram-se na NBR 5419-2.

Atualmente, o sítio do INPE permite obter o valor da densidade de descargas atmosféricas para a terra (Ng); com o endereço da localização pretendida em mãos, pode-se encontrar o Ng da região, fator extremamente importante e utilizado para cálculos estatísticos de proteção elétrica: quanto maior o valor de Ng da região, maior a probabilidade de descargas elétricas, ou seja, maior será o nível requerido de proteção para uma mesma estrutura, caso ela estivesse localizada em uma região de um valor menor de Ng.



**Figura 3 - Mapa isoceráunico do sul do Brasil**  
**Fonte: NBR 5419-2/2015, pág. 114**

A Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC), pioneira na análise da proteção de turbinas eólicas, baseia-se particularmente nas descargas elétricas atmosféricas afetando os aerogeradores, para estabelecer então parâmetros para o sistema de proteção de acordo com a Norma Europeia IEC 61400-24, tais como índice isoceráunico da região, altura da estrutura a ser protegida, entre outros parâmetros, a serem vistos nos capítulos seguintes deste trabalho. Tem-se então que, a quantidade de descargas atmosféricas, não é um fator negligenciável no planejamento de um parque eólico.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Considerando a necessidade global de energia elétrica, e as estimativas de crescimento da demanda nos próximos anos, conclui-se que o uso de sistemas geradores baseados nos ventos tende a se intensificar ainda mais (HEIER, 1998).

A matriz energética mundial ganhou 63 GW de capacidade eólica instalada em 2015 – o Brasil contribuiu com 4,3% desse total. O novo recorde em relação ao total que havia sido instalado em 2014 – 51,7 GW – fez de 2015 um ano sem precedentes para a indústria eólica mundial, já que as novas instalações ultrapassaram a marca de 60 GW pela primeira vez na história.

Até 2024, no Brasil, a meta é chegar a 24 GW, cobrindo 11% da geração de energia do Brasil. A maior parte dos empreendimentos está concentrada na região Nordeste, que reúne as melhores características para a geração de energia eólica do país.

Levando em conta o alto grau de vulnerabilidade de aerogeradores às descargas atmosféricas (devido a sua altura e localização), fica evidente que garantir proteção e confiabilidade na geração de energia eólica é uma premissa básica para geração de energia.

A descarga elétrica atmosférica (raio), é um fenômeno da natureza absolutamente imprevisível e aleatório, tanto em relação às suas características elétricas (intensidade de corrente, tempo de duração), como em relação aos efeitos danosos decorrentes de sua incidência sobre as edificações (TERMOTÉCNICA, 2001).

Nada em termos práticos pode ser feito para se impedir a "queda" de uma descarga em determinada região. Não existe "atração" a longas distâncias, sendo os sistemas prioritariamente receptores. Assim sendo, as soluções internacionalmente aplicadas buscam tão somente minimizar os efeitos destruidores, a partir da colocação de pontos preferenciais de captação e condução segura da descarga para a terra (TERMOTÉCNICA, 2001).

Este trabalho propõe analisar os efeitos de sobretensão causados por descargas atmosféricas em aerogeradores, com objetivo de expor as principais variáveis e métodos envolvidos para proteção do aerogerador, para garantir a segurança e confiabilidade do sistema a seus usuários.

### 1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

O estudo da proteção contra descargas atmosféricas (DA) em aerogeradores tem sido uma pauta recente, principalmente após os anos 90, devido ao crescimento da demanda de energia no mundo, sobretudo as de origens renováveis, o que ocasionou regulamentações e normatizações recentes abordando o tema.

A IEC, responsável pela normatização na Europa, normatiza estudos de caso e parâmetros para proteção de aerogeradores desde 2001, onde na sua norma IEC 61400-24 apresenta os parâmetros a serem considerados, desde a incidência da descarga atmosférica, até seus efeitos sobre o sistema eólico como um todo.

Uma separação de zonas de proteção mais específica foi idealizada pela norma europeia IEC, de forma a facilitar a parametrização e obtenção de resultados de proteção para o aerogerador (EEP, 2014). Estas zonas consideram o nível de surto que atinge a estrutura, da área externa até a chegada do surto aos aparelhos localizados internamente.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é responsável pela normatização e certificação técnica. A NBR 5419, norma para proteção contra descargas atmosféricas, sofreu uma alteração em 2015, passando a ter quatro capítulos, aumentando sua complexibilidade, assim como sua precisão na proteção de sistemas elétricos; apesar disso, sistemas eólicos não são uma pauta específica da norma; assim, é indicado que projetos de proteção eólicos no Brasil sejam baseados na norma internacional IEC 61400-24.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo geral

Analisar os efeitos de sobretensão causados por descargas atmosféricas, com objetivo de expor as principais variáveis e métodos envolvidos na proteção do aerogerador.

##### 1.4.1.1 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- pesquisar bibliografia a respeito de geradores eólicos, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento;

- analisar as normas relativas à proteção, como a norma brasileira ABNT NBR 5419-2015 e a norma europeia IEC 61400-24;
- levantar parâmetros pertinentes ao estudo de descargas atmosféricas atingindo aerogeradores;
- identificar os principais problemas causados pela descarga atmosférica nos aerogeradores;
- simular um caso de sobretensão em aerogeradores;
- analisar resultados da simulação, apontando os principais efeitos da sobretensão causada por descargas atmosféricas no gerador e transformador da turbina eólica, e sua relação com os valores da resistência de aterramento.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Entre as fontes alternativas de energia, a eólica é a forma de geração que ganhou bastante destaque, com uma parcela que representa cerca de 8,3% da matriz energética brasileira. Recentemente, o Brasil tornou-se o 10º maior gerador dessa fonte de energia, segundo o Ranking Mundial de Energia e Socioeconômica (BRASIL, 2015).

O crescente desenvolvimento de tecnologias para a geração eólica com estruturas cada vez mais altas utilizadas para a captação de ventos, estas se tornaram cada vez mais suscetíveis a descargas elétricas atmosféricas.

Com usinas cada vez mais afastadas dos grandes centros, faz-se importante aumentar a confiabilidade na geração, tornar as usinas energeticamente eficientes e seguras, a fim de evitar interrupção no funcionamento dos geradores e reparos, provavelmente dispendiosos, atraindo cada vez mais investimentos para o setor.

O estudo possui relevância por propor uma análise qualitativa das variáveis envolvidas quanto à segurança e confiabilidade da energia produzida por um parque eólico, com sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Além disso, o estudo ajudará a entender melhor as influências desse fenômeno natural nos parques eólicos, com o intuito de minimizar os efeitos danosos deste no sistema elétrico.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, o estudo deu-se através de pesquisas bibliográficas em livros e artigos relacionados a influências de descargas atmosféricas em aparelhos elétricos, comportamento do sistema ao ser atingido por descargas elétricas, e efeitos da sobretensão, para criar uma base teórica para compreender, analisar, e realizar o trabalho.

Após a fundamentação teórica, será feito o levantamento de dados sobre as características das descargas atmosféricas para uma melhor compreensão sobre esse fenômeno natural imprevisível e suas consequências. Utilizando o software *Alternative Transient Program* (ATP), serão feitas as modelagens digitais do aerogerador e dos componentes do sistema, no qual este está inserido, e a simulação da DA sobre o mesmo, com o objetivo de obter dados durante e após o sistema ser atingido por esse fenômeno, para analisar seus efeitos.

A próxima etapa consiste em compreender os dados e interpretá-los, para então propor sistemas de proteção com resistência de aterramento com valores que possam amenizar os efeitos de indução do surto, além de levantar valores máximos permitidos de isolamento dos aparelhos, e compará-los com valores da simulação, de modo a tornar o sistema mais seguro e confiável.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está dividido na disposição de capítulos a seguir.

- Capítulo 1: INTRODUÇÃO
- Capítulo 2: TEORIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E EXPOSIÇÃO DO AEROGERADOR A RAIOS.
- Capítulo 3: PROTEÇÃO DE COMPONENTES DO AEROGERADOR CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
- Capítulo 4: ATERRAMENTO E SEGURANÇA PESSOAL
- Capítulo 5: SIMULAÇÃO DE SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADOR
- Capítulo 6: CONCLUSÕES
- REFERÊNCIAS

## **2 TEORIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E EXPOSIÇÃO DO AEROGERADOR A RAIOS.**

### **2.1 TEMPESTADES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Uma tempestade é uma perturbação produzida em nível atmosférico; sua origem é provinda no choque de massas de ar de diferentes temperaturas, acompanhada por fenômenos elétricos que causam formação de nuvens carregadas eletricamente, ventos violentos, e súbita condensação (chuva) que, em certas ocasiões, pode precipitar em estado sólido (granizo), causando instabilidade do meio ambiente.

#### **2.1.1 Processo de formação**

Tempestades formam nuvens carregadas eletricamente de maneira homogênea, que podem dar origem a descargas atmosféricas; o potencial elétrico podem alcançar cem milhões de volts com um campo eletrostático resultante de 10 kV/m<sup>2</sup>. A maneira como as nuvens de tempestades se formam depende de vários fatores, principalmente da umidade do ar e da instabilidade da atmosfera, que é a variação de temperatura com a altura. A temperatura na atmosfera, a partir do solo, diminui até certa altura, denominada como tropopausa. A altura da tropopausa depende principalmente da latitude geográfica: próximo ao equador ela está situada a cerca de 16 quilômetros de altura; em altas latitudes ela está por volta de dez quilômetros. A atmosfera costuma ser considerada como instável quando a diminuição da temperatura que está relacionada com a altura for igual ou maior do que seis graus Celsius por quilômetro. Só que isso depende do aquecimento solar, das características do relevo, e das frentes frias (PLONUS, 1994).

A nuvem de tempestade isolada tem uma duração média de uma a duas horas. Enquanto não há queda de água, ela passa por três fases diferentes: desenvolvimento, amadurecimento, e dissipativo; cada uma dessas fases tem uma duração de 20 a 40 min (SILVA, 2007).



### 2.1.2 Fase de desenvolvimento

Nesta fase, o ar quente e úmido sobe a partir das camadas inferiores da atmosfera; como resultado desta subida, o ar é arrefecido e condensado, formando uma nuvem chamada "Cúmulo". A ascensão do ar pode surgir devido às condições instáveis na atmosfera. O ar ascendente é disposto em camadas na atmosfera; sua densidade é inversamente proporcional a sua temperatura, ou seja, quanto mais denso, menor sua temperatura.

Se o processo que mantém a corrente de ar ascendente for contínuo, a nuvem mantém o seu crescimento e a formação de cristais de gelo para alcançar uma temperatura de zero grau Celsius. A nuvem pode crescer até a área da tropopausa (transição entre a troposfera e a estratosfera); no limite da troposfera, a temperatura é mantida constante; isso impede condições térmicas de convecção do ar e, assim, mantém o ar confinado no clima da troposfera. Nestas condições, a nuvem (conhecida nesta fase por "Cumulonimbus") começa a produzir as primeiras precipitações, e surgem as primeiras descargas elétricas entre regiões da nuvem (PIERGALLINI, 2008).

### 2.1.3 Fase de amadurecimento

O crescimento vertical atinge o seu máximo, e o topo da nuvem fica achatado com a forma característica de uma bigorna. Usualmente isto acontece quando o ar ascendente encontra uma inversão de temperatura estável (por exemplo, o ar mais quente da tropopausa). Os ventos predominantes em altitude começam a espalhar Cirrus (categoria de nuvens de alta altitude) a partir do topo da nuvem. As bases dianteiras ficam mais baixas, e os relâmpagos começam a ocorrer em toda a extensão da nuvem.

No interior da nuvem, a turbulência é intensa e irregular, com equilíbrio entre correntes ascendentes e descendentes. O peso das partículas de precipitação já é suficiente para contrariar as correntes ascendentes e começam a cair, arrastando o ar em volta. À medida que as partículas de precipitação caem nas regiões mais quentes da nuvem, o ar seco presente no ambiente entra na nuvem, e pode originar a evaporação dessas partículas. A evaporação esfria o ar, tornando-o mais denso e pesado.

É todo este ar frio que cai através da nuvem com a precipitação que forma a corrente descendente de ar que, quando bate na superfície, pode se espalhar para os lados, formando

uma frente de rajada que vai deslocando e substituindo o ar mais quente da superfície. Nesta fase, a trovoada produz ventos fortes, relâmpagos, além de forte precipitação.

#### 2.1.4 Fase de dissipação

A nuvem começa a se espalhar para os lados em camadas, e as correntes frias descendentes tornam-se predominantes. O ar frio substitui o ar mais quente da superfície, desligando os movimentos ascendentes dentro da trovoada. Nesta fase, só há correntes descendentes fracas e fraca precipitação.

As tempestades são mais comuns no período da tarde, quando o aquecimento diurno da Terra pelo Sol deixa a parte inferior da troposfera instável. Às vezes, algumas tempestades podem se formar quando a atmosfera superior torna-se fria, devido à aproximação de uma perturbação de ar superior. Neste caso, as tempestades podem se formar a qualquer hora do dia, mesmo quando não tenha havido aquecimento diurno da terra.

Uma exigência absoluta, no entanto, é que tem que haver vapor de água suficiente para alimentar a tempestade. Este é o combustível para ela. Enquanto a tempestade usa esse combustível, ele é convertido em precipitação (BRASIL ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA, Tempestades).

## 2.2 O RAIOS

Uma vez que a tempestade de raios é desenvolvida através da alteração das condições atmosféricas, provocadas pela variação de temperatura e da pressão diretamente envolvida na separação de cargas na nuvem, a base da nuvem influenciada pela carga, atrai da superfície do solo uma quantidade de cargas elétricas equivalentes, porém de polaridade oposta.

À medida que a tempestade aumenta a sua intensidade, a separação entre cargas permanece contínua, até um ponto em que o ar não pode desempenhar a sua função de isolante (barreira do dielétrico do ar se rompe), resultando no surgimento de um intenso campo elétrico entre a nuvem e a terra. Esse campo elétrico chega a valores extremamente altos, que pode transformar o ar de isolante em condutor, possibilitando que cargas elétricas comecem a se mover da nuvem para o solo (O RAIOS UFRGS, 2003).

Essa movimentação das cargas em direção ao solo começa com um “líder”, assim chamado por liderar (dar início à movimentação das cargas para fora da nuvem), seguido por um intenso raio de retorno com uma grande luminosidade.

### 2.2.1 Tipos de raio

De acordo com a origem e destino de um raio, principalmente, há como classificá-los em dois tipos: os intra nuvens e os nuvem-solo.

#### 2.2.1.1 Intra nuvem

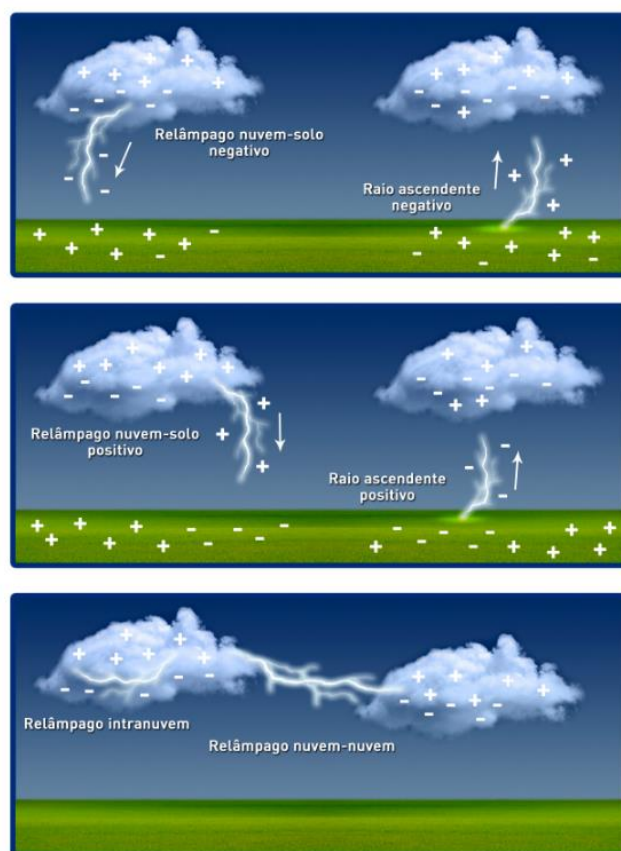
Relâmpagos na nuvem originam-se dentro das nuvens Cumulonimbus e propagam-se dentro (relâmpago intra nuvem) ou fora da nuvem rumo à outra nuvem (relâmpago nuvem-nuvem), ou ainda fora da nuvem em uma direção qualquer (descarga para o ar). Cerca de 70% do total de relâmpagos são do tipo intra nuvem. Embora eles sejam a maioria dos relâmpagos, são menos conhecidos que os relâmpagos no solo, em parte porque eles são menos perigosos, e porque são escondidos da visão humana pela nuvem.

#### 2.2.1.2 Nuvem-solo

Relâmpagos no solo podem se originar dentro da nuvem (relâmpago nuvem -solo) ou no solo (relâmpago solo-nuvem). Mais de 99% dos relâmpagos no solo são relâmpagos nuvem-solo. Em raras ocasiões, relâmpagos nuvem-solo apresentam um canal alargado ou múltiplas interrupções, sendo conhecidos nestes casos como relâmpagos de faixa.

Relâmpagos solo-nuvem são relativamente raros, e geralmente, ocorrem no topo de montanhas ou estruturas altas, como torres.

Os relâmpagos no solo podem também ser classificados em termos do sinal da carga líquida transportada da nuvem para o solo, como relâmpagos negativos ou positivos. Cerca de 90% dos relâmpagos do tipo nuvem-solo ou solo-nuvem que ocorrem em nosso planeta, são negativos (BRASIL ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA, Tipos de Raio). Na Figura 4 pode-se observar o processo de formação de descargas atmosféricas.



**Figura 4: Tipos de raios**

Fonte: INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

## 2.2.2 Tipos de impacto

As descargas atmosféricas podem causar danos e problemas por impacto direto ou indireto sobre qualquer objeto ou estrutura que possa alcançar com sua magnitude.

### 2.2.2.1 Impacto direto

O impacto direto de um raio tem como efeito predominante a destruição física do ponto de impacto. O raio pode causar incêndios, quando o impacto se encontrar em uma região com combustíveis expostos, por exemplo.

### 2.2.2.2 Impacto indireto

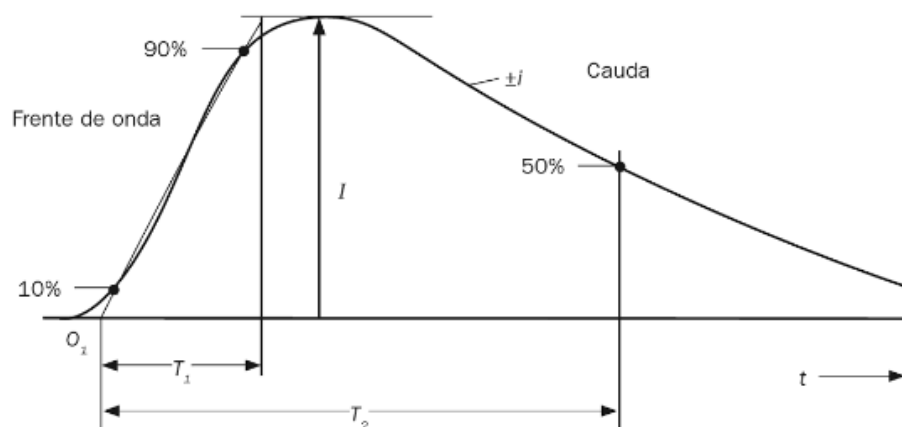
Raios com impacto indireto produzem um campo eletromagnético afastado do ponto de impacto direto; este campo induz sobre sistemas elétricos ou linhas elétricas, uma força eletromotriz, que causa sobretensões ou sobrecorrentes.

### 2.2.3 Características

Estima-se que cada raio tenha cerca de 5 a 7 km de comprimento vertical, e de 8 a 16 km de comprimento na descarga horizontal; apresenta valores entre mil e dez bilhões de joules de energia por descarga, com uma corrente de até 500 kA, e cem milhões de volts. O feixe quase nunca ocorre na forma de uma linha reta, mas sim muitas ramificações à sua disposição. Em 90% das descargas nuvem-solo, a polaridade da descarga é negativa, e em apenas 10% dos casos a polaridade é positiva. Descargas com polaridade positiva geralmente são mais severas, e percorrem uma maior distância.

O raio pode aquecer o ar circundante em suas temperaturas próximo de  $30.000^{\circ}\text{C}$ , e a pressão do ar pode atingir 100 atm. A velocidade de propagação de um raio pode atingir  $1/20$  da velocidade da luz (15.000 km/s).

As correntes de um raio se comportam principalmente de duas maneiras distintas: sendo as de curta duração (menores que  $2\ \mu\text{s}$ ), e as de longa duração (maiores que  $2\ \mu\text{s}$ ) - Figura 5.



**Figura 5 - Relação entre pico de corrente (I) e tempo (t) de um raio**  
 Fonte: IEC 61400-24, "Wind turbines - Part 24: Lightning protection", Ed. 1.0, 2010.

- T1: tempo de frente de onda ( $\mu\text{s}$ )
- T2: tempo de meia cauda de onda ( $\mu\text{s}$ )

- I: Pico de corrente (ampères)

### 2.2.3.1 Parâmetros característicos

Os principais parâmetros característicos de uma descarga atmosférica, para efetuar ensaios e dimensionamento de sistemas de proteção, são os listados a seguir.

#### 2.2.3.1.1 *Valor máximo de pico de corrente*

Este parâmetro representa a magnitude de descarga do raio I, onde seu comportamento aleatório e sua caracterização devem ser realizados de maneira probabilística. Sua ordem de grandeza é de quiloampères.

#### 2.2.3.1.2 *Carga transferida*

A carga transferida da corrente do raio, determina a energia produzida diretamente no ponto de impacto do raio, e em todos os pontos em que a corrente do raio se propaga.

#### 2.2.3.1.3 *Energia específica*

A energia específica  $W/R$  de um raio pode ser caracterizada pela energia gerada pela corrente sobre uma resistência de  $1 \Omega$ . Este valor é expresso em MJ/ $\Omega$  (megajoules por ohm).

#### 2.2.3.1.4 *Nível cerâmico*

Representa o número de raios que atingem a terra por  $\text{km}^2$  no ano. É um parâmetro que permite calcular a incidência de raios em uma determinada região.

#### 2.2.3.1.5 *Polaridade do raio*

Representa o sinal das cargas elétricas predominantes transferidas na descarga atmosférica. Geralmente são elétrons, porém em alguns casos podem ser cargas positivas.

No Quadro 1 mostram-se os principais parâmetros característicos de descargas atmosféricas, usados para dimensionamento de sistemas de proteção contra descarga atmosférica, de acordo com a norma IEC 62305-1.

**Quadro 1 - Parâmetros atuais das descargas atmosféricas para dimensionamento de proteção**

Parâmetros de Corrente	Simbologia	Unidade	Nível de Proteção		
			I	II	III-IV
Pico de Corrente <sup>1</sup>	I	kA	200	150	100
Tempo de parâmetros de corrente <sup>1</sup>	T1/T2	μs/μs	-	10/350	-
Carga <sup>2</sup>	Q	C	300	225	150
Energia específica <sup>2</sup>	W/R	kJ/Ω	10000	5625	2500
Corrente de impulso <sup>3</sup>	di/dt	kA/μs	200	150	100
Tempo de parâmetros de corrente <sup>3</sup>	T1/T2	μs/μs	-	0,25/100	-

Fonte: Norma IEC 62305 -1

Seis dos principais efeitos causados pelas DA estão citadas a seguir.

1. Efeito térmico: é produzido devido ao calor dissipado pelo efeito Joule em elementos percorridos pela corrente gerada pelo raio.
2. Efeito acústico: o som é causado pela onda de choque; a corrente produzida pelo raio expande rapidamente o ar, produzindo um ruído conhecido como “trovão”.
3. Efeito luminoso: resultado de lesões oculares e cegueira temporal das pessoas que se encontram expostas próximas ao raio.
4. Efeito elétrico: devido às derivações e sobretensões, causados pela brusca frente de onda e de corrente, há transientes de alto valor de corrente e tensão, devido a alta frequência da descarga atmosférica.
5. Efeito elétrico indutivo: origina-se devido ao campo eletromagnético criado pela circulação de corrente do raio.
6. Efeito mecânico: recai nos danos causados por elementos afetados com o fenômeno natural.

## 2.3 PERTURBAÇÕES OCASIONADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Em uma instalação elétrica todos os condutores, internos e externos, estão expostos a facilitar o caminho de sobretensões transitórias, provocando assim perturbações na alimentação de todos os sistemas elétricos conectados.

As sobretensões induzidas pelas descargas atmosféricas são efeitos secundários destas, e existem três tipos, listados a seguir.

### 2.3.1 Acoplamento resistivo

Produz-se quando a descarga atmosférica impacta zonas próximas à instalação, causando uma elevação do potencial dos arredores da instalação, afetando o sistema de aterramento, conduzindo correntes transitórias através do sistema elétrico.

### 2.3.2 Acoplamento indutivo

O impacto de uma descarga atmosférica sobre o sistema de proteção contra descarga atmosférica (SPDA), gera um pulso de energia eletromagnética, o qual pode ser absorvido por cabos no interior da edificação com sobretensões.

### 2.3.3 Acoplamento capacitivo

As linhas de alta tensão estão expostas, em geral, ao impacto de descargas atmosféricas, e quando atingidas, parte da energia do raio viaja pelas linhas, e pelo efeito das altas frequências naturais da descarga atmosférica, produzem um acoplamento capacitivo através dos enrolamentos de alta e baixa tensão dos transformadores dos sistemas de potência, provocando faltas nas fontes dos aparelhos eletrônicos mais sensíveis.



## 2.4 A NATUREZA DE DESCARGAS ELÉTRICAS EM AEROGERADORES

Por razões de maximizar os lucros, as turbinas eólicas modernas são preferencialmente colocadas em locais com altas velocidades de vento, como nas regiões costeiras, ou em posições elevadas na paisagem. Tais locais tendem a ter relativamente alta a ocorrência de raios, e, além disso, tendem a serem remotos em termos de acesso à rede de potência elétrica, rede de telecomunicações, e estradas de acesso.

As perturbações operacionais causadas por descargas atmosféricas são proporcionais ao comprimento das linhas. As ameaças de descargas atmosféricas para os aerogeradores podem ser divididas em duas fontes de interferência principais: as descargas atingindo diretamente o aerogerador, chamada assim de “descarga direta”, e a segunda fonte são das descargas atingindo a linha de transmissão, com o surto se propagando até chegar ao aerogerador, chamada de “descarga indireta”.

A natureza da descarga atmosférica que golpeia turbinas eólicas é influenciada pela altura e localização da turbina eólica. A distinção muitas vezes feita em proteção contra raios de estruturas menores do que 60 m, não se aplicam para aerogeradores, devido à sua localização isolada. A proporção de descargas descendentes torna-se significativa para estruturas superiores a 60 m (ERIKSON A, 1984).

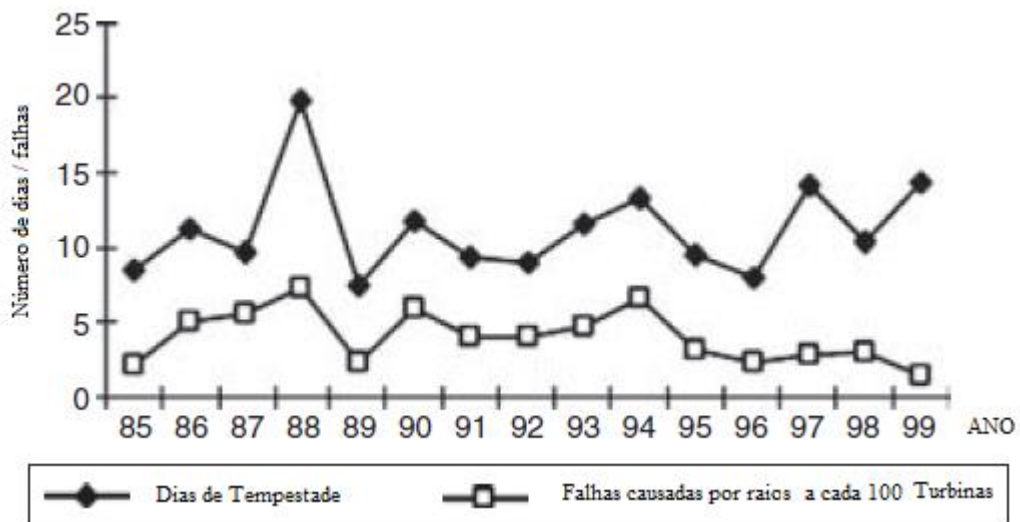
Os parâmetros elétricos para descargas atmosféricas descendentes e ascendentes estão documentados na literatura, e os parâmetros específicos relevantes para a concepção e dimensionamento de sistemas de proteção contra raios para turbinas eólicas, são compilados nas Normas IEC 62305-1 e IEC 61400-24 (ICLP, 1990) (DOOD, 1993) (DIB, 2014).

Os parâmetros de níveis de proteção I, II e III-IV, que são definidos na norma IEC 62305-1, correspondem respectivamente às correntes que aparecem em 98%, 95% e na faixa de 80 a 90% das vezes que o raio atinge o solo, respectivamente. Isso significa que para um nível de proteção I, por exemplo, a norma garante que todos os procedimentos de proteção terão efetividade em 98% dos casos.

## 2.5 ESTATÍSTICAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADORES

Países precursores da utilização de energia eólica como fonte de geração de energia elétrica possuem dados estatísticos importantes a serem analisados, pois ajudam em tomadas de decisão e avaliação estatística para novas instalações.

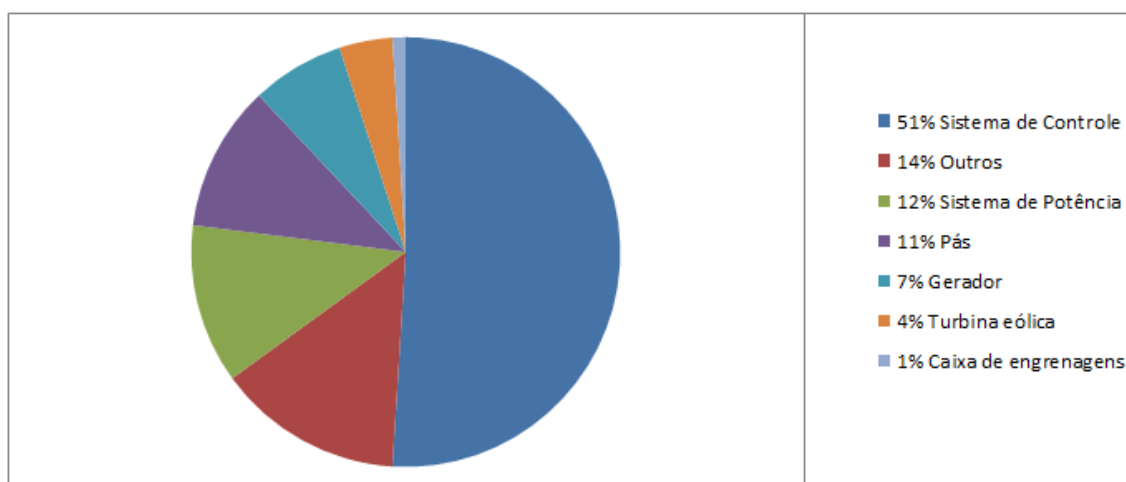
Uma análise feita em parques eólicos da Dinamarca de 1985 até 1999, mostra o número de faltas causadas por descargas atmosféricas nos aerogeradores. Pesquisadores dinamarqueses evidenciaram uma relação entre o risco de descargas atmosféricas e o número de trovoadas na área onde as turbinas eólicas estavam situadas (CIRED, 2009).



**Figura 6 - Relação entre números de tempestades com raios e falhas elétricas em turbinas eólicas.**  
 Fonte: COORAY, 2003, pág. 687

A relação pode ser vista na Figura 6: o número de defeitos causados por descargas atmosféricas é mostrado juntamente com o número de dias de tempestades registradas na Dinamarca nos anos 1985-1999. A média anual de turbinas eólicas danificado por raios no período foi de 4%. A Alemanha, nos anos 1991-1998, a média anual foi de 14 % nas zonas de montanha no sul, enquanto a região mais baixa no norte do país foi de 7,4%, e nas áreas costeiras do norte 5,6 %.

Danos causados por descargas atmosféricas foram relatados para um total de 900 turbinas eólicas na Dinamarca no período de 1990-1999, com a distribuição de componentes danificados mostrados na Figura 7.



**Figura 7 - Distribuição dos danos causados nas estruturas do aerogerador**  
**Fonte: COORAY, 2003, pág. 688**

Pode ser visto que na maioria dos danos, 51%, o sistema de controle foi afetado, 12% no sistema de potência, 7% danos no gerador, e 11% nas pás.

Partes significativas dos danos aos sistemas de energia e de controle são provavelmente devido às descargas que atingem as linhas elétricas e de comunicação, mas a base de dados dinamarquesa não faz distinção entre danos causados por um raio atingindo o aerogerador diretamente ou indiretamente. No entanto, as estatísticas alemãs indicam que 70% dos danos causados nos aerogeradores são causadas por meio das linhas de telecomunicações ligadas ao aerogerador, ou seja, de origem de impacto indireto da descarga atmosférica.

As estatísticas alemãs também mostram que os custos de reparação podem aumentar com o tamanho físico do aerogerador, e mostram que danos nas pás são os mais caros, seguidos por danos ao gerador, devido aos custos relativamente elevados destes componentes, e também devido aos custos de reparação (COTTON, 2000).

No caso das estatísticas dinamarquesas, as turbinas eólicas se encontravam na faixa de potência de 100-300 kW, já consideradas de baixa potência no período da realização desse trabalho; atualmente existem em funcionamento aerogeradores de até 10 MW no local. (COTTON, 2000).

Um estudo Norte Americano de 2015, fez análise estatística e qualitativa quanto aos danos causados por descargas atmosféricas em aerogeradores (N.WILSON, 2013).

A análise baseia-se em 304 incidências de raios que causaram danos às pás dos aerogeradores, sendo necessária reparação significativa. Os danos analisados correspondem a parques eólicos com uma potência total instalada de 997 MW, localizada nos Estados do Texas, Kansas e Illinois, onde a densidade de descargas  $N_g$  está entre dois e oito descargas por

km<sup>2</sup>/ano. O estudo foi realizado por um período de aproximadamente cinco anos, com uma amostra total de 508 aerogeradores.

Portanto, em média, cada turbina eólica experimentou danos devido a raios a cada 8,4 anos. A análise inclui queimaduras, perfurações, e desprendimento de parte da lâmina metálica da estrutura. Note-se que todas as pás de turbinas eólicas eram projetadas e fabricadas antes da publicação da IEC 61400-24.

## 2.6 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RAIOS

Um passo significativo na análise de risco devido às descargas atmosféricas é a obtenção da estimativa da frequência de impactos diretos e indiretos no aerogerador. Esta estimativa é dependente da área de captação da estrutura, da topografia, e do nível de descargas atmosféricas que atingem uma determinada área.

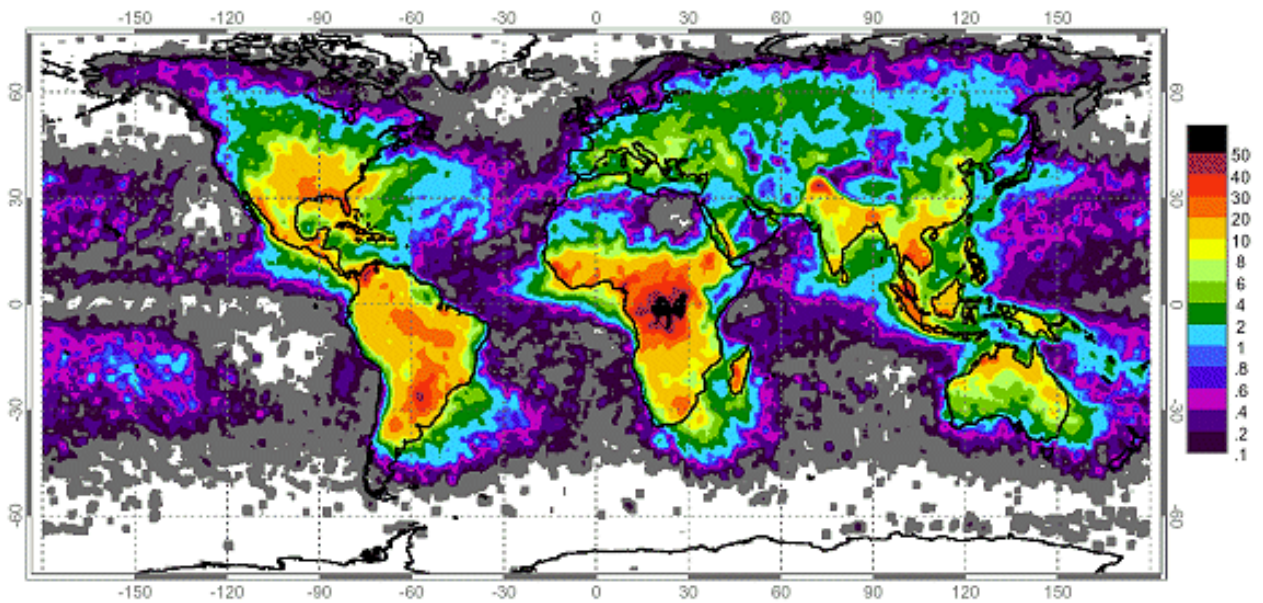
Para avaliar a exposição de aerogeradores, seja sozinho ou em um parque eólico, deve-se determinar qual o nível de proteção mínima contra raios, e implementar uma maneira de garantir a segurança dos subcomponentes do aerogeradores e das pessoas envolvidas no local.

## 2.7 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS

Os parâmetros mais relevantes para a avaliação da frequência de raios são: a densidade de descargas à Terra “Ng”, e a superfície de captação da estrutura; estes permitem utilizar metodologias de proteção, melhorar instalações existentes, e prevenir contra acidentes.

### 2.7.1 Densidade de raios à Terra

É o número de descargas à Terra por quilômetro quadrado no ano “Ng”. Reflete a probabilidade que se tem de um ponto do terreno ou estrutura ser impactado por uma descarga atmosférica; portanto, é um parâmetro cerâmico que permite quantificar a incidência de raios em uma zona – Figura 8.



**Figura 8 - Distribuição global de raios entre 2003 e 2015**  
 Fonte: Observatório da NASA OTD e LIS (*Ligth Image Sensor*)

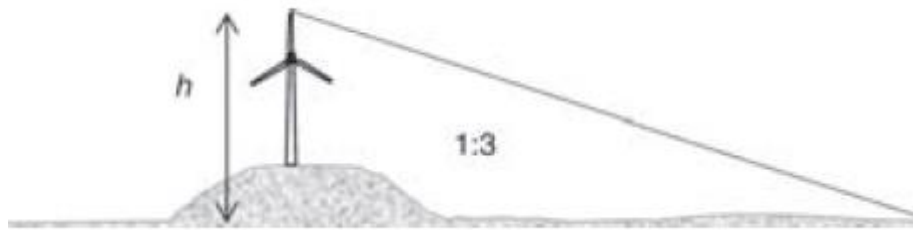
Pode-se observar pela imagem, que o território brasileiro possui um índice que varia de 6 a 15 descargas atmosféricas por km<sup>2</sup> no ano.

## 2.7.2 Superfície de captação

A superfície de captação de uma estrutura é a área do terreno que têm a mesma frequência anual de descargas que as estruturas instaladas.

### 2.7.2.1 Determinação da área de captação de um aerogerador

A norma IEC 61400-24 estabelece que, para estruturas isoladas como aerogeradores, o limite da área de captação equivale à área formada por um raio imaginário, onde o centro é o aerogerador, sendo este raio três vezes maior que a altura do aerogerador (incluindo suas pás na posição mais alta), como mostrado na Figura 9:



**Figura 9- Zona com maior exposição a raios de acordo com a altura h do aerogerador, e variações do terreno.**

Fonte: COORAY, 2003, pág. 689

A área de captação pode ser equacionada da seguinte forma:

$$A = \pi * (3H)^2 \quad (1)$$

A: Área de captação do aerogerador (m<sup>2</sup>)

H: Altura do aerogerador (m)



**Figura 10 - Área de captura de impacto de raios**

Fonte: IEC 61400-24, "Wind turbines - Part 24: Lightning protection", Ed. 1.0, 2010.

Na Figura 10 observa-se a visão superior da Figura 9, mostrando a área com maior probabilidade de impactos de descargas atmosféricas ao redor do aerogerador.

#### 2.7.2.2 Determinação da área de captação aplicada a parques eólicos

Em parques eólicos, as áreas de captação dos aerogeradores adjacentes podem sobrepor-se; nesta situação, as áreas de captação devem dividir-se entre os aerogeradores que compartilham a mesma área; para obter-se o equivalente de todo parque eólico, pode-se optar

por diferentes métodos, como o método da IEC 61400-24; este normaliza o sistema de proteção de aerogeradores em todo espaço da União Europeia.

#### 2.7.2.2.1 Método IEC 61400-24

Este método aplica a somatória das áreas de captação individuais dos aerogeradores para obter uma área equivalente do parque eólico da seguinte maneira:

$$A = \sum_{i=1}^n 9\pi H_i^2 \quad (2)$$

sendo

- A: Área da captura equivalente (m<sup>2</sup>)  
 H: Altura do aerogerador (m)  
 n: Número de aerogeradores

## 2.8 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO DO AEROGERADOR CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O número anual de descargas atmosféricas que podem colocar em perigo um aerogerador ou um parque eólico, se divide nas avaliações, a seguir.

### 2.8.1 Avaliação do número médio anual de descargas atmosféricas sobre o aerogerador.

A frequência dos impactos de raios diretos em um aerogerador pode ser obtida com a seguinte equação:

$$Nd = Ng * A * Cd * 10^{-6} \quad (3)$$

sendo

- Nd: Número médio de impactos diretos de raios no aerogerador por ano  
 A: Área de captura equivalente (m<sup>2</sup>)  
 Cd: Fator médio ambiental

**Quadro 2 - Fator Médio Ambiental**

<b>Fator Médio Ambiental</b>	<b>Cd</b>
Terreno Plano	1
Terreno Elevado	2
Zona próxima ao Mar	3 à 5

Fonte: NFPA 780

### **Avaliação do número médio anual de impactos diretos toleráveis na estrutura do aerogerador**

O número de impactos diretos toleráveis na estrutura do aerogerador é baseado na frequência do raio que coloca em risco a estrutura, levando em conta fatores como: tipo de construção, conteúdo da estrutura, e número médio de pessoas expostas dentro do aerogerador em um dado momento.

O número de impactos diretos toleráveis na estrutura do aerogerador pode ser estimado da seguinte forma:

$$N_c = \frac{0,0015}{C} \quad (4)$$

$$C = C_2 * C_3 * C_4 * C_5 \quad (5)$$

sendo

$N_c$  Número de impactos diretos toleráveis na estrutura ( $\text{ano}^{-1}$ )

$C$  Parâmetro de riscos determinados pelos coeficientes de correção

Se  $N_d < N_c$  o sistema de proteção contra descargas atmosféricas pode ser opcional.

Se  $N_d \geq N_c$  o sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve ser necessariamente instalado.

$C_2, C_3, C_4, C_5$ : coeficientes a seguir, nos quadros 3, 4, 5 e 6.

**Quadro 3 - Coeficiente devido ao material da estrutura**

<b>Coeficientes Estruturais (C2)</b>			
Metal	0,5	1	2
Não metálica	1	1	2,5
Inflamável	2	2,5	3

Fonte: NFPA 780



**Quadro 4 - Coeficiente devido ao material interno inflamável da estrutura**

<b>Inflamabilidade da Estrutura</b>	<b>C3</b>
Baixa	0,5
Normal	1
Moderada	2
Alto	3
Explosivo	4

**Fonte: NFPA 780**

**Quadro 5 - Coeficiente devido a ocupação da estrutura**

<b>Ocupação da Estrutura</b>	<b>C4</b>
Ocupada	0,5
Normalmente ocupada	1
Difícil de evacuar (risco de pânico)	3

**Fonte: NFPA 780**

**Quadro 6 - Coeficientes devido aos efeitos do raio**

<b>Consequência do Raio</b>	<b>C5</b>
Sem necessidade de continuidade do serviço e nenhuma consequência no entorno	1
Necessidade de continuidade do serviço e nenhuma consequência no entorno	5
Consequência no entorno	10

**Fonte: NFPA 780**

## 2.8.2 Nível de eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas

O propósito de escolher um Nível de Proteção (LPZ), é reduzir os riscos de danos causados por descargas atmosféricas por impactos diretos na estrutura do aerogerador, de acordo com um grau de segurança baseado nos parâmetros do raio.

Os níveis de proteção em função do nível de segurança se classificam em:

- LPZ1: máxima segurança, onde se considera as condições mais restritivas e seguras para dimensionamento, posicionamento, e seleção dos elementos de proteção contra descargas atmosféricas.
- LPZ2: segurança alta.
- LPZ3: segurança média.
- LPZ4: segurança baixa.

A eficiência mínima do sistema de proteção pode ser definida pela seguinte equação:

$$E \geq 1 - \left( \frac{Nc}{Nd} \right) \quad (6)$$

sendo:

E: Eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas

Nd: Número anual médio de impactos de raios no aerogerador (ano<sup>-1</sup>)

O nível de eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas estabelece o nível de proteção LPZ correspondente, determinado pela norma IEC 62305-1.

**Quadro 7 - Eficiência do Nível de Proteção**

<b>Valores de eficiência e níveis de proteção (ZP)</b>	
<b>E</b>	<b>Nível de proteção</b>
E > 0,98	I, com medidas adicionais
0,95 < E < 0,98	I
0,90 < E < 0,95	II
0,80 < E < 0,90	III
0 < E < 0,80	IV
E < 0	Sem proteção

**Fonte:** IEC 62305-1, "*Protection against lightning Part 1: General principles*", Ed. 2.0, 2010.

### **3 PROTEÇÃO DE COMPONENTES DO AEROGERADOR CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Como a maioria das descargas atmosféricas são atraídas por objetos mais altos, a localização das instalações de um parque eólico constitui uma área favorável para impactos de descargas atmosféricas, onde a estrutura do aerogerador se transforma em um grande condutor, que pode levar a carga elétrica do raio até seus subcomponentes, causando severos danos.

Na maioria dos casos, as partes mais vulneráveis do aerogerador, que são percorridos por uma corrente significativa, são os subcomponentes como: pás do rotor, instrumentos meteorológicos, componentes estruturais, equipamentos elétricos. As áreas internas, assim como as externas do aerogerador, são classificadas de acordo com a zona de proteção LPZ, que garantem o nível de proteção requerido.

A norma IEC 61400-24 descreve de maneira geral, a metodologia para proteção contra descargas atmosféricas dirigidas ao aerogerador; esta metodologia determina o posicionamento, dimensão e seleção dos elementos de proteção, de acordo com o nível LPZ selecionado previamente.

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) devem constituir-se e serem planejados para funcionar como um componente natural do aerogerador, de acordo com as novas tecnologias e normas vigentes.

#### **3.1 PARTES ELEMENTARES DO AEROGERADOR**

Os aerogeradores possuem componentes elétricos e mecânicos. Especificamente, o rotor extrai energia cinética do vento e a converte em energia mecânica de rotação; porém, a conversão de energia mecânica em elétrica acontece no gerador. A seguir há detalhes dos componentes que compõem a turbina eólica e sua estrutura.

##### **3.1.1 Componentes de captação**

- Rotor: encontra-se unido ao eixo principal; inclui o cubo e as pás.
- Pás: são dotadas de desenho aerodinâmico que captam a força do vento e transmitem sua potência ao cubo.

- Cubo: peça de união entre as pás e o eixo principal; portanto, é o transmissor de força do vento ao interior da Nacele; dentro do cubo, podem existir certos elementos mecânicos que permitem variar o ângulo das pás.
- Nacele: ver item 3.1.5.

### 3.1.2 Componentes de transmissão

- Eixo de baixa velocidade: é o eixo que acopla o cubo do rotor ao multiplicador; seu giro de operação lento é de aproximadamente 30 rpm; possui sistema hidráulico para atuação de freios aerodinâmicos.
- Eixo de alta velocidade: permite o funcionamento do aerogerador. Seu giro tem velocidade aproximada de 1500 rpm; possui um freio de disco mecânico para emergências.
- Caixa multiplicadora: permite que o eixo de alta velocidade gire mais rapidamente que o eixo de baixa velocidade, utilizando sistema de engrenagens (multiplicador de engrenagens), ou polias dentadas (multiplicador de polias dentadas), fazendo assim o aerogerador trabalhar de maneira a gerar energia elétrica no gerador elétrico no interior da Nacele.

### 3.1.3 Componentes de orientação

- Sistema de orientação e rotação: a Nacele rotaciona a parte superior da torre, mediante um sistema de controle e orientação de rotação ativa, construído com atuadores elétricos, com a finalidade de fazer o rotor estar sempre em posição transversal à direção do vento; a orientação para o aerogerador rotacionar, vem de alguns sensores localizados na Nacele.
- Anemômetro e cata-vento: sensores utilizados para medir a velocidade e direção do vento, respectivamente; os registros de ambos permitem controlar a operação do aerogerador, e encontram-se na parte superior externa da Nacele.

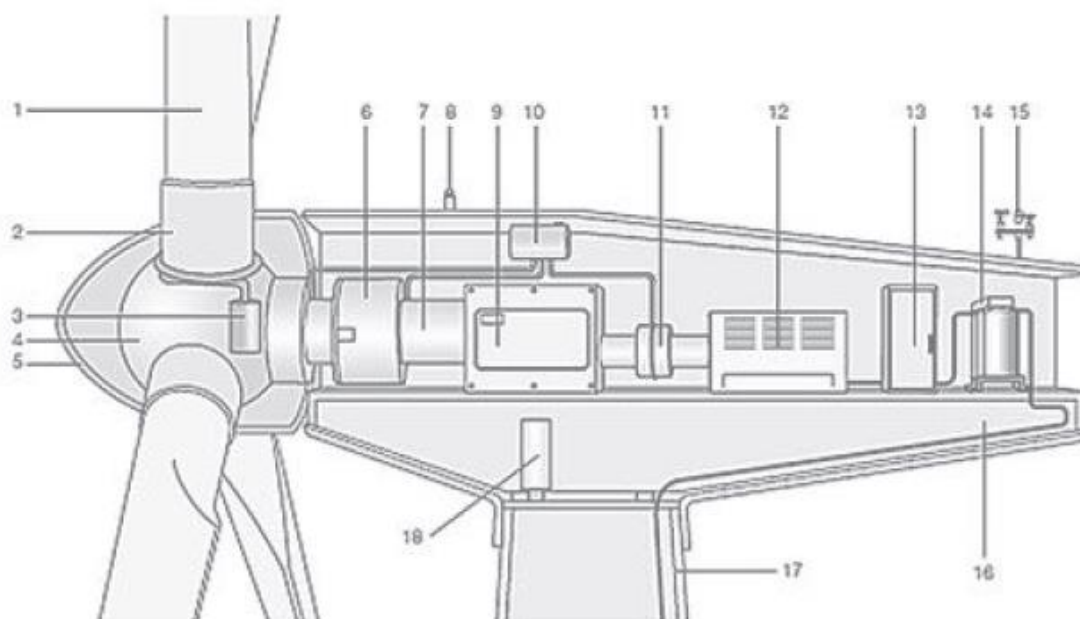
### 3.1.4 Componentes de geração

- Gerador: converte energia mecânica em elétrica; desta forma, induz f.e.m.; geralmente se utilizam geradores síncronos.
- Transformador: a potência elétrica que é entregue pelo gerador é de baixa tensão; o transformador eleva esta tensão para conexão com a rede de distribuição de média tensão (1,0 a 36,2 kV).

### 3.1.5 Componentes Estruturais

- Nacele: região localizada atrás das pás onde se encontra a caixa de multiplicação, eixo principal, sistema de controle, gerador, freio, e mecanismos de rotação da Nacele; a Nacele pode girar em torno da torre por meio de uma roda dentada, para permitir a orientação do aerogerador em relação ao vento.
- Torre: A torre tem função estrutural de suportar a Nacele e o rotor.
- Fundação: tem objetivo de manter a verticalidade da estrutura; absorve as tensões mecânicas e transmite ao terreno.

A seguir, na Figura 11, há a representação de um aerogerador e suas principais partes constituintes.



**Figura 11 Componentes do aerogerador**  
**Fonte: (2016) “Principales elementos de un aerogenerador”**

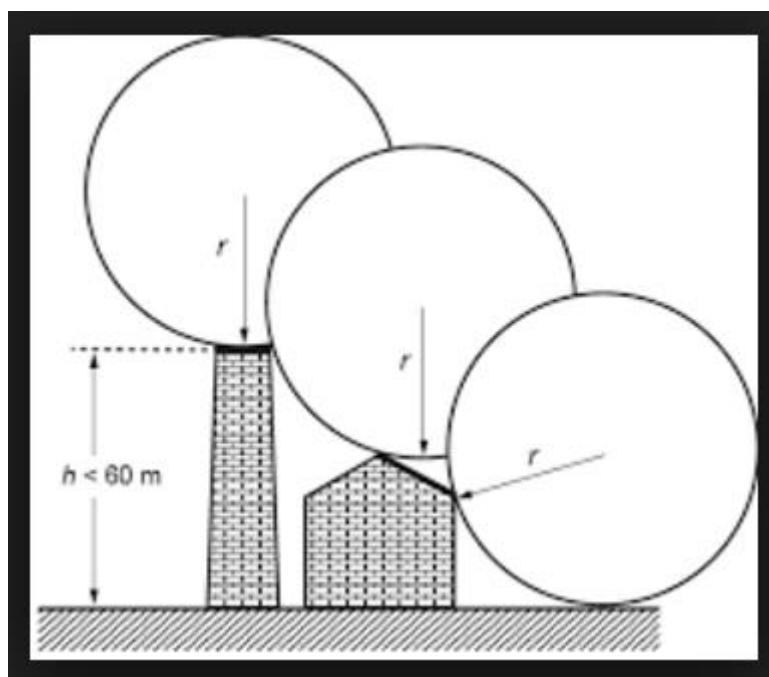
- 1- Pás do rotor
- 2- Suporte das pás
- 3- Atuador do ângulo de passo
- 4- Cubo do rotor
- 5- Cobertura de proteção
- 6- Suporte principal
- 7- Engrenagens
- 8- Luzes de sinalização aérea
- 9- Caixa multiplicadora de velocidade
- 10- Dispositivos hidráulicos de refrigeração
- 11- Freios mecânicos
- 12- Gerador
- 13- Conversores
- 14- Transformador
- 15- Anemômetro
- 16- Estrutura da Nacele
- 17- Torre de Suporte
- 18- Mecanismos de atuação e orientação

### 3.2 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE IMPACTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NAS ESTRUTURAS DO AEROGERADOR

Para estabelecer os pontos de impacto do raio em uma estrutura, será utilizado o “Método da Esfera Rolante” MER, que permite identificar as partes mais vulneráveis de uma estrutura em relação às descargas atmosféricas.

#### 3.2.1 Método da esfera rolante

O método da esfera rolante provém do modelo eletrogeométrico, onde se assume que o líder descendente do raio que poderá atingir a edificação tem a forma de uma esfera de raio  $r$ , conforme a Figura 12:



**Figura 12 - Método da esfera rolante**  
Fonte: Modena, 2015

A aplicação do método da esfera rolante ao rodar uma esfera imaginária sobre uma estrutura é em todas as direções. Todos os pontos de contato da esfera com a estrutura requerem proteção. Este método é o mais universal, é recomendado para casos complicados devido à geometria da estrutura.

### 3.2.1.1 Raio da esfera rolante

O ponto de menor distância entre o vértice da descarga descendente e a estrutura se encontra a uma distância igual ao raio da esfera rolante.

A norma EIC 61024-1 atribui o raio da esfera rolante por meio da seguinte equação:

$$R = 10 * I^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

sendo:

R: Raio da esfera rolante (m)

I: Valor da corrente de retorno que se produz da conexão dos líderes ascendentes e descendentes da descarga atmosférica (kA)

O valor da corrente do raio da esfera rolante, de acordo com o nível de proteção, corresponde aos parâmetros estabelecidos na norma IEC 62305-1.

**Quadro 8 - Valores mínimos de r em função do LPZ e do valor mínimo da corrente do raio**

Critério de Captação			LPZ			
	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Raio da Esfera Rolante	R	m	20	30	45	60

Fonte: IEC 62305-1, "Protection against lightning Part 1: General principles", Ed. 2.0, 2010.

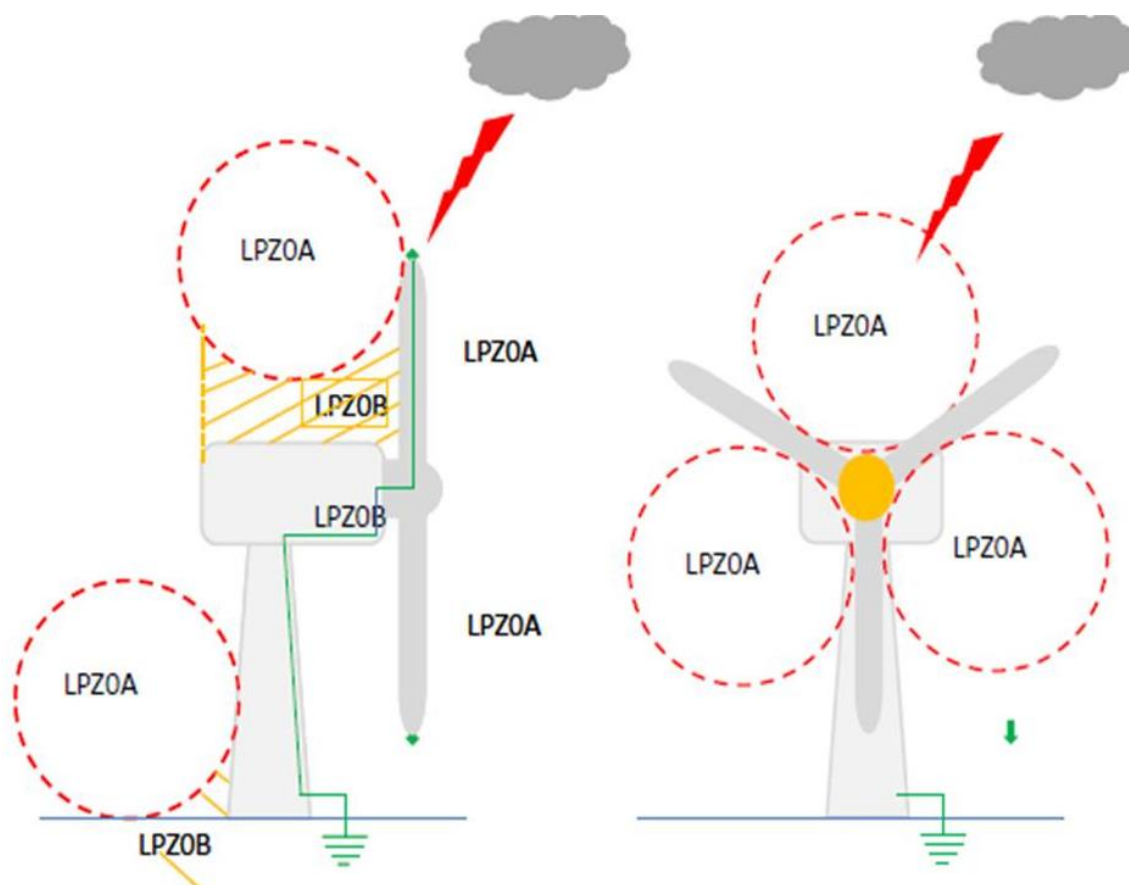
### 3.3 ZONAS DE PROTEÇÃO APLICADAS AO AEROGERADOR

As zonas de proteção contra raios LPZ garantem proteção e redução gradual da corrente e sobretensões transitórias causados pelo impacto do raio no aparelho ou estrutura, em um ambiente livre de perturbações eletromagnéticas.

Aplicando o método da esfera rolante na estrutura do aerogerador, podem-se identificar as áreas expostas a uma descarga atmosférica, com uma grande variação de trajetórias.



Considerando a movimentação das pás do aerogerador em constante movimento, a localização das esferas rolantes se torna variável. A Figura 13 mostra a aplicação do método para posição mais alta do aerogerador. (DEHN BLITZPANER, 2007). No tópico 3.3.1 serão descritos como são feitas as divisões em zonas de proteção de acordo com modelo eletrogeométrico.



**Figura 13 – Representação do modelo eletrogeométrico em um aerogerador genérico. Pontos onde a esfera toca a estrutura são considerados pontos onde é possível o impacto por descarga direta.**

Fonte: Risco de descargas atmosféricas nas torres eólicas, 2016.

### 3.3.1 Divisão de LPZ

As LPZ determinam a sensibilidade que os componentes estão dispostos em uma determinada zona. É conveniente dividir a estrutura do aerogerador em diferentes áreas que representam zonas de proteção LPZ, as quais definem o entorno eletromagnético da descarga atmosférica, conforme Figura 14.

Em muitos casos, a divisão em zonas de proteção contra descargas atmosféricas depende da forma geométrica do aerogerador, e da disposição de aparelhos. O objetivo é

garantir que a LPZ proporcione uma proteção suficiente confiável a todos componentes da estrutura em uma área específica.

De acordo com a norma IEC 62305-1, pode-se definir e dividir as zonas de proteção entre exteriores e interiores à estrutura da maneira a seguir.

#### 3.3.1.1 Zona exterior

- LPZ 0: zona em que o risco se deve a um campo eletromagnético de descarga, no qual os sistemas internos podem ser submetidos, em totalidade ou em parte, pela corrente de impulso do raio; a zona LPZ 0 pode se dividir em duas partes: LPZ 0A e LPZ 0B.
- LPZ 0A: zona em que o risco se deve a descarga direta do raio e ao campo eletromagnético induzido; os sistemas internos a esta zona podem estar expostos em totalidade a uma grande parte do impulso da corrente do raio.
- LPZ 0B: zona protegida contra descargas atmosféricas diretas, em que o risco é devido ao campo eletromagnético induzido; os sistemas internos desta zona podem estar expostos a uma parte da corrente do raio.

#### 3.3.1.2 Zona interior

- LPZ 1: zona em que o impulso de corrente do raio está limitado pela distribuição de si mesmo e pelo DPS (dispositivo de proteção contra surtos); a instalação de um sistema de proteção pode reduzir o campo eletromagnético induzido.
- LPZ 2... N7: mesmo critério que para a LPZ 1, porém conforme mais divide-se a área interna, assume-se que a área mais interior terá menor chance de sofrer interações com a descarga atmosférica e seus efeitos.

Abaixo é possível observar a representação de uma divisão genérica da estrutura dos aerogeradores em zonas de proteção, segundo o critério da norma IEC 62305-1.

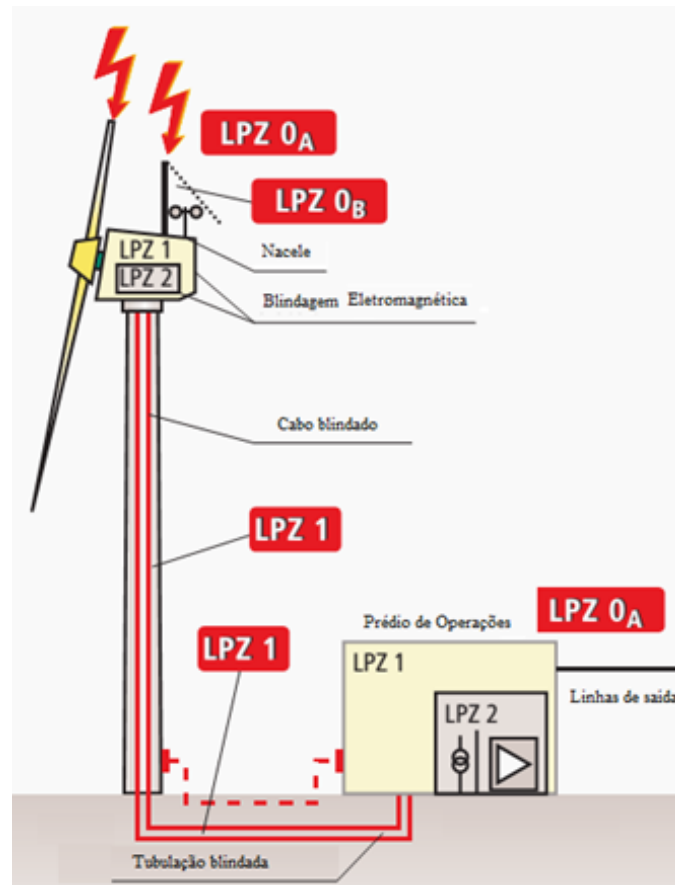


Figura 14- Zonas de proteção.

Fonte: DEHN – *Lightning protection guide* (Guia de proteção contra raios)

### 3.4 PROTEÇÃO DE COMPONENTES DO AEROGERADOR

O conceito de proteção aplicado na norma IEC 61400-24 pode ajudar na seleção da proteção efetiva da estrutura. As principais funções de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas se resumem em:

- interceptação das descargas diretas do raio através de um sistema de captação;

- sistema de condução da descarga direta até o sistema de aterramento por meio de condutores, agentes externos de proteção, e componentes naturais do aerogerador;
- distribuição da corrente no terreno através da malha de aterramento;
- prevenção de descargas perigosas na estrutura interna do aerogerador com conexões equipotenciais.



**Figura 15 - Raios atingindo aerogeradores no Parque Eólico Central de Kansas, EUA.  
Fonte: N. WILSON, 2013**

Os componentes individuais de proteção contra descargas atmosféricas devem estar conectados entre si de maneira adequada; isto assegurará que, em caso de uma descarga atmosférica atingir a estrutura, a correta disposição e escolha dos componentes de proteção minimizarão qualquer dano potencial. Na Figura 15 há a foto de aerogeradores sendo atingidos por descargas atmosféricas no Parque Eólico Central do Kansas, nos Estados Unidos da América.

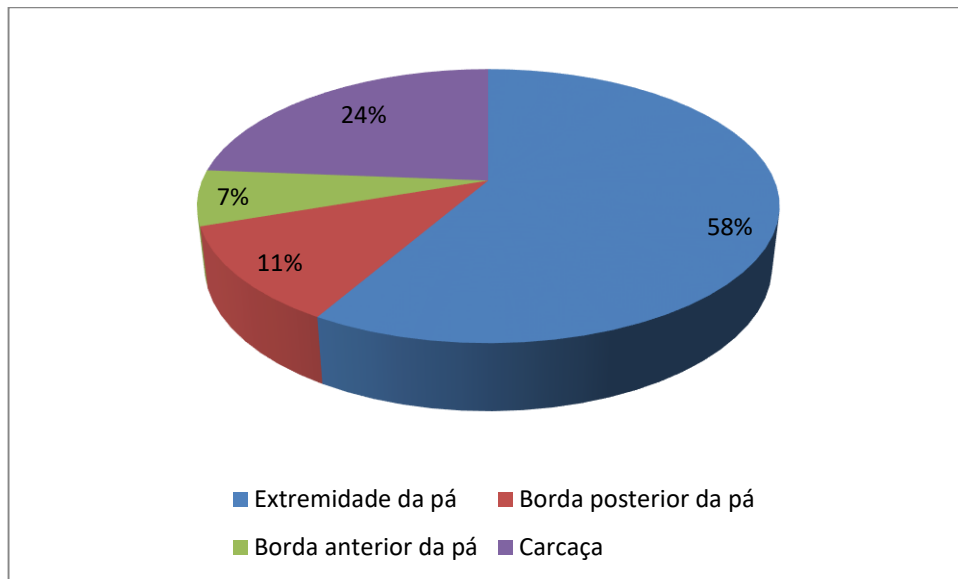
#### 3.4.1 Pás do rotor

As pás representam a parte mais alta do aerogerador, e, portanto são as partes mais expostas de toda estrutura; por isso, as pás são consideradas partes extremamente importantes a serem protegidas contra raios.

Danos relacionados a descargas atmosféricas são uma das preocupações mais importantes para a indústria eólica, e uma das principais razões de manutenção ou troca de partes afetadas nos aerogeradores.

#### 3.4.1.1 Danos nas pás

Na Figura 16 observa-se a distribuição de tipos de danos causados pela descarga atmosférica nas pás do aerogerador.



**Figura 16 - Divisão dos danos causados por raios nas pás de aerogeradores**  
**Fonte: YOKOYAMA, 2011**

A Figura 16 revela que 58,6% dos danos ocorram nas extremidades da pá, seguido por 23,6% sobre a carcaça e 17,8% entre as bordas anterior e posterior da pá.

Os danos causados por descargas atmosféricas experimentados nas pás do aerogerador têm sido classificados (YOKOYAMA, 2011) em quatro tipos, de acordo com a aparência e gravidade. Os tipos de danos compreendem: delaminação, descolamento, separação da carcaça e separação da ponta.

- **Delaminação:** a delaminação consiste em danos na estrutura da lâmina, em que as camadas do laminado são separadas uma da outra conforme mostrado na Figura 17. É normalmente causada pela pressão local e rápida expansão da descarga atmosférica. A delaminação é acompanhada de queimaduras no laminado e em torno do ponto onde o raio atingiu a lâmina.



**Figura 17 - Exemplo de dano por delaminação em aerogeradores**  
Fonte: N. WILSON, 2013

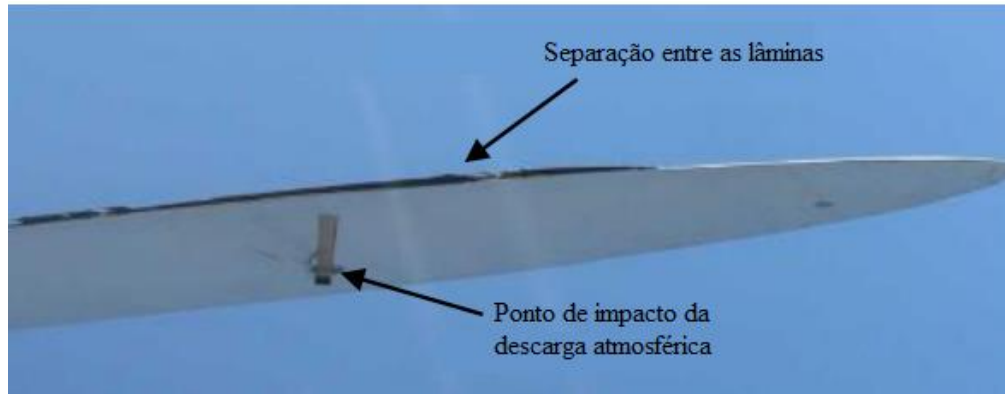
- Descolamento: consiste em uma separação localizada das bordas superior e inferior da pá. O ponto de impacto da descarga atmosférica é muitas vezes localizado próximo, mas não na área de descolagem, o que sugere que a causa da descolagem é a expansão do ar no interior da lâmina devido ao calor gerado pela descarga, possivelmente combinada com a vaporização de umidade condensada presa dentro pá. As pás que sofrem descolagem geralmente são acompanhadas de um certo grau de delaminação - Figura 18.



**Figura 18 - Exemplo de dano por descolamento em aerogeradores**  
Fontes: WETZEL, 2009

- Separação da carcaça: consiste de vários metros de um ou de ambos os lados da carcaça laminada da pá separadas. As rotações das pás combinadas com as fortes rajadas de vento favorecem a separação do laminado constituinte da pá

do aerogerador. Este tipo de dano não ocorre com frequência. O ponto de separação pode ocorrer a vários metros de distância do ponto de impacto da descarga atmosférica na pá do aerogerador - Figura 19.



**Figura 19 - Exemplo de dano por separação entre as lâminas das pás em aerogeradores**  
Fonte: N. WILSON, 2013

- Separação da ponta: O descolamento de ponta é o mais crítico caso de danos, onde vários metros da lâmina constituinte da pá se separam. A descarga atmosférica prejudica severamente o laminado estrutural neste tipo de impacto, na medida em que o laminado não pode suportar a carga mecânica. Este dano não ocorre frequentemente, e está associada principalmente com lâminas fabricadas com estrutura de fibra de carbono - Figura 20.



**Figura 20 - Exemplo de dano causado por separação das pontas da pá de aerogeradores**  
Fonte: N. WILSON, 2013

### 3.4.1.2 Métodos de proteção para as pás

O objetivo principal da proteção das pás dos geradores é conduzir a corrente do raio de forma segura através de captosres, condutores de descida, e aterramento, de maneira a minimizar os danos causados pela descarga atmosférica.

#### 3.4.1.2.1 Sistema de captação externa

Consiste no sistema de captação através de receptores metálicos que estão instalados de maneira a receber toda magnitude do raio; são materiais metálicos sólidos que estão alocados para cobrir toda forma aerodinâmica das pás do aerogerador para garantir a proteção. O captor pode ser feito de vários tipos de metais que possuem diferentes propriedades específicas, entre elas, elétricas e térmicas, adaptadas para sua implementação de acordo com a Norma IEC 62305-3.

- Deverão ser instalados 1 ou 2 captosres metálicos principais em cada um dos vértices das pás em ambos lados, com uma distância que pode variar de 0,25 a 1 m do vértice.
- Deverão ser instalados receptores metálicos secundários a cada 5 m de distância sobre as pás, até aproximadamente 25 m de seu vértice. Distribuídos paralelamente em ambas as superfícies, a quantidade mínima necessária se estabelece de acordo com o tamanho das pás do rotor:
  - para pás com tamanho L entre 20 e 30 m: 2 receptores metálicos secundários em seus extremos;
  - para pás com tamanho L entre 30 e 45 m: 4 ou mais receptores metálicos secundários em seus extremos;
  - para pás de tamanho L maior que 45 metros: 6 ou mais receptores metálicos secundários em seus extremos.



- Para impedir a fusão indevida dos captores, a Norma IEC 62305-3 estabelece que o diâmetro mínimo dos receptores deva ser maior ou igual a 20 mm.

#### 3.4.1.2.2 *Sistema de condução interno*

A condução da corrente elétrica do raio do sistema de captação até o sistema de aterramento possui um sistema intermediário: o sistema de condução ou também chamado de sistema de descidas. A seção adequada dos condutores de condução é um importante fator de proteção.

Alguns critérios que devem ser levados em conta para o bom dimensionamento do sistema de condução interno de acordo com a Norma IEC 62305-3:

- as conexões dos condutores de descida devem ser firmes e permanentes, capazes de suportar esforços elétricos, mecânicos, térmicos e dinâmicos;
- devem ser instalados 1 ou 2 condutores de descida na superfície interna da pás;
- a seção transversal do condutor deve respeitar a Norma IEC 62305-3, Quadro 9, considerando a temperatura do material condutor em função da energia específica do raio;
- os condutores de descida devem estar conectados aos captores metálicos através de juntas isolantes.

Os critérios acima listados se aplicam a pás menores que 60 m, tamanho que a maioria das pás em plena geração possuem atualmente (entre 2015 e 2020) (N. WILSON, 2013).

**Quadro 9 - Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descidas.**

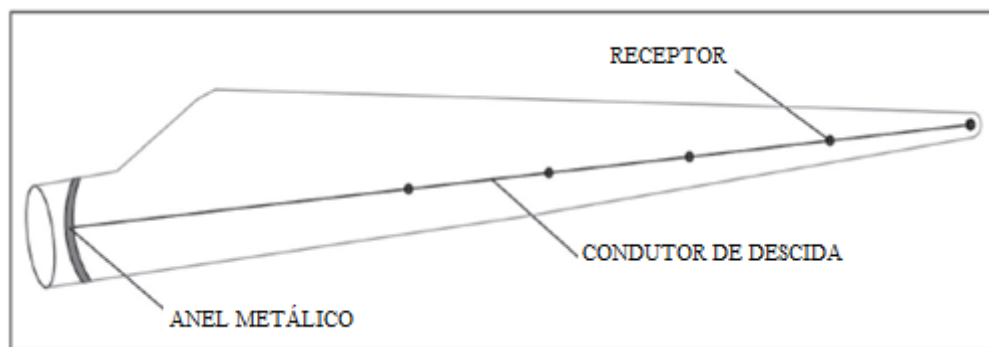
Material	Configuração	Área de seção mínima [mm <sup>2</sup> ]	Comentários <sup>10)</sup>
Cobre	Fita maciça	50 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 2 mm.
	Arredondado maciço <sup>7)</sup>	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
	Arredondado maciço <sup>3), 4)</sup>	200 <sup>8)</sup>	Diâmetro 16 mm.
Cobre revestido <sup>1)</sup>	Fita maciça	50 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 2 mm.
	Arredondado maciço <sup>7)</sup>	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
Alumínio	Fita maciça	70 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 3 mm.
	Arredondado maciço	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
Liga de alumínio	Fita maciça	50 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 2,5 mm.
	Arredondado maciço	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
	Arredondado maciço <sup>3)</sup>	200 <sup>8)</sup>	Diâmetro 16 mm.
Aço galvanizado a quente <sup>2)</sup>	Fita maciça	50 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 2,5 mm.
	Arredondado maciço <sup>9)</sup>	50	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	50 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
	Arredondado maciço <sup>3), 4), 9)</sup>	200 <sup>8)</sup>	Diâmetro 16 mm.
Aço inoxidável <sup>5)</sup>	Fita maciça <sup>6)</sup>	50 <sup>8)</sup>	Espessura mínima 2 mm.
	Arredondado maciço <sup>6)</sup>	50	Diâmetro 8 mm.
	Encordoado	70 <sup>8)</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm.
	Arredondado maciço <sup>3), 4)</sup>	200 <sup>8)</sup>	Diâmetro 16 mm.

<sup>1)</sup> Estanho a quente ou estanhado galvanicamente. Espessura mínima do revestimento 1 µm.  
<sup>2)</sup> O revestimento deve estar pronto, contínuo, livre de fluxo residual e apresentar espessura mínima de 50 µm.  
<sup>3)</sup> Aplicável somente a minicaptoras. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo, força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento máximo de 1 m.  
<sup>4)</sup> Aplicável para hastes que penetram o solo.  
<sup>5)</sup> Cromo ≥ 16%, níquel ≥ 8%, carbono ≤ 0.03%.  
<sup>6)</sup> No caso do aço inoxidável em concreto e/ou em contato direto com materiais inflamáveis, a área de seção mínima para o arredondado maciço deve ser de 78 mm<sup>2</sup> (10 mm de diâmetro) e para fita maciça 75 mm<sup>2</sup> (3 mm de espessura).  
<sup>7)</sup> Em determinadas aplicações onde a resistência mecânica não é relevante, a seção pode ser reduzida de 50 mm<sup>2</sup> (8 milímetros de diâmetro) a 28 mm<sup>2</sup> (6 mm diâmetro). Nestes casos deve-se levar em conta a redução da distância dos elementos de fixação.  
<sup>8)</sup> Quando as condições térmicas e mecânicas são importantes, estas medidas podem ser aumentadas para 60 mm<sup>2</sup> para fita maciça e para 78 mm<sup>2</sup> para arredondado maciço.  
<sup>9)</sup> Com uma energia específica de 10.000 kJ/Ω a seção mínima para evitar a fusão é de 16 mm<sup>2</sup> (cobre), 25 mm<sup>2</sup> (alumínio), 50 mm<sup>2</sup> (aço) e 50mm<sup>2</sup> (aço inoxidável).  
<sup>10)</sup> Espessura, largura e diâmetro são definidos para uma tolerância de ± 10%.

**Fonte: IEC62305-3, 2010.**

### 3.4.1.2.3 Conexão das pás com o cubo

A transferência da corrente do raio forma uma conexão elétrica entre cada condutor de descida com as pás do rotor, através de um anel metálico localizado no cubo do aerogerador, como mostrado na Figura 21:



**Figura 21 - Caminho elétrico percorrido pelo raio na pá do aerogerador**  
Fonte: VEINTIMILLA, 2016

## 3.4.2 Instrumentos meteorológicos

Os instrumentos meteorológicos são sensores externos, como medidores da direção do vento e anemômetros, que normalmente se encontram expostos aos impactos diretos das descargas atmosféricas.

### 3.4.2.1 Sistema de captação

Com a finalidade garantir que os instrumentos meteorológicos se encontrem em uma área de proteção para que não sofram nenhum dano, deve-se projetar um sistema de captação de descargas atmosféricas mediante a seleção de um captor baseado no método de ângulo de proteção, que garanta os instrumentos contra danos, assim estabelecendo uma zona de proteção LPZ 0B.

### 3.4.2.1.1 Método do ângulo de proteção

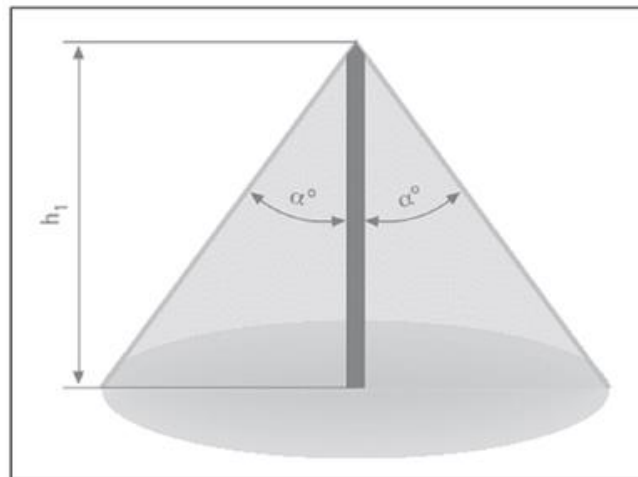
Pode-se considerar que o instrumento meteorológico estará protegido com uma medida de “raio de proteção”  $R_p$  de acordo com a seguinte equação (DEHN BLITZPANER, 2007):

$$R_p = \tan \alpha * h \quad (8)$$

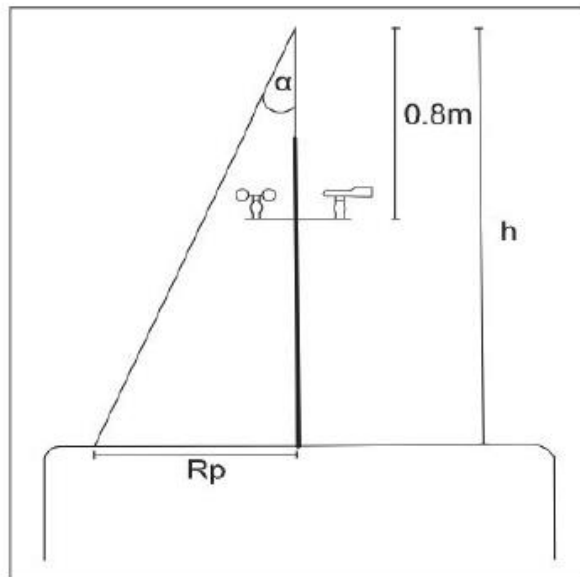
sendo:

- $\alpha$ : ângulo do cone de proteção (graus)
- $h$ : altura do captor (m)
- $R_p$ : raio de proteção (m)

Abaixo, na Figura 22, há a representação do raio de proteção garantido pelo captor:



**Figura 22 - Região de proteção de um captor de altura  $h_1$**   
Fonte: AGUADO, 2005



**Figura 23 - Captor de proteção do sistema meteorológico de aerogeradores**  
**Fonte: AGUADO, 2005**

Por questões práticas e estudo do modelo do ângulo de proteção, costuma-se adotar um captor que possua pelo menos 0,80 m de altura em relação à base dos instrumentos meteorológicos – Figura 23.

#### 3.4.2.2 Sistema de condução

Os condutores conectados ao para-raios derivarão a corrente do raio; tais condutores devem ser resistentes a altas tensões, e possuir seção transversal apropriada, garantida pela norma IEC 62305-3, considerando a elevação de temperatura do condutor em função da energia específica da corrente do raio, de acordo com o nível de proteção requerido.

Para todos os para-raios deve existir um condutor de descida conectado diretamente à malha de aterramento, normalmente localizada na base da torre.

O método do ângulo de proteção deve cobrir a parte superior da Nacele, pois outros instrumentos de sinalização e rotação do aerogerador se encontram nesta área de proteção, garantindo assim a proteção geral de todos os instrumentos.

### 3.4.3 Nacele e outros componentes estruturais

A proteção da Nacele e de outros componentes estruturais do aerogerador se faz por meio dos próprios materiais usados na fabricação de suas estruturas, chamados de “componentes naturais”.

Através destes componentes naturais, o raio é conduzido de maneira segura e eficiente até a terra. Baseados no princípio da gaiola de Faraday, estes componentes são naturalmente usados como sistema de captação, e equipotencializam o raio na junção com a malha de aterramento.

#### 3.4.3.1 Cubo

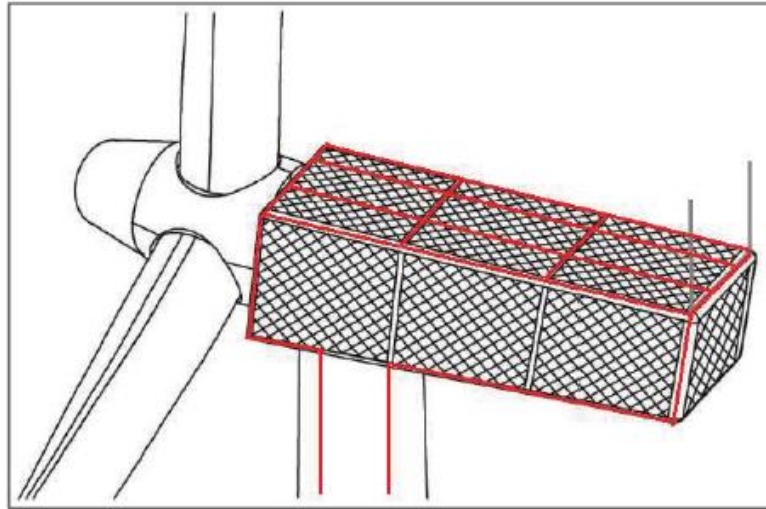
O cubo possui diâmetro aproximado de 3 m, e a espessura do cubo garante que a estrutura seja imune aos raios, pois a maneira como é concebido representa uma gaiola de Faraday, que promove blindagens magnéticas em toda sua estrutura.

#### 3.4.3.2 Nacele

A estrutura da Nacele representa um sistema de captação que detém papel essencial na proteção contra as descargas atmosféricas; ela proporciona proteção externa contra impactos diretos, proteção física para pessoas e aparelhos, além da proteção de circuitos elétricos contra transitórios e tensões induzidas.

##### *3.4.3.2.1 Nacele de material isolante*

Se a Nacele for fabricada em sua maior parte por materiais não condutores, então se deve considerar uma malha captora ao redor da Nacele, de maneira que a parte traseira deva conter captores que podem receber a corrente da descarga atmosférica, e, após, transfiram a corrente do raio para malha captora ao redor da Nacele, e esta, por fim, transfere a corrente para malha de aterramento na base da torre, como mostrado na Figura 24.



**Figura 24 - Proteção por gaiola de Faraday**

**Fonte: IEC 61400-24, "Wind turbines - Part 24: Lightning protection" , Ed. 1.0, 2010.**

Desta maneira, ao englobar toda a Nacela, esta malha de captação cumpre o papel de proteção de acordo com a gaiola de Faraday. As correntes do raio que encontram as pás do rotor ingressam na Nacela através do eixo principal, e representam um problema para manter a blindagem eletromagnética no interior da Nacela, a menos que a corrente do raio se desvie de maneira efetiva para a base da Nacela, através de agentes externos de proteção.

#### 3.4.4 Torre

A torre representa uma estrutura grande em tamanho, e propensa a ser golpeada por raios. Entretanto, para projetar corretamente o sistema de proteção contra descargas atmosféricas da torre, é necessário levar em consideração seu tipo de estrutura.

##### 3.4.4.1 Torres metálicas

As torres de aerogeradores por serem de grande tamanho, tem estrutura preferencialmente metálica, para agir como uma gaiola de Faraday, eficaz eletromagneticamente. Portanto, sua própria estrutura metálica é usada como sistema de captação e descida dos raios até o sistema de aterramento.

#### 3.4.4.2 Torres não metálicas

As torres não metálicas devem possuir sistema de captação e descidas externas, ou por meio de conexão com sua ferragem estrutural, para que possa haver conexão com a malha de aterramento, dissipando a corrente elétrica do raio.

#### 3.4.5 Componentes de transmissão e sistemas de orientação

O aerogerador possui uma série de rolamentos para o controle das pás do rotor, a rotação do eixo principal, e o sistema de orientação da Nacele. Todos os rolamentos e sistemas atuadores (elétricos e mecânicos), que podem estar direta ou indiretamente no caminho da corrente do raio, devem estar protegidos de acordo com o nível de proteção adequado de acordo com a corrente do raio.

##### 3.4.5.1 Rolamentos

A maior parte da corrente normalmente flui das pás do rotor até a torre passando pelos rolamentos dos sistemas de orientação. As correntes do raio que fluem através dos rolamentos geralmente causam danos, tais como: geração de ruído, vibração, e aumento do atrito mecânico, e finalmente reduzem a vida útil dos rolamentos.

##### 3.4.5.2 Sistemas hidráulicos

Especialmente nos sistemas hidráulicos, é necessário considerar o risco de perda por rupturas e risco de ignição do próprio fluido hidráulico, quando parte da corrente do raio flui por ele. Para o sistema de proteção do sistema hidráulico, deve ser prevista a implementação de descarregadores projetados para proteger os sistemas metálicos contra descargas, além de poder optar pela instalação de conexões trançadas, para criar um caminho paralelo para corrente do raio nos atuadores, diminuindo então os danos.



### 3.4.6 Sistema elétrico de alta tensão

#### 3.4.6.1 Gerador

Colocar o gerador em uma carcaça metálica oferece proteção eletromagnética, como na Nacele de estrutura metálica; assim estará protegido de descargas diretas de raios. Deve-se garantir que frações das correntes do raio não sejam dirigidas ao eixo do rotor do gerador, através de:

- uso de escovas nos enrolamentos do eixo principal;
- implementação de um acoplamento isolante entre o eixo de alta velocidade e o eixo do rotor do gerador, onde a maioria dos fabricantes faz uso deste equipamento de isolamento elétrico; tal isolamento protegerá ao mesmo tempo a caixa de engrenagens de velocidade contra correntes que também poderiam dirigir-se até o eixo principal do rotor;
- tanto o gerador quanto a caixa de velocidade devem estar situados em uma base isolante com ligação equipotencial entre suas estruturas metálicas, e que deve ser conectada à malha de terra para evitar diferenças de potencial e corrente parcial.

#### 3.4.6.2 Transformador

Sua proteção deve-se basear na gaiola de Faraday, e sua estrutura deve estar conectada o mais próxima possível da conexão com a malha de aterramento através da conexão equipotencial.

Nos casos onde o transformador se encontra fora da Nacele do aerogerador, os eletrodos de conexão com a malha de aterramento do transformador e da turbina eólica devem estar conectados entre si.

### 3.5 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS)

Os dispositivos de proteção contra surtos, também conhecidos como supressores de surtos, são designados a aparelhos capazes de proteger equipamentos elétricos contra picos de tensão que podem vir da rede elétrica. Esses picos de tensão são causados por eventos como

descargas atmosféricas (os raios), liga e desliga de aparelhos nas redondezas (principalmente em áreas que tenham indústrias), e grandes oscilações vindas da rede de distribuição de energia em geral. (FINDER, 2012)

O local de instalação do DPS para uma adequada proteção dos equipamentos das descargas atmosféricas e seus efeitos, deve ser baseada no conceito de zonas de proteção, que consiste em dividir o volume da instalação a ser protegido em fronteiras. Nelas, são definidos locais com maior ou menor suscetibilidade à ocorrência de descargas atmosféricas diretamente na estrutura ou próximas, e classificadas segundo a severidade e suportabilidade dos sistemas às sobretensões e sobrecorrentes transitórias.

Existem três famílias principais de DPS conforme sua constituição física e funcionamento; são elas: por comutação ou disparo (a centelhador), por limitação (a varistor ou diodo zener), e do tipo combinado (ligação dos dois primeiros tipos em série ou paralelo). (CLAMPER, 2017)

Em um parque eólico é recomendável que haja DPS instalado em cada entrada de energia da torre eólica, assim como na subestação mais próxima. Ambos os lugares possuem aparelhos eletroeletrônicos que podem ser danificados por transitórios de tensão, portanto requisitam a proteção por DPS.

Sugere-se para um trabalho futuro, a análise das influências das descargas atmosféricas nos componentes internos do aerogerador, e como os DPS atuam minimizando possíveis tensões e correntes induzidas.

## 4 ATERRAMENTO E SEGURANÇA PESSOAL

A natureza transitória das descargas atmosféricas, com suas características de formação e correntes com grandes magnitudes, faz necessária a instalação de um sistema de aterramento efetivo e seguro, de maneira a dissipar a corrente captada pelo sistema de captação e descidas do aerogerador, para que não afete os sistemas elétricos nem causem danos à vida de seres vivos.

A instalação de um sistema de captação e descidas para conduzir e dispersar a alta energia da corrente do raio, tem como ponto final o sistema de aterramento, que deve ter baixa impedância. Por fim, o sistema de aterramento, em conjunto com as conexões equipotenciais, limita e minimiza sobretensões que podem ser perigosas para seres vivos e aparelhos do aerogerador.

### 4.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade do solo  $\rho$  é a resistência que o solo possui a opor-se a corrente elétrica por unidade de comprimento, e é determinante para a magnitude da resistência do sistema de aterramento  $R$ .

Alguns fatores influenciam na resistividade do solo: composição do solo, umidade, temperatura, concentração de sais e água, compactação e granulometria.

### 4.2 ELETRODOS DE ATERRAMENTO

Um eletrodo de aterramento é um objeto metálico condutor, o qual estabelece conexão física direta com a terra.

Os sistemas elétricos que são conectados à Terra, devem conectar-se de maneira a limitar a corrente imposta pelo raio, e picos de tensão nas superfícies metálicas.

A norma IEC 62305-3 descreve a disposição dos eletrodos de aterramento de acordo com a aplicação das turbinas eólicas.

#### 4.2.1 Eletrodos em disposição tipo A

Usa-se esta disposição para construções de pequenas dimensões, como por exemplo, construções que contenham instrumentos de medida e oficinas situadas no parque eólico.

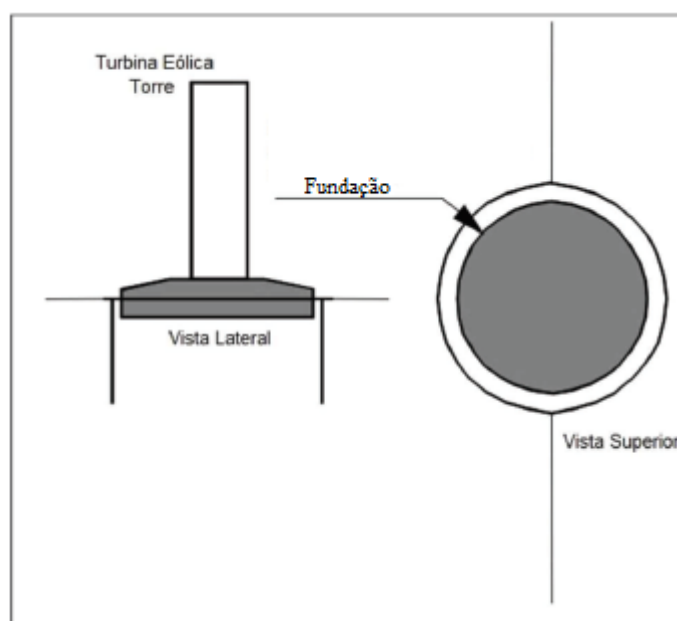
Os eletrodos do tipo A são instalados horizontalmente/radialmente ou verticais, situados fora da estrutura a ser protegida, conectados no mínimo com dois condutores de descida. Para este tipo de conexão devem existir no mínimo dois eletrodos de aterramento conectados entre si.

#### 4.2.2 Eletrodos em disposição tipo B

Geralmente esta disposição é aconselhada a usar-se em aerogeradores. O eletrodo é disposto normalmente ao redor do perímetro da base do aerogerador como mostrado na Figura 25.

Esta disposição compreende um eletrodo em forma de anel exterior ao aerogerador, em contato com o terreno ao menos em 80 % de seu comprimento total; este eletrodo deve ser conectado a estrutura da torre.

Adicionalmente são instalados eletrodos verticais, caso a resistência requerida não possa ser atingida somente com o eletrodo em anel.



**Figura 25 - Sistema de aterramento tipo B**  
Fonte: IEC 61400-24, "Wind turbines - Part 24: Lightning protection", Ed. 1.0, 2010.

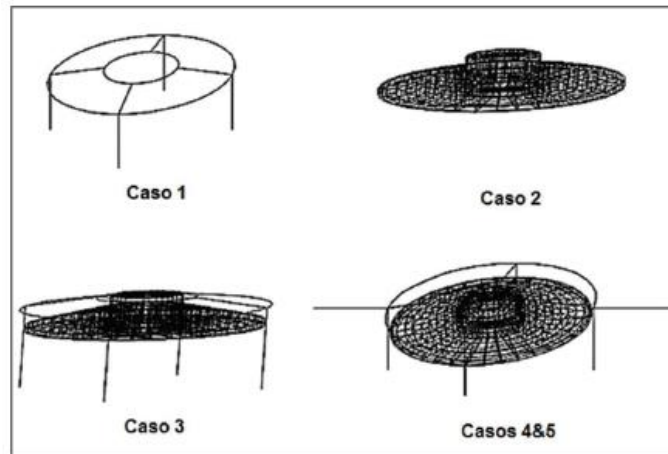
Quando existe maior interação de pessoas nas zonas adjacentes do aerogerador, deve-se prever maior controle de potencial elétrico destas zonas, devido às tensões de passo e de toque. Por esta razão, uma maior quantidade de eletrodos anelares com distâncias específicas pode ser prevista. Os eletrodos em forma de anel devem conectar-se ao primeiro anel condutor por eletrodos radiais.

#### 4.3 DISPOSIÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

A seguir há 5 casos de disposições de sistema de aterramento mais comumente utilizados em aerogeradores *onshore* (localizados em terra).

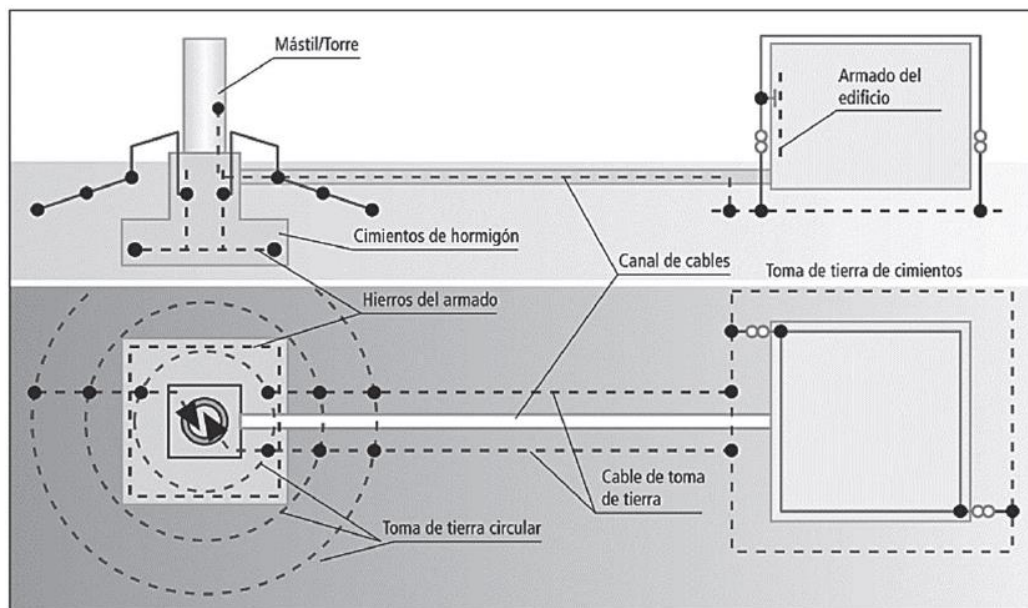
1. Disposição dos eletrodos em anéis externos à fundação, e 4 eletrodos verticais.
2. Usa a ferragem estrutural do aerogerador como sistema de aterramento.
3. A disposição se dá através da ligação equipotencial da ferragem estrutural da torre, 2 eletrodos em anel, e 4 eletrodos na vertical.
4. Compreende o caso 3, adicionando eletrodos horizontais ao redor da ferragem estrutural.
5. Compreende o caso 3, adicionando o dobro de eletrodos horizontais ao redor da ferragem estrutural.

Os casos 3, 4 e 5 (Figura 26) são os mais recomendados para serem implementados na disposição do sistema de aterramento de aerogeradores *onshore*; porém, deve-se garantir uma resistência de aterramento suficientemente baixa para proteção contra tensões de passo e de toque.



**Figura 26 - Disposição de sistemas de aterramento 1,2,3 e 4/5**  
**Fonte: DEHN, 2012**

No caso em que o transformador do aerogerador se encontre próximo à base da torre, adicionam-se eletrodos em anéis, ou uma malha de aterramento no perímetro do transformador - Figura 27; os eletrodos de aterramento do transformador devem ser conectados entre si, para garantir uma diferença de potencial próxima a zero.



**Figura 27 - Aterramento do aerogerador com estrutura próxima**  
**Fonte: ENERGINET, 2012.**

#### 4.4 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Teoricamente, a resistência de aterramento é dependente da resistividade do solo e das dimensões do eletrodo de aterramento.

O emprego de softwares para projetar sistemas de aterramento é comumente utilizado; porém, pode-se implementar sistemas de aterramento a partir de cálculos e expressões matemáticas desenvolvidas em inúmeras biografias (IEEE, 2000). A seguir, observam-se algumas equações para vários tipos de disposições da malha de aterramento, como enunciado na Norma IEC, com eletrodos em forma de anel combinados com hastes verticais (IEC 61400-24, 2010).

1. Eletrodo anular nu enterrado (IEC 61400-24, 2010):

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}} \quad (9)$$

2. N hastes de aterramento e entre elas um círculo de diâmetro D, sendo a distância entre as hastes adjacentes igual ou maior que o comprimento delas (IEC 61400-24, 2010):

$$R_2 = \frac{\rho}{2n\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{D} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\text{sen} \left( \frac{\pi m}{n} \right)} \right) \quad (10)$$

3. N hastes conectadas e distribuídas em um anel de aterramento de diâmetro D (IEC 61400-24, 2010):

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2 \frac{L}{e} d}} \quad (11)$$

sendo:

$\rho$ : resistividade do solo ( $m\Omega$ )

n: número de cabos radiais

L: comprimento do cabo radial (m)

A: raio do cabo radial (m)

S: espaçamento entre as hastes (m)

R: resistência do eletrodo de aterramento ( $\Omega$ )

D: diâmetro do eletrodo anular (m)

#### 4.4.1 Condutores em contato com o solo

Em um parque eólico, a transmissão da energia elétrica produzida pelo aerogerador é transmitida pelo subsolo até a subestação mais próxima. O sistema de aterramento de cada aerogerador de um parque eólico deve estar interligado com os demais, de maneira a garantir a equipotencialização do aterramento.

De maneira geral, o sistema de aterramento é feito a partir de condutores nus, e por estes há passagem de corrente somente em casos de diferença de potencial entre dois pontos da malha; isto pode ser causado por inúmeros fatores, mas principalmente por curtos-circuitos nos aparelhos elétricos, ou por descargas atmosféricas.

A transmissão de energia elétrica de cada aerogerador até a subestação mais próxima é feita pelo subsolo, com condutores isolados e protegidos. O solo de determinada região possui sua resistência de aterramento variável, de acordo com parâmetros característicos da região, como granulabilidade, temperatura, umidade e densidade. Caso este condutor venha a sofrer uma falha, o valor da resistência de aterramento estará ligado diretamente com o valor de curto circuito.

Para avaliar essa falha, Rufato (2015, p.48) realizou ensaios de curto-circuito em ambientes conhecidos, nos quais aplicou uma tensão de 13.800 V, e colocou os condutores em contato direto com o solo, e, através das medições de correntes e tensões, calculou a resistência de defeito de cada tipo de solo, para avaliar a relação da resistência de defeito com o valor da corrente de curto.

Alguns dos ensaios realizados possuem relação com o objeto de estudo deste trabalho.



#### 4.4.1.1 Curto-circuito fase terra em solo de “terra fértil”

Normalmente com baixa resistência de defeito, foi provocado o curto levando o cabo da fase em contato com o solo, e obteve-se o valor de corrente de 1.800 A, o que resultou em um valor de resistência menor que 20  $\Omega$ .

#### 4.4.1.2 Curto-circuito fase terra sobre grama molhada

Foi provocado o curto levando o cabo da fase em contato com a grama molhada: obteve-se o valor de corrente de 1.200 A, resultando em um valor de resistência entre 20 e 40  $\Omega$ .

#### 4.4.1.3 Curto-circuito fase terra em pedra brita e cabo de alumínio coberto

Neste ensaio, um condutor tipo “coberto” de uma rede compacta, foi colocado em contato com o solo de pedra brita, e foi aferido um valor de corrente na ordem de mili-ampères, observando-se uma resistência maior do que 1.000  $\Omega$ , devido ao isolamento do cabo.

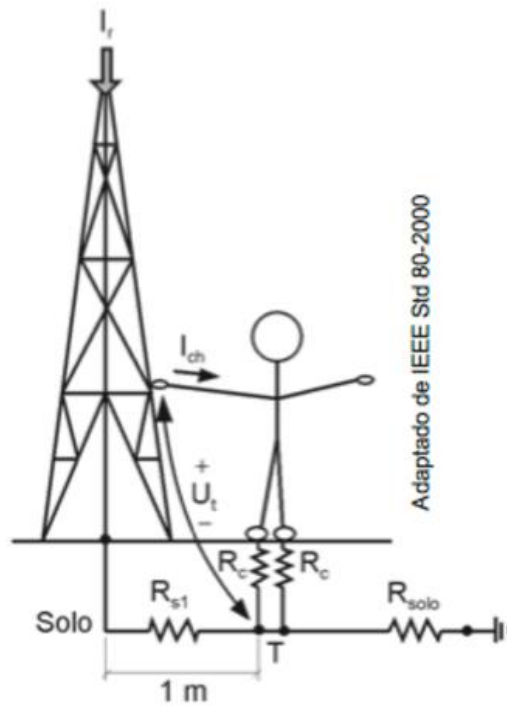
Através dos ensaios realizados por Rufato (2015), é possível observar a relação da resistência do solo com o nível de curto-circuito, o que auxiliará em estudos para melhorar a proteção dos aerogeradores, dependendo do tipo de solo em que estes estarão instalados.

### 4.5 TENSÃO DE TOQUE E PASSO

Em função da forma e das dimensões dos eletrodos e da malha de aterramento, poderá haver uma diferença de potencial entre os eletrodos de aterramento. A diferença de potencial pode induzir correntes que podem eletrocutar seres vivos expostos nas regiões de aterramento; portanto, é de extrema importância garantir que o sistema de aterramento esteja projetado a não ultrapassar as tensões admissíveis de passo e de toque, originados pela corrente residual do raio.

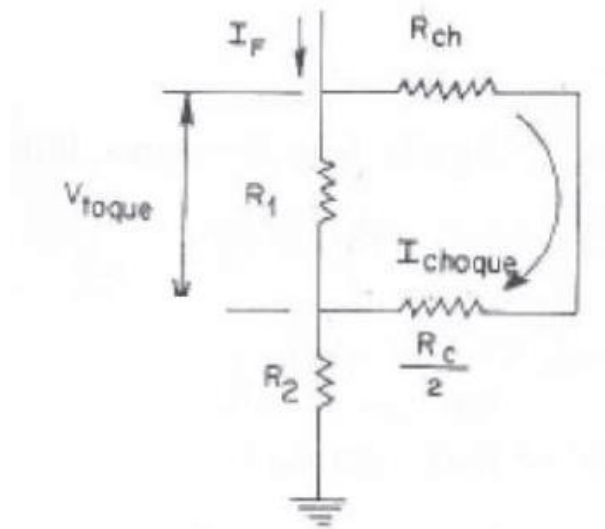
#### 4.5.1 Tensão de toque

É a diferença de potencial entre um elemento condutor situado ao alcance da mão de uma pessoa e o solo que se localiza a 1 m de distância do elemento condutor, conforme representação na Figura 28.



**Figura 28 - Caracterização elétrica da tensão de toque**  
**Fonte: IEEE Std 80, 2000.**

Abaixo, na Figura 29, observa-se a representação em circuito elétrico das resistências e correntes envolvidas na tensão de toque.



**Figura 29 - Representação em circuitos elétricos da tensão de toque**  
**Fonte: IEEE Std 80, 2000.**

Portanto pode-se equacionar da seguinte forma a tensão de toque (NICOLAS REBOSIO, 2016):

$$V_{toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) * I_{choque} \quad (12)$$

*Equação de Daziel:*  $I_{choque} = 0,116/\sqrt{t}$  (13)

$$0,25 < t < 1$$

sendo:

R<sub>ch</sub>: resistência do corpo humano > 1.000 (Ω)

R<sub>c</sub>: resistência de toque, aproximadamente 3\*ρ<sub>s</sub>\*C<sub>s</sub> (Ω)

C<sub>s</sub>: é o fator de resistência superficial

ρ<sub>s</sub>: resistividade superficial (Ω.m)

ρ: resistividade do solo (Ω.m)

I<sub>choque</sub>: corrente de choque máxima que não causa fibrilação ventricular (A)

t: tempo de duração do choque (s)

A tensão de toque máxima gerada não deve produzir uma corrente de choque maior que da equação (12); portanto, a tensão de toque máxima permitida será (NICOLAS REBOSIO, 2016):

$$V_{\text{toque máx}} = (1000 + 1,5 * C_s * \rho_s) * 0,116/\sqrt{t} \quad (14)$$

$$C_s = 1 - \left( 0,09 * \frac{1 - \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \right) \quad (15)$$

$$500 > \rho_s > 2000$$

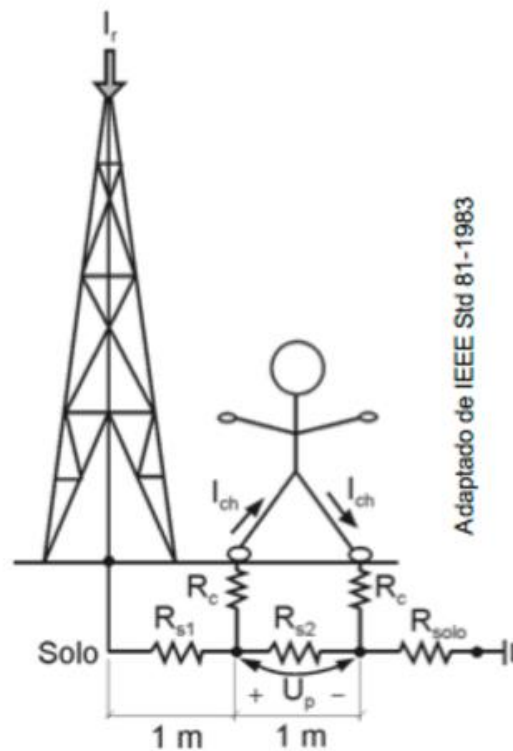
$$0,15 > h_s > 0,1$$

sendo:

- Cs: é o fator de resistência superficial
- $\rho_s$ : resistividade superficial ( $\Omega.m$ )
- $\rho$ : resistividade do solo ( $\Omega.m$ )
- hs: espessura da camada superficial (m)
- Vtoque: valor da tensão de toque máxima permitida (V)

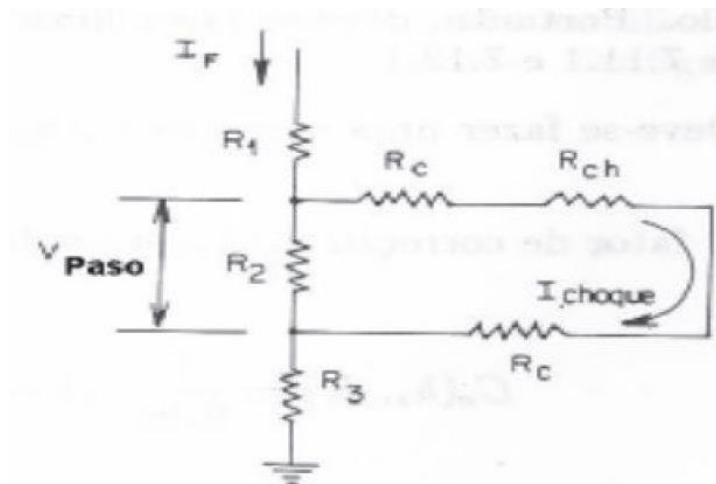
#### 4.5.2 Tensão de passo

É a diferença de potencial existente entre os pés de uma pessoa, separados 1 m, quando se encontram sobre linhas de potencial diferentes; neste caso, a corrente circula através do corpo humano de um pé até o outro, conforma representação na Figura 30.



**Figura 30 - Caracterização elétrica da tensão de passo**  
**Fonte: IEEE Std 80,2000**

A seguir, a representação em circuito elétrico das resistências e correntes envolvidas na tensão de passo.



**Figura 31 - Representação em circuito elétrico da tensão de passo**  
**Fonte: IEEE Std 80,2000**

Portanto, pode-se equacionar da seguinte forma a tensão de passo, com base na Figura 31 (NICOLAS REBOSIO, 2016):

$$V_{\text{passo}} = (R_{ch} + 2 * R_c) * I_{\text{choque}} \quad (16)$$

A tensão máxima de toque permitida será (NICOLAS REBOSIO, 2016):

$$V_{\text{passo máx}} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * 0,116/\sqrt{t} \quad (17)$$

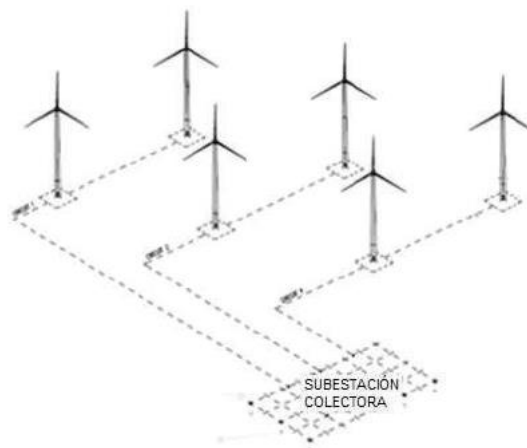
sendo:

$V_{\text{passo máx}}$ : é a tensão de passo máxima permitida (V)

Deve-se considerar os mesmos limites de  $\rho_s$  e  $h_s$  da tensão de toque.

#### 4.5.3 Parques eólicos conectados à malha de aterramento

Um parque eólico consiste em um número de estruturas, tais como aerogeradores, edificações, infraestruturas para passagem de cabos, linhas aéreas, e subestações elétricas. De maneira geral, cada aerogerador deve ter seu próprio sistema de aterramento, conforme descrito anteriormente. Na prática, o sistema de aterramento de cada gerador deve ser interligado com os demais, além da conexão com a subestação, garantindo uma ligação de aterramento geral (Figura 32).



**Figura 32 - Conexão das malhas de aterramento de um parque eólico**  
**Fonte: IEC 60364-5-34, 2011**

A conexão entre os diferentes sistemas de aterramento que devem ser conectados, é realizada com eletrodos horizontais, dispostos de maneira preferencialmente retilínea, sem mudanças bruscas de direção. As conexões entre eletrodos são feitas com soldas exotérmicas.

A conexão dos sistemas de aterramento de um parque eólico é muito importante para proteção dos sistemas elétricos e dos seres vivos; o baixo valor de resistência da malha de aterramento reduz as diferenças de potencial entre as diferentes estruturas, e, portanto, reduz as interferências produzidas pelas conexões elétricas.

#### 4.6 SISTEMA DE LIGAÇÃO EQUIPOTENCIAL

A conexão equipotencial é utilizada para formar um trajeto eletricamente condutivo, que assegure a continuidade elétrica e a capacidade de conduzir com segurança qualquer corrente imposta.

Ao circular a corrente proveniente de um raio por um condutor, aparecem diferenças de potencial no condutor e estruturas metálicas, assim como nos sistemas elétricos e de comunicações conectados à terra que se encontram próximos. Pode-se provocar faiscamentos (arco elétrico provocado por uma corrente de descarga no interior de um volume a ser protegido), que potencialmente pode ser perigoso entre os extremos do arco criado.

O sistema de ligação equipotencial deve prover proteção suficiente, de acordo com os critérios da Norma IEC 62305-4, tal que:

- garanta um caminho de baixa impedância e impeça diferenças de potencial perigosas entre os aparelhos situados dentro do aerogerador;
- proporcione proteção contra tensões de passo e toque durante o tempo de impacto;
- reduza os níveis dos campos eletromagnéticos causados por um raio, e a probabilidade de danos nos sistemas elétricos e de controle devido às sobretensões.

## 5 SIMULAÇÃO DE SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AEROGERADOR

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos capítulos anteriores foi apresentada a importância da geração eólica no cenário energético, além de outras características, tais como: formação de descargas atmosféricas, desenvolvimento, dissipação, tipos, efeitos, perturbações causadas, e estatísticas relacionadas às descargas atmosféricas, e também as partes elementares de um aerogerador.

Este trabalho propõe o estudo e análise dos efeitos de sobretensão causados por descargas elétricas atmosféricas, quando estas atingem aerogeradores e sistemas interligados a ele. Dada a limitação e dificuldade de se produzir um modelo físico em pequena escala, e a imprevisibilidade das descargas atmosféricas, procede-se, nesta seção, a apresentação da modelagem computacional de um gerador eólico atingido por este fenômeno natural.

O objetivo deste capítulo é realizar uma breve apresentação acerca do software de simulação digital escolhido, dos métodos utilizados para a obtenção de dados e analisar os resultados obtidos da simulação.

A simulação limitar-se-á em mostrar os efeitos transitórios da descarga atmosférica sobre dois geradores, sendo o primeiro (G1) atingido por uma descarga atmosférica de 50 kA, avaliando-se os efeitos no adjacente (G2) com valores diferentes de resistências de aterramento do sistema.

#### 5.1.1 PARÂMETROS LIMITES DE SOBRETENSÃO DE GERADORES EÓLICOS

Os projetos de transmissão de potências em alta tensão devem assegurar a capacidade dos aparelhos elétricos de suportar sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas (sobretensões externas), e de surtos de manobra (sobretensões internas) (SCHAEFER, 2010).

As sobretensões de origem externa são devidas às descargas atmosféricas diretas ou próximas aos elementos componentes do sistema elétrico, tais como as linhas de transmissão e os equipamentos instalados em subestações, como, por exemplo, transformadores, disjuntores e para-raios.

O surto de tensão desenvolvido no sistema elétrico está relacionado ao surto de corrente injetado pela descarga atmosférica incidente; estas sobretensões podem atingir várias



dezenas de milhares de volts, com taxas de crescimento elevadas, representando um real perigo aos aparelhos elétricos, submetendo principalmente o isolamento entre espiras das porções iniciais dos enrolamentos de transformadores e geradores a severos esforços dielétricos. (JIMENEZ, 2017).

As sobretensões devidas às manobras ou chaveamentos estão entre as mais severas, quando o religamento de linhas de transmissão trifásicas estão com carga residual, chegando até 4 pu (sistema por unidade); o uso de técnicas e aparelhos de proteção tendem a atenuar a sobretensão para até 1,3 pu, não causando avarias aos aparelhos, para tempos de duração curtos na faixa de milissegundos (SCHAEFER, 2010).

As sobretensões devidas às descargas atmosféricas tendem a ter duração mais rápida do que os surtos causados por manobras. Em geral, as sobretensões têm a ver com a ruptura do dielétrico; logo, é usual usar como limite de sobretensão os valores de isolamento dos aparelhos elétricos; porém, quanto menor a duração da perturbação, maior a alteração admitida, uma vez que os elementos armazenadores de energia internos ao equipamento devem ser capazes de absorvê-la (SCHAEFER, 2010).

A norma NBR 6939 (coordenação do isolamento) estabelece valores de tensões máximas admitidas por equipamentos elétricos ao serem atingidos por impulsos atmosféricos, como observado na Figura 33.

Tensão máxima do equipamento $U_m$ [kV <sub>eficaz</sub> ]	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [kV <sub>eficaz</sub> ]	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV <sub>crista</sub> ]
0,6* (nota 1)	4 <sup>*)</sup>	-
1,2 <sup>*)</sup>	10	30 <sup>*)</sup>
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15 <sup>*)</sup>	34 <sup>*)</sup>	95 110 <sup>*)</sup>
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200 <sup>*)</sup>
52	95	250
72,5	140	325 350 <sup>*)</sup>
92,4 <sup>*)</sup>	150 <sup>*)</sup>	380 <sup>*)</sup>
	185	450
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

NOTAS

1 O nível de isolamento correspondente à  $U_m = 0,6$  kV só é aplicável a secundário de transformador, cujo primário tem  $U_m$  superior a 1 kV.

2 Se os valores entre parênteses forem considerados insuficientes para provar que as tensões suportáveis fase-fase especificadas são satisfeitas, ensaios adicionais de suportabilidade fase-fase são necessários.

<sup>\*)</sup> Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

**Figura 33 – Quadro de valores de tensões máximas de isolamento de acordo com tensão máxima do equipamento.**

**Fonte: NBR 6939 – Coordenação do isolamento (Procedimento), 2000.**

A partir do quadro de valores fornecidos pela norma, obtêm-se os valores máximos de isolamento (valores aproximados) suportados pelos equipamentos.

**Quadro 10 - Parâmetros de tensão de pico e máxima tensão de isolamento dos equipamentos.**

Equipamento	Tensão de pico	Máxima tensão de isolamento
Gerador	600 V	4 kV
Transformador (aerogeradores)	34,5 kV	170 kV
Transformador (rede)	230 kV	850 kV

Fonte: NBR 6939 – Coordenação do isolamento (Procedimento), 2000.

De acordo com o tópico 4.9 da norma NBR de Coordenação do isolamento, para aparelhos de tensão inferior a 1 kV, como caso do gerador eólico deste trabalho (600 V), o valor da máxima tensão de isolamento deve ser tomada como o de curta duração (segunda coluna da Figura 33), dado esta informação observa-se o valor de isolamento máximo de 4 kV que o gerador pode suportar sem que comprometa seu funcionamento.

Para os transformadores foram escolhidos valores médios de isolamento fornecidos pela Figura 33, correspondente aos dados da Norma 6939. Para os transformadores dos aerogeradores, que possuem tensão de pico de 34.5 kV, a máxima tensão de isolamento escolhida foi de 170 kV, e para o transformador de alta tensão da rede, 850 kV.

Nas simulações realizadas neste trabalho, serão verificados se os valores máximos de isolamento foram ultrapassados quando o sistema é atingido pela descarga atmosférica; nos casos em que o valor é ultrapassado, pode-se afirmar que a geração de energia é comprometida devido a danos nos aparelhos.

## 5.2 SOFTWARE DE MODELAGEM UTILIZADO

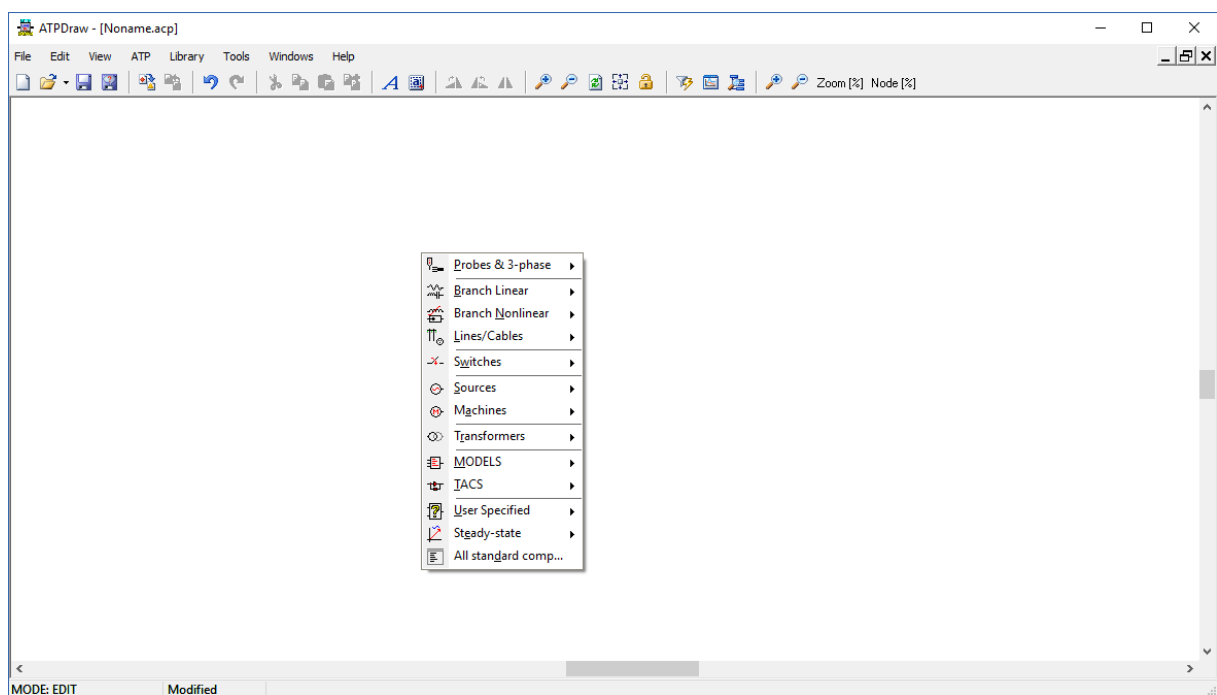
Descargas atmosféricas, faltas no sistema, e operação de aparelhos de proteção, são alguns exemplos de distúrbios e eventos inesperados, que causam uma súbita variação de tensão e corrente, que, por sua vez, provocam o surgimento de transitórios eletromagnéticos no sistema.

A correta especificação dos aparelhos de proteção dos equipamentos, e a determinação da causa de distúrbios no sistema elétrico, podem ser determinadas estudando-se os fenômenos transitórios. Este pode ser realizado através de modelos de escala reduzida ou simuladores; para este trabalho será utilizado um simulador digital.

Graças ao avanço tecnológico, os computadores possuem um poder de processamento de dados cada vez mais rápido. Com isso, propiciou-se um grande avanço no desenvolvimento de ferramentas digitais que façam modelagem de sistemas elétricos e seus componentes cada

vez mais próximos à realidade, tornando a simulação digital mais confiável. Os estudos desenvolvidos para o sistema de Itaipu utilizam essas ferramentas (MARCARINI, 2012).

O programa de simulação que será utilizado para este estudo é o *Alternative Transient Program/ElectroMagnetic Transient Program (ATP/EMTP)*, software de licença gratuita, amplamente utilizado e reconhecido por pesquisadores, universidades, empresas, e concessionárias de energia, para estudos e simulações de transientes eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência (BONELLI, 2010). Na Figura 34, apresenta-se o formato padrão da tela inicial do software.



**Figura 34 - Tela inicial do software de simulação ATPDraw.**  
**Fonte: Dos autores, 2017.**

Desenvolvido pelo Dr. Herman Dommel em 1968, este software era chamado apenas de EMTP. Originalmente era utilizado apenas para simular a variação transiente em sistemas de potência, mas devido ao crescimento dos sistemas, do número de usuários, e o avanço da tecnologia, fazia-se necessário uma atualização no programa. Em 1984, utilizando o EMTP e com aparelhos mais potentes, os pesquisadores Dr. W. Scott Meyer e o Dr. Tsu-Huei Liu desenvolveram uma nova versão do software, o ATP (CHANG, HUANG, JIAN & KUO, 2013).

Atualmente, em 2017, o programa possui mais avanços, facilitando a interação com o usuário através de complementos como o DRAW e o MODELS, nos quais o primeiro possui componentes já modelados, e o segundo possibilita que o componente seja modelado conforme a necessidade do usuário (BONELLI, 2010).

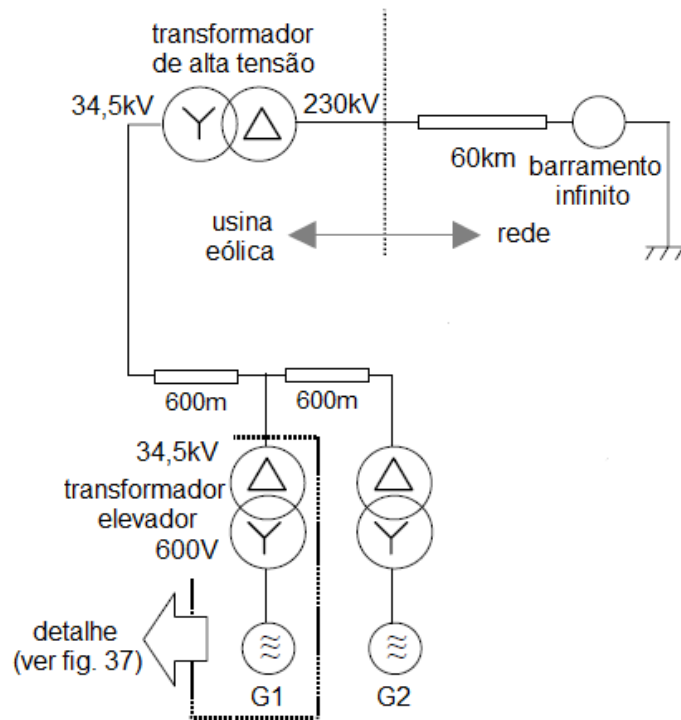
### 5.3 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem do aerogerador e os componentes presentes no sistema, foram realizados no software ATPDraw, no qual serão consideradas, para a simulação, algumas características referentes à estrutura da turbina eólica, o tipo de descarga atmosférica, o sistema de aterramento e o para-raios.

Parâmetros construtivos e dados técnicos como potência, impedância, reatância, entre outros, foram utilizados a partir de valores usados em aparelhos usuais, mas não serão detalhados nesse trabalho.

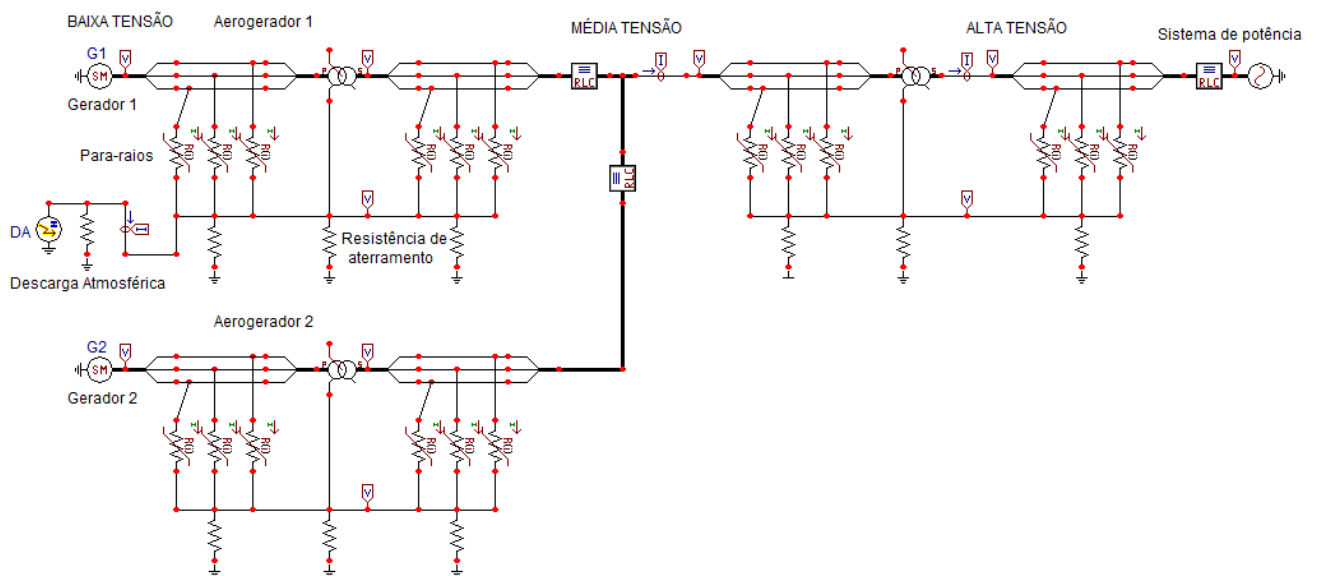
Valores de reatância capacitiva do cabeamento e dos transformadores não foram considerados na modelagem do sistema, sugere-se a inclusão desses parâmetros em trabalhos futuros para verificar suas influências.

A Figura 35 ilustra o modelo da usina eólica considerada, na qual é possível observar a disposição dos geradores e dos transformadores. A usina eólica é composta de dois aerogeradores com potência nominal de 1 MW e 600 V de tensão de pico em seus terminais de saída, distantes de 600 m, com mesmas características e desempenho; cada um deles possui um transformador elevador (600 V/34,5 kV) instalado em suas proximidades, seguido de um transformador de alta tensão (34,5 kV/230 kV), a 600 m de distância do gerador 1 (G1), que conecta a usina ao sistema de potência. Os transformadores utilizados na simulação são considerados ideais, e não foram modelados neste trabalho.



**Figura 35 - Modelo da usina eólica com dois aerogeradores.**  
**Fonte: FUNABASHI & YASUDA, 2004.**

Na Figura 36 tem-se a representação do circuito elétrico do modelo da usina, utilizado no programa de simulação. Pode-se observar os diferentes níveis de tensão do sistema (baixa tensão, média tensão e alta tensão), a localização do aerogerador 1, do aerogerador 2, dos transformadores e do sistema de potência.

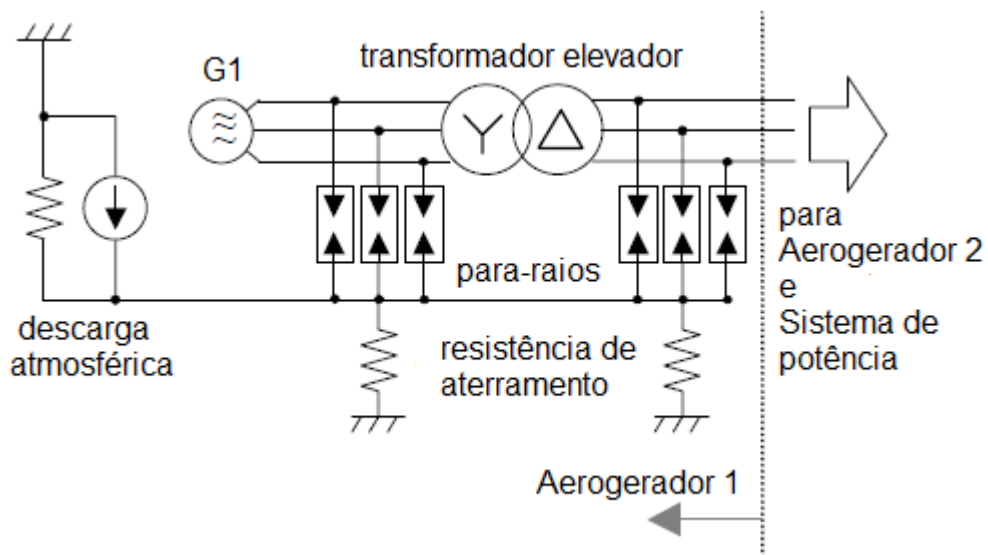


**Figura 36 - Representação da turbina eólica e demais componentes do sistema.**  
**Fonte: Simulação no software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

### 5.3.1 Turbina eólica

Detalhar a estrutura física da turbina é importante, pois durante a descarga elétrica, que normalmente atinge a parte mais alta do aerogerador, a corrente irá percorrer os condutores desde o receptor (no sistema de captação), passando pela torre, até o sistema de aterramento na base da torre (AGGARWAL & MALCOLM, 2014).

Na Figura 37 ilustra-se o detalhe do aerogerador, a disposição dos para-raios, e também a representação da descarga atmosférica. Para este trabalho, o gerador será representado por uma máquina síncrona ideal. Os para-raios estão ligados nos terminais do primário e do secundário dos transformadores elevadores, de cada aerogerador, e possuem aterramento comum.



**Figura 37 - Detalhe do aerogerador.**  
**Fonte: FUNABASHI & YASUDA, 2004.**

Sabe-se que um aerogerador possui componentes como: caixa de velocidades, caixa de engrenagens, gerador síncrono ou de indução, retificador, inversor, entre outros; porém, para a modelagem do sistema deste trabalho, será representado como um gerador síncrono ideal, como o da Figura 38. O programa de simulação possui uma máquina síncrona disponível para utilização e com possibilidade de troca de parâmetros. No Quadro 11 estão os parâmetros inseridos na máquina para a simulação, com valores usuais recomendados pelo software.



**Figura 38 - Representação da máquina síncrona no software ATPDraw.**  
**Fonte: Simulação no software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

**Quadro 11 - Parâmetros da máquina síncrona no software ATPDraw.**

<b>Modelo de gerador síncrono</b>	
Potência nominal [MW]	1,00
Tensão de pico [V]	600,00
Reatância do eixo direto ( $X_d$ ; $X_d'$ ; $X_d''$ ) [p.u.]	2,00; 0,25; 0,20
Reatância do eixo de quadratura ( $X_q$ ; $X_q'$ ; $X_q''$ ) [p.u.]	1,90; 0,50; 0,20
Constantes de tempo ( $T_{do}'$ ; $T_{do}''$ ; $T_{qo}'$ ; $T_{qo}''$ ) [p.u.]	6,00; 0,03; 0,50; 0,06

**Fonte: FUNABASHI & YASUDA, 2004.**

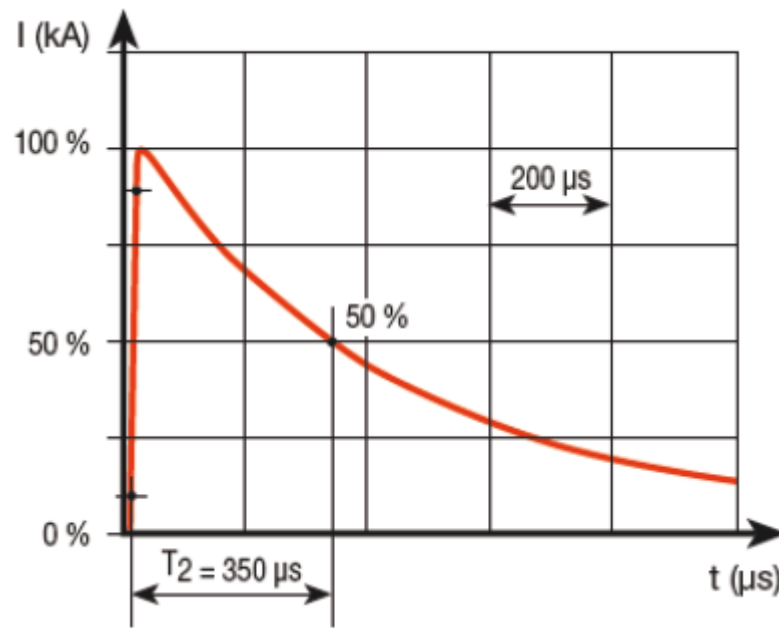
O valor de potência nominal de cada turbina foi tomado como 1 MW, baseado nos valores médios das turbinas instaladas no mundo em 2015 de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2013).

### 5.3.2 Simulação da descarga atmosférica

Os parâmetros a serem considerados para a descarga elétrica atmosférica são de extrema importância para a simulação, visto que a sobretensão gerada é diretamente relacionada ao valor da corrente de descarga (CHATTERJEE & MUKHERJEE, 2015).

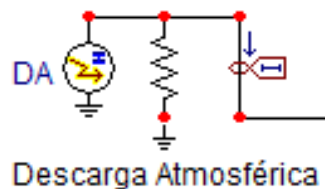
A forma de onda típica de uma descarga atmosférica, em um impacto direto pode ser observada na Figura 39:





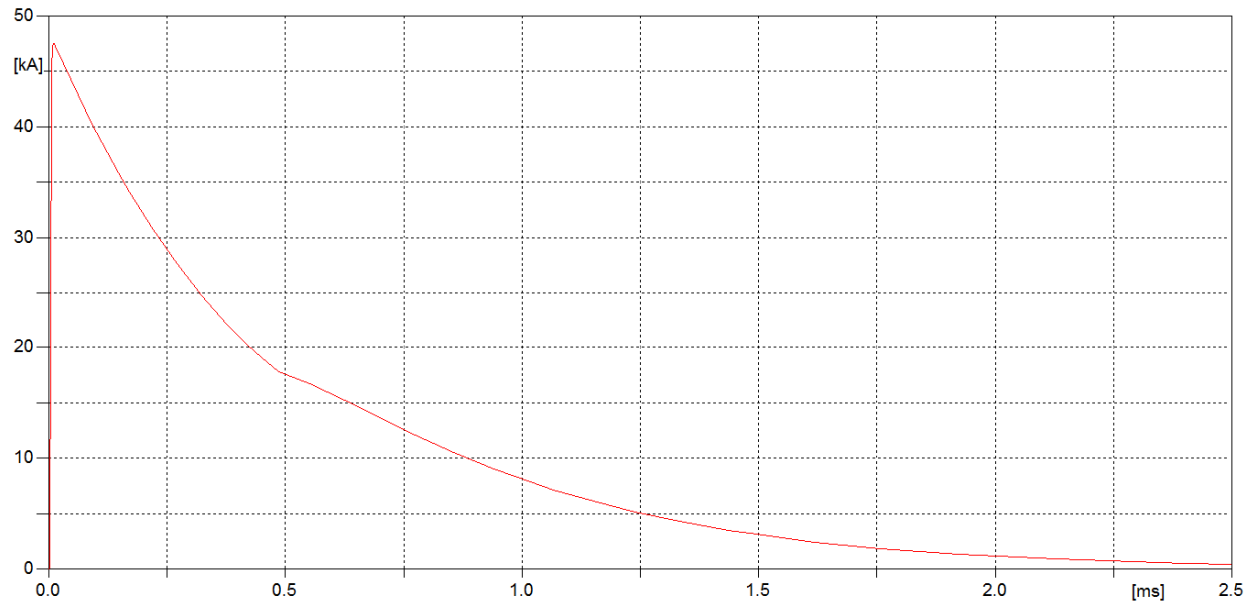
**Figura 39 - Forma de onda típica para uma descarga atmosférica de impacto direto.**  
**Fonte: Dispositivo de proteção contra surto de tensão – Prestes, 2015.**

Para simular o padrão da descarga atmosférica no software foi utilizada uma fonte de surto - Figura 40, que alcança seu pico em 10  $\mu\text{s}$ , e metade do seu valor em 350  $\mu\text{s}$ . O valor de pico de 50 kA foi baseado nos valores mais frequentes de DA (PRESTES, 2015).



**Figura 40 - Representação do circuito elétrico da descarga atmosférica.**  
**Fonte: Simulação no Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

A função de surto fornecida pelo software tem tempo de subida de 10  $\mu\text{s}$ , com um pico de 50 kA, seguido de uma exponencial decrescente, na qual a metade do valor de pico é atingida após 350  $\mu\text{s}$  (PRESTES, 2015). Para o modelo seguido na simulação serão considerados os efeitos a partir do início da descarga atmosférica até o decaimento da corrente a 0 A - Figura 41, devido a análise focar nos efeitos de sobretensão causados que ocorrem em maior magnitude no pico máximo de corrente.



**Figura 41 - Representação da descarga atmosférica no software ATPDraw.  
Fonte: Simulação do software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

### 5.3.3 Sistema de aterramento e para-raios

O impacto direto da descarga atmosférica na estrutura do aerogerador ou para-raios, possui um alto valor de corrente, que é escoado para o sistema de descida até chegar ao aterramento. Os para-raios tem impedância não linear; no *software* ATPDraw este sistema é representado pelo seguinte bloco indicado na Figura 42:

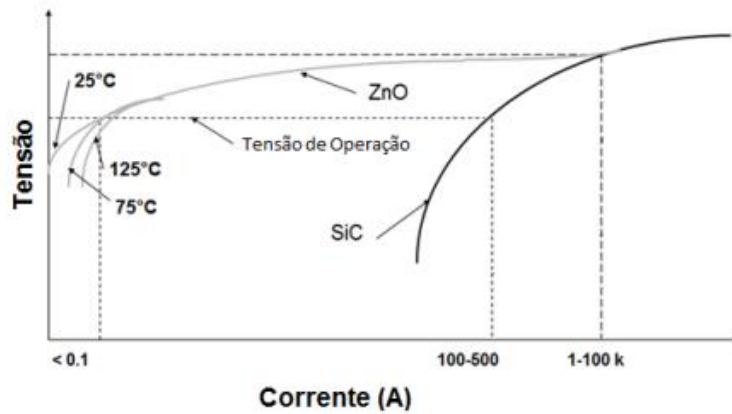


**Figura 42 - Representação do para-raios no software ATPDraw.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Para a modelagem do para-raios é necessário inserir dados sobre sua característica, simulada em laboratório ou fornecido pelo fabricante para que o programa, através de interpolações, descreva o comportamento do mesmo em outros pontos.

Para o sistema simulado foram utilizados os parâmetros usuais do para-raios de silício, os quais possuem grande durabilidade na prática, além de suportar valores de correntes da ordem das dezenas de milhares de Ampères.

Na Figura 43 observa-se a comparação do para-raios de silício, com outro tipo de para-raios utilizado em sistemas de potência: o de óxido de zinco.



**Figura 43 - Valores de corrente suportados pelos para-raios.**  
**Fonte: Monitoramento autônomo de Para-Raios de ZnO, 2013.**

A não linearidade do para-raios é descrita pelos parâmetros que foram inseridos no software ATPDraw, de acordo com o Quadro 12:

**Quadro 12 - Pontos de características de Tensão X Corrente usados para modelar o para-raios.**

I [A]	U [V]
100	650000
1000	760000
2000	800000
4000	834000
5000	850000
10000	935000
20000	1082000
30000	1200000

**Fonte: Software de simulação ATPDraw, 2017.**

É necessário fornecer uma referência, a menor impedância durante a incidência de descargas elétricas, e reduzir as tensões de passo e de toque do sistema, a fim de manter a saúde

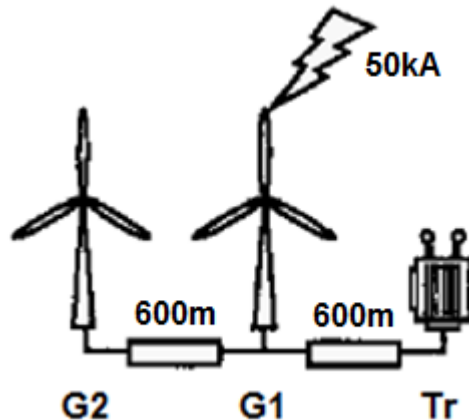
e a segurança das pessoas. Para sistemas geradores de potência, a impedância de referência deve ser a menor possível (PAULINO, JUNIOR, 2013).

#### 5.4 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO

Feita a modelagem e a definição dos parâmetros pertinentes ao sistema, estes foram inseridos na simulação digital; os resultados gerados serão apresentados e analisados neste tópico.

Como já descrito nos tópicos anteriores, foi considerada uma descarga atmosférica de 50 kA atingindo os para-raios do aerogerador (G1), com a variação dos valores das resistências de aterramento do sistema (1.000  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 40  $\Omega$ , 4  $\Omega$ , e 0,1  $\Omega$ ), para avaliar a sua influência sobre o gerador adjacente (G2) e o transformador de alta tensão (Tr).

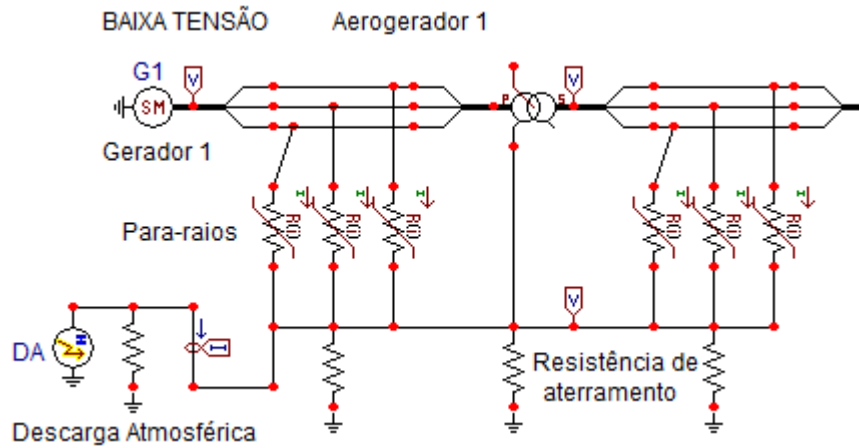
O modelo da usina eólica considerada e o local que será atingido pela descarga atmosférica estão ilustrados na Figura 44.



**Figura 44 - Locais considerados para as descargas atmosféricas.**

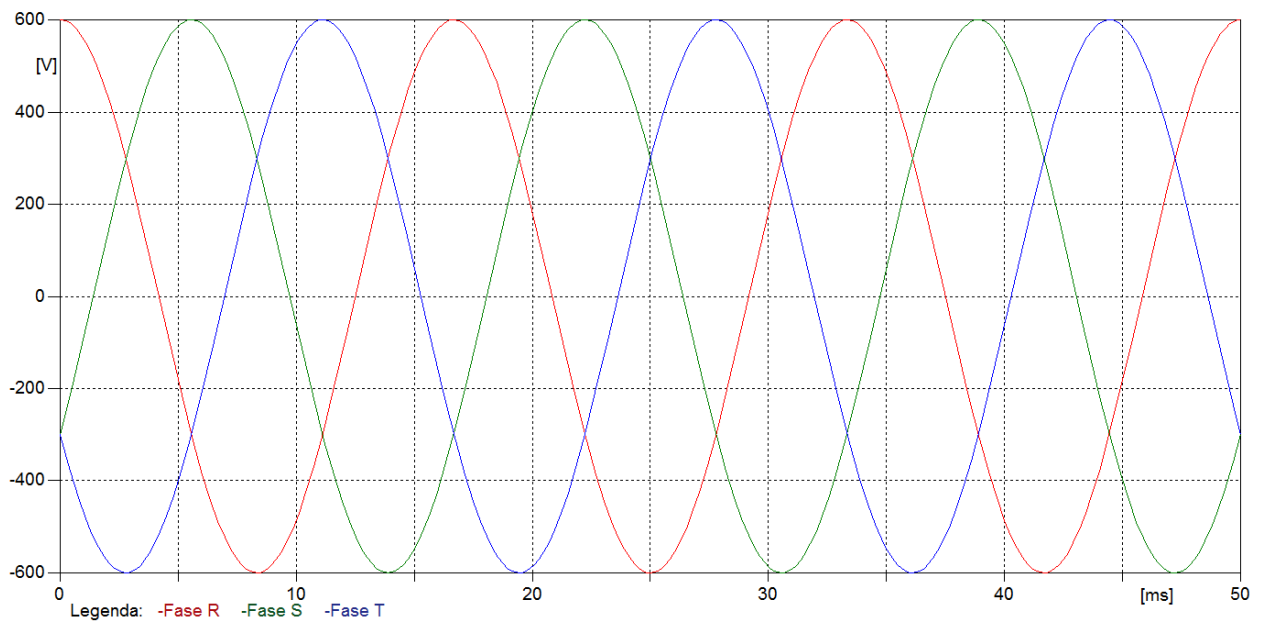
**Fonte: FUNABASHI & YASUDA, 2004.**

A Figura 45 é a vista ampliada, da Figura 36, da área do Aerogerador 1, na qual pode-se observar a parte referente à DA de 50 kA, a parte de baixa tensão do circuito composta pelo gerador síncrono (G1), com 600 V de pico em seus terminais de saída; o transformador elevador (600 V/34,5 kV), o sistema para-raios, e as resistências de aterramento.

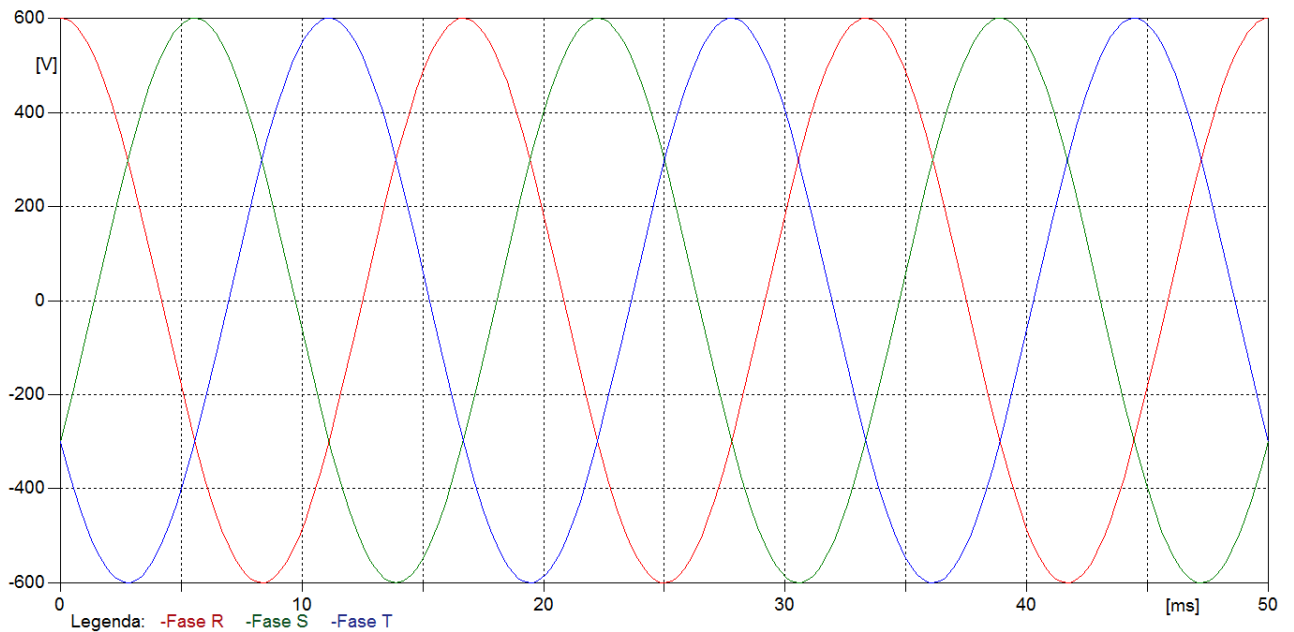


**Figura 45 - Locais considerados para as descargas atmosféricas.**  
**Fonte: FUNABASHI & YASUDA, 2004.**

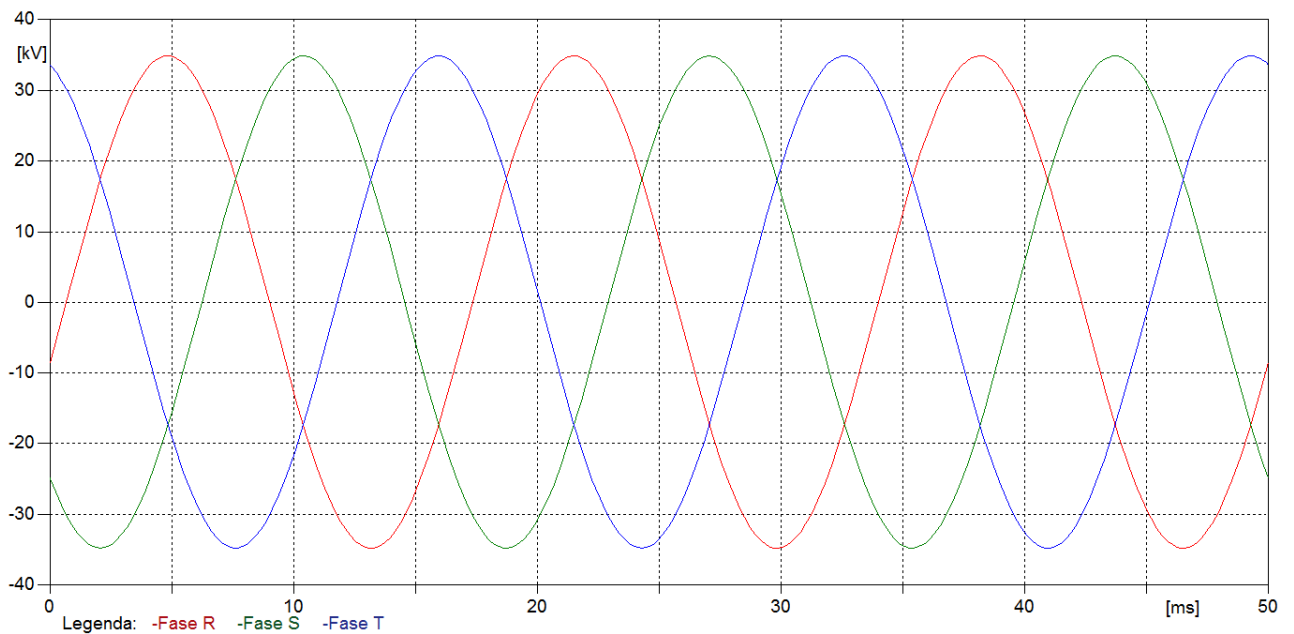
Antes de realizar simulações com a aplicação da descarga atmosférica com diferentes resistências de aterramento, visualizaram-se as curvas de tensão das fases (R, S e T), nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, obtidas no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.



**Figura 46 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 antes do surto.**  
**Fonte: Simulação no Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**



**Figura 47 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 antes do surto.**  
**Fonte: Simulação no Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**



**Figura 48 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 antes do surto.**

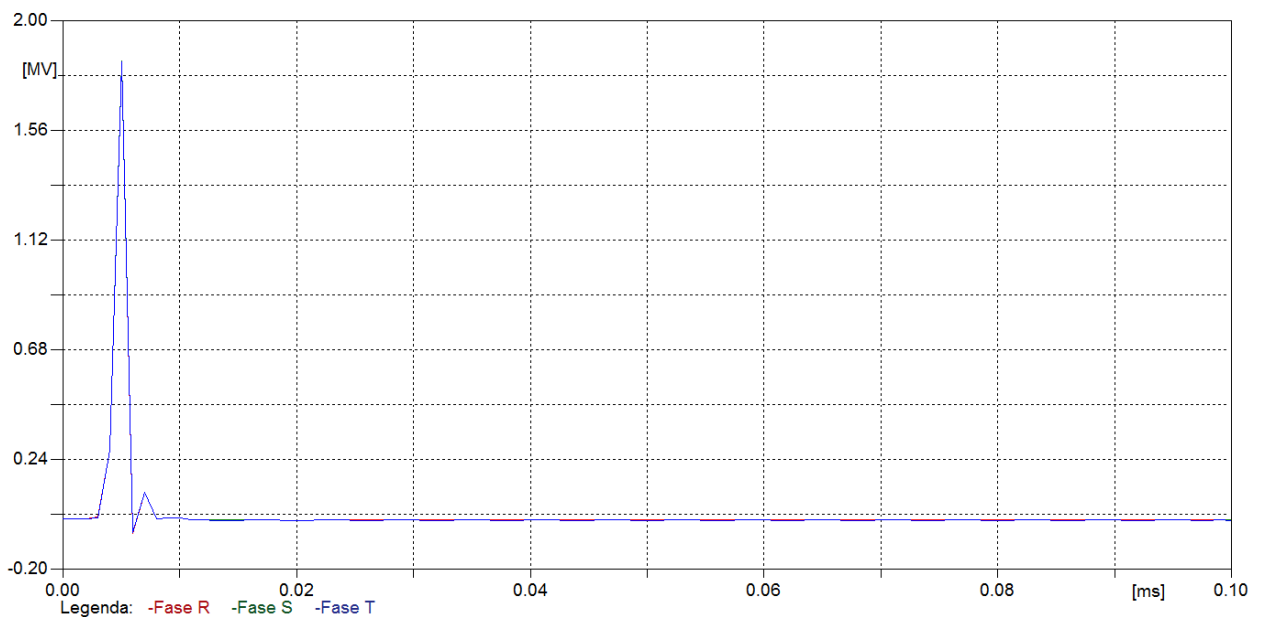
**Fonte: Simulação no Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se, nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, que antes da DA não há alteração nenhuma nas formas de onda de tensão, ou seja, são ondas senoidais perfeitas.

#### 5.4.1 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 1.000 $\Omega$

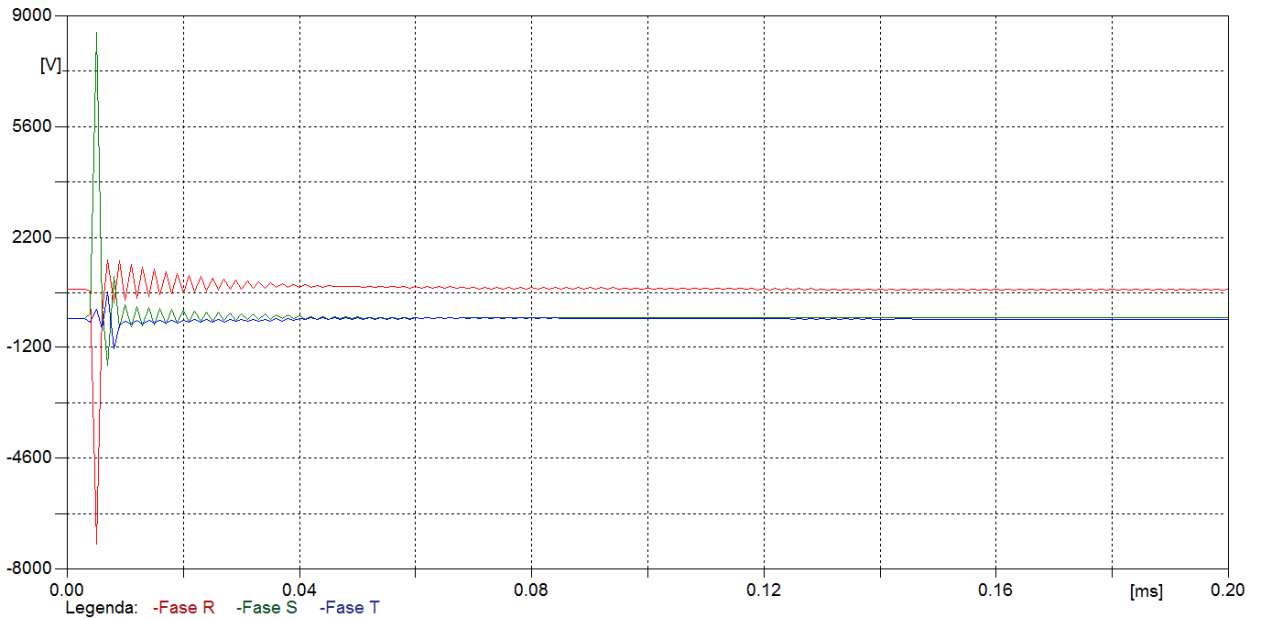
Considerando-se uma resistência de aterramento de 1.000  $\Omega$ , aplicou-se uma DA de 50 kA no Aerogerador 1. A fim de analisar e comparar o comportamento deste cenário com o do funcionamento normal do aerogerador obtiveram-se as formas de ondas nos mesmos pontos utilizados nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, ou seja, no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.

As formas de ondas obtidas estão ilustradas nas figuras Figura 49, Figura 50 e Figura 51. Na Figura 49 é possível observar que, após o impacto direto da DA, a forma de onda na saída do gerador 1 (G1), possui um surto transitório que atinge pico positivo de 1,85 MV e um pico negativo de -60 kV (valores aproximados), retomando o valor de pico de 600 V após, aproximadamente, 12  $\mu$ s.



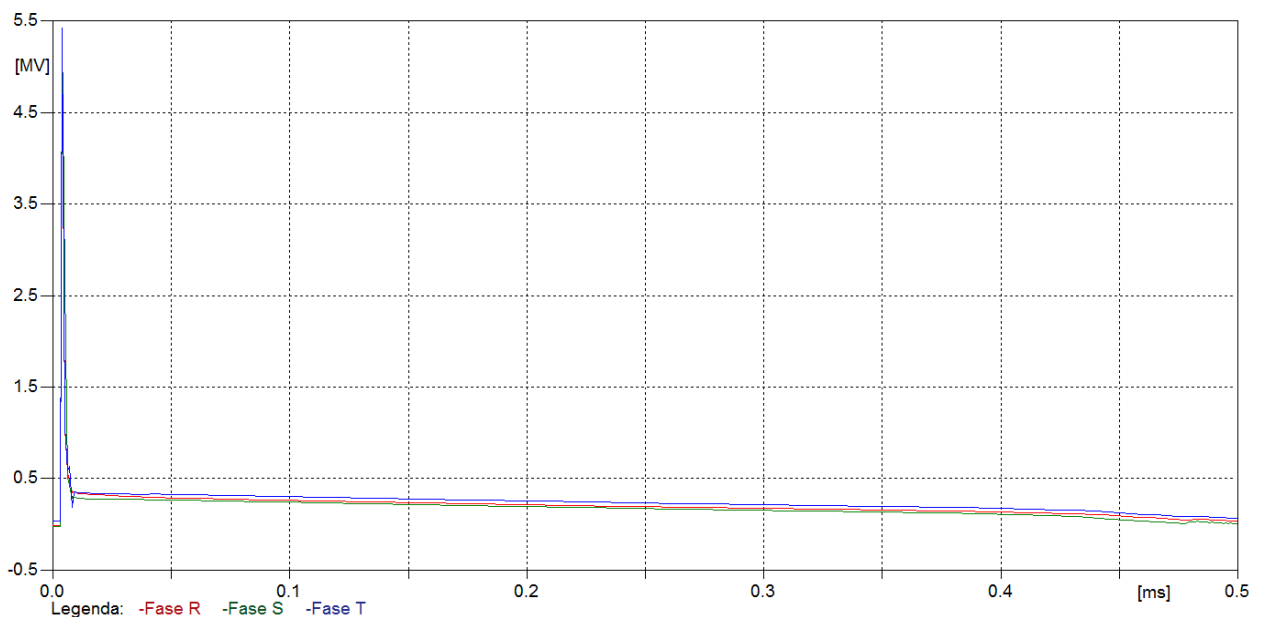
**Figura 49 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Na Figura 50 observa-se que, após o impacto direto da DA, ainda há a presença de surto transitório na saída do gerador 2 (G2), porém de menor amplitude (na faixa de 8,6 kV e -7,3 kV, valores aproximados), em relação ao aferido em G1, e há ruídos nas fases R, S e T que diminuem com o passar do tempo, até o reestabelecimento do valor de pico de 600 V após, aproximadamente, 0,25 ms.



**Figura 50 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto.**  
**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se na Figura 51, a presença de surto transitório na saída do transformador elevador dos geradores, porém com valores mais altos que os encontrados nas saídas dos geradores, na faixa de 5,45 MV e -40 kV, aproximadamente, que juntamente com o ruído gerado, diminuem com o passar do tempo até reestabelecer seu valor de pico de 34,5 kV após, aproximadamente 0,75 ms.



**Figura 51 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto.**  
**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**



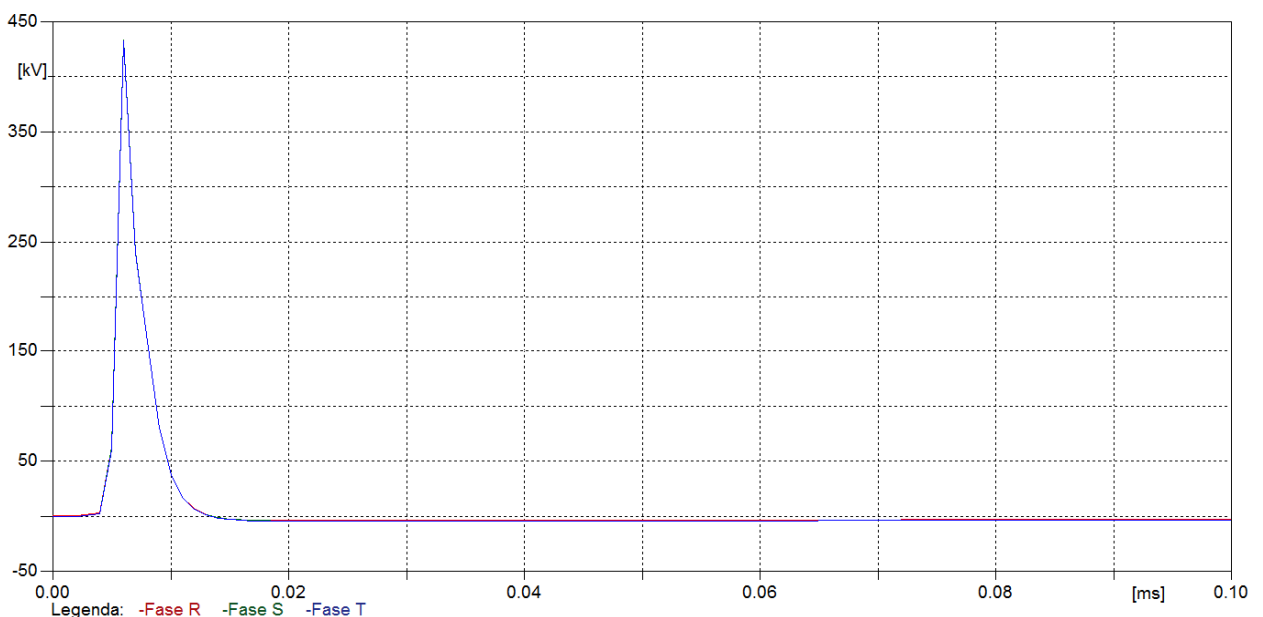
Analisando-se este cenário com um alto valor de resistência de aterramento, nota-se a presença de surtos transitórios com valores na ordem de 5,45 MV.

Como o valor de pico do transitório é da ordem de MV, pela Figura 33, constatou-se que, o valor máximo de isolamento (170 kV para o transformador elevador e 4 kV para os geradores) dos aparelhos, são superados. Torna-se, portanto, inviável a operação de uma fazenda eólica nessas condições.

#### 5.4.2 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de 100 $\Omega$

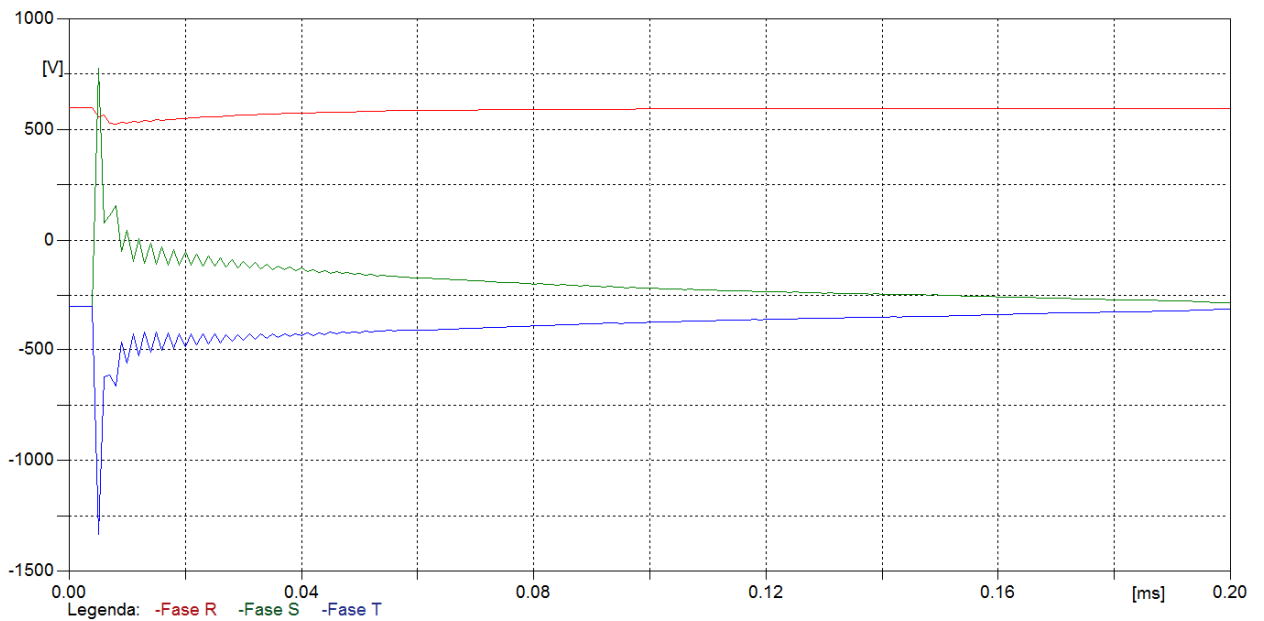
Considerando uma resistência de aterramento de 100  $\Omega$  e aplicou-se uma DA de 50 kA no Aerogerador 1. A fim de analisar e comparar o comportamento deste cenário com o do funcionamento normal do aerogerador, obteve-se as formas de ondas nos mesmos pontos utilizados nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, ou seja, no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.

As formas de ondas obtidas estão ilustradas nas figuras Figura 52, Figura 53 e Figura 54. Na Figura 52 é possível observar que após o impacto direto da DA, a forma de onda na saída do gerador 1 (G1), possui um surto transitório que atinge pico positivo de 435 kV e um pico negativo de -5 kV (valores aproximados), retomando o valor de pico de 600 V após, aproximadamente, 0,4 ms.



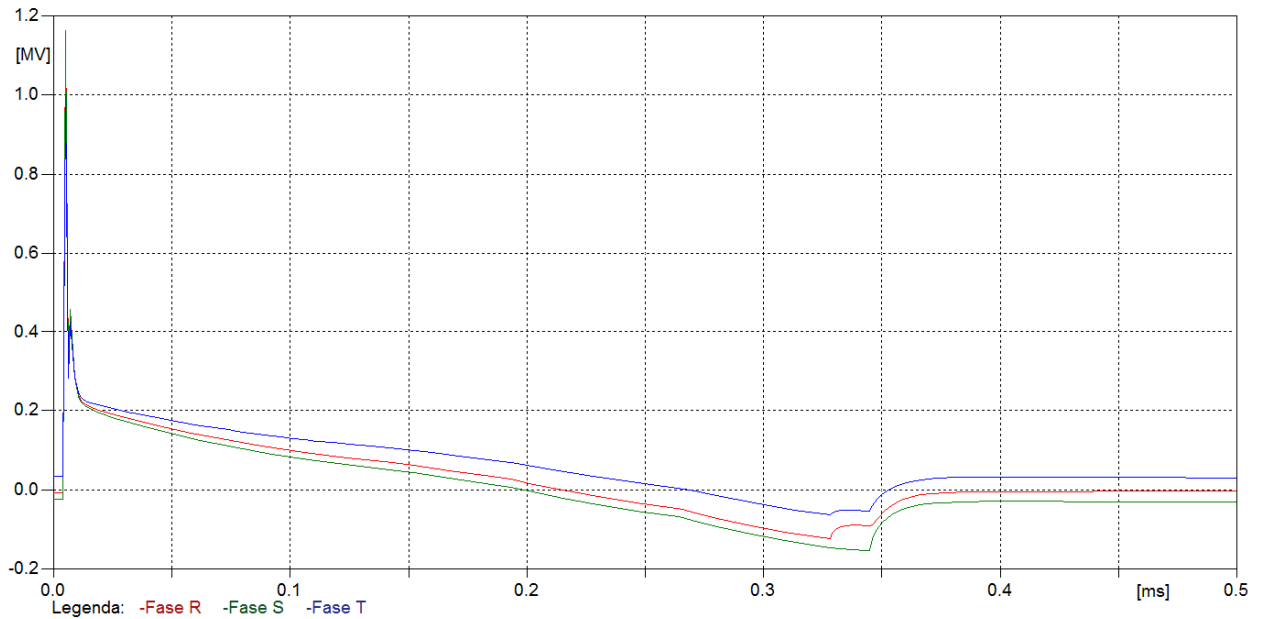
**Figura 52 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Na Figura 53 observa-se que após o impacto direto da DA, ainda há a presença de surto transitório na saída do gerador 2 (G2) porém de menor amplitude (na faixa de 780 V e -1,35 kV, valores aproximados), em relação ao aferido em G1, e há ruídos nas fases R, S e T que diminuem com o passar do tempo, até o reestabelecimento do valor de pico de 600 V após, aproximadamente, 0,3 ms.



**Figura 53 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se, na Figura 54, a presença de surto transitório na saída do transformador elevador dos geradores, porém com valores mais altos que os encontrados nas saídas dos geradores, na faixa de 1,17 MV e -160 kV, aproximadamente, que juntamente com o ruído gerado diminuem com o passar do tempo até reestabelecer o valor de pico de 34,5 kV após, aproximadamente 0,4 ms.



**Figura 54 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto.**

**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Analisando-se este cenário com o valor de resistência de aterramento de  $100 \Omega$ , nota-se a presença de surtos transitórios com valores na ordem de  $1,17 \text{ MV}$ , porém com amplitude cerca de 4 vezes menor, com relação ao cenário anterior de  $1.000 \Omega$ .

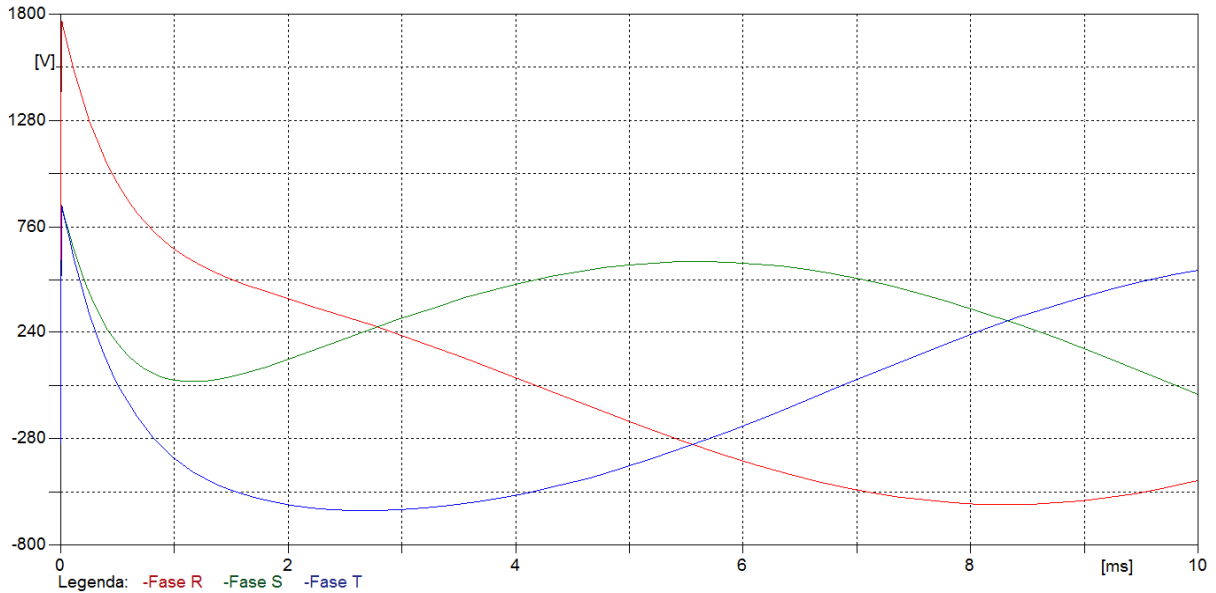
Como o valor de pico do transitório é da ordem de MV, pela Figura 33, constatou-se que, o valor máximo de isolamento ( $170 \text{ kV}$  para o transformador elevador e  $4 \text{ kV}$  para os geradores) dos aparelhos, são superados. Torna-se, portanto, inviável a operação de uma fazenda eólica nessas condições.

#### 5.4.3 Descarga atmosférica de $50 \text{ kA}$ com resistência de aterramento de $40 \Omega$

Considerando uma resistência de aterramento de  $40 \Omega$ , aplicou-se uma DA de  $50 \text{ kA}$  no Aerogerador 1. A fim de analisar e comparar o comportamento deste cenário com o do funcionamento normal do aerogerador, obteve-se as formas de ondas nos mesmos pontos utilizados nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, ou seja, no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.

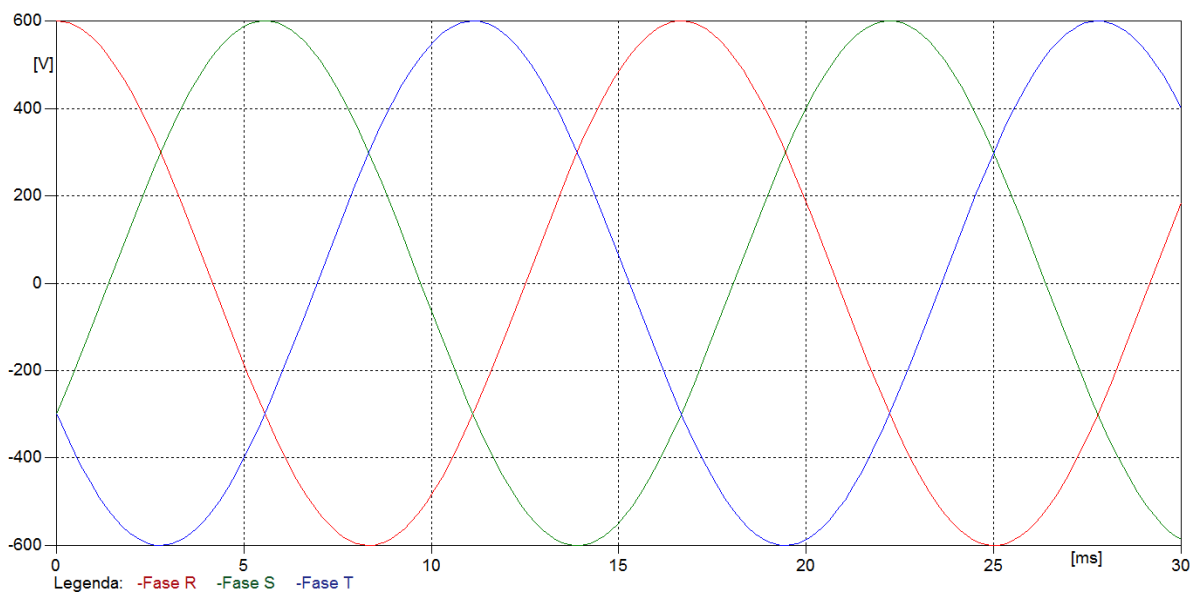
As formas de ondas obtidas estão ilustradas nas figuras Figura 55, Figura 56 e Figura 57. Na Figura 55 é possível observar que após o impacto direto da DA, a forma de onda na saída do gerador 1 (G1), possui um surto transitório que atinge pico positivo de  $1,77 \text{ kV}$  e um

pico negativo de -650 V (valores aproximados), o valor de pico de 600 V é retomado após, aproximadamente, 2 ms.



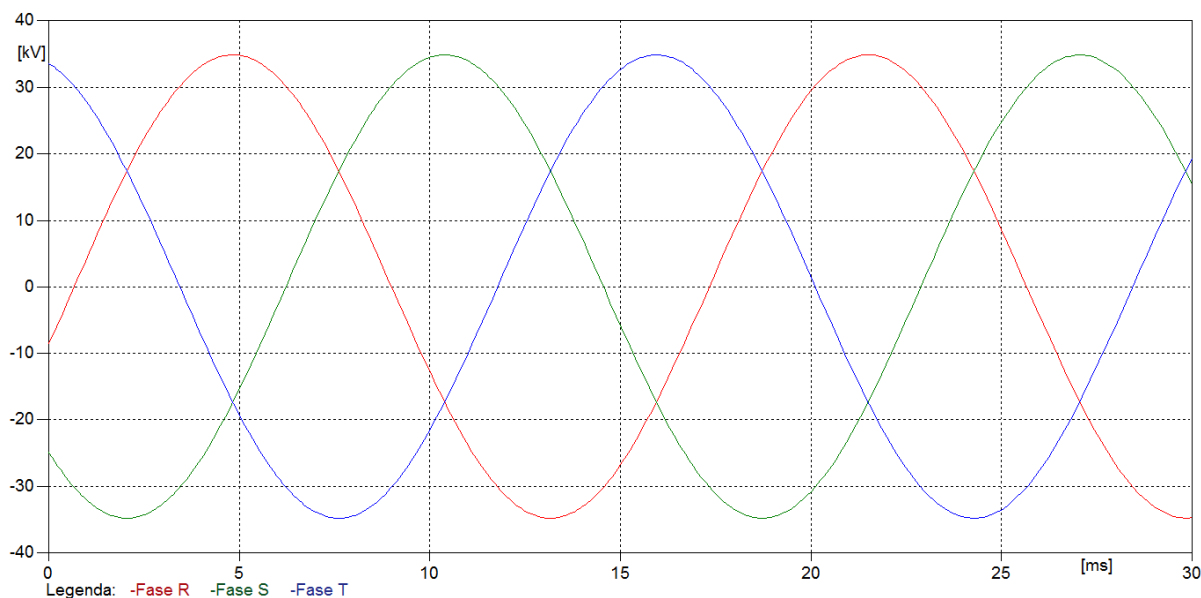
**Figura 55 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Na Figura 56 observa-se que após o impacto direto da DA, não foi detectada a presença de surto transitório na saída do gerador 2 (G2), ou seja, as fases R, S e T possuem formas de ondas senoidais ideais com valor de pico de 600 V.



**Figura 56 - Formas de onda do primário do transformador (600V) do gerador G2 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se, na Figura 57, que não há surto transitório na saída do transformador elevador dos geradores, ou seja, apenas as fases R, S e T com formas de ondas senoidais ideais com o valor de pico de 34,5 kV.



**Figura 57 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto.**

**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

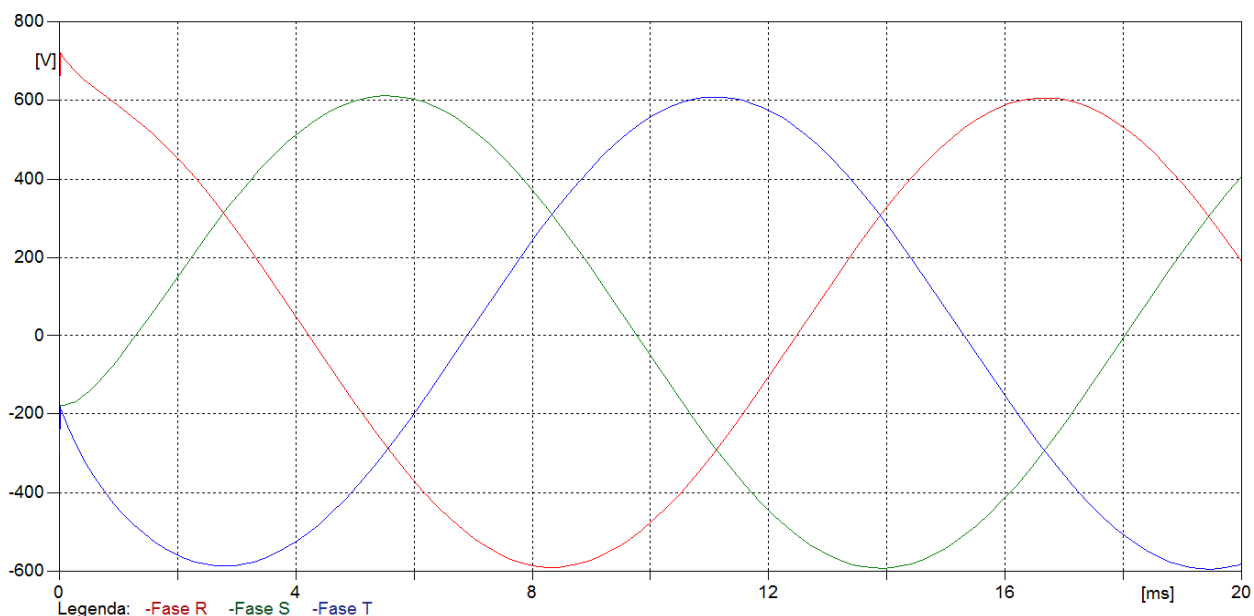
Analisando-se este cenário com o valor de resistência de aterramento de  $40 \Omega$ , nota-se a presença de surtos transitórios apenas no primário do transformador elevador do G1, porém com amplitude cerca de 2 vezes menor, com relação ao cenário de  $100 \Omega$ .

Torna-se, portanto, viável a operação de uma fazenda eólica nessas condições, pois, pela Figura 33, a máxima tensão suportável normalizada de impulso atmosférico para os geradores é de 4 kV, e o pico máximo encontrado foi de 1,77 kV na saída do G1.

#### 5.4.4 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de $4 \Omega$

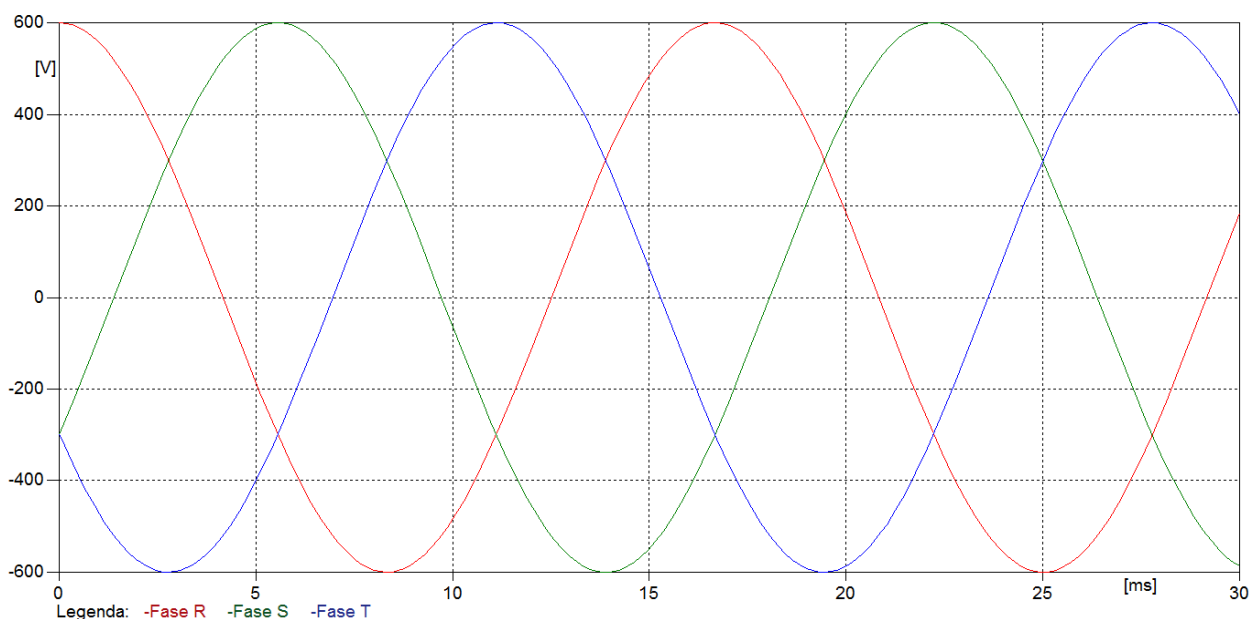
Considerando uma resistência de aterramento de  $4 \Omega$ , aplicou-se uma DA de 50 kA no Aerogerador 1. A fim de analisar e comparar o comportamento deste cenário com o cenário de funcionamento normal do aerogerador, obteve-se as formas de ondas nos mesmos pontos utilizados nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, ou seja, no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.

As formas de ondas obtidas estão ilustradas nas figuras Figura 58, Figura 59 e Figura 60. Na Figura 58 é possível observar que após o impacto direto da DA, a forma de onda na saída do gerador 1 (G1), possui um surto transitório que atinge pico positivo de 720 V (valor aproximado), retomando o valor de pico de 600 V após, aproximadamente, 2 ms.



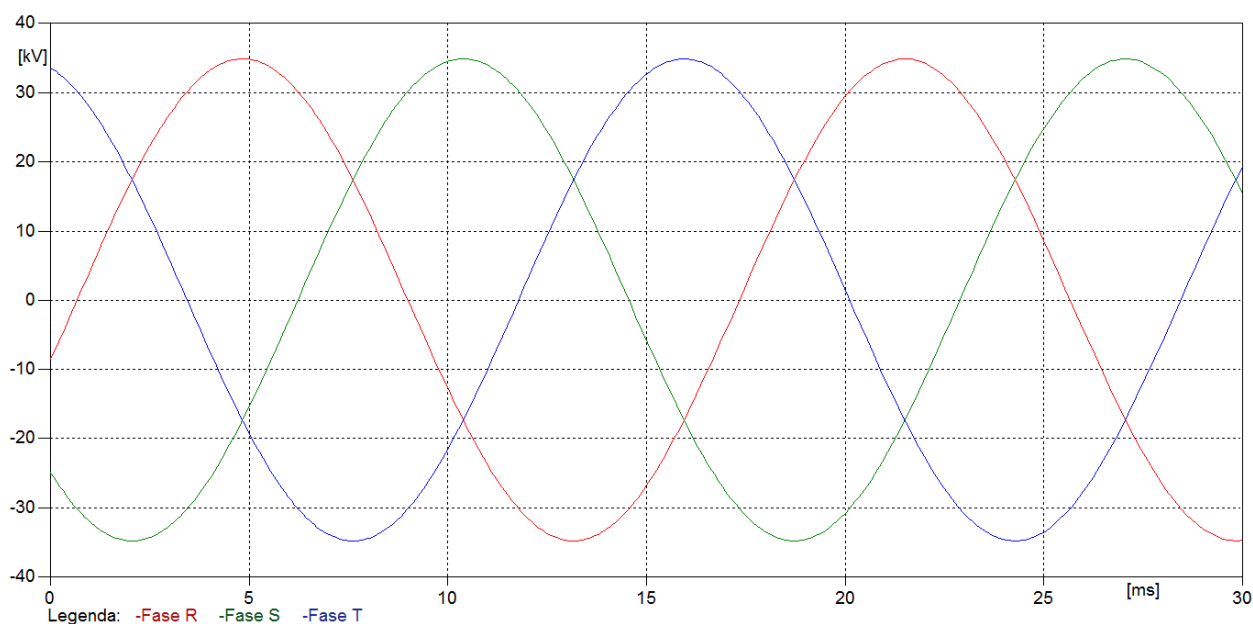
**Figura 58 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto.**  
**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Na Figura 59 observa-se que após o impacto direto da DA, não foi detectada a presença de surto transitório na saída do gerador 2 (G2), ou seja, as fases R, S e T possuem formas de ondas senoidais ideais com valor de pico de 600 V.



**Figura 59 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se, na Figura 60, que não há surto transitório na saída do transformador elevador dos geradores, ou seja, apenas as fases R, S e T com formas de ondas senoidais ideais com o valor de pico de 34,5 kV.



**Figura 60 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5kV) dos geradores G1 e G2 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

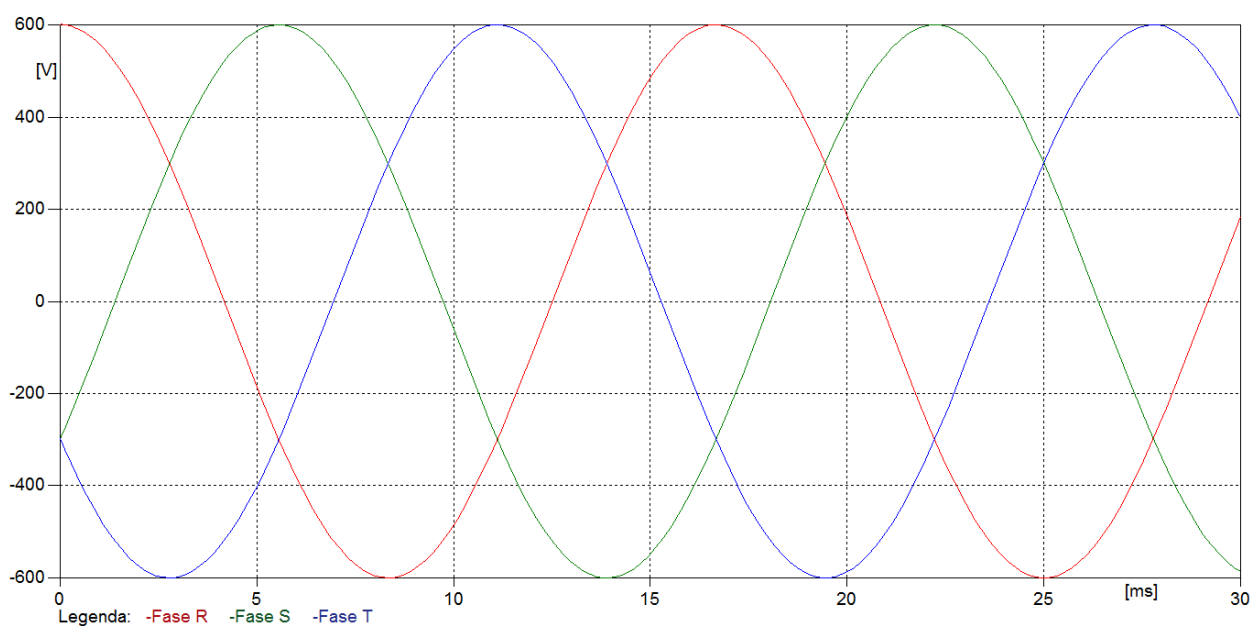
Analisando-se este cenário com o valor de resistência de aterramento de  $4 \Omega$ , nota-se a presença de surtos transitórios apenas no primário do transformador elevador do G1, porém com amplitude cerca de 2,5 vezes menor, com relação ao cenário de  $40 \Omega$ .

Torna-se, portanto, viável a operação de uma fazenda eólica nessas condições, pois, pela Figura 33, a máxima tensão suportável normalizada de impulso atmosférico para os geradores é de 4 kV, e o pico máximo encontrado foi de 720 V na saída do G1.

#### 5.4.5 Descarga atmosférica de 50 kA com resistência de aterramento de $0,1 \Omega$

Considerando uma resistência de aterramento de  $0,1 \Omega$ , aplicou-se uma DA de 50 kA no Aerogerador 1. Afim de analisar e comparar o comportamento deste cenário com o cenário de funcionamento normal do aerogerador, obteve-se as formas de ondas nos mesmos pontos utilizados nas figuras Figura 46, Figura 47 e Figura 48, ou seja, no primário e no secundário do transformador elevador de cada gerador.

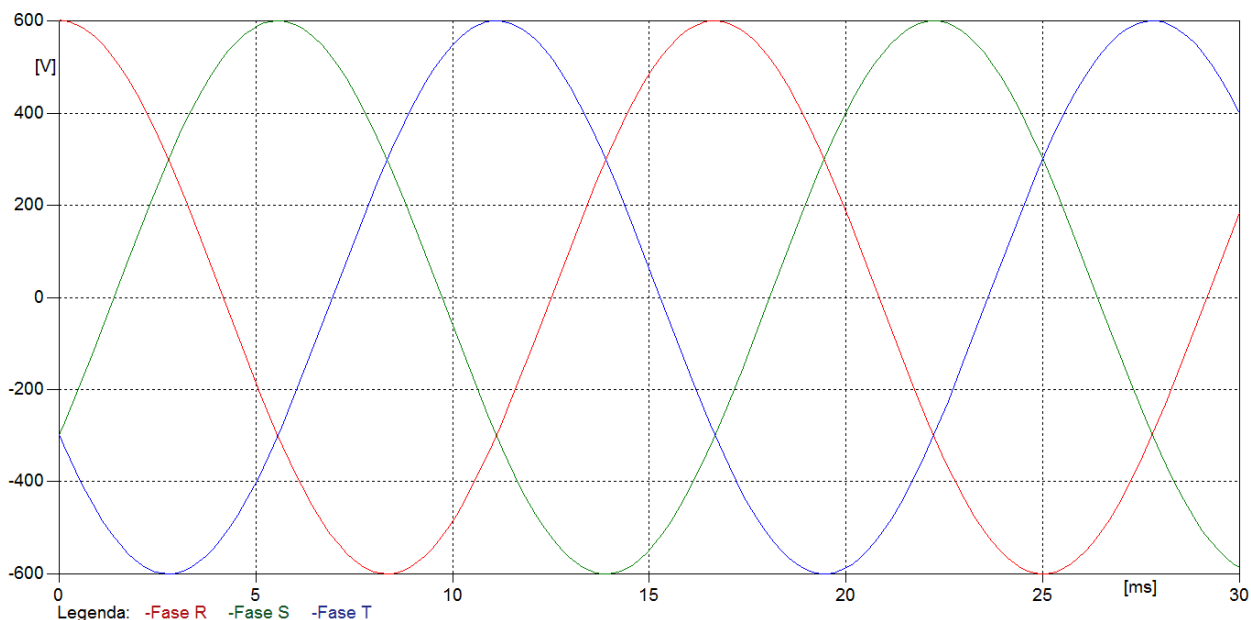
As formas de ondas obtidas estão ilustradas nas figuras Figura 61, Figura 62 e Figura 63. Na Figura 61 é possível observar que após o impacto direto da DA, a forma de onda na saída do gerador 1 (G1), não é afetada pelo surto transitório, ou seja, mantém o valor de pico de 600 V.



**Figura 61 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G1 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

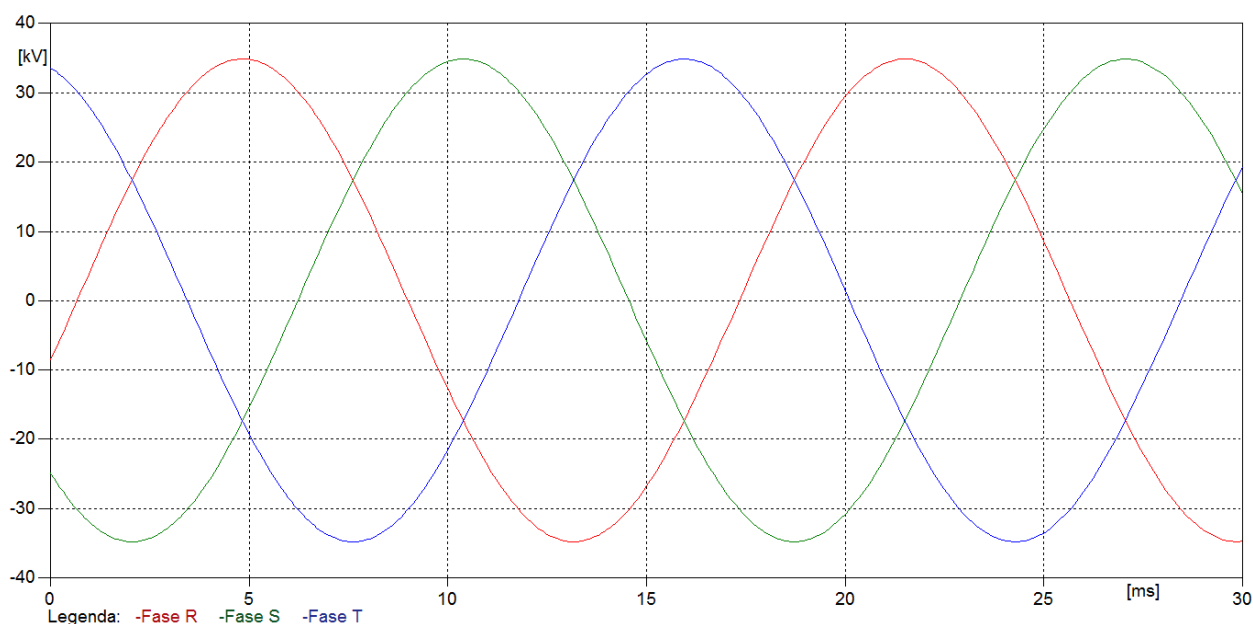


Na Figura 62 observa-se que, após o impacto direto da DA, não há a presença de surto transitório na saída do gerador 2 (G2), ou seja, as fases R, S e T possuem formas de ondas senoidais ideais com valor de pico de 600 V.



**Figura 62 - Formas de onda do primário do transformador (600 V) do gerador G2 com o surto.  
Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Observa-se na Figura 63, que não há surto transitório na saída do transformador elevador dos geradores, ou seja, apenas as fases R, S e T com formas de ondas senoidais ideais com o valor de pico de 34,5 kV.



**Figura 63 - Formas de onda do secundário do transformador (34,5 kV) dos geradores G1 e G2 com o surto.**

**Fonte: Software ATPDraw. Dos autores, 2017.**

Analisando-se este cenário com o valor de resistência de aterramento de  $0,1 \Omega$ , nota-se que não há surtos transitórios no primário e no secundário dos transformadores elevadores dos geradores G1 e G2, tornando-se viável a operação de uma fazenda eólica nessas condições.

Realizou-se simulação de uma descarga atmosférica de 50 kA com resistências de aterramento de inferiores a  $0,1 \Omega$ ; não observou-se alteração dos resultados encontrados. Portanto torna-se viável a operação de instalações com resistências de aterramento iguais ou inferiores a  $0,1 \Omega$ .

## 5.5 CONSIDERAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A partir do modelo de simulação apresentado, aplicou-se um surto correspondente a uma descarga atmosférica com valor de 50 kA variando-se o valor da resistência de aterramento da instalação ( $1.000 \Omega$ ,  $100 \Omega$ ,  $40 \Omega$ ,  $4 \Omega$  e  $0,1 \Omega$ ).

A modelagem se limita a verificar o aspecto qualitativo do surto sobre o aerogerador que sofre a descarga atmosférica, a influência deste no aerogerador adjacente e no transformador de alta tensão. Ambos estão conectados à rede do sistema elétrico.

Baseado nos valores e formas de ondas geradas, pode-se concluir que o surto transitório não se limitou a afetar apenas o aerogerador que sofreu o impacto, mas afetou também o adjacente, em menor intensidade no primário do transformador, porém, mesma

intensidade no secundário, isto devido a conexão do secundário dos geradores serem no mesmo ponto em que são conectados à rede elétrica.

Das curvas plotadas, originárias do software ATPDraw, pode-se fazer alguns apontamentos, como a relação direta entre a intensidade dos efeitos transitórios, causados pela DA, com o valor da resistência de aterramento. Pode-se notar que, com a diminuição do valor da resistência da instalação, há um decréscimo do valor do induzido pelo surto nos aparelhos da turbina eólica, como pode ser visto no Quadro 13.

É notável que, com o aumento da intensidade da corrente elétrica da descarga atmosférica, também cresce-se a tensão induzida tanto no gerador que sofreu impacto, quanto em seu adjacente. Os valores transitórios tendem a diminuir com passar do tempo até o estabelecimento dos valores nominais anteriores dos equipamentos e a rede, desde que o surto não comprometa o funcionamento destes.

Sugere-se para trabalhos futuros, o modelamento de um parque eólico completo acrescido de mais unidades aerogeradoras, onde se possa simular o surto em diferentes partes do parque, analisando os efeitos sobre o valor entregue à rede elétrica, assim como uma análise sobre os componentes de proteção e geração durante a ocorrência do surto.

**Quadro 13 – Quadro comparativo dos valores de sobretensão com a resistência de aterramento para o Gerador 1 e 2.**

Quadro comparativo em Volts		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		1000 $\Omega$		100 $\Omega$	
Geradores	Tensão de Pico (kV)	Sobretensão (kV)	Duração (ms)	Sobretensão (kV)	Duração (ms)
Gerador 1	0.6	1849.4	0.25	434.4	0.4
Gerador 2	0.6	8	0.75	0.75	0.3
		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		40 $\Omega$		4 $\Omega$	
Geradores	Tensão de Pico (kV)	Sobretensão (kV)	Duração (ms)	Sobretensão (kV)	Duração (ms)
Gerador 1	0.6	1.17	2	0.12	2
Gerador 2	0.6	0	0	0	0
		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		0,1 $\Omega$			
Geradores	Tensão de Pico (kV)	Sobretensão (kV)	Duração ( $\mu$ s)		
Gerador 1	0.6	0	0		
Gerador 2	0.6	0	0		
Quadro comparativo em %		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		1000 $\Omega$		100 $\Omega$	
Geradores	Tensão de Pico (%)	Sobretensão (%)	Duração (ms)	Sobretensão (%)	Duração (ms)
Gerador 1	100	308233	0.25	72400	0.4
Gerador 2	100	1333	0.75	125	0.3
		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		40 $\Omega$		4 $\Omega$	
Geradores	Tensão de Pico (%)	Sobretensão (%)	Duração (ms)	Sobretensão (%)	Duração (ms)
Gerador 1	100	195	2	20	2
Gerador 2	100	0	0	0	0
		Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
		0,1 $\Omega$			
Geradores	Tensão de Pico (%)	Sobretensão (%)	Duração ( $\mu$ s)		
Gerador 1	100	0	0		
Gerador 2	100	0	0		

Fonte: Dos autores, 2017.

## 6 CONCLUSÕES

As descargas atmosféricas tem caráter naturalmente imprevisível, e seus efeitos podem causar danos físicos às estruturas e prejuízos financeiros. Com avanço da tecnologia de geração eólica em termos de potência elétrica e altura, faz-se necessária a proteção dos aerogeradores contra descargas atmosféricas, garantindo continuidade da geração de energia, vida útil dos aparelhos, e proteção física de pessoas contra tensão de passo e toque.

O sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de uma estrutura é composto pelo sistema de captação, descida e aterramento. Em um aerogerador, os sistemas envolvidos possuem particularidades devido à sua altura, seus aparelhos internos, e seu material construtivo. Ao atingir o aerogerador, a descarga atmosférica pode causar danos por impacto direto ou indireto (indução de tensão e corrente); desta maneira, o sistema de proteção deve ser parametrizado para reduzir os efeitos da descarga atmosférica sobre o aerogerador.

A utilização de simuladores digitais mostrou-se muito importante para a finalização deste trabalho, visto que, a partir dos dados obtidos, foi possível realizar o estudo para avaliar os impactos dos transientes causados por descargas elétricas atmosféricas sobre o sistema.

O estudo dos efeitos de sobretensão, causados pelas descargas atmosféricas aplicada numa usina eólica ideal composta por dois aerogeradores, possibilitou observar que a mudança na resistência de aterramento da instalação afeta diretamente as tensões geradas no primário e secundário do gerador que sofreu impacto, assim como do gerador adjacente. Sistemas de proteção dos componentes internos, como DPS, projeto de malha de aterramento de baixa impedância, assim como sistema de captação e descida que atendam as normas, devem ser condições necessárias para a geração elétrica confiável e segura.

Ao analisar as simulações, pode-se observar a relação direta que há entre os valores diferentes de resistência de aterramento da instalação com os valores induzidos pelo surto. As diferentes situações simuladas possibilitaram evidenciar a importância de um correto dimensionamento da malha de aterramento, a fim de limitar o valor induzido pelo surto, garantindo a segurança e confiabilidade do sistema a seus usuários.

Muito embora não fosse essa a intenção deste trabalho, sugere-se analisar os efeitos de sobretensão nos componentes internos do aerogerador, assim como a análise dos efeitos do transitório com mais turbinas e com disposições diferentes.

## REFERÊNCIAS

AGGARWALL, Raj; MALCOLM, Newman. “**Analysis of Transient Overvoltage Phenomena Due to Direct Lightning Strikes on Wind Turbine Blade**”. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, Bath, United Kingdom, 2014.

AGUADO M., HERMOSO B., PEREZ J., “**Evaluacion del tipo de Descargas en los Aerogeneradores para su Proteccion Contra el Rayo**”, IEEE Latin American Transactions, July, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6939**: Coordenação de Isolamento–Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

BARBOSA, I.J. **Fundamentos de Proteção de Sistemas Elétricos**. São José da Barra, MG. 2009.

BONELLI, A. F. **Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica**. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2010.

BRASIL. **Energia renovável representa mais de 42% da matriz energética brasileira**. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/11/energia-renovavel-representa-mais-de-42-da-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 21 abril 2016.

BRASIL. ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. (Ed.). **Tempestades: Tipos**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/tipos.php> . Acesso em: 26 set. 2016.

BRASIL. ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. (Ed.). **Tipos de Raios**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php> . Acesso em: 27 set. 2016.

CHANG, H.C., HUANG, C.K., JIANG, J.L., KUO, C.C. “**Department of Electronic and Electrical Engineering**”. Department of Electrical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan. Department of Electrical Engineering, Saint John’s University, Taipei, Taiwan, 2013.

CHATTERJEE, T., MUKHERJEE, A. “**Study of Lightning Overvoltage Transients using ATP**”. Department of Electrical Engineering, Jadavpur University, Kolkata, India, 2015.

CLAMPER (Ed.). **Dispositivos de Proteção contra Surtos Elétricos DPS**. Disponível em: <<http://www.ribeirorepresentacoes.com/downloads/clamper/01-dispositivos-de-protecao-contrasurtos-eletricos-dps.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2017.

COORAY, Vernon. The lightning flash. No. 34. IET, 2003.

COTTON I., McNiff B., Soerensen T., Zischank W., Christiansen P., Hoppe-Kilpper M. et al. ‘**Lightning protection for wind turbines**’. 25th ICLP, Rhodes, Greece, 2000.

DEHN BLITZPANER, “**Lightning Protection Manual**”, Manual, Chapter 9.16, Germany, 2007.

DEHN, “**Lightning and Surge Protection for Wind Turbines**”, White Paper, Germany, 2012.

DIB Djalel, GUEBLA Abdallah, LABAR Hocine; “**Study of the Lightning impact of the Wind-Turbine**”, Laboratory of Electrical Engineering LABGET, University of Tebessa, Algeria, 2014.

DOOD Curtis, McCALLA Thomas, SMITH James, “**How To Protect a Wind Turbine from Lightning**”, First Edition, College of Engineering and Technology, Illinois, 1983

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/servicos/contrato.monitoramento.php> Acesso em: 20 abril 2016.

ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL. **Lightning and surge protection of multi-megawatt wind turbines**. Disponível em: <http://electrical-engineering-portal.com/lightning-and-surge-protection-of-multi-megawatt-wind-turbines>. Acesso em: 12 maio 2016.

ENERGINET, “**Earthing, Bonding and Lightning Protection**”, Technical Standards, Document no. 56361/10, Case 10/4054 – ETS – 04 V.03, Denmark, 2012.

ERIKSSON A.J., Meal D.V. ‘**The incidence of direct lightning strikes to structures and overhead lines**’. IEE Conference on Lightning and Power Systems, IEE Conference Publications 1984; 236.

FINDER (Org.). **Guia para aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS**. 2. ed. São Caetano do Sul: Finder, 2012. 74 p. Disponível em: <<http://www.instalacoeseletricas.com/Findernet/download/section/PDFs/guia-dps.pdf>>. Acesso em: 01 março 2017.

FUNABASHI, Toshihisa; YASUDA, Yoh. **Transient Analysis on Wind Farm Suffered From Lightning**. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1491992/>. Acesso em: 02 fevereiro 2017.

GAZETA DO POVO (Paraná). **Brasil é o 4º país do mundo em crescimento de energia eólica**. 2016. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/brasil-e-o-4-pais-do-mundo-em-crescimento-de-energia-eolica-aun9d7vi6sv1pa8gqj39mw62z> . Acesso em: 24 jun. 2016.

GWEC - Global Wind Energy Council. **Global Statistics**. Disponível em <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>. Acesso em: 21 abril 2016.

HEIER, Siegfried. **Grid integration of wind energy conversion systems**. Wiley, Chichester, 1998.

ICLP, “**Lightning struck on isolated tower**”. 20th ICLP, Interlaken, Switzerland, 1990.

IEEE Std 80-2000, “**IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**”, New York, 2000

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Wind Energy - 2013 edition**. Disponível em: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf). Acesso em: 21 abril 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400-24: Wind turbine generator systems – Part 24: Lightning protection**. Genebra, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62305-1: Protection against lightning . Part 1 – General Principles**. Genebra, 2010.



INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62304-5-34: Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors**. Genebra, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **WebRaios - INPE: Densidade de descargas atmosféricas para a terra (Ng)**. Disponível em: [http://www.inpe.br/webelat/ABNT\\_NBR5419\\_Ng/](http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng/). Acesso em: 12 maio 2016.

JIMENEZ, Carlos Marcelo Ari. **Sobretensão devido a uma descarga atmosférica em uma Subestação típica de 500 kV**. 2010. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000627.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

JOHNSON, Gary L. **Wind energy systems**. Manhattan, KS, 2006.

MARCARINI, Fabiano. **Proteção contra descargas atmosféricas utilizando para-raios de óxido de zinco**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

MODENA, Jobson. **A nova NBR 5419:2015 – Proteção contra descargas atmosféricas**. São Paulo: Cinesa, 2015. 46 slides, color.  
NFPA 780, “**Standard for the Installation on Lightning Protection Systems**”, Edition 2011.

NICOLAS REBOSIO (Uruguai). **Introducción al curso de instalaciones eléctricas de baja tension**. 2006.  
Disponível em: <[https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/63221/mod\\_resource/content/1/Contenido/0910-Presentacion.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/63221/mod_resource/content/1/Contenido/0910-Presentacion.pdf)>. Acesso em: 08 dez. 2016.

N. WILSON, J. Myers, K. L. Cummins, M. Hutchinson, A. Nag, "**Lightning attachment to wind turbines in Central Kansas: Video observations correlation with the NLDN and in-situ peak current measurements**", *Eur. Wind Energy Assoc. Conf.*, 2013.

**O RAI0. 2003**. UFRGS.

Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20031/Ricardo/oraio.html> . Acesso em: 26 set. 2016.

PAULINO, Marcelo E. de C.; JUNIOR., Dilney C. B. Pereira. **Medições de resistência de aterramento em subestações energizadas utilizando variação de frequência – Experiência da Celesc distribuição**. In: INDUSCON, 1., 2013, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Celesc Distribuição S.a., 2013. p. 1 - 6. Disponível em:

<<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1613.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

PIERGALLINI, Ana Cecilia. **Pautas para Regulación Jurídica de les Combustibles Alternativos**. 2008. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Direito e Ciências Políticas, Universidad Abierta Interamericana, Rosário, 2008. Disponível em: <http://imgbiblio.vaneduc.edu.ar/fulltext/files/TC081087.pdf> . Acesso em: 22 out. 2016.

PLONUS Martin, “Electromagnetismo aplicado”, Editorial Reverté, S.A., New York, 1994.  
SILVA, Elaine dos Santos. **A FÍSICA DOS RELÂMPAGOS E DOS RAIOS**. 2007. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

PRESTES, Sergio. “**Dispositivo de proteção contra surto de tensão**”, 2015. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/18f13a4586db468ea859899cb08d66d2/Artigo\\_Sergio.pdf](https://library.e.abb.com/public/18f13a4586db468ea859899cb08d66d2/Artigo_Sergio.pdf)>. Acesso em: 28 mar. 2017.

(2016) “**Principales elementos de un aerogenerador**”

Disponível em:

<http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/partes-de-un-aerogenerador-de-eje-horizontal/>. Acesso em 08/12/2016.

RISCO DE DESCARGAS ATMOSFERICAS NAS TORRES EÓLICAS. 2016. Disponível em: <<http://www.colunaengenharia.com.br/>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

RUFATO, Eloi J. **Aplicação de sistema especialista para localização de defeitos em redes de distribuição**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

SCHAEFER, Jose Carlos. **ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO E DE MANOBRA**. 2017. Disponível em: <<http://www.fisica-potierj.pro.br/outros/EnsaioImpulsoAtmosferico.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

SOERENSEN T., Jensen F.V., Raben N., Lykkegaard J., Saxov J. ‘**Lightning protection for offshore wind turbines**’. CIRED 2001, Amsterdam, The Netherlands, June 2001; 18–21.

TERMOTÉCNICA, Indústria e Comércio Ltda. **Apostila Orientativa Sobre SPDA**. Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <http://www.tel.com.br/informacoes-tecnicas/para-raios/informacoesbasicas/>. Acesso em: 10 abril 2016.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos.** Curitiba: UTFPR, 2008. Disponível em: [http://www.utfpr.edu.br/dibib/normas-para-elaboracao-de-trabalhos-academicos/normas\\_trabalhos\\_utfpr.pdf](http://www.utfpr.edu.br/dibib/normas-para-elaboracao-de-trabalhos-academicos/normas_trabalhos_utfpr.pdf). Acesso em: 11 abril 2016.

YASUDA, Yoh, TAKEHISA Hara, and Toshihisa Funabashi. "**Analysis on lightning surge propagation in wind farm.**" IEEJ TRANSACTIONS ON POWER AND ENERGY B 125.7 (2005): 709.

YOKOYAMA, Y. Yasuda, "**Proposal of lightning damage classification to wind turbine blades**", 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, pp. 368-371, 2011.

WETZEL K. "**Defect-tolerant structural design of wind turbine blades.**" In 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf., Palm Springs, CA. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.