

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

DANIEL SOUZA DE ALMEIDA



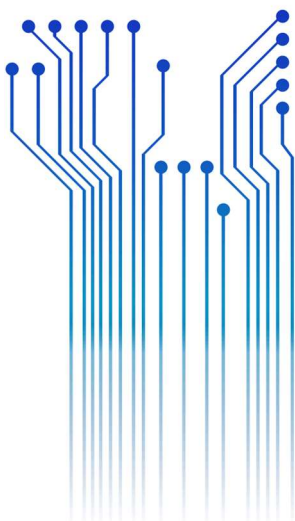
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PARQUES EÓLICOS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2016

DANIEL SOUZA DE ALMEIDA

PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PARQUES EÓLICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia Eólica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2016

DANIEL SOUZA DE ALMEIDA

PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PARQUE EÓLICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia Eólica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Deus, minha família, namorada, amigos e a todos os outros que me acompanharam nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Mais que um trabalho de conclusão de curso, esta conquista representa o fim de mais uma etapa realizada com o apoio de muitas pessoas, que merecem os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por me conceder forças e suporte que fizeram com que esse trabalho fosse realizado.

Agradeço aos meus pais, Osório e Betânia, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade.

Agradeço a toda minha família que, com todo carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida.

Agradeço aos meus amigos, Matheus Pinto e Breno Borborema, cuja ajuda foi fundamental para a realização desse trabalho.

Agradeço em especial ao meu orientador Leimar de Oliveira, pela paciência na orientação, e toda instrução que foi dada para a elaboração deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém”.

Dalai Lama.

RESUMO

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas têm um papel importante, principalmente quando se leva em conta a segurança de seres vivos e equipamentos elétricos. Com a finalidade de se tornar uma fonte inicial de referência em proteção de parques eólicos contra descargas atmosféricas, este trabalho tem como objetivo estudar os sistemas de proteção empregados em parques eólicos, desde o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) até materiais empregados na fabricação da torre de sustentação da turbina eólica como também das pás usadas no rotor da mesma. O trabalho aborda um breve histórico, contextualização do atual estado da energia eólica no Brasil e no mundo. Uma revisão bibliográfica sobre as descargas elétricas atmosféricas e do Estado da Arte da proteção empregada em aerogeradores contra descargas elétricas atmosféricas. Utilizando a metodologia de estudo de caso, este trabalho aprofundou o tema no estudo do sistema utilizado em um parque eólico instalado no Brasil.

Palavras-chave: Descarga, Proteção, Eólicas, SPDA, Pás.

ABSTRACT

The protection systems against lightning have an important role, especially when taking into account the safety of living beings and electrical equipment. In order to make an initial reference source protection windfarm against lightning, this work aims to study the protective systems used in wind farms, since the protection system against lightning (SPDA) to materials used in manufacturing the support tower of the wind turbine as well as the shovels used in the same rotor. The work deals with a brief history, context of the current state of wind energy in Brazil and worldwide. A literature review on the atmospheric electrical discharges and the art state of the employed protection in wind turbines against atmospheric electrical discharges. Using the case study methodology, this work has deepened the theme in the system study used in a wind farm installed in Brazil.

Keywords: Discharge, Protection, Wind, SPDA, Lightning, Blades

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Turbina Charles F. Brush.....	17
Figura 2 - Turbina Smith-Putnam 1941 USA.....	17
Figura 3 - Turbinas eólicas a) F.L. Smidth; b) Turbina Gedser	18
Figura 4 - Capacidade total instalada 2011-2015[MW]	19
Figura 5 - Ranking dos 15 países com maior capacidade instalada.	20
Figura 6 - Projeção da evolução de potência instalada no Brasil [MW].	21
Figura 7 - Mapa dos ventos do Brasil.....	22
Figura 8 – Evolução dos aerogeradores.....	24
Figura 9 - Turbina de eixo horizontal.....	25
Figura 10 - Componentes de aerogerador de eixo horizontal.....	26
Figura 11 - Processo de formação de cargas nas nuvens.....	29
Figura 12 - Indução de cargas nuvem-solo.....	30
Figura 13 - Formação de uma descarga atmosférica.	31
Figura 14 - Mapa Isoceràunico do Brasil.	32
Figura 15 - Forma de onda típica da tensão de uma descarga atmosférica	33
Figura 16 - Danos devido a descargas atmosféricas por componente.	35
Figura 17 - Custo médio de manutenção de turbinas novas e antigas.....	36
Figura 18 - Método da esfera rolante para turbina eólica.....	37
Figura 19 - Proteção das pás.....	39
Figura 20 - Caminho para a corrente de descarga.	40
Figura 21 - Diferentes zonas de proteção em uma turbina	41
Figura 22 - Leiaute típico do aterramento de um aerogerador	42
Figura 23 - Arranjos alternativos de aterramentos	43
Figura 24 - Disposição dos aerogeradores.....	45
Figura 25 - Instalações do parque eólica alegria	45
Figura 26 - Captores na pá.....	48
Figura 27 - Camada de aço na base da pá.....	48
Figura 28 - Extremidade da nacele	49
Figura 29 - Unidade de transferência de corrente de descarga.....	49
Figura 30 - Conexão cos cabos de descida.....	50

Figura 31 - Conexão entre os cabos de descida e o sistema de aterramento51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
MME	Ministério de Minas e Energia
INB	Indústrias Nucleares Brasileiras
Km	Quilômetro
Km/h	Quilômetro por hora
KV	Quilovolt
KW	Quilowatt
m	Metro
m/s	Metro por segundo
GW	Gigawatt
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
V	Volt
VA	Volt-ampére
W	Watt
WWEA	World Wind Energy Association
LCTU	Unidade de Transferência de Corrente de Descarga
E	Eficiência necessária de um sistema de proteção
N_c	Número de eventos críticos admissíveis anualmente
N_d	Média anual de ataques diretos
H	Altura efetiva da turbina
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Sumário.....	xii
1 Introdução	14
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Estrutura.....	15
2 Energia Eólica.....	16
2.1 História.....	16
2.2 Energia Eólica no Mundo	19
2.3 Energia Eólica no Brasil	20
2.4 Aproveitamento da Energia Cinética dos Ventos	23
2.5 Turbinas	24
3 Descargas Atmosféricas.....	28
3.1 Como são Geradas as Descargas Atmosféricas	28
3.2 Incidência de Raios no Brasil	31
3.3 Características das Descargas Atmosféricas.....	32
3.3.1 Forma de Onda da Descarga Atmosférica.....	32
3.3.2 Valores da descarga atmosférica	33
4 Proteção de Turbinas Eólicas.....	35
4.1 Danos as Turbinas.....	35
4.2 Proteção dos sub componentes dos aerogeradores	36
4.3 Definição do Sistema de Proteção	37
4.4 Proteção das Pás e Componentes Mecânicos	38
4.5 Proteção dos Sistemas Elétrico e Eletrônico.....	40
4.6 Sistema de Proteção do Anemômetro	41
4.7 Aterramento de Aerogeradores	42
5 Estudo de Caso.....	44

5.1	A empresa	44
5.2	O Leiaute do Complexo Eólico	44
5.3	Aerogrador Vestas V82-165	46
5.4	Proteção do Parque contra Descargas Atmosféricas.....	46
5.4.1	Proteção das Pás	47
5.4.2	Proteção da Nacele	48
5.4.3	Proteção dos Rolamentos	49
5.4.4	Sistema de Aterramento	50
5.4.5	Distribuição na Terra.....	50
6	Conclusão.....	52
	Referências Bibliográficas.....	53

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população mundial, elevação da produção de bens e da oferta de serviços é natural o aumento na demanda por energia elétrica e atrelada a essa necessita o fato da sociedade desejar o não comprometimento do meio ambiente, a energia elétrica gerada a partir da força do vento é tida como uma fonte de geração promissora por combinar capacidade de geração e impacto ambiental reduzido em relação a outras fontes de energia elétrica.

Devido as áreas favoráveis para a implantação de parques eólicos coincidem com os locais com frequentes registros de descargas atmosféricas, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são necessários nos parques eólicas. Aliado a altura elevada das turbinas, as descargas atmosféricas têm como caminho preferencial a estrutura da torre eólica.

A turbina eólica de eixo horizontal com três pás são as mais utilizadas na geração eólica e sendo o componente mais exposto, os danos nas torres estão se tornando problemas maiores a partir que a necessidade por uma maior potência faz com a altura da torre seja aumentada com consequência o aumento da probabilidade de ser atingida por descargas atmosféricas.

É importante ressaltar que mesmo com o grande número de pesquisas e estudos relacionados ao tema de descargas atmosféricas, muito ainda precisa ser esclarecido, no caminho de tentar impedir que uma descarga atmosférica ocorra. Portanto, até o momento devemos sempre tentar aprimorar os sistemas de proteção que ao menos impeçam ou tentem reduzir os possíveis prejuízos. Ressaltando que ainda não se conseguiu uma proteção completamente efetiva contra as descargas elétricas atmosféricas.

1.1 OBJETIVOS

A realização deste trabalho tem por objetivo estudar e avaliar os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas empregados atualmente pela indústria de geração eólica, desde ao SPDA como também os materiais empregados na fabricação das torres e pás.

Para um melhor entendimento, uma revisão sobre os conceitos que envolvem a energia eólica, descargas elétricas atmosféricas e o SPDA são abordados nesse trabalho.

1.2 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Tendo o capítulo 1 apresentando uma introdução, objetivos e uma visão geral dos temas abordados no trabalho.

O Capítulo 2 apresenta um panorama geral da energia eólica no Brasil e no mundo, apresenta uma revisão bibliográfica sobre a energia eólica, falando dos ventos, potência gerada a partir da força do vento, a composição do sistema de geração e alguns modelos de turbinas eólicas.

No Capítulo 3 é feito um estudo sobre as descargas atmosféricas, desde a origem dos raios, a formação das cargas nas nuvens, formação dos raios, incidência de raios, índice ceráunico e formas de raio.

No Capítulo 4 é apresentado uma revisão bibliográfica sobre o Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas utilizados em turbinas eólicas. Considerações sobre os danos as turbinas, as classes de proteção, componentes mais afetados.

No Capítulo 5 é apresentado o estudo referente ao Parque Eólico Alegria, desde informações sobre a empresa, as turbinas eólicas utilizadas no empreendimento e sobre o sistema de proteção contra descargas atmosféricas presente nas turbinas.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre o estudo, levando em consideração todos os elementos analisados anteriormente e por fim, tem-se as referências bibliográficas que foram utilizadas nesse trabalho.

2 CONTEXTUALIZANDO A ENERGIA EÓLICA

Observa-se que atualmente o uso da energia eólica para geração de energia elétrica está ganhando cada vez mais espaço no panorama nacional e como também internacional. A busca por novas fontes energia motivada tanto pelo elevado preço dos derivados de petróleo quanto a preocupação com a poluição fez com que países estimulassem o desenvolvimento de tecnologias na área de geração de energia elétrica através da força dos ventos.

2.1 ALGUNS ASPECTOS HISTÓRICOS

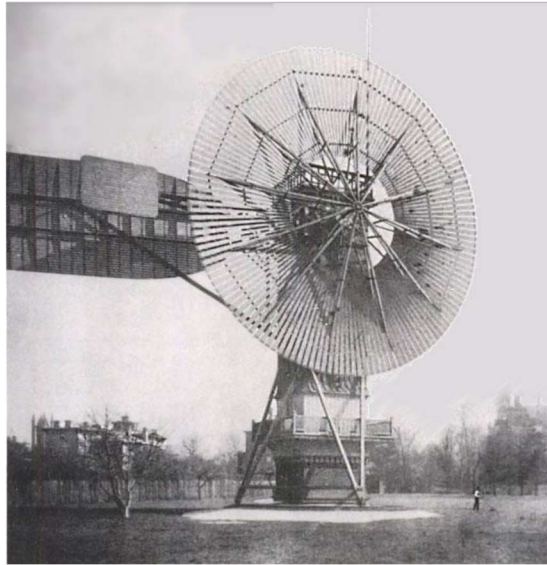
As primeiras utilizações da força dos ventos pelo homem não têm datas definidas, mas, certamente, ocorreram no Oriente há milhares de anos. O aproveitamento tinha como objetivo a substituição da força humana ou animal nas atividades realizadas na agricultura, algumas dessas atividades são a moagem de cereais e bombeamento de água a ser utilizada na irrigação.

Estima-se que as máquinas eólicas movidas por força de sustentação passaram a ser utilizadas em grande escala durante a Idade Média. Essas foram introduzidas na Europa pelos soldados que retornavam das Cruzadas. Essa tecnologia permitiu assim as grandes navegações, além de serem vastamente utilizada por navegadores era também bastante utilizada para a drenagem de terras, mais significativamente na Holanda e Inglaterra.

Já no final do século XIX, devido ao acelerado crescimento industrial e por consequência o aumento da demanda por energia elétrica fez com que os princípios básicos de funcionamento dos moinhos de vento fossem utilizados para a geração de energia elétrica com o objetivo de suprir a demanda.

Charles Brush foi um cientista americano que desenvolveu o primeiro sistema automático de produção de energia eólica colocado em funcionamento nos EUA em 1887. A turbina possuía um rotor de 17m de diâmetro, constituído por 114 pás de madeira, montada numa torre de 18m de altura sustentado por um tubo metálico central que possibilitava o movimento de rotação de modo a acompanhar o vento predominante. A turbina tinha potência nominal de 12KW que o cientista usou por 20 anos carregando baterias de chumbo-ácido na sua casa como observa-se na Figura 1. (RESENDE, 2011)

Figura 1 - Turbina Charles F. Brush



Fonte: Wikipédia (2016)

O primeiro aerogerador a ser conectado à rede elétrica foi o Balaclava, modelo russo de 100 KW no ano de 1931. Nos anos seguintes surgiram novos modelos de aerogerados motivados pelo investimento em novas tecnologias de geração de energia devido as dificuldades de abastecer as outras fontes de energia com combustíveis fósseis devido a 2ª Guerra Mundial. Já no ano de 1941 o aerogerador chamado de Smith-Putnam entrou em funcionamento nos EUA, com potência nominal de 1,25 MW, com diâmetro de 53m e pesando 16 toneladas conseguiu até o ano de 1979 manter o recorde de a turbina com a maior potência instalada. (RESENDE, 2011)

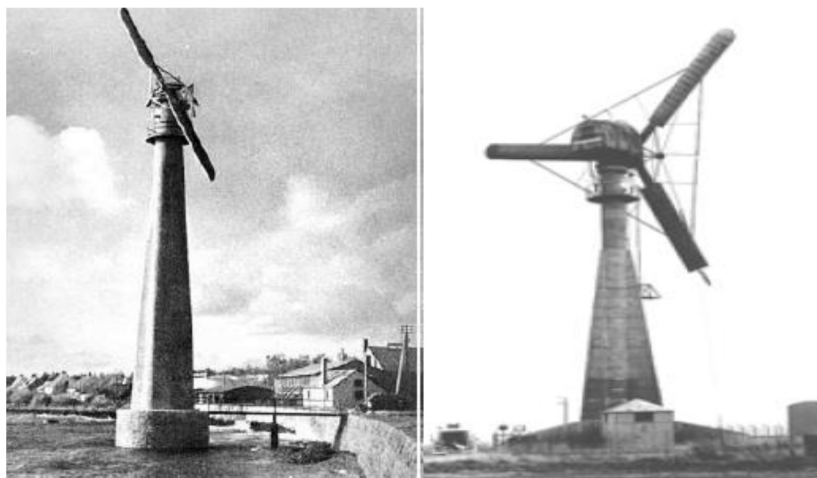
Figura 2 - Turbina Smith-Putnam 1941 USA



Fonte: Resende (2011)

Fruto dos progressos iniciados pelos cientistas Poul la Coure, posteriormente, Johannes Jull, a Dinamarca se destacou no aproveitamento da energia vinda da força dos ventos. Tendo a empresa F.L. Smidth como a precursora no desenvolvimento e na fabricação de pequenos aerogeradores com potencias de 45 KW. Em 1958, Johannes Jull conseguiu projetar uma turbina de 200 KW com alguns aspectos construtivos importantes, como três pás, diâmetro de 24m e o gerador assíncrono. Essa turbina foi intitulada de Gedser, essa titulação foi decorrente da cidade onde a turbina foi instalada.

Figura 3 - Turbinas eólicas a) F.L. Smidth; b) Turbina Gedser



Fonte: Resende (2011)

Os primeiros parques eólicos com produção em massa foram construídos nos anos 50 pelo construtor alemão Allgaier. Foram concebidos para fornecer energia elétrica para a rede elétrica pública. As turbinas eram essencialmente instaladas na costa Alemã, com apenas 10 KW de potência instalada e com diâmetro de 10m, com a possibilidade de regulação do ângulo das laminas. Algumas destas turbinas funcionaram durante 40 anos. (RESENDE, 2011)

O baixo preço dos combustíveis fósseis após os anos 50 gerou o desinteresse por parte dos investidores nas tecnologias de aproveitamento da força dos ventos como forma alternativa a geração tradicional de energia elétrica. Porém, o cenário mudou nos anos 70, com o aumento dos mesmos, a energia eólica se tornou uma fonte de interesse, onde parques eólicos foram construídos com diferentes potências instaladas.

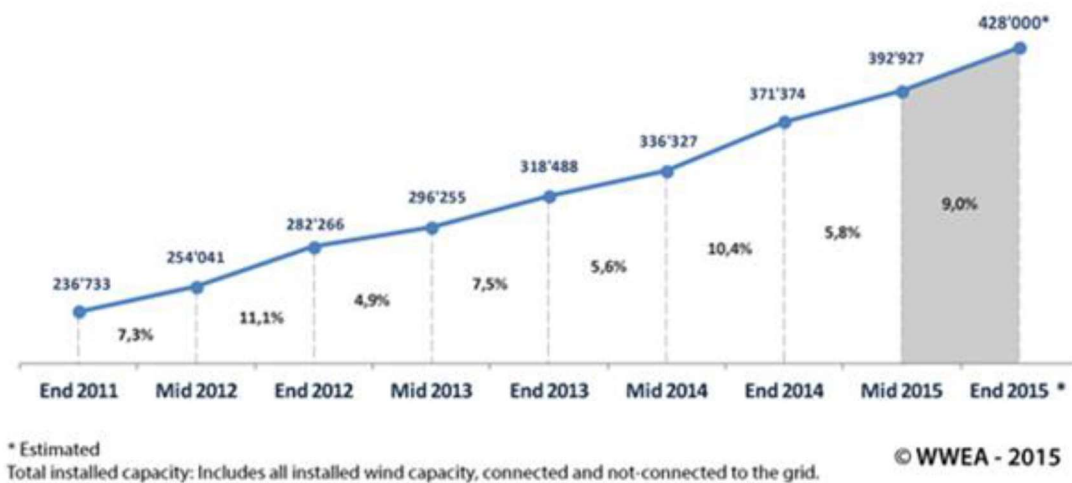
Os esforços realizados por países como Dinamarca, Alemanha e EUA nas décadas de 80 e 90 com objetivo de desenvolver tecnologias a partir de experiências de estímulo ao mercado de energia eólica fizeram com que esse tipo de fonte de energia conseguisse contribuir de uma forma mais significativa na geração de energia elétrica.

2.2 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

O alto custo de produção de energia combinado com o aumento da demanda por energia fez com que a energia eólica se tornasse uma fonte de energia com uma certa representatividade do cenário mundial. Combinando eficiência e fonte inesgotável, a geração eólica tem levado países a estabelecer incentivos reguladores e direcionar investimentos para estimular essa forma de geração de energia.

A capacidade eólica mundial atingiu 435 GW até o final do ano de 2015, com uma taxa de crescimento mundial de 17,2%, superior ao ano anterior que teve uma taxa de 16,4%. Podendo destacar o Brasil, Polônia, China e Turquia, que fora os países com as maiores taxas de crescimento.

Figura 4 - Capacidade total instalada 2011-2015[MW]



Fonte: The World Wind Energy Association - Year 2015 Report.

Os cinco países: China, Alemanha, Índia, Estados Unidos e Espanha ainda representam coletivamente a maior parte da capacidade eólica global, cerca de 72%. Vale ressaltar que a Espanha teve um desempenho decepcionante no ano de 2015 com nenhum crescimento em sua capacidade instalada.

O mercado chinês mostrou um desempenho surpreendente, adicionando 33 GW, alcançando uma capacidade eólica total de 148 GW no ano de 2015.

A Alemanha adicionou 4,9 GW. Tendo a energia eólica responsável por 13% da demanda do país em 2015.

A Índia conseguiu adicionar 2,3 GW até novembro de 2015, esse desempenho foi suficiente para passar a Espanha em capacidade total instalada de energia eólica.

O mercado americano apresentou uma boa performance com o acréscimo de 8,6 GW a sua capacidade instalada. O crescimento mais forte desde 2012, destacando que o preço baixo dos combustíveis fósseis não tiveram impacto negativo no desempenho da geração eólica no país.

Figura 5 - Ranking dos 15 países com maior capacidade instalada.

Wind Energy Worldwide
Top 15 countries by total wind installations

Position 2015	Country/Region	Total capacity end 2015** [MW]	Added capacity 2015*** [MW]	Growth rate 2015 [%]	Total capacity end 2014 [MW]
1	China	148'000	32'970	29.0	114'763
2	United States	74'347	8'598	13.1	65'754
3	Germany	45'192	4'919	11.7	40'468
4	India *	24'759	2'294	10.2	22'465
5	Spain	22'987	0	0.0	22'987
6	United Kingdom	13'614	1'174	9.4	12'440
7	Canada	11'205	1'511	15.6	9'694
8	France	10'293	997	10.7	9'296
9	Italy	8'958	295	3.4	8'663
10	Brazil	8'715	2'754	46.2	5'962
11	Sweden	6'025	615	11.1	5'425
12	Poland	5'100	1'266	33.0	3'834
13	Portugal	5'079	126	2.5	4'953
14	Denmark	5'064	217	3.7	4'883
15	Turkey	4'718	955	25.4	3'763
	Rest of the World	40'800	5'000	14.0	35'799
	Total	434'856	63'690	17.2	371'374

* by november 2015

** Includes all installed wind capacity, connected and not-connected to the grid.

*** Includes the net capacity added during the year 2015.

© WWEA - 2016

Fonte: The World Wind Energy Association - Year 2016 Report.

O desempenho positivo dos mercados de energia eólica no mundo ocorreu devido as vantagens econômicas e da sua crescente competitividade em relação a outras fontes de energia, as incertezas em relação a oferta dos derivados do petróleo, bem como a necessidade urgente de implementar tecnologias livres de emissões de poluentes.

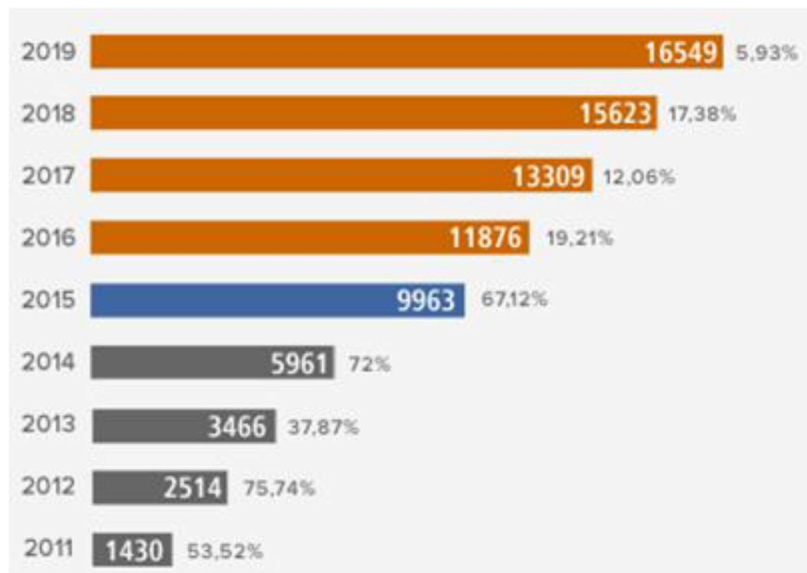
2.3 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil, apesar de ainda apresentar tímida participação no mercado eólico mundial, teve crescimento significativo em sua capacidade instalada na última década, e no último ano

só suplantado pela China, EUA e Alemanha. A profunda crise econômica na Europa deslocou o mercado eólico para Ásia e Brasil. Incentivos governamentais destinados ao setor lograram êxito em aumentar a participação eólica na matriz elétrica brasileira. (LAGE; PROCESSI, 2013)

O Brasil entrou no grupo que mais investem em instalação energia eólica com a impressionante taxa de crescimento de 46,2% em 2015, com isso o país se tornou um importante mercado para novas turbinas eólicas estendendo assim sua liderança incontestável na América Latina. Tendo uma expectativa de 20 GW de capacidade de geração em 2020.

Figura 6 - Projeção da evolução de potência instalada no Brasil [MW].



Fonte: Brazil Windpower (2016)

No ano de 1992, a primeira turbina eólica foi instalada no Brasil, em Fernando de Noronha, mas foi a partir de 2005 que a geração eólica brasileira cresceu de forma significativa.

Excluindo a geração de energia por meio de hidrelétricas, a matriz energética brasileira não tem índices relevantes de geração por meio de fontes renováveis. A partir do momento que o governo federal começou a incentivar e desejar uma maior participação de fontes renováveis na matriz energética pode-se observar um crescimento especial da geração eólica e por biomassa, tendo a região Nordeste como campeã na geração de energia eólica.

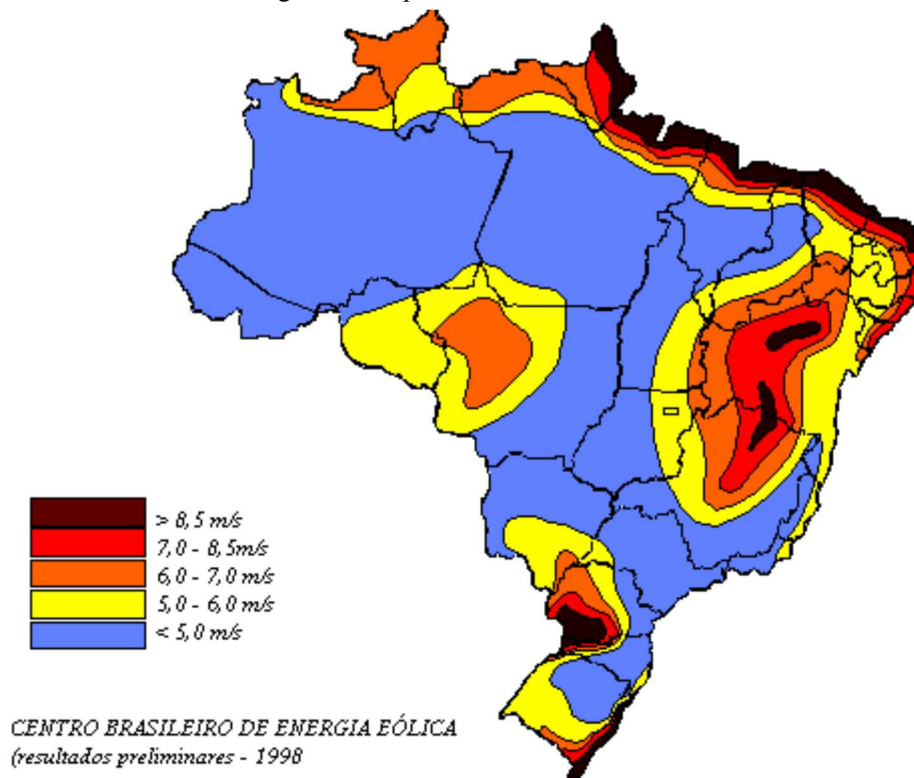
O estado do Rio Grande do Norte foi especialmente agraciado com a energia eólica, por possuir bons ventos atraiu investidores, deixando de ter sua demanda totalmente abastecida por outros estados.

De acordo com a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, até setembro de 2003, O Brasil tinha em operação, apenas seis parques eólicos com capacidade instalada total de 22

MW, mas até o ano de 2009, a matriz elétrica tinha 33 usinas em operação e mais 414 MW de capacidade instalada. Possuindo também nove fabricas e aerogeradores que estão sendo exportados.

O Brasil tem uma enorme extensão territorial e um litoral com mais de 8.000 Km, um aspecto de fundamental importância, além disso, estudos mostram que grande parte do país tem um potencial para geração eólica. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, o potencial de energia eólica foi estimado em mais de 272 TWh/ano.

Figura 7 - Mapa dos ventos do Brasil.



Fonte: Eletrobras/Cepel 2001

Na Paraíba, um leilão garantiu a construção de mais três parques eólicos, que serão construídos no Seridô paraibano. Os vencedores do leilão de geração de energia A-5, realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) na manhã do dia 20/11/2014, instalarão os projetos no município de São José do Sabugi, e ainda nos territórios dos municípios de Santa Luzia e do Junco do Seridó.

Os três parques totalizam um investimento de cerca de R\$ 300 milhões e terão 30 MW de potência cada. Foram comprados 488 lotes das três usinas, valendo R\$ 136,24 cada MWh,

o que resulta em cerca de R\$ 60 milhões de renda fixa anual. O preço ficou abaixo da média registrada no leilão, que foi R\$ 196,11 por cada MWh.

2.4 APROVEITAMENTO DA ENERGIA CINÉTICA DOS VENTOS

O vento é o recurso primordial para a geração eólica, que está associado a rotação planetária e a energia solar. Esses são causados pelas diferenças de pressão ao longo da superfície da Terra.

Os ventos mais fortes e mais contínuos ocorrem nas zonas localizadas a cerca de 10 Km da superfície da Terra. Não sendo possível implantar turbinas nessas áreas, regiões a algumas dezenas de metros na atmosfera são de interesse para a geração eólica.

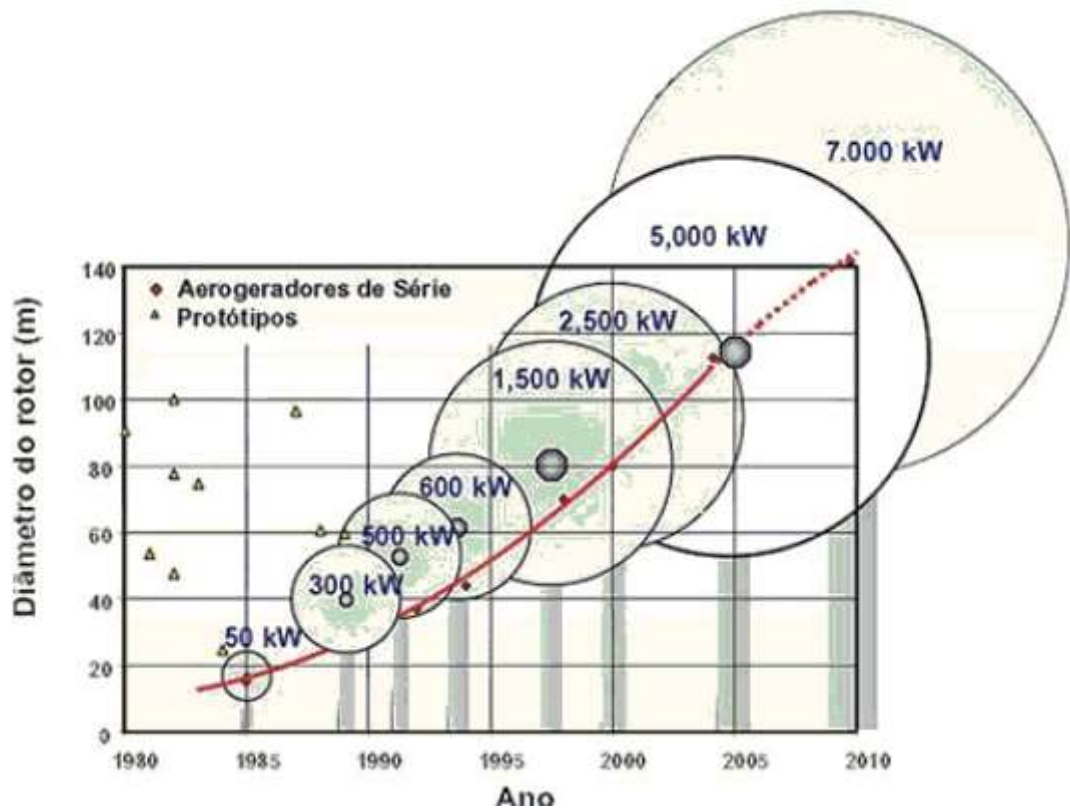
As turbinas eólicas conseguem aproveitar a energia do vento disponível no ar em movimento através da conversão de parte da energia cinética utilizando o aerogerador. Duas fases são necessárias para a conversão, na primeira, as pás do aerogerador acionam o rotor retirando assim a energia cinética convertendo em conjugado mecânico, em seguida o gerador converte o conjugado mecânico em energia elétrica.

A potência que pode ser extraída por uma turbina eólica de três pás com eixo horizontal pode ser calculada a partir da Equação 1.

$$Pm = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p(\lambda, \beta) * V_v^3 \quad (1)$$

Como apenas parte da energia cinética pode ser convertida em energia mecânica, o rendimento da turbina é influenciado pela sua curva de coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$. Esta curva é função da razão da velocidade de ponta da pá e a velocidade do vento e do ângulo de passo das pás. A potência também está em função da densidade do ar, da área varrida pelas pás do rotor e pela velocidade do vento.

Figura 8 – Evolução dos aerogeradores.



Fonte: Lima, Guimarães Jr e Paula (2011)

Pode-se concluir que para um maior aproveitamento da força dos ventos, elevação da altura das torres, como também do diâmetro das pás empregadas em turbinas modernas fazem com que a turbina produza mais energia, porém, os riscos de serem atingidas por descargas atmosféricas aumentam consideravelmente.

2.5 TURBINAS

Turbinas eólicas de eixo horizontal com duas e três pás são as que permitem o maior aproveitamento da energia eólica com velocidade entre 7 m/s e 15 m/s. Sendo a turbina de eixo horizontal com três pás a mais comumente utilizada, serão essas as abordadas nesse trabalho.

As turbinas cujo eixo é montado paralelo ao solo é a mais comum nos parques eólicos. O seu rendimento aerodinâmico é superior aos de eixo vertical e estão menos expostos aos esforços mecânicos, compensando seu maior custo, porém essas turbinas também possuem desvantagens, como a necessidade de se alinhar constantemente com a direção do vento, usando um mecanismo automático de ajuste. O controlador eletrônico da turbina lê a posição de um

dispositivo mecânico ou eletrônico e ajusta a posição do rotor para capturar o máximo de energia disponível pelo vento.

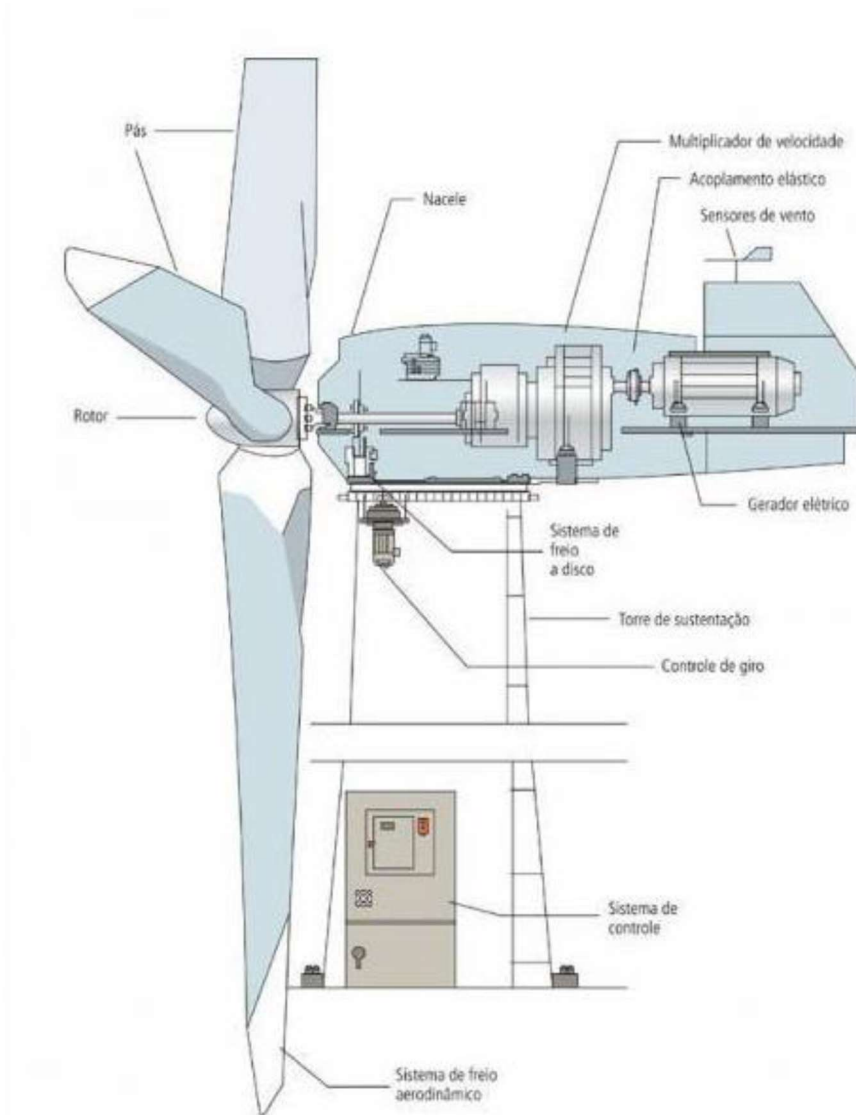
Figura 9 - Turbina de eixo horizontal.



Fonte: AeroGerador (2016)

Na figura 10 pode-se observar as partes que compõem um aerogerador de eixo horizontal.

Figura 10 - Componentes de aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: Evolução Energia Eólica (2016)

- Torre de sustentação: Elemento indispensável para suportar e posicionar o rotor. Sustentando o peso dos componentes do aerogerador que fica na nacela.
- Nacela: É a estrutura montada sobre a torre, abriga os componentes do sistema de geração de energia como o gerador e a caixa multiplicadora.
- Eixo: O eixo da turbina eólica é conectado ao cubo do rotor. Quando o rotor gira, o eixo gira junto, transferindo sua energia mecânica rotacional para um gerador elétrico na outra extremidade.
- Freios: Em caso de sobrecarga de energia ou algum outro tipo de problema do sistema, detém a rotação do eixo.
- Caixa Multiplicadora: Sistema de engrenagem para a multiplicação da velocidade entre os eixos do rotor e do gerador.

- Pás: As pás são responsáveis pela interação com o vento, convertendo a energia cinética do vento em conjugado mecânico no eixo.

- Sistemas de Controle Aerodinâmico da Potência: Monitora todo o sistema, realiza o desligamento da turbina em caso de falha e ajusta o mecanismo de alinhamento da turbina com o vento de maneira que atinjam e consigam manter a máxima potência nominal no maior intervalo de tempo possível.

3 ASPECTOS BÁSICOS DE UMA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 COMO SÃO GERADAS AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O fenômeno é consequência do rápido movimento de elétrons de um lugar para outro. Os elétrons se movem tão rápido que fazem o ar ao seu redor iluminar-se, resultando em um clarão, e aquecer-se, resultando em um som (o trovão). Apesar de estarem normalmente associados a tempestades com chuvas intensas e vento intensos, também podem ocorrer em tempestade de neve, tempestades de areia, durante erupções vulcânicas, ou mesmo em nuvens que não sejam de tempestade, embora nesses casos costumem ter extensões e intensidade bem menores. Quando o relâmpago se conecta ao solo é chamado de raio, podendo ser denominado ascendente, quando inicia no solo e sobe em direção a tempestade, ou descendente, quando inicia na tempestade e desce em direção ao solo. (INPE, 2016)

Considerando que a Terra possui cargas negativas em excesso, ela será um potencial negativo. A incidência de luz do Sol no solo faz com que a superfície da Terra aqueça, e por consequência, esse calor tende a ser transferido a camada de ar mais próxima ao solo.

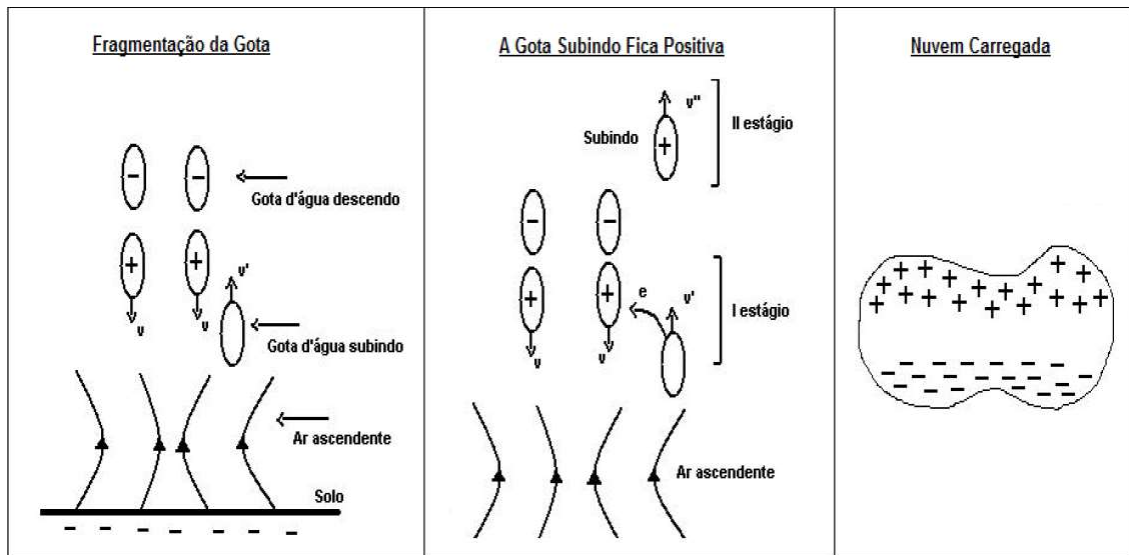
A camada de ar recebe, também, grande quantidade de umidade devido a evaporação da água da superfície, e essa camada de ar aquecida dilata-se diminuindo sua densidade, ficando mais leve que as camadas de ar frio. Essas camadas de ar frio deslocam-se empurrando para cima as de ar quente, desta forma tem-se as correntes de ar ascendentes.

As correntes de ar ascendente carregam muita umidade, quando atingem regiões altas onde a temperatura é baixa se condensa e forma várias gotículas de água que ficam suspensas no ar. Ao caírem encontram outras gotículas aumentando assim o seu tamanho. As gotículas possuem cargas induzidas, na parte inferior cargas positivas e cargas negativas na parte superior. Visto que o solo da Terra é carregado negativamente quando há a fragmentação das gotas formam-se os íons positivos na parte inferior e os íons negativos na superior.

Os íons positivos encontram grande quantidade de gotículas d'água arrastada pelo ar ascendente, já a gota ascendente neutra durante o choque, entrega elétrons aos íons positivos descendentes, com isso a gota ascendente se torna positiva e o íon fica neutralizado. Essas gotas

ascendentes estão dotadas de grande energia cinética, conseguem subir até a parte superior da nuvem e os íons negativos tem menor energia cinética e se aglomeram na parte inferior.

Figura 11 - Processo de formação de cargas nas nuvens.



Fonte: Ferreira (2010)

A nuvem carregada induz no solo cargas positivas, que ocupam uma área correspondente ao tamanho da nuvem. Como a nuvem é arrastada pelo vento, a região de cargas positivas no solo acompanha o deslocamento da mesma, formando praticamente uma sombra de cargas positivas que seguem a nuvem.

A concentração de cargas elétricas positivas e negativas numa determinada região faz surgir uma diferença de potencial entre a terra e a nuvem, essa diferença de potencial entre a terra e a nuvem varia de 10 a 1.000.000 KV, sendo a altura média da nuvem varia de 300 a 5.000 m de altura.

Nota-se que para a descarga efetuar não é necessário que o gradiente de tensão seja superior à rigidez dielétrica de toda a camada de ar entre a nuvem e o solo, basta apenas um campo elétrico bem menor. Isso é resultado do fato que o ar entre a nuvem e o solo não ser homogêneo, pois contém grande quantidade de impurezas, umidade e ar ionizado, que estão em constante agitação.

Essas impurezas deixam o ar “fraco”, necessitando de um campo elétrico menor para que o raio consiga perfurar o ar e descarregar sua carga elétrica na terra.

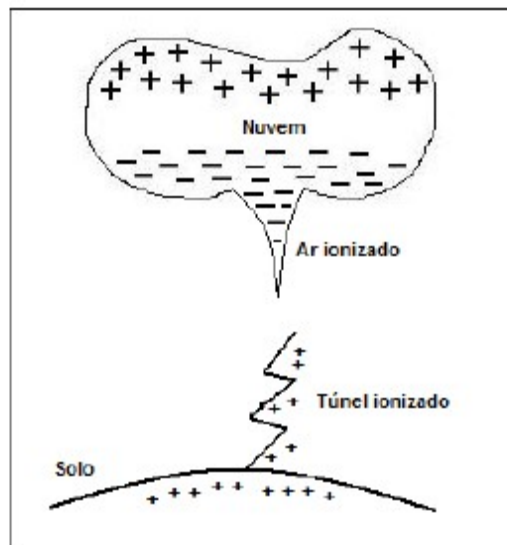
Na descida de um raio, primeiramente pequenos túneis de ar ionizado ficam pelo poder das pontas, com alta concentração de cargas que vão, aos poucos furando a camada de ar a procura de menor resistividade, ou seja, os túneis ionizados tentando se aproximar das cargas

positivas do solo. Esses tuneis ionizados seguem um caminho tortuoso e cheio de ramificações, com origem na terra e na nuvem, esse fenômeno é conhecido como descarga piloto ou raio líder.

A ionização do caminho seguido pela descarga piloto propicia condições favoráveis de condutividade do ar ambiente, mantendo-se elevado o gradiente de tensão na regia entre a nuvem e a terra, surge, em função da aproximação do solo de uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente, constituída de cargas elétricas positivas, denominadas descargas ascendente de retorno da terra para nuvem.

Em seguida originando-se a descarga principal no sentido nuvem para terra, de grande intensidade, responsável pelo fenômeno conhecido com trovão, que o deslocamento da massa de ar circundante ao caminhamento do raio, em função da elevação de temperatura e, conseqüentemente do aumento de volume.

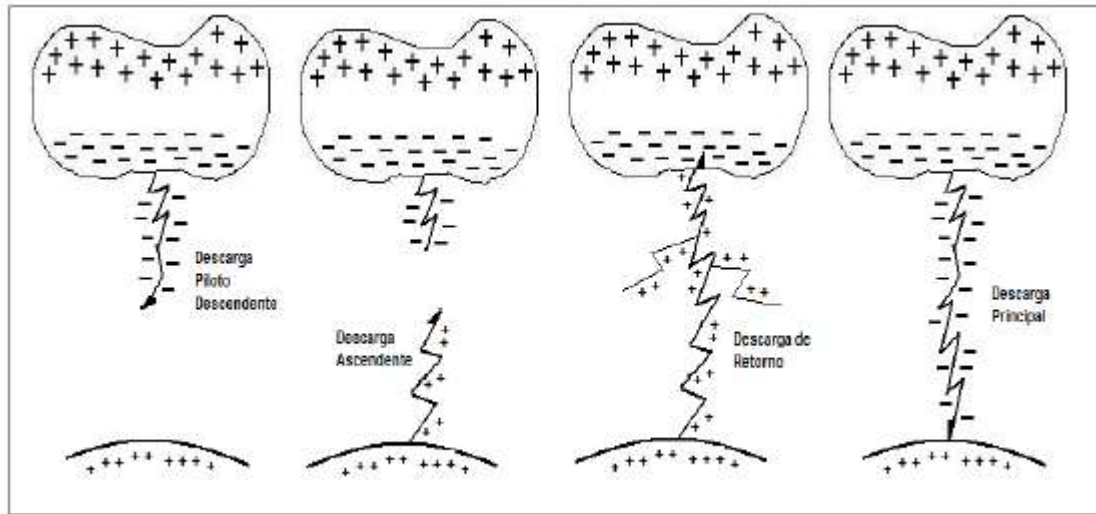
Figura 12 - Indução de cargas nuvem-solo.



Fonte: Ferreira (2010).

A Figura 13 ilustra graficamente a formação das descargas atmosféricas, passando pelo processo de descarga piloto, em seguida a descarga ascendente com a descarga de retorno e, por fim, a formação da descarga principal.

Figura 13 - Formação de uma descarga atmosférica.



Fonte: Ferreira (2010)

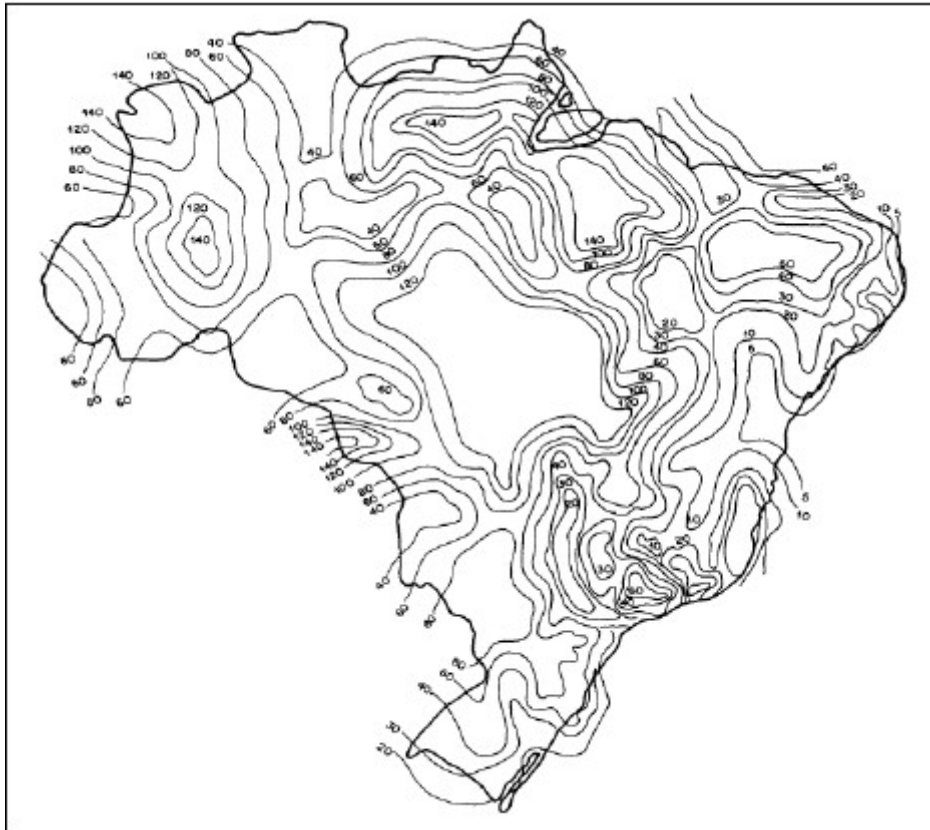
3.2 INCIDÊNCIA DE RAIOS NO BRASIL

O Brasil é um dos países de maior ocorrência de relâmpagos no mundo por ter grande extensão territorial e estar próximo do equador geográfico. Estima-se, com base em dados de satélite, que cerca de 50 milhões de relâmpagos nuvem-solo atinjam o solo brasileiro por ano – ou dois relâmpagos por segundo. Isto equivale a uma média de aproximadamente 7 relâmpagos por km² por ano, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

Um parâmetro que indica o número de dias de trovoadas por ano em uma determinada localidade é chamado de Índice Ceráunico. Este dado é mais realista quando se tem registro de muitos anos, onde o observador deve registrar as trovoadas dentro de sua localidade, no qual a distância estimada da ação do observador é de um círculo com raio de 20 km.

Registrando todos os índices ceráunicos em um mapa, e ligando os pontos de igual intensidade, obtém-se as linhas de mesmo índice, isto é, índice isoceráunicos. Na figura 14 a seguir temos o Mapa Isoceráunico do Brasil.

Figura 14 - Mapa Isoceráunico do Brasil.



Fonte: NBR-5419

O mapa isoceráunico é importante porque é através dele que se verifica o número de trovoadas por ano para a área em que se pretende projetar o sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Sendo de grande relevância para a avaliação da necessidade do sistema de proteção.

Normalmente, a indispensabilidade de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas é imposta por leis municipais no Brasil. Porém, na NR-10 Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade é explicitado a obrigatoriedade para instalações com potência superior a 75 KW.

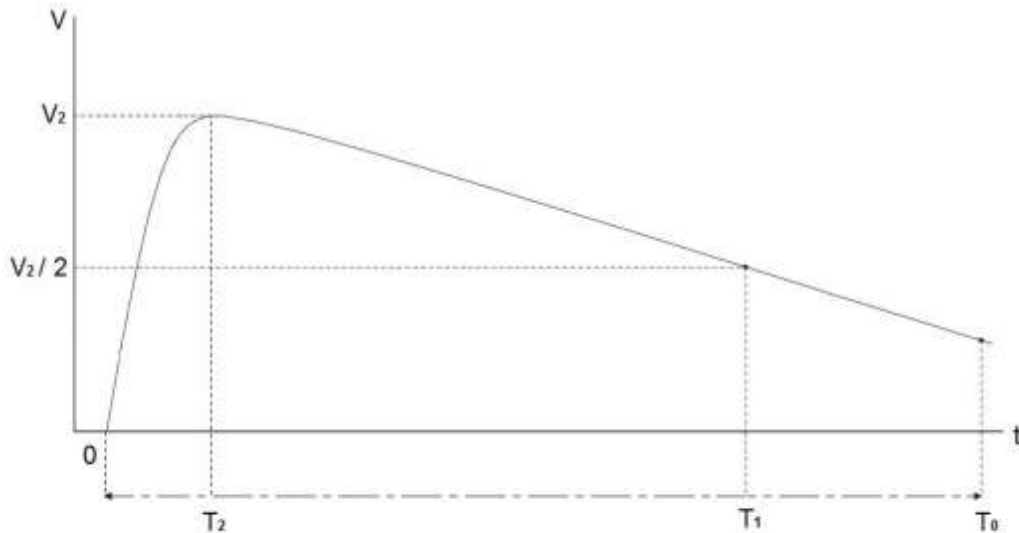
3.3 CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.3.1 FORMA DE ONDA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Com as informações adquiridas nos diferentes estudos e pesquisas relacionadas a descargas atmosféricas, pode-se comprovar que a corrente de descarga é caracterizada por ter

polaridade única, significando assim uma só direção. Sendo possível também caracterizar a forma de onda típica de uma descarga, como mostra a figura 15.

Figura 15 - Forma de onda típica da tensão de uma descarga atmosférica



Fonte: Stéfani (2011)

Observando na forma de onda típica de uma descarga atmosférica, pode-se verificar que o seu valor máximo de tensão V_2 , conhecido como Valor de Crista é alcançado no instante de tempo T_2 , variando entre 1 a 10 μs , esse tempo é conhecido como Frente de Onda.

Após atingir o Valor de Crista (V_2), a tensão da descarga atmosférica começa a cair, atingido uma amplitude de metade do valor de crista num intervalo de tempo T_1 como se observa na figura 14, esse tempo geralmente varia de 20 a 50 μs e é comumente conhecido como Tempo de Meia Cauda. A descarga atmosférica atinge valor praticamente zero após atingir T_0 , esse período varia entre 100 a 200 μs e é chamado de Tempo de Cauda.

A onda de tensão característica de descarga atmosférica foi normalizada com 1,2 μs para o valor de frente de onda e 50 μs para o valor de tempo de meia cauda. Essa onda de tensão também é conhecida como onda de 1,2 x 50 μs . Já a onda de corrente da descarga atmosférica foi normalizada com 8 μs para valor de frente de onda e 20 μs para o valor do tempo de meia cauda. Consequentemente, a onda de corrente da descarga atmosférica é conhecida como onda 8 x 20 μs . (MAMEDE FILHO, 2005; 2010)

3.3.2 VALORES DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Além das informações referentes aos valores típicos das formas de onda da tensão e corrente das descargas atmosféricas, mais grandezas foram medidas e catalogadas, sendo apresentadas no quadro 1 abaixo. (KINDERMANN, 2011)

Quadro 1 - Valores de uma descarga atmosférica

Corrente	2.000 a 200.000 Ampères
Tensão	100 a 1.000 kV
Duração	70 a 200 μ s
Carga elétrica da nuvem	20 a 50 C
Potência liberada	1 a 8 bilhões de kW
Energia	4 a 10 kWh
Tempo de crista	1,2 μ s
Tempo de meia calda	50 μ s
di(t)/dt	5,5 kA/ μ s

Fonte: Kindermann (2011)

Segundo Kindermann (2011), pode-se afirmar que após estudos realizados por investigadores internacionais, pode-se dizer a respeito da curva de probabilidade da magnitude da corrente de uma descarga atmosférica, que:

- 70% das descargas atmosféricas excedem 10 KA;
- 50% das descargas atmosféricas excedem 20 KA;
- 20% das descargas atmosféricas excedem 40 KA;
- 5% das descargas atmosféricas excedem 80 KA.

4 PROTEÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

Este capítulo fornece informações sobre a proteção contra descargas atmosféricas de turbinas eólicas.

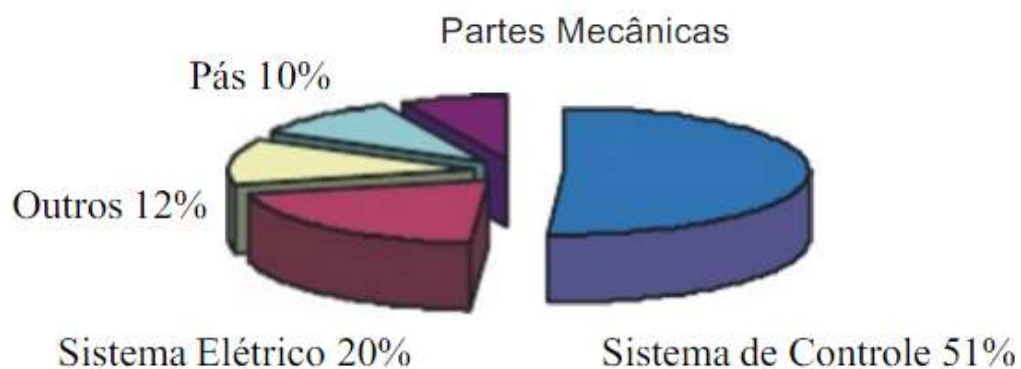
4.1 DANOS AS TURBINAS

Devido as instalações de parques eólicos ocorrerem geralmente em locais abertos ou montanhosos, tendo o terreno pouca influência na condução do vento na região, as descargas atmosféricas estão propícias a causarem danos as estruturas das turbinas eólicas.

Segundo Santos (2013),

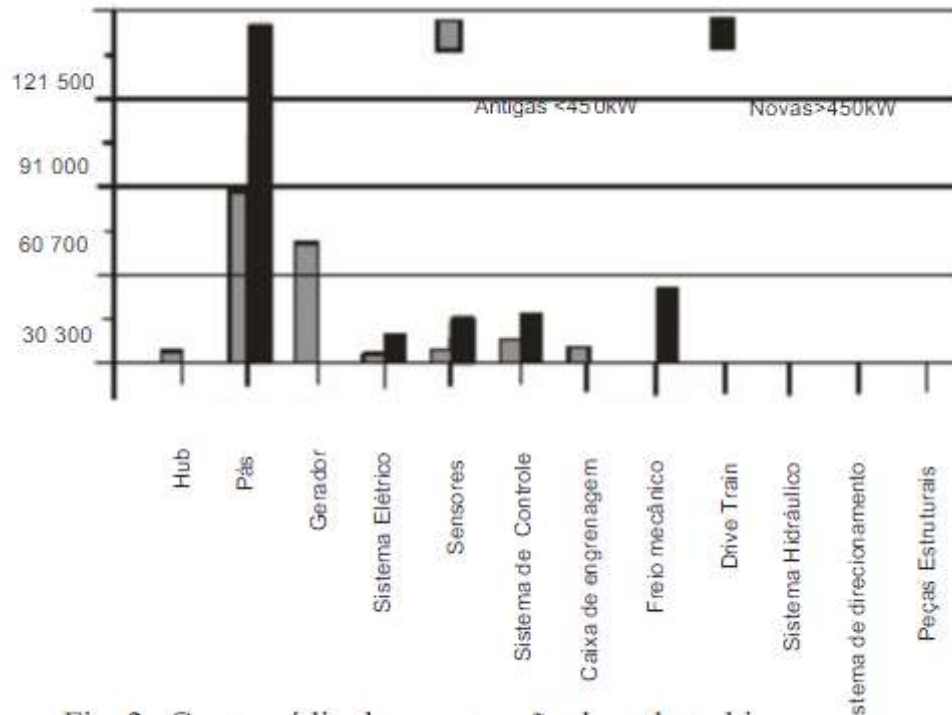
“Bancos de dados de manutenção de países onde a penetração de geração eólica é significativa indicam que o sistema de controle e supervisão é o mais frequentemente danificado. Isto pode ser observado na figura 16, para o caso dinamarquês. Por outro lado, deve ser ressaltado que as pás são os componentes com maior custo de manutenção como ilustrado na figura 17. Além disso, danos às pás podem causar longos períodos de interrupção de geração de energia, ocasionando perdas financeiras elevadas e diminuição da rentabilidade da turbina eólica”.

Figura 16 - Danos devido a descargas atmosféricas por componente.



Fonte: Santos (2013)

Figura 17 - Custo médio de manutenção de turbinas novas e antigas.



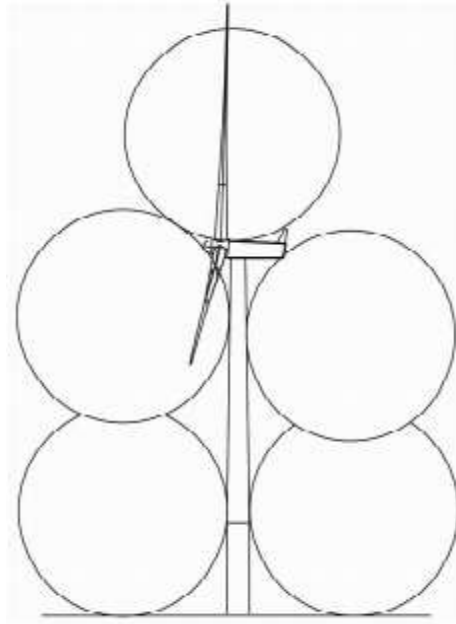
Fonte: Santos (2013)

4.2 PROTEÇÃO DOS SUB COMPONENTES DOS AEROGERADORES

A aplicação do método da esfera rolante para um aerogerador é mostrado na figura 18, podendo assim identificar as áreas que estão expostas a ataques diretos de raios e as áreas mais protegidas da turbina.

Como observado na imagem, a nacela como a torre são as partes mais bem protegidas, e as pás estão fora das zonas de proteção, por consequência, são os elementos mais favoráveis a sofrerem ataques diretos de descargas.

Figura 18 - Método da esfera rolante para turbina eólica.



Fonte: IEC

4.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Antes de especificar o sistema de proteção a ser empregado na turbina eólica, deve-se calcular a probabilidade de a mesma ser atingida por descargas atmosféricas. Para se obter esse valor, deve-se calcular através da equação 1 mostrada a seguir que se aplica a turbinas que serão instaladas em áreas planas.

$$N_d = 9\pi N_g h^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

Onde:

N_d – Média anual de ataques diretos à estruturas.

N_g – Densidade média anual de ocorrência de descargas atmosféricas.

h – Altura efetiva da turbina eólica.

Tendo o Instituto Nacional de Pesquisas Atmosféricas – INPE disponibilizando informações acerca do monitoramento constante das descargas atmosféricas no Brasil, pode-se observar nos resultados que o N_g para a cidade de Catingueira no Estado da Paraíba é 5,55 raios por Km². Considerando também que a altura da turbina eólica estudada é de 31,5m (considerando

altura da torre mais comprimento da pá), vemos que a probabilidade de a turbina ser atingida por uma descarga direta N_d é 0,15 vezes em um ano.

Segundo a IEC (2002 *apud* SANTOS, 2013), a eficiência necessária de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas pode ser calculada pela equação 2.

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (2)$$

Onde:

N_c – Número de eventos críticos admissíveis anualmente.

E – Eficiência requerida do sistema de proteção.

Considerando que o número de eventos críticos admissíveis anualmente seja de 0,001, observa-se que para a região, a eficiência requerida do sistema de proteção seja de 0,99, equivalendo assim a Classe 1.

Tabela 1 – Parâmetros das diferentes classes de proteção

Classe	Eficiência	Corrente de Pico KA	Energia Especifica $KJ\Omega^{-1}$	di/dt KA/ μ s	Carga transferência C
I	0,98	200	10000	200	300
II	0,95	150	5600	150	225
III	0,90	100	2500	100	150

Fonte: Santos (2013)

4.4 PROTEÇÃO DAS PÁS E COMPONENTES MECÂNICOS

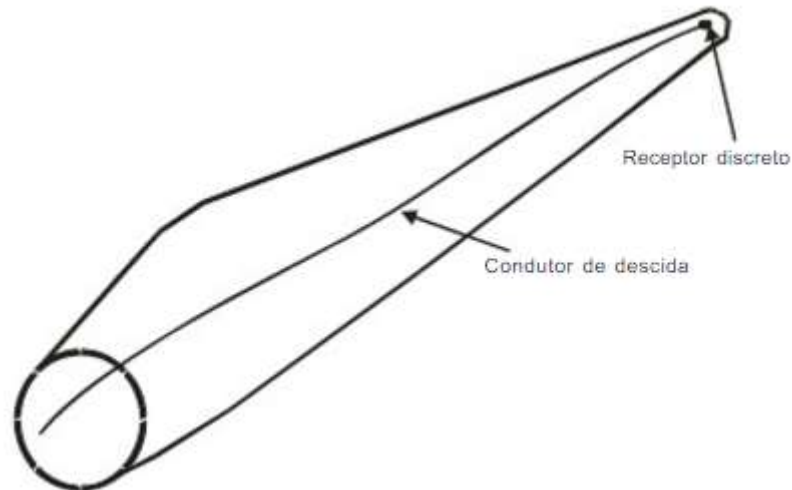
As pás são os elementos de uma turbina eólica mais expostos a sofrerem ataques diretos das descargas atmosféricas. Para protegê-las, diferentes formas de sistemas vêm sendo empregadas pelas indústrias de aerogeradores. São elas:

- I – Utilização de material condutor na fabricação das pás;
- II – Utilização de uma malha metálica para revestir as pás;
- III – Condutores externos

O sistema de proteção das pás que se mostra mais eficiente e que o que vem sendo mais utilizado pelos fabricantes está ilustrado na figura 19. O esquema de proteção utiliza um receptor discreto na ponta da pá e um condutor de descida para conduzir a corrente da descarga atmosférica em segurança até a base, evitando a formação de um arco elétrico dentro da estrutura. Salientando que em pás com mais de 20m de comprimento, se torna necessário o

acrécimo de interceptores ao longo da estrutura, aumentando assim a eficiência do sistema de captação (SANTOS, 2013).

Figura 19 - Proteção das pás.

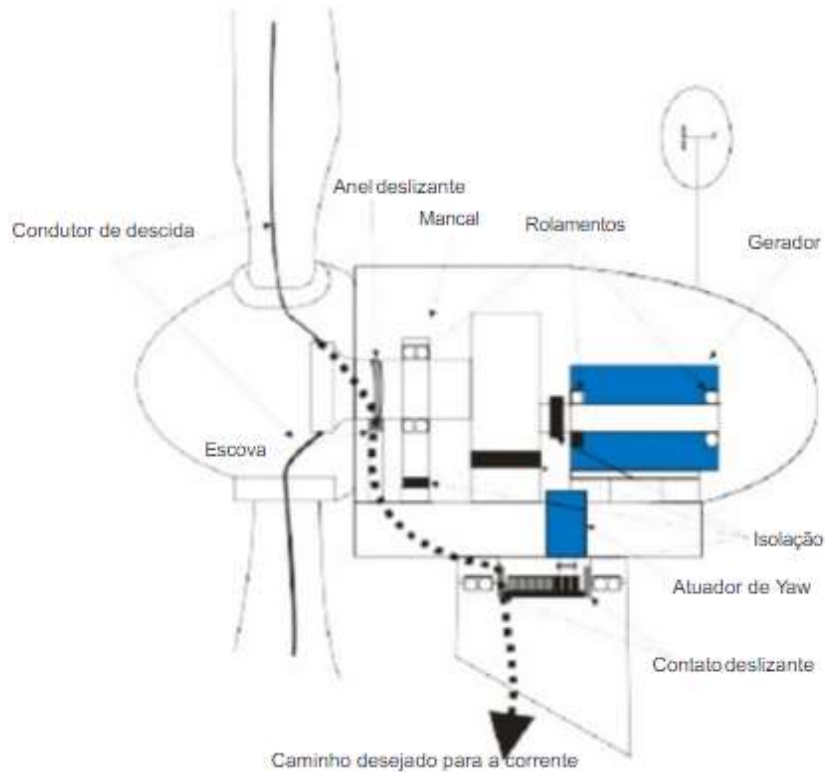


Fonte: Santos (2013)

Tentar proporcionar um caminho de baixa impedância para a corrente produzida pela descarga atmosférica ao longo da pá passando pela torre até a base da torre de sustentação tem sido um desafio aos projetistas das turbinas eólicas, não constando assim uma solução irrefutável a respeito do tema.

Um caminho de alto impedância deve ser formado para proteger o gerador e os rolamentos, utilizando para tal método de proteção a utilização de acoplamentos isolantes entre o eixo da caixa de engrenagens e do gerador e da isolamento do assento dos mancais na base do nacele (SANTOS, 2013).

Figura 20 - Caminho para a corrente de descarga.



Fonte: Santos (2013)

Possíveis danos podem ocorrer nos equipamentos dentro do nacele caso uma alta corrente passe pelos elementos. Podendo soldar parte das estruturas de rolamento, para evitar tal prejuízo, proporcionar um caminho de baixa impedância para a corrente de descarga.

4.5 PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICO E ELETRÔNICO

O sistema elétrico como o sistema eletrônico presentes nas turbinas eólicas estão sujeitos a danos causados pelo impulso eletromagnético causado pela descarga elétrica. Estatísticas mostram que os danos causados por descargas afetam com grande frequência os sistemas elétricos e eletrônicos.

Prover proteções para evitar falhas desses sistemas são requeridas por padrões internacionais. Utilizando a proteção por zonas de acordo com a IEC 62305-4 e também a utilização de outros métodos de proteção combinados, como aterramento devidamente dimensionado, escudo magnético e elétrico, SPDA, isoladores, circuitos balanceados, impedâncias em série dentre outros.

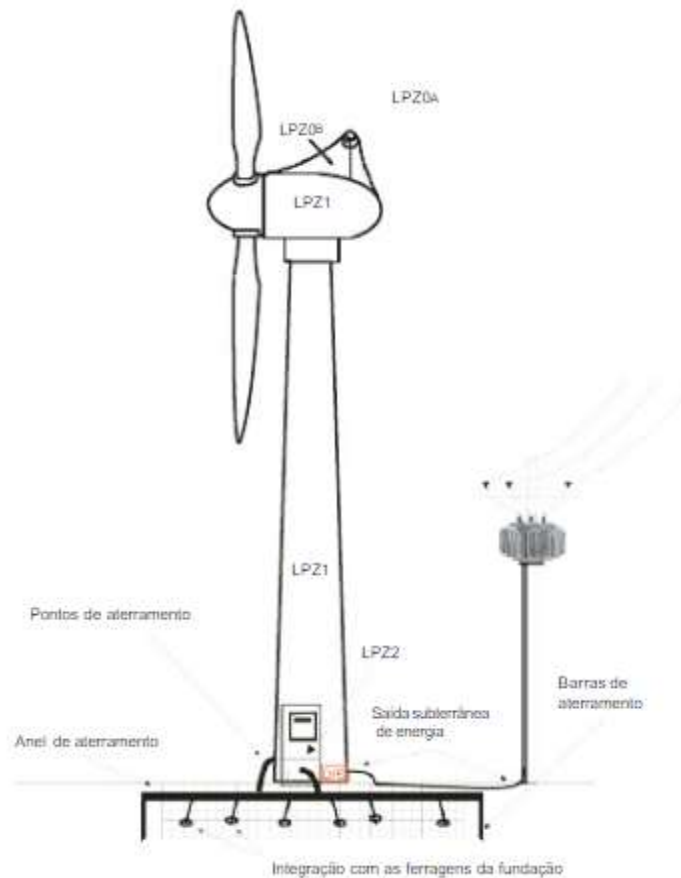
Dispositivos de Proteção contra Surtos – DPS estão presentes em turbinas eólicas, e estes definem as zonas de proteção. Estas zonas LPZ (*Lightning Protection Zone*). A parte externa de uma turbina é definida como LPZ0_A, devido ao fato de estar exposto a um ataque direto. A parte interna do nacele pertence a LPZ1, pelo fato de poder possuir uma malha metálica que envolve a estrutura. As definições de LPZ são mostradas no quadro 2.

Quadro 2 - Requisitos das diferentes zonas de proteção

LPZ	Requisitos
0 _A	Equipamentos nessa zona de proteção estão sujeitos a uma descarga direta e a um campo eletromagnético não atenuado.
0 _B	Equipamentos nessa zona de proteção estão sujeitos a parte da corrente de uma descarga e um campo eletromagnético não atenuado.
1	Equipamentos nessa zona de proteção estão sujeitos a uma pequena parte da corrente de uma descarga devido a medidas de proteção na fronteira com a zona 0 _B e o campo eletromagnético é atenuado por meio de blindagens.
2...N	Equipamentos nessas zonas de proteção são consideravelmente protegidos contra sobrecorrentes e estão sujeitos a campos eletromagnéticos fortemente atenuados.

Fonte: Santos (2013)

Figura 21 - Diferentes zonas de proteção em uma turbina



Fonte: Santos (2013)

4.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO DO ANEMÔMETRO

Por estar localizado em uma zona exposta a ataques diretos de uma descarga atmosférica, a utilização de um para-raios se torna indispensável para proteger o anemômetro.

O para-raios que contorna lateralmente o anemômetro colocaria o dispositivo dentro da zona LPZ_{0B} junto com os cabos de informações e direção do vento.

4.7 ATERRAMENTO DE AEROGERADORES

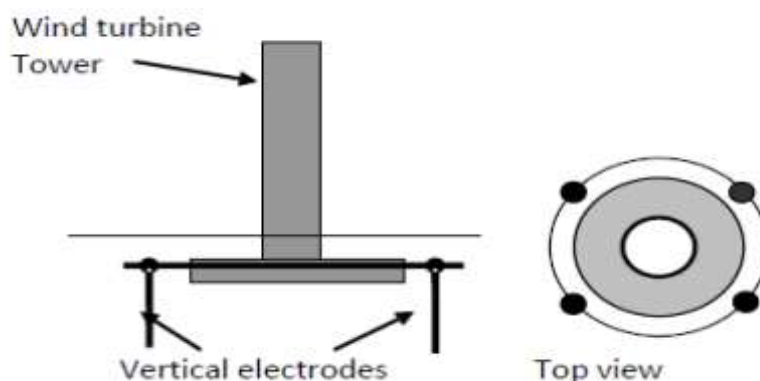
O sistema de aterramento tem como função dispersar a corrente da descarga atmosférica e prevenir danos a turbina eólica. Protegendo também pessoas contra choques elétricos.

Quando faltas ocorrem no sistema elétrico, o sistema de aterramento serve para manter a tensão de passo e de toque em um nível seguro até equipamentos de proteção serem atuados e interrompam a corrente.

Servindo como destino para corrente de alta frequência e alta energia, o sistema de aterramento atua evitando danos causado pela elevação da temperatura ou pelos efeitos eletrodinâmicos.

Um sistema de aterramento de uma única turbina eólica consiste em um anel eletrodo instalado em torno da fundação e ligado à torre de metal através das fundações de concreto, como pode ser visto na figura 22.

Figura 22 - Leiaute típico do aterramento de um aerogerador



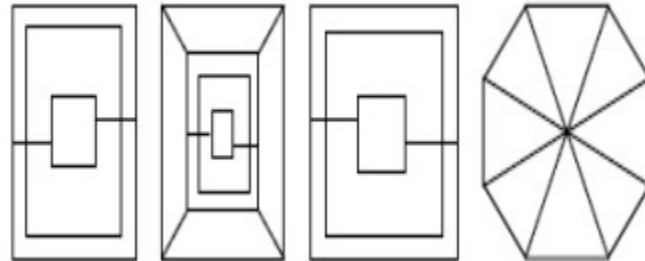
Fonte: Abd-allah, Ali e Said (2014)

Cada turbina deve possuir um sistema de aterramento com uma resistência de aterramento de no máximo 10 ohms, como especificado na IEC 61024.

Hastes verticais e eletrodos horizontais são frequentemente adicionados em conjunto com os eletrodos em anel para que a resistência de aterramento exigida por norma seja

alcançada. Para isso, algumas formas alternativas de arranjos das hastas de aterramento são instaladas como mostra a figura 23.

Figura 23 - Arranjos alternativos de aterramentos



Fonte: Abd-allah, Ali e Said (2014)

Como a combinação de diferentes tipos de eletrodos é uma prática comum nos sistemas de aterramento, estimar corretamente o valor da resistência de aterramento de um eletrodo com um formato complexo é de grande dificuldade. Sob um impulso atmosférico, não é satisfatório a utilização única da resistência da terra, deve-se também considerar a tensão transitória, podendo utilizar cálculos numéricos como o Método dos Elementos Finitos para calcular o eletrodo de aterramento e conseguir projetar um sistema de aterramento preciso.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo faz o estudo específico do Parque Eólico Alegria I, tratando da empresa, turbinas eólicas utilizadas no empreendimento, descargas atmosféricas na região e do sistema de proteção utilizado no parque.

5.1 A EMPRESA

O parque eólico surgiu a partir de uma iniciativa da New Energy Options Geração de Energia, empresa brasileira, controlada pelo grupo Multiner, sediado no Rio de Janeiro que tem como foco o desenvolvimento e operação de centrais de geração elétrica.

A empresa já contribuiu com o adicionamento de mais de 236,8 MW em instalações de geração de energia elétrica no Brasil. Sendo uma empresa regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica que por sua vez é subordinada ao Ministério de Minas e Energia.

5.2 O LEIAUTE DO COMPLEXO EÓLICO

O complexo eólico instalado na cidade de Guamaré – RN é composto por 31 aerogeradores, totalizando uma capacidade de geração de 51,15 MW de energia elétrica. Possuindo uma geografia privilegiada, localiza-se na Zona Costeira do Rio Grande do Norte.

A região onde se localiza o parque eólico apresenta velocidade média do vento de 30,6 quilômetros por hora, sendo superior assim aos 11 quilômetros por hora necessários para a ativação do aerogerador.

Figura 24 - Disposição dos aerogeradores



Fonte: Paque Eólico Alegria (2016)

Figura 25 - Instalações do parque eólica alegria



Fonte: Parque Eólico Alegria (2016)

Uma turbina eólica extrai energia através do vento incidente, conseqüentemente o vento da turbina eólica atrás terá um aproveitamento menor dessa energia, na qual se forma uma

estreita de vento turbulento e de menor velocidade do que o vento que incide na primeira turbina. A verdade é que, depois do vento passar numa turbina eólica, esta, sempre provocará uma sombra, assim uma menor produção de energia por essas turbinas, este efeito é conhecido como efeito esteira. (DIAS, 2015)

Em parques eólicos, o espaçamento entre as turbinas – é de cinco a nove vezes o valor do diâmetro das pás do rotor na direção predominante do vento, e três a cinco vezes na direção perpendicular à velocidade predominante do vento.

Devido a indisponibilidade das informações referentes ao distanciamento das turbinas por parte da empresa, o estudo aprofundado do efeito da distância das turbinas comprometeu a realização de um estudo aprofundado.

5.3 AEROGRADOR VESTAS V82-165

No complexo eólica Alegria, o sistema de conversão elétrica é feito por aerogeradores cujo modelo é o V82-165 da Vestas. Basicamente constituem-se de turbina eólica, gerador elétrico e sistemas de controles para processamento da energia. Cada turbina presente no parque estudado conta com uma potência de 1.65 MW.

O rotor dos aerogeradores tem 82 m de diâmetro, onde são instaladas três pás. A altura até a cubo de aproximadamente 70 m. A caixa de multiplicadores de voltas converte uma única revolução do rotor em 14,4 revoluções na saída de uma caixa de engrenagens. Por sua vez, ela aciona um gerador de indução, produzindo energia elétrica na tensão de 690 V.

5.4 PROTEÇÃO DO PARQUE CONTRA DESCARGAS

ATMOSFÉRICAS

Todas as turbinas eólicas produzidas pela Vestas são equipadas com um sistema de proteção contra descargas atmosféricas com o objetivo de minimizar os danos causado nos componentes mecânicos, no sistema elétrico e no sistema de controle.

Como todas as turbinas presentes no Parque Eólico Alegria são fornecidas pela fabricante Vestas, o sistema de proteção contra descargas atmosféricas da empresa está presente no parque.

Segundo o fabricante, em geral, o sistema de proteção é baseado em soluções internas e externas de proteção. O sistema externo é designado a proteger a turbina de ataques diretos e conduzir a corrente de pico da descarga para o sistema de aterramento na base da torre. Já o sistema interno é projetado para minimizar os danos e interferências de energia elétrica nos componentes eletrônicos presentes dentro da turbina eólica.

O fabricante também utiliza para seus aerogeradores nível de proteção I, de acordo com os padrões da IEC61024-1, que significa que o sistema de proteção deve ser capaz de suportar ataques de descargas com altos índices de energia.

Quadro 3 - Valores numéricos para as descargas

Lightning parameter			Protection level I
Current peak value	I_{max}	[kA]	200
Total charge	Q_{total}	[C]	300
Impulse charge	$Q_{impulse}$	[C]	100
Specific energy	W/R	[kJ/Ohm]	10.000
Average steepness	$di/dt_{30/90\%}$	[kA/s]	200

Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

5.4.1 PROTEÇÃO DAS PÁS

As pás são equipadas com um sistema de proteção contra descargas de terminação de ar que são projetados para captar os ataques de raios nas pás.

O sistema é baseado em 7 captadores de ar posicionados em 44,7 m, 42 m, 39 m, 35 m, 30 m, 25m, e 20m medidos em relação ao eixo de rotação.

As pás são feitas de fibra de vidro combinado com fibra de carbono e uma compensação potencial é estabelecida entre o condutor presente na nas pás e a fibra de carbono, assegurando assim que a corrente da descarga seja conduzida para a base das pás garantindo assim o não acúmulo de potencial elétrico ao longo das pás.

O condutor termina com uma banda de aço inoxidável sobre a parte externa da raiz das pás. Isolando assim essa parte do rolamento e do cubo.

Figura 26 - Captores na pá



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Figura 27 - Camada de aço na base da pá



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Uma conexão direta é feita entre a camada de aço presente na base das pás com o chassi da nacele utilizando um sistema de transferência de corrente de descarga.

5.4.2 PROTEÇÃO DA NACELE

Na extremidade da nacele, dois anemômetros e luzes de sinalização são componentes encontrados nessa área das turbinas. Esses equipamentos estão expostos a ataques diretos de raios como as pás. Por essa razão, cada anemômetro é protegido por um anel de aço como pode ser observado na figura 28. A proteção em anéis está em contato direto com a estrutura de aço no interior da nacele. Para a proteção das luzes de sinalização, um captor tipo Franklin é instalado ao lado da sinalização.

Figura 28 - Extremidade da nacele



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Todos os equipamentos presentes em cima da nacele estão conectados com cabos de 50 mm² de cobre junto as vigas dentro da nacele.

5.4.3 PROTEÇÃO DOS ROLAMENTOS

Com o objetivo de conduzir a corrente da descarga atmosférica das pás para a base da nacele sem que esta penetre no rolamento ou na engrenagem uma unidade de transferência de corrente de descarga é introduzido no sistema.

O condutor de descida de cada pá é conectado a nacele por essa unidade de transferência de corrente de descarga, isolando assim o cubo.

Figura 29 - Unidade de transferência de corrente de descarga



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Todas as Unidades de Transferência de Corrente de Descarga são testadas com o objetivo de assegurar que serão capazes de suportar o nível de corrente de descarga atmosférica definido no quadro 3.

5.4.4 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O Sistema de Aterramento em turbinas eólicas é padronizado para ser um sistema com terra e neutro separados para todo o sistema.

O aterramento principal fora da turbina é especificado pela Vestas, porém, o projeto, a instalação e as medidas de controle são feitas sobre a responsabilidade dos clientes das turbinas. A Vestas recomenda sempre obedecer às regulações vigentes para cada parque, para casos que essa regulamentação diferencie dos padrões fornecidos pela Vestas, a empresa deve ser informada para que possa analisar se o sistema de proteção contra descargas atmosféricas vai atuar de forma eficiente, garantido assim segurança na instalação.

Infelizmente, informações referentes ao sistema de aterramento presente no Parque Eólico Alegria não disponibilizados pela empresa, impossibilitando o estudo aprofundado do sistema.

5.4.5 DISTRIBUIÇÃO NA TERRA

Da nacelle, condutores são instalados com o objetivo de estabelecer conexões seguras necessárias com a base da torre e com sistema de aterramento externo.

Figura 30 - Conexão dos cabos de descida



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Dois cabos de cobre de 50 mm² são instalados da nacela até a parte inferior da torre. Os cabos também estão ligados à base da secção superior da torre com o intuito de fazer equalização potencial.

Figura 31 - Conexão entre os cabos de descida e o sistema de aterramento



Fonte: Vestas Wind Systems (2005b)

Na parte inferior da torre, os cabos estão conectados a haste do sistema de aterramento externo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo abordar as noções básicas de funcionamento de uma turbina eólica e de um parque eólico levando em conta a sua conversão em energia elétrica, as tecnologias empregadas nos modelos de turbinas, os riscos de danos aos parques eólicos devido as descargas atmosféricas, estudo sobre o fenômeno natural de descarga e bem como os sistemas implantados nos parques eólicos para proteger desses eventos.

Fica evidente que, apesar de não ser um sistema infalível de proteção, as existências de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são de fundamental importância nos aerogerados. As técnicas usadas para proteger as pás são as de mais relevância, pois por ser o componente com maior custo de manutenção e o mais favorável a ser atingido por um ataque direto.

Destaca-se que os fabricantes fornecem junto com as turbinas os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, porém fica sobre responsabilidade do comprador as adequações do sistema de aterramento para obedecer às normas reguladoras de cada região.

Durante a elaboração desse trabalho, foram encontradas dificuldades em obter informações consistentes sobre o parque eólico em estudo, especialmente a parte do sistema de aterramento empregado, o que impossibilitou a realização de um estudo sobre a eficiência do sistema utilizado.

Conclui-se a partir da análise do crescimento da utilização da energia eólica como fonte de energia elétrica no mundo, que os parques eólicos devem estar sempre protegidos ao máximo contra as descargas, visando a diminuição do risco de danos aos componentes mecânicos e elétricos, bem como reduzir o tempo de interrupção da geração, tornando assim, a geração eólica mais confiável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-ALLAH, M. A.; ALI, M. N.; SAID, A. A Proper Design of Wind Turbine Grounding Systems under Lightning. **International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering**, v. 8, n. 10, p. 1572-1579, 2014.

AEROGERADORES. Disponível em: < <http://www.aerogeradores.org/images/gerador.jpg>>. Acesso em: junho 2016.

ALBUQUERQUE, P. F. C. **Energia Eólica e o Estudo de Caso de um Parque Eólico**. 2015. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2001.

BRAZIL WINDPOWER. O mercado. Disponível em: <<http://www.brazilwindpower.com.br/>>. Acesso em: junho 2016.

CASTRO, R. M. G. Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Eólica. **Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico (ISL), DEEC/Secção de Energia**, 2003.

CONSTANZO, A. *et al.* Parque Eólico Água Doce: Medições de Resistividade do Solo e de Resistências de Aterramento. **Brazil Windpower Conference & Exhibition**. 2013.

DIAS, B. A. **Energia eólica e o estudo de caso do parque eólico de Brotas de Macaúbas**. 2015. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2015.

EVOLUÇÃO ENERGIA EÓLICA. Aerogerador de eixo horizontal. Disponível em: < <http://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal>>. Acesso em: junho 2016.

FERREIRA, A. A. Avaliação do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas da **Empresa Acumuladores Moura S.A. (Um.01)**. 2010. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Mapa de raios em tempo real. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: junho 2016.

INTERNATIONAL STANDART. **IEC 61024**: Protection of structures against lightning. 1 ed, 1990.

INTERNATIONAL STANDART. **IEC 62305-4**: Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures. 2 ed, 2010.

KINDERMANN, G. **Descargas Atmosféricas**, 2011.

LAGE, E.S.; PROCESSI, L. D. Panorama do Setor de Energia Eólica. **Revista do BNDES**, v.39, p. 183-206, 2013.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 7 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2010.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDENCIA SOCIAL. *NR 10*: Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Texto dado pela Portaria GM n.º 598, de 07 de dezembro de 2004.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **NREL/SR-500-31115**: Wind Turbine Lightning Protection Project. Colorado, 2002.

PARQUE EÓLICO ALEGRIA. Disponível em:
<<http://www.parqueeolicoalegria.com.br/parque>>. Acesso em: junho 2016

RESENDE, F. O. Evolução Tecnológica dos Sistemas de Conversão de Energia Eólica para Ligação à Rede. **Engineering and Technology Journal - Universidade Lusófona do Porto**, v. 2, 2011.

SANTOS, P. R. S. **Proteção de turbinas eólicas contra descargas atmosféricas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Tópicos Especiais em Engenharia de Potência: Impactos da Geração Distribuída em Redes Elétricas. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.

SORENSEN, S. T. et al. The update of IEC 61400-24 lightning protection of wind turbines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 29., Suécia, 2008.

STÉFANI, R. V. **Metodologia de Projeto de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas para Edifício Residencial**. 2011. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. 2015 year report.

THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. 2016 year report.

VESTAS WIND SYSTEMS A/S. General Specification V82-1.65 MW MK II, NM82/1650 v. 2, Class 1, TSD 4000258-02 EN, 2005a.

VESTAS WIND SYSTEMS A/S. Lightning Protection System V90 – 3.0 MW. Class 1, Item no. 950036.R1, 2005b.

WIKIPÉDIA. Turbina de vento, invenção de Charles Francis Brush. Disponível em:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Charles_Francis_Brush#/media/File:Wind_turbine_1888_Charles_Brush.jpg>. Acesso em: junho 2016.