

# *Monografia de Graduação*

## **Especificação e Análise das avarias que influenciam no funcionamento dos Aerogeradores**

**Isabel Cavalcanti Cabral**

**Natal, janeiro de 2015**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
NUPEG – PRH-14  
Engenharia de Processos em Plantas de Petróleo e Gás Natural

Especificação e Análise das avarias que influenciam no  
funcionamento dos Aero geradores

*por*  
*Isabel Cavalcanti Cabral*

*Natal – Rio Grande do Norte*  
*Janeiro de 2015*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

## **Especificação e Análise das avarias que influenciam no funcionamento dos Aerogeradores**

*Isabel Cavalcanti Cabral*

---

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes  
Orientador

***Banca Examinadora:***

---

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes

---

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

---

Prof. Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza

*Natal – Rio Grande do Norte  
Janeiro de 2015*

Dedico este trabalho ao meu namorado, Oto Lima de Albuquerque Neto, por todo apoio, empenho, incentivo e dedicação que me foram dados durante esta longa caminhada, sem ele eu jamais conseguiria.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar todos os obstáculos e principalmente por ter segurado minha mão e me carregado nos momentos mais difíceis.

Ao meu namorado, Oto Lima de Albuquerque Neto, que desde o início do Curso de Ciências e Tecnologia sempre me apoiou, me incentivou e me mostrou que não existem obstáculos tão grandes que não possam ser superados, devo toda minha graduação a ele!

Aos meus pais, Damião Bezerra Cabral e Maria Socorro Campos Cavalcanti Cabral, pois me deram toda base que precisei para chegar até aqui.

Aos meus irmãos, João Hermínio Cavalcanti Cabral e Hugo Cavalcanti Cabral, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu Orientador o Prof. Dr., José Ubiragi de Lima Mendes, por todo apoio e empenho na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr., Luiz Guilherme Meira de Souza, pelos conselhos, apoio e carinho, durante todo o curso de Engenharia Mecânica, ele sempre será como um segundo pai!

Aos meus demais familiares e meus verdadeiros amigos, que sempre entenderam minha ausência e sempre torceram pelo meu sucesso.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Chiavone, a Maria Brunet por toda atenção, empenho e dedicação dados aos alunos do PRH – 14.

À ANP e a Petrobras pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Recursos Humanos e aos funcionários do NUPEG.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação acadêmica.

## RESUMO

---

Com a necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis que poluem o meio ambiente para produção de energia, a indústria e os órgãos de pesquisa vêm buscando investir em fontes de energia alternativas, pois são limpas e não poluem o meio ambiente (energias renováveis). Nesse contexto, a energia eólica surge como uma alternativa a qual vem crescendo cada vez mais, principalmente nas pesquisas e nos investimentos para sua produção. Os custos com sua implantação e manutenção tem baixado cada vez mais, atraindo assim mais investidores. Devido às avarias que prejudicam o funcionamento dos aerogeradores, ou até mesmo provocam paradas, neste trabalho foram abordadas as principais avarias do tipo mecânica, elétrica e estrutural. Em função dos resultados avaliados, traçou-se um plano de manutenção preditiva que aumente a vida útil do aerogerador e reduza os gastos com manutenções corretivas.

**Palavras-chaves:** energias renováveis, aerogeradores, avarias, eficiência.

## ABSTRACT

---

With the need to reduce dependence on energy production through fossil fuels that pollute the environment, industry and research institutions are seeking to invest in new alternative energy sources because they are clean and do not pollute the environment (renewable energies). In this context, wind energy is an alternative in which is growing increasingly especially in research and investments to their production. Costs with its deployment and maintenance has been declining increasingly, thus attracting more investors. Due to faults occurring in wind turbines that damage their functioning, or even cause stoppages, in this work was adresses the major damage from mechanical, electrical and structural type. According to the presented results, has implemented a predictive maintenance plan that increases the life of the wind turbine and reduce your expenses for corrective maintenance.

**Keywords:** renewable energy, wind turbines, breakdowns, efficiency.

## **Sumário**

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	12
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1. Motivação</b> .....	15
<b>1.2. Objetivos</b> .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>1. Energias Renováveis</b> .....	18
<b>1.1. Energia Solar</b> .....	18
<b>1.2. Biomassa</b> .....	18
<b>1.3. Hidrelétrica</b> .....	19
<b>1.4. Geotérmica</b> .....	20
<b>1.5. Biocombustíveis</b> .....	20
<b>1.6. Energia Eólica</b> .....	21
<b>2. Aerogeradores</b> .....	21
<b>2.1. Componentes do Aerogerador</b> .....	21
<b>2.2. Formação da Energia Eólica</b> .....	24
<b>2.3. Variáveis que influenciam na geração de Energia Eólica</b> .....	24
<b>2.4. Princípio de Funcionamento do Aerogerador</b> .....	25
<b>3. Componentes mais críticos dos Aerogeradores</b> .....	28
<b>3.1. Componentes Mecânicos– Caixa Multiplicadora (Engrenagens e Rolamentos)</b> 28	
<b>3.2. Componentes Elétricos – Geradores Elétricos e Transformadores</b> .....	30
<b>4. Técnicas de manutenção Preditiva</b> .....	32
<b>4.1. Análise de Óleo</b> .....	32
<b>4.2. Análise de Vibrações</b> .....	33
<b>4.2.1. Ressonância</b> .....	34
<b>4.3 Termografia</b> .....	35
<b>3. PRINCIPAIS AVARIAS QUE PREJUDICAM O FUNCIONAMENTO DOS AEROGERADORES</b> .....	38
<b>1. Mecânica – Componentes Críticos</b> .....	39
<b>1.1. Caixa Multiplicadora – Engrenagens e Rolamentos</b> .....	39
<b>1.2. Geradores – Mancais e Ventilação</b> .....	43
<b>2. Elétrica - Componentes Críticos: Geradores e Transformadores</b> .....	43
<b>3. Estrutural</b> .....	44
<b>4. RESULTADOS</b> .....	46

<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	52
<b>1. Conclusões</b> .....	52
<b>2. Sugestões</b> .....	53
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	55
ANEXO.....	57

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1. Células Fotovoltaicas .....	17
Figura 2. Energia Biomassa .....	18
Figura 3. Hidrelétrica. ....	18
Figura 4. Formação da energia geotérmica .....	19
Figura 5. Biocombustíveis .....	19
Figura 6. Aerogeradores .....	20
Figura 7. Imagem do interior de uma Nacele de um aerogerador utilizando gerador convencional.....	21
Figura 8. Imagem do interior da nacele de um aerogerador multipolos .....	22
Figura 9. Como ocorre a formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar .....	23
Figura 10. Fluxo de ar através de uma área de seção transversal A .....	24
Figura 11. Ilustração do princípio básico de funcionamento de um aerogerador .....	25
Figura 12. Gerador de indução de rotor de gaiola .....	25
Figura 13. Gerador de indução duplamente alimentado (rotor bobinado) .....	26
Figura 14. Gerador síncrono acoplado diretamente ao eixo da turbina eólica .....	27
Figura 15. Caixa multiplicadora (Fabricante – Winergy – Vestas – V80) .....	28
Figura 16. Conjunto massa-mola em movimento harmônico simples .....	33

Figura 17. Equipamento elétrico – Ensaio de termografia para medir a temperatura dos equipamentos em operação .....	35
Figura 18. Equipamento mecânico – Ensaio de termografia .....	35
Figura 19. Rolamento defeituoso que causam ondas elásticas .....	39
Figura 20. Ruptura da estrutura de um Aerogerador .....	48
Figura 21 Equipamentos mecânicos. A) Superaquecimento em rolamento de transportador B) Superaquecimento de motor C) Revestimento refratário danificado.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

### *Alfabeto Grego:*

$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosidade Cinemática	[mm <sup>2</sup> /s]
$E_c$	Energia Cinética	[J]
$v$	Velocidade da massa de ar em movimento	[m/s]
M	Massa de ar	[kg]
T	Tempo	[s]
P	Potência	[kW]
$\dot{E}$	Fluxo de Energia	[J/s]
$\dot{m}$	Fluxo de massa	[kg/s]
A	Área da secção transversal	[m <sup>2</sup> ]
F	Força que age sobre o rotor	[N]

# CAPÍTULO 1

## Introdução

# 1. INTRODUÇÃO

---

A necessidade de criar novas ferramentas que auxiliassem o homem no desenvolvimento de seu trabalho agrícola, por causa da moagem de grãos, bombeamento de água, entre outras atividades que exigiam mais esforço do homem, fez com que surgissem os primeiros moinhos de vento, que eram utilizados no desenvolvimento da produção agrícola. Eles constavam basicamente de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, que era movida por homens ou animais.

Acredita-se que a utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-vento surgiu na Pérsia, por volta de 200 A.C.. O moinho de eixo vertical utilizado na época se espalhou pelo mundo islâmico e foi utilizado durante muitos séculos. Algumas bibliografias mostram ainda que antes da invenção do cata-vento na Pérsia, a China (2000 A.C.) e o Império Babilônico (1700 A.C.) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação, segundo CHESF-BRACEP, 1987. Os primeiros aerogeradores comerciais usados na rede elétrica pública foram instalados na Dinamarca em 1976. Atualmente os governos vem buscando investir cada vez mais na implantação de novos parques eólicos para suprir a necessidade da população.

Essa fonte de energia é vista hoje como uma das fontes mais promissoras para o fornecimento e o abastecimento de energia elétrica nas cidades, por se tratar de uma fonte renovável, de caráter limpo, abundante, teoricamente inesgotável e que tecnicamente é mais versátil do que outras fontes renováveis, e nos últimos anos essa fonte de energia obteve uma progressão maior em sua utilização do que o esperado como mostram alguns dados, como o da Agência Nacional de Energia Elétrica [12], que em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2000 MW e em 1994 essa capacidade subiu para 3734 MW, divididos entre a Europa, América, Ásia e alguns países.

Como exemplo pode-se citar que no ano de 2002 haviam mais de 30 mil aerogeradores em operação no mundo e que em 1991 a Associação Europeia de Energia Eólica estabeleceu como meta a instalação de 4000 MW de energia eólica na Europa até o ano de 2000 e 11500 MW até o ano 2005, e até o ano de 2010 foi de 75000 MW, o que mostra uma grande busca pela utilização de uma fonte de energia limpa para a produção de energia elétrica e que irá contribuir para minimizar os impactos ambientais.

Antigamente não se investia tanto em energia eólica por se tratar de uma fonte de energia relativamente cara, mas até os anos 90 os custos com os equipamentos caíram circunstancialmente e com o crescimento do mercado a favor desta fonte de energia nota-

se que os preços caíram dos aerogeradores nas últimas décadas o que torna esta fonte de energia cada vez mais competitiva com outras fontes de geração, devido aos recentes desenvolvimentos tecnológicos com relação aos sistemas de avanço de transmissão, uma melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação dos aerogeradores, entre outros avanços, o que tem reduzido cada vez mais os seus custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos.

Porém, diversas avarias, quer sejam do tipo mecânica, elétrica ou estrutural, que ocorrem nos aerogeradores fazem com que seu funcionamento fique prejudicado ou até mesmo ocorram paradas. Portanto o presente trabalho visa fazer uma análise e a especificação das principais avarias que ocorrem nos aerogeradores, para assim sugerir métodos de manutenções preditivas que contribuam para diminuição desses problemas (avarias).

## **1.1. Motivação**

Pesquisas mostram que os investimentos na geração de energia eólica vêm aumentando nos últimos anos. As turbinas eólicas geram grandes quantidades comerciais de eletricidade, o que auxilia outras fontes de geração de energia, ou até mesmo se torna a única fonte de eletricidade para suprir a demanda de energia elétrica de uma determinada região. Mas alguns fatores são importantes para a geração de eletricidade a partir dos ventos, fatores tanto técnicos como econômicos.

A energia produzida é calculada como o cubo da velocidade dos ventos, ou seja, a potência de saída é muito sensível a este fator, logo com o aumento de 10 % no mesmo irá gerar 33 % a mais de energia, sendo assim, o vento é o principal fator para determinar a energia obtida por um aerogerador. Mas além do vento outras variáveis influenciam na sua eficiência. Devido aos problemas provocados em algumas partes dos aerogeradores que prejudicam seu funcionamento, se faz necessário um estudo como forma de apresentar os principais equipamentos que sofrem avarias, e as suas possíveis causas, para assim sugerir métodos de manutenções preditivas que venham a contribuir para um melhor funcionamento dos aerogeradores sem a necessidade de paradas para manutenção.

## **1.2. Objetivos**

- **Objetivos Gerais:**

Analisar e especificar as principais avarias que ocorrem nos aerogeradores que prejudicam seu funcionamento.

- **Objetivos Específicos:**

Estudar as principais avarias do tipo mecânica, elétrica e estrutural que ocorrem nos aerogeradores. Em seguida será traçado um plano de manutenção preditiva.



CAPÍTULO 2  
Fundamentação Teórica

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

### 1. Energias Renováveis

A energia renovável é proveniente de recursos naturais, logo não agride o meio ambiente, diferente das fontes de energia baseadas nos combustíveis fósseis, na qual seus recursos não são renováveis e ainda causam sérios danos ao meio ambiente, como principal exemplo, a influência no aumento do efeito estufa. Logo, a constante busca por fontes alternativas de energias se faz muito necessária no cenário atual, pois além de poluidoras as fontes de energia derivadas do petróleo estão se esgotando.

Nos próximos tópicos serão descritos resumidamente conceitos sobre as principais energias renováveis discutidas na atualidade.

#### 1.1. Energia Solar

Esta fonte de energia se baseia na capacidade de converter a luz solar em energia elétrica ou térmica. Isso é feito usando placas fotovoltaicas e coletores solares (ver figura 1). É uma fonte energética renovável e limpa.

Sua obtenção pode ser feita de forma direta através de células fotovoltaicas, ou de forma indireta, através da construção de usinas de grande escala.



Figura 1. Células Fotovoltaicas  
Fonte: site blue-sol

#### 1.2. Biomassa

A Biomassa é gerada por meio da decomposição de materiais orgânicos (esterco, restos de alimentos, resíduos agrícolas que produzem o gás metano, entre outros). A energia é gerada através de processos como: combustão, gaseificação, fermentação ou a produção de substâncias líquidas.

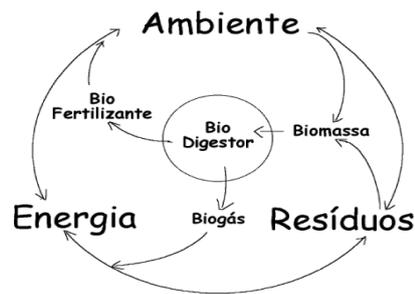


Figura 2. Energia Biomassa.  
 Fonte: Integração do biodigestor ao  
 Biociclo ENERGIA / AMBIENTE /  
 RESIDUOS

Além de ser uma fonte renovável, ela auxilia na diminuição do CO<sub>2</sub> na atmosfera, conforme ilustrado na figura 2. A bioenergia pode ser convertida em três produtos: eletricidade, calor e combustíveis.

### 1.3. Hidrelétrica

Essa fonte de energia é obtida através do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio. Para que isso seja possível é necessário a construção de usinas em rios que possuam um grande volume de água.

A força da água que passa pelas tubulações da usina faz movimentar as turbinas, e assim ocorre a transformação de energia potencial (energia da água) em energia mecânica (movimento das turbinas) e as turbinas em movimento são conectadas a um gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica (ver figura 3).



Figura 3. Hidrelétrica.  
 Fonte: Site tvbrasil / novidades - acesso  
 em 10/05/1014

## 1.4. Geotérmica

A energia geotérmica é gerada através do calor proveniente do interior da Terra. Esse calor é transformado em eletricidade através de usinas geotérmicas, conforme ilustrado na figura 4. Essa fonte de energia é considerada uma fonte renovável porque produz baixos índices de poluição. Ela é obtida através de rochas secas quentes, rochas úmidas quentes e o vapor quente.

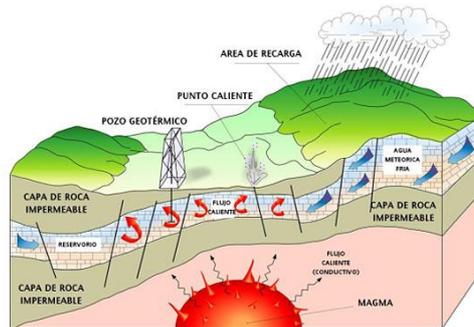


Figura 4. Formação da energia geotérmica.  
Fonte site [tocadacotia.com/cultura/geografia/energia-geotermica](http://tocadacotia.com/cultura/geografia/energia-geotermica)

## 1.5. Biocombustíveis

Essa energia é obtida através de vegetais, como: soja, milho, cana-de-açúcar, mamona, canola, babaçu, entre outros (a figura 5, mostra diferentes vegetais usados na obtenção de biocombustíveis). Também pode ser usado lixo orgânico na fabricação de biocombustíveis. De um modo geral eles são usados em automóveis, e sua principal vantagem é redução de emissão de gases poluentes na atmosfera.



Figura 5. Tipos de Biocombustíveis.  
Fonte Site [brasilescola / química / produção de biocombustíveis](http://brasilescola.com/quimica/producao-de-biocombustiveis)

## 1.6. Energia Eólica

Essa fonte de energia provem do vento, e por isso é considerada uma fonte limpa que não gera poluição e não agride o meio ambiente. A obtenção de energia se dá através de grandes turbinas (aerogeradores, ver figura 6), em formato de cata-vento, que giram através da força dos ventos, e com o movimento das turbinas é gerado energia elétrica.

O presente trabalho irá detalhar melhor essa fonte de energia renovável e tratar dos assuntos importantes pertinentes a ela. A seguir serão mostrados e discutidos esses assuntos.



Figura 6. Aerogeradores offshore

## 2. Aerogeradores

### 2.1. Componentes do Aerogerador

A seguir a figura 7 descreve os principais componentes de um aerogerador. Ela mostra uma Nacele (que é a carcaça que fica montada sobre a torre), na qual é colocado o gerador, a caixa de engrenagens (se for utilizada), o sistema de controle, medição do vento e motores pra rotação do sistema que serve para melhorar a posição do aerogerador em relação ao vento. Já a figura 26 mostra o interior de uma nacele de um aerogerador de multipolos, a qual apresenta alguns componentes diferentes da nacele apresentada na figura 8.

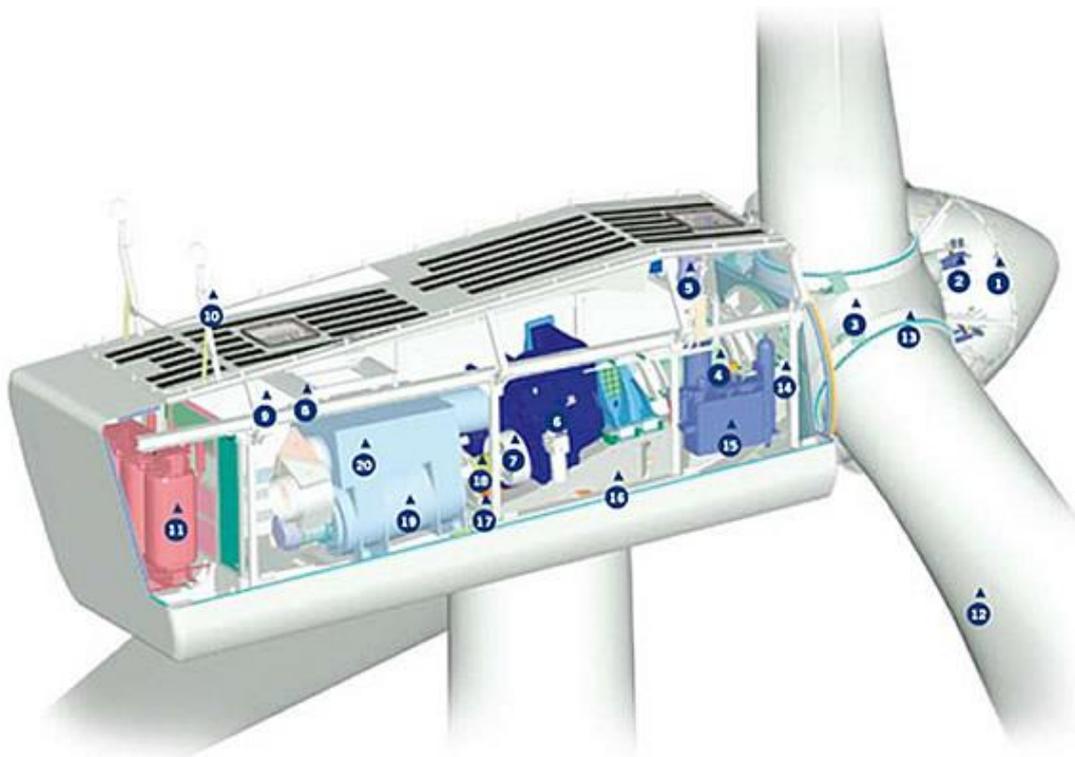


Figura 7. Imagem do interior de uma Nacela de um aerogerador utilizando gerador convencional.

Fonte: VESTAS, 2006

Onde:

1. Controlador do Cubo (apresenta os rolamentos para fixação das pás e também acomoda os mecanismos e motores para ajuste do ângulo de ataque de todas as pás, material: estruturas metálicas);
2. Controle pitch;
3. Fixação das pás no cubo;
4. Eixo principal (responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. Material: aço ou liga metálica de alta resistência);
5. Aquecedor de óleo;
6. Caixa multiplicadora (responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador);
7. Sistema de freios;
8. Plataforma de serviços;
9. Controladores e inversores;
10. Sensores e direção e velocidade do vento;

11. Transformador de alta tensão;
12. Pás (responsável pela interação com o vento. Converte parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Material: fibra de vidro reforçada com epóxi);
13. Rolamento das pás;
14. Sistema de trava do rotor;
15. Sistema hidráulico;
16. Plataforma da nacela;
17. Motores de posicionamento da nacela;
18. Luva de acoplamento;
19. Aquecimento de ar.

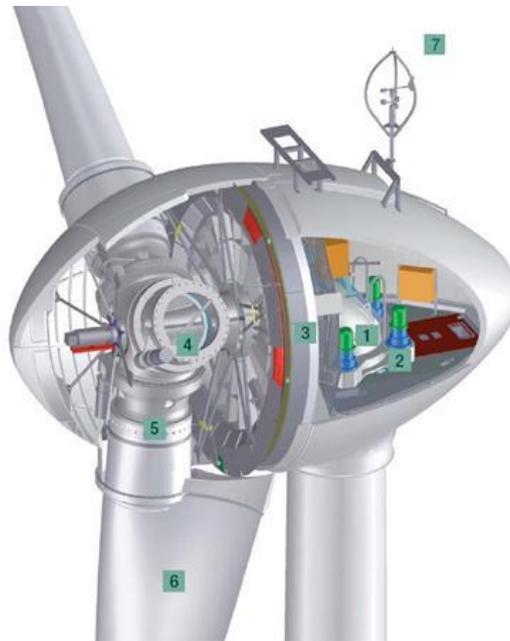


Figura 8. Imagem do interior da nacela de um aerogerador multipolos. Fonte: ENERCON, 2006

Onde:

1. Apoio principal da nacela;
2. Motores de orientação da nacela;
3. Gerador em anel (multipolos);
4. Fixador das pás ao eixo;
5. Cubo do rotor;
6. Pás;

## 7. Sensores de direção e velocidade do vento.

### 2.2. Formação da Energia Eólica

A radiação solar (ver figura 9) é o principal responsável pela geração da energia eólica, pois os ventos são gerados a partir do aquecimento da superfície terrestre, e dados apontam que aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela terra é convertida em energia cinética dos ventos. Mesmo que pequeno esse percentual representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo, segundo CRESEB, 1996.

Em alguns locais da Terra o vento nunca cessa, pois os mecanismos que são responsáveis por sua produção estão sempre presentes na natureza. Esses ventos podem ser classificados em:

- ✓ Alísios – Sopram dos trópicos para o equador (baixas altitudes);
- ✓ Contra – Alísios – Sopram do Equador para os pólos (Altas altitudes);
- ✓ Ventos do Oeste – sopram dos trópicos para os pólos;
- ✓ Polares – Sopram dos pólos para as zonas temperadas.

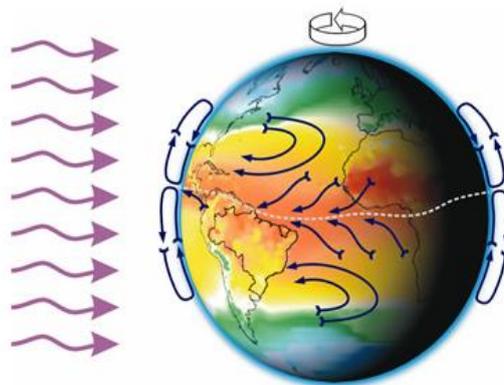


Figura 9. Como ocorre a formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.  
Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998.

### 2.3. Variáveis que influenciam na geração de Energia Eólica

Para calcularmos a potência do vento que passa por uma seção A, conforme mostrado na figura 10, a qual representa o fluxo de ar que se move com velocidade “V”, que é perpendicular à seção transversal de um cilindro imaginário.

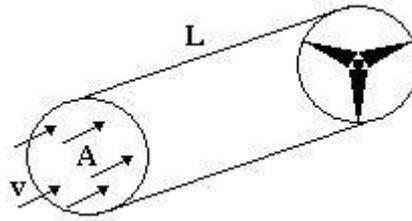


Figura 10. Fluxo de ar através de uma área de seção transversal A

A potência de um aerogerador é dada como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [10]$$

De acordo com a literatura, os primeiros projetos envolvendo energia eólica, onde era extraído a energia dos fluidos (no caso o ar) para movimentar elementos como as pás, foi desenvolvido por Albert Betz no séc. XX, por volta de 1920.

Betz através de sua teoria conseguiu provar o valor máximo da energia que pode ser retirada dos ventos, ele afirmou que a máxima eficiência aerodinâmica do rotor era de 59,3%. A sua teoria se baseia na ideia de considerar um determinado cilindro de área A, no qual entra um vento de velocidade  $V_1$  e que passa pela área interna a uma velocidade  $V$  e em seguida saí do cilindro a uma velocidade  $V_2$ . Logo, a eficiência aerodinâmica de um rotor de acordo com Betz é dada por:

$$P = \rho A \bar{v}^2 (v_1 - v_2) = 2 \left(\frac{2}{3}\right)^3 \frac{\rho A v_1^3}{2} = \frac{16}{27} \frac{\rho A v_1^3}{2} \quad [10]$$

## 2.4. Princípio de Funcionamento do Aerogerador

Para o funcionamento de um aerogerador é necessário que ocorram dois processos de conversão, os quais são compostos por tais componentes: o rotor, responsável por retirar a energia cinética do vento e a converter em conjugado mecânico e o gerador que é responsável em converter o conjugado mecânico em eletricidade e em seguida alimentar a rede elétrica, a seguir a figura 11 representa tal princípio.

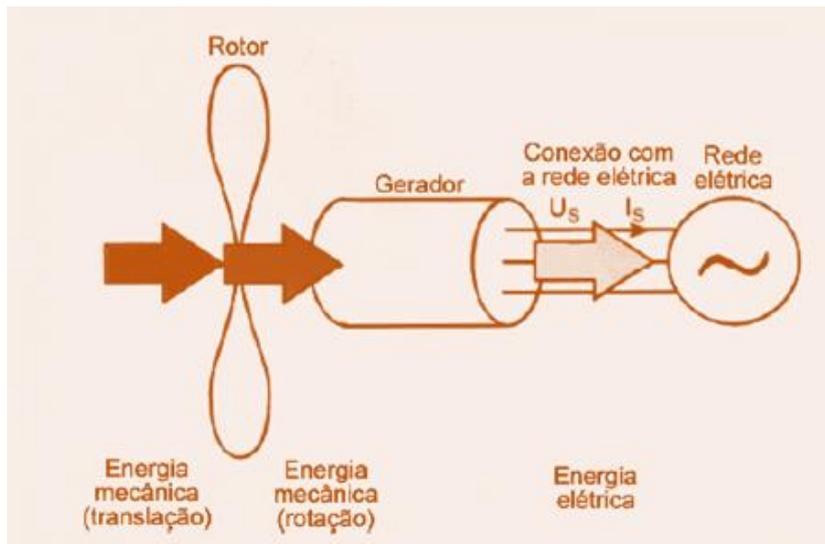


Figura 11. Ilustração do princípio básico de funcionamento de um aerogerador.

Existem hoje três tipos de aerogeradores. Suas principais diferenças estão no sistema de geração e também a eficiência aerodinâmica do rotor que é limitada durante altas velocidades do vento de maneira a prevenir sobrecargas mecânicas. As figuras 12, 13 e 14 irão mostrar os três tipos de aerogeradores usados no mercado.

O gerador de indução de rotor de gaiola é conectado diretamente a rede elétrica, esse é o sistema mais antigo de geração.

A desvantagem desse tipo de sistema é que ele consome energia reativa e isso pode causar problemas no nível de tensão do ponto de conexão devido ao fluxo de potência reativa da rede elétrica.

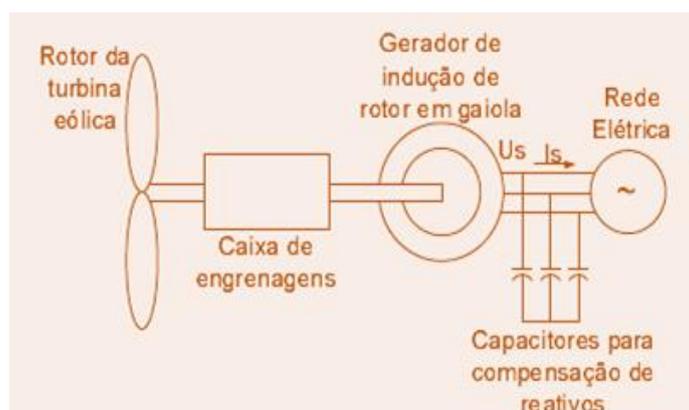


Figura 12. Gerador de indução de rotor de gaiola.

Já o gerador de indução duplamente alimentado (rotor bobinado), figura 13 e gerador síncrono acoplado diretamente ao rotor da turbina eólica, figura 14, são sistemas de geração de velocidade variável e para que isto ocorra a velocidade mecânica e a

frequência da rede devem estar desacopladas, logo são usados dispositivos eletrônicos que permitiram variar essa velocidade. O gerador de indução duplamente alimentado usa um conversor que alimenta o enrolamento trifásico do rotor, sendo assim a frequência mecânica e elétrica do rotor estão desacopladas e a frequência elétrica do estator e do rotor se equilibram, sem depender da velocidade mecânica do rotor. E as principais vantagens desse tipo de sistema são:

- ✓ Ganho na eficiência que varia de aproximadamente 2% a 3%;
- ✓ Desacoplamento das potências ativa e reativa do gerador;
- ✓ Redução do custo do inversor;
- ✓ Redução do custo dos filtros;
- ✓ Implementação do controle do fator de potência.

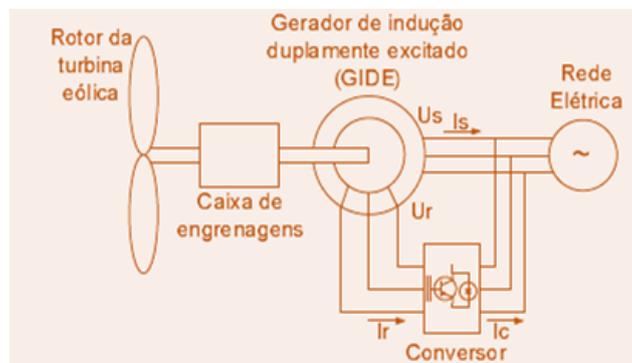


Figura 13. Gerador de indução duplamente alimentado (rotor bobinado).

O gerador síncrono acoplado diretamente ao eixo da turbina eólica, é desacoplado da rede elétrica por um dispositivo eletrônico conectado aos enrolamentos do estator, seu excitação se dá através do uso de um enrolamento de campo ou ímãs permanentes. A vantagem de se usar esse tipo de sistema é que ele dispensa o uso da caixa de engrenagens, mas como consequência apresenta algumas desvantagens como:

- ✓ Seu inversor deve ser dimensionado para suportar a potência total do sistema;
- ✓ A eficiência do inversor irá afetar a eficiência total do sistema.

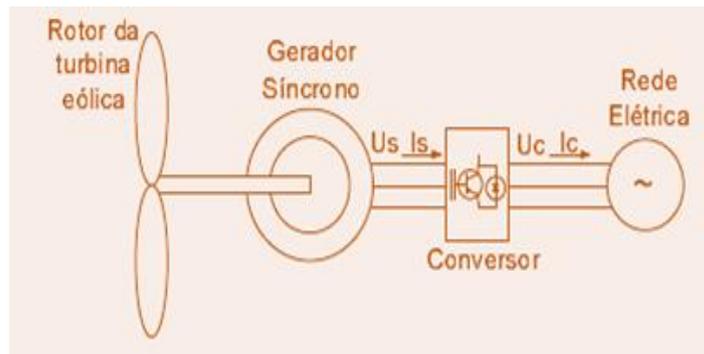


Figura 14. Gerador síncrono acoplado diretamente ao eixo da turbina eólica.

### 3. Componentes mais críticos dos Aerogeradores

#### 3.1. Componentes Mecânicos– Caixa Multiplicadora (Engrenagens e Rolamentos)

A caixa multiplicadora, ilustrada na figura 15, é responsável pelo mecanismo de transmissão da energia mecânica do eixo do rotor (eixo principal) ao eixo gerador elétrico. Os rotores eólicos funcionam com velocidades tangenciais de ponta de pá da ordem de 60 a 100 m/s, praticamente independentes do tamanho do diâmetro. A velocidade de rotação do rotor da turbina eólica é limitada entre 15 a 200 rpm, por causa da vibração, do empuxo e ruído aerodinâmicos que são causados. E para que seja feita a conexão do eixo do rotor ao eixo do gerador elétrico, é necessário utilizar uma forma de multiplicação de velocidade, pois os geradores elétricos comerciais possuem rotações típicas de 1.800 rpm.

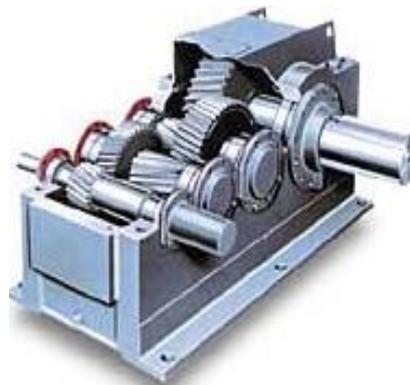
A caixa de engrenagem é o mecanismo de transmissão responsável por realizar a multiplicação de velocidade. Quanto maior o número de engrenagens usadas maior será o custo com a caixa de engrenagens. Esse componente é o que apresenta maior falha nas turbinas eólica, e recentes pesquisas tentam desenvolver projetos de rotores eólicos com maiores velocidade e caixas de engrenagens mais eficientes. Elas apresentam maior resistência a cargas mecânicas, diâmetros adequados e fatores de multiplicação de velocidade inferior aos antigos. Contudo, em projetos mais recentes de turbinas eólicas, não usam mais caixas de engrenagens, o eixo do rotor eólico é acoplado diretamente ao eixo de um gerador elétrico com um número maior de pólos, assim funcionando com velocidades mais próximas da velocidade do eixo do rotor.



Figura 15. Caixa multiplicadora (Fabricante – Winergy – Vestas – V80)

Os tipos de caixas de engrenagens existentes são:

- ✓ Eixos paralelos: São engrenagens colocadas em eixos paralelos suportados por rolamentos montados em uma caixa. A caixa de engrenagem de um estágio possui dois eixos paralelos, um de baixa rotação, conectado ao rotor, e outro de alta rotação conectado ao gerador elétrico, conforme ilustrado na figura abaixo. A eficiência neste tipo de engrenagem é de aproximadamente 2% da perda de potência por estágio.



- ✓ Eixos planetários: Nessas engrenagens os eixos de saída e de entrada são coaxiais, o eixo de baixa velocidade é conectado de forma rígida ao Planet carrier, que se acopla a outras três engrenagens conhecidas como planetas por causa do seu formato. Elas giram livremente, e fazem mexer uma engrenagem interna de maior diâmetro que está acoplada ao eixo de alta velocidade. A figura abaixo mostra

uma caixa de engrenagem do tipo planetário. A eficiência neste tipo de engrenagem é de aproximadamente 1% da perda de potência por estágio.



### 3.2. Componentes Elétricos – Geradores Elétricos e Transformadores

- **Gerador de corrente contínua (CC):**

Esse tipo de gerador é utilizado em menor escala e ele é limitado a turbinas de baixa potência. Uma desvantagem desse tipo de gerador é que possui alto custo e maiores necessidades de manutenção. O campo se localiza no estator e a armadura no rotor. O comutador no rotor retifica a potência CA gerada para CC, a corrente de campo e o campo magnético aumentam com a velocidade de operação, esse aumento de velocidade também provoca aumento da tensão da armadura e o torque elétrico.

- **Gerador de ímã permanente:**

São bastante utilizados nas turbinas eólicas, tanto de grande como de pequeno porte. Esse tipo de gerador fornece campo magnético e com isso não necessita do uso de enrolamentos de campo (que necessitam de alimentação CC externa). Seu princípio de funcionamento é semelhante aos geradores síncronos, exceto os que operam de forma assíncrona, logo, não são ligados a rede elétrica diretamente.

- **Gerador síncrono:**

Esse tipo de gerador é mais utilizado em turbinas de maior potência, eles funcionam com velocidade constante associada à frequência constante. Por funcionarem dessa forma, os geradores síncronos se tornam pouco viáveis, pois não são adequados a trabalhar com velocidade de operação variável, as quais são adequadas para turbinas eólicas, devido ao comportamento dos ventos. Sua aplicação pode ser:

- Em turbinas de grande porte com rotor bobinado ou imã permanente conectadas às redes elétricas;
- Conjunção com conversores eletrônicos em turbinas de velocidade variável;
- Aplicações isoladas – usando imã permanente com aplicação CC e AC (com uso de inversores);
- Controle de tensão e fonte de potência reativa – redes isoladas.

A vantagem desse tipo de gerador é que eles possuem maior rendimento e não necessitam de fonte externa de reativos. Por outro lado, eles necessitam de equipamentos adicionais (reguladores de tensão e velocidade) para manter o sincronismo com a rede além de ter maior custo em relação aos geradores de indução, essas são algumas de suas desvantagens.

- **Gerador de indução (assíncrono):**

Esse tipo de gerador é muito aplicado em turbinas de pequeno e grande porte [8], devido sua construção robusta, facilidade de manutenção, e baixo custo. O gerador de indução apresenta uma vantagem em relação aos demais tipos de geradores, pois não necessita de excitação CC de campo, e seu funcionamento é baseado em indução eletromagnética.

A estrutura eletromagnética de um gerador é formada basicamente por duas partes: um estator (parte fixa), no qual são alojadas as bobinas em grupos de três, alimentadas com corrente trifásica senoidais e o rotor (parte móvel), que se move no interior do estator e que pode também possuir bobinas alojadas ao longo de sua estrutura, ou também pode ser constituído por barras de cobre ou alumínio curto-circuitadas em suas extremidades.

Os geradores elétricos usados em turbinas eólicas fornecem energia em tensões entre 380 V e 690 V trifásica. Devido ao seu aquecimento, necessitam de sistema de refrigeração que pode ser ar (ventiladores) ou água (necessita de radiador), os quais são os principais componentes com falhas mecânicas [segundo, Ronaldo, 2013].

#### **4. Técnicas de manutenção Preditiva**

As técnicas de manutenção preditiva surgem como uma solução sistemática através do monitoramento das variáveis ou parâmetros que indicam a performance ou desempenho dos equipamentos visando definir a necessidade ou não de intervenção. Assim permitindo que os equipamentos operem por mais tempo e a intervenção ocorra com base em dados e informações. As principais técnicas preditivas são:

- ✓ Ultra-som;
- ✓ Partículas magnéticas;
- ✓ Líquidos penetrantes;
- ✓ Raio X;
- ✓ Termografia;
- ✓ Análise de vibrações;
- ✓ Emissão acústica;
- ✓ Correntes parasitas;
- ✓ Ferrografia;
- ✓ Análise de óleos;
- ✓ Outros.

No presente trabalho será dado ênfase nas técnicas de análise de óleo, vibrações e termografia.

##### **4.1. Análise de Óleo**

A análise de óleo permite o monitoramento das condições do óleo lubrificante e identificação da necessidade de sua troca, filtragem ou reposição parcial.

A Lubrificação pode ser considerada como um princípio básico para o funcionamento da maioria dos equipamentos. Porém, a lubrificação é uma das causas de

falha mais comuns nos equipamentos industriais, podendo causar sérios prejuízos operacionais e danos nos equipamentos.

As funções básicas do lubrificante são: reduzir o atrito e desgaste; retirar o calor gerado pelo atrito ou pelo funcionamento da máquina; formar o filme de lubrificante; evitar a corrosão e contaminação.

As análises de óleos lubrificantes podem ser divididas em quatro grupos:

1. Análise Físico-Química:

- ✓ Viscosidade Cinemática;
- ✓ Ponto de fulgor;
- ✓ Número Total de Acidez;
- ✓ Número Total de Basicidade;
- ✓ Corrosão em Lâmina de Cobre;

2. Análise de Contaminação:

- ✓ Teor de Água;
- ✓ Insolúveis em Pentano;

3. Espectrometria;

4. Ferrografia.

## **4.2. Análise de Vibrações**

A vibração é um movimento oscilante de uma máquina ou de algum elemento de máquina, saindo de sua posição de estabilidade (estática ou dinâmica). Como exemplo, temos uma massa suspensa presa ao referencial por uma mola, e que se movimenta a partir de sua posição neutra (repouso) até os limites superior e inferior, retornando à sua posição neutra. Neste ponto, estará completo um ciclo de oscilação.

Dizemos que existe vibração quando este ciclo se repete várias vezes numa unidade de tempo. O tempo gasto para completar um ciclo é chamado período e, a quantidade de ciclos numa unidade de tempo é chamada frequência do movimento.

Registrando graficamente este movimento temos o traçado senoidal desta “oscilação”, que obedece às leis cinemáticas do “movimento harmônico simples - MHS”, conforme ilustrado abaixo.

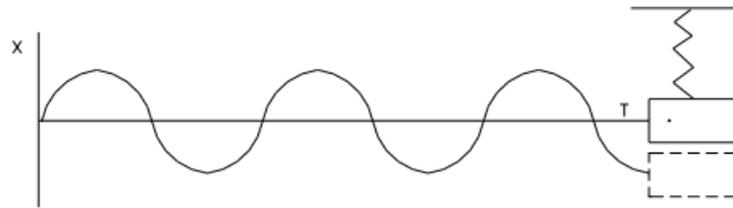


Figura 16. Conjunto massa-mola em movimento harmônico simples.

#### 4.2.1. Ressonância

A ressonância é a interação física e matemática de dois ou mais eventos atuando simultaneamente. As energias dos eventos manifestando-se em frequências idênticas ou próximas entre si, darão surgimento a excitações não previstas inicialmente nos mais diversos sistemas mecânicos, elétricos ou estruturais. É objetivo da análise espectral, identificar os vários componentes que podem gerar as interações para assim proceder as modificações necessárias para eliminá-las.

Agregando o monitoramento periódico e sistemático, podemos identificar situações de ressonância as mais imprevisíveis, responsáveis, muitas das vezes, pela deterioração prematura de máquinas e componentes.

Os exemplos mais comuns de ressonâncias são:

- ✓ RPM da máquina com CPM da estrutura;
- ✓ RPM de um componente com CPM de partes de rolamentos;
- ✓ CPM de área espectral com CPM de partes de rolamentos;
- ✓ CPM de engrenagens com CPM de carcaças e estruturas;
- ✓ CPM de componentes de máquinas com CPM de sensores;
- ✓ CPM de rolamentos com CPM de alimentação elétrica, dentre outros.

Por meio da medição e análise das vibrações de uma máquina em serviço normal de produção detecta-se, com antecipação, a presença de falhas que devem ser corrigidas, a seguir algumas dessas falhas que podem ser detectadas através da análise de vibração:

- ✓ Rolamentos deteriorados;
- ✓ Engrenagens defeituosas;
- ✓ Acomplamentos desalinhados;
- ✓ Rotores desbalanceados;
- ✓ Vínculos desajustados;
- ✓ Eixos deformados;
- ✓ Lubrificação deficiente;
- ✓ Folga excessiva em buchas;
- ✓ Falta de rigidez;
- ✓ Problemas aerodinâmicos;
- ✓ Problemas hidráulicos;
- ✓ Cavitação.

As falhas mais comumente encontradas através da análise de vibração são:

- ✓ Desbalanceamento de massas rotativas.
- ✓ Rotores excêntricos ou empenados.
- ✓ Eixo empenado.
- ✓ Desalinhamentos em geral.
- ✓ Rolamentos danificados ou inadequados.
- ✓ Correias fora de padrão.
- ✓ Cavitação/Refluxo hidráulico.
- ✓ Passagem de palhetas.
- ✓ Turbulência em mancais de deslizamento.
- ✓ Motores Elétricos defeituosos.
- ✓ Engrenamentos desgastados ou incorretos.

### **4.3 Termografia**

A termografia é definida como a técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperatura e a formação de imagens térmica de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha. Através dessa tecnologia é possível detectar em estágio inicial, processos de falha gerados por anomalias térmicas

em um determinado componente antes que ocorra interrupção de funcionamento dos equipamentos, podendo classificar e quantificar.

Em relação aos sistemas elétricos, a inspeção termográfica identifica problemas causados por anomalias térmicas devido a interação entre a corrente/resistência dos componentes, geralmente causadas por deficiências de contato. A figura 17 mostra os pontos mais críticos do equipamento.

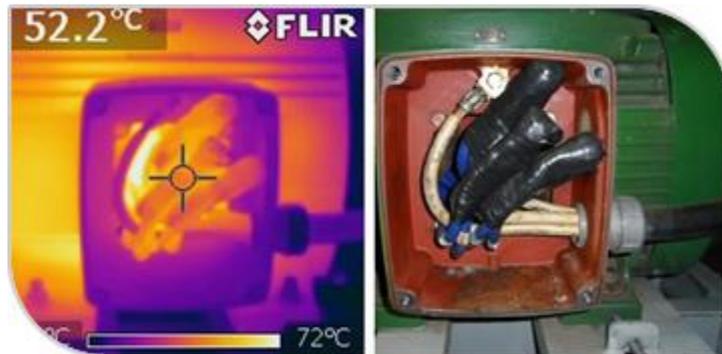


Figura 17. Equipamento elétrico – Ensaio de termografia para medir a temperatura dos equipamentos em operação.

Para sistemas mecânicos, dinâmicos ou estáticos permite identificar problemas causados pelo atrito entre peças, devido à lubrificação deficiente ou inadequada, ou até desalinhamento de eixos pelo aquecimento nos dispositivos de acoplamento. A figura 18 mostra os níveis de temperatura que o equipamento esta trabalhando através do ensaio de termografia.

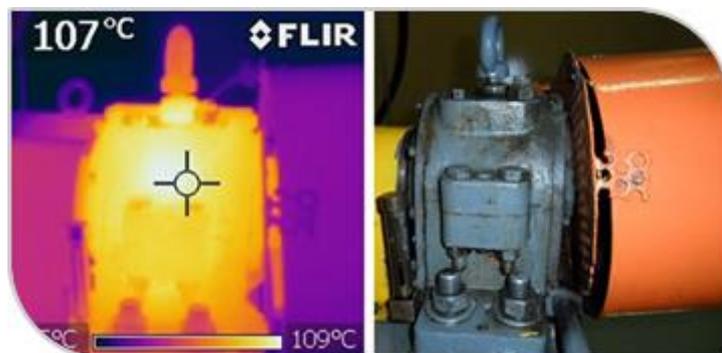


Figura 18. Equipamento mecânico – Ensaio de termografia.

## CAPÍTULO 3

# Principais avarias que prejudicam o funcionamento dos aerogeradores

### 3. PRINCIPAIS AVARIAS QUE PREJUDICAM O FUNCIONAMENTO DOS AEROGERADORES

Os aerogeradores não produzem energia todo o tempo e com sua plena capacidade. Alguns fatores influenciam para o seu bom funcionamento, como: as perdas que provocam diminuição do rendimento esperado, indisponibilidades e as variações da velocidade do vento.

Um grande problema também enfrentado pelos aerogeradores são as vibrações causadas por falhas mecânicas e que são provenientes de forças que mudam de direção e de intensidade. Essas vibrações ocorrem devido a fatores como: desequilíbrio, desalinhamento, rolamentos defeituosos, problemas em engrenagens, folgas, lubrificação deficiente e até as ressonâncias. Pelo gráfico 1 é possível notar que a principal causa de parada em aerogeradores são as caixas multiplicadoras, e em seguida as falhas elétricas. Os problemas que ocorrem na caixa multiplicadora são do tipo mecânicos, ocorrendo principalmente nas engrenagens e rolamentos.

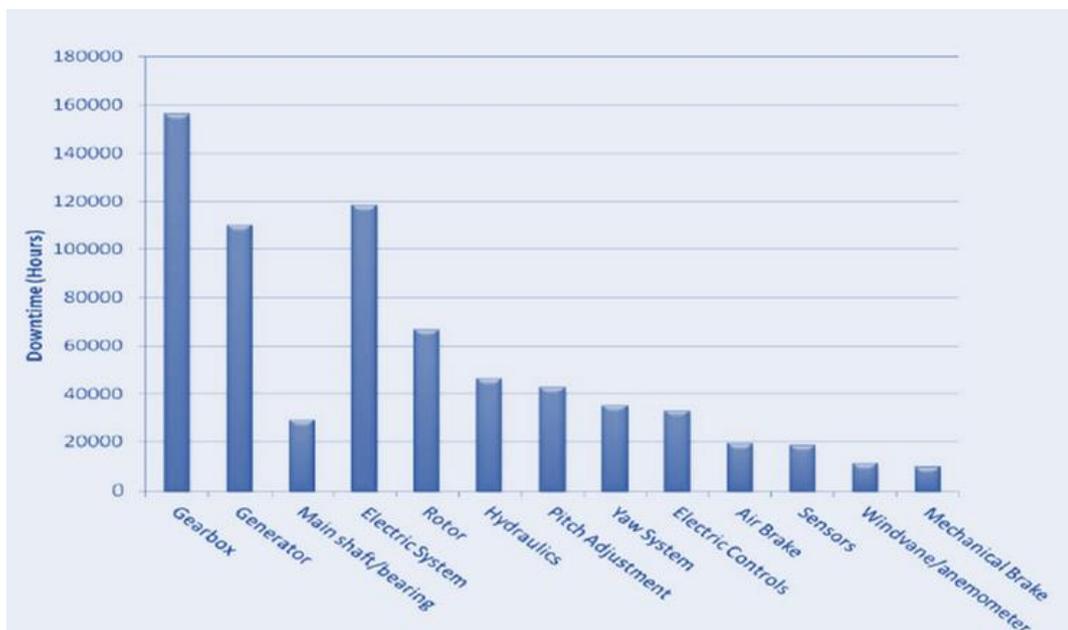


Gráfico 1 Tempo de parada X origem da falha.[4]

A seguir serão apresentados alguns sistemas dos aerogeradores e as causas que provocam seu mal funcionamento.

## **1. Mecânica – Componentes Críticos**

### **1.1. Caixa Multiplicadora – Engrenagens e Rolamentos**

- **Defeitos nas Engrenagens:**

Os defeitos encontrados nas engrenagens que são usadas na caixa multiplicadora dos aerogeradores estão associados a diversos fenômenos, como: a micropicagem (micropitting), picagem (pitting) e escamação (spalling) [6]. Estes são usados para designar o grau de degradação que é causado por fadiga de contato.

- Micropitting é o termo usado para a degradação por fadiga de contato na escala dos picos de rugosidade, ou seja, em escala microscópica e com origem superficial, o qual constitui a formação de pequenos micropits ou microescamas que não são profundas variando de 10  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  na superfície de contato, e que apresentam diâmetros de no máximo 100  $\mu\text{m}$  [4] Essa degradação pode ser causada por causa da rugosidade superficial, a pressão de contato local, ou até mesmo o tipo de material usado e o tratamento térmico que foi realizado neste material.
- Pitting surge pelas tensões tangenciais nas superficiais de contato, e ele é a evolução do Micropitting. As causas que provocam seu aparecimento são, lubrificação inadequada ou insuficiente, a rugosidade excessiva das superfícies e a existência de partículas de grandes dimensões no lubrificante. Esse defeito ocorre principalmente nas engrenagens que são endurecidas superficialmente e retificadas, a profundidade desde defeito varia na ordem de 0,1 mm e apresenta diâmetros variando de 0,3 a 2 mm, bem maiores que os defeitos por Micropitting.

O desgaste causado nas engrenagens é causado pela retirada progressiva de material da superfície, e conseqüentemente ocorre a deformação plástica, a abrasão, a adesão e desgaste químico do material.

A remoção de material do mancal, causa desgaste com deposição, que posteriormente é depositado em outro ponto do mancal. Esse desgaste é causado pelas sobrecargas, perdas de lubrificação e desalinhamento. A propagação de fendas de fadiga causa a formação de partículas de desgastes sobre os rolamentos, prejudicando seu

funcionamento. Isso ocorre por causa da lubrificação do sistema, pois o lubrificante sofre degradação devido ao aumento da temperatura, o que conseqüentemente aumenta o atrito entre as superfícies, gerando assim deformações plásticas do conjunto.

Outro causador de defeitos nas engrenagens é a frequência de engrenamento da caixa multiplicadora e essa frequência é calculada através do número de dentes de cada engrenagem e a velocidade de rotação no momento da análise.

- **Defeitos nos Rolamentos:**

Para garantir o bom funcionamento dos aerogeradores, é necessário que os rolamentos estejam em um bom estado de conservação. Para definir o tempo de vida de um determinado rolamento é necessário saber o número de rotações que ele fará antes de apresentar os primeiros sinais de desgastes. Esses desgastes se apresentam na forma de fendas e, através da passagem de esferas faz com que o sistema libere pequenas partículas que fazem com que os defeitos sejam aumentados (gerando o conhecido spalling).

Conseqüentemente surgem vibrações nos rolamentos, que são causadas por defeitos nas pistas, nas esferas, ou nos rolos dos próprios rolamentos.

O rolamento gera vibrações que normalmente não são transmitidas para outros pontos da máquina, logo o rolamento que está com defeito é aquele onde os pontos de maiores vibrações ocorrem, conforme ilustrado abaixo.

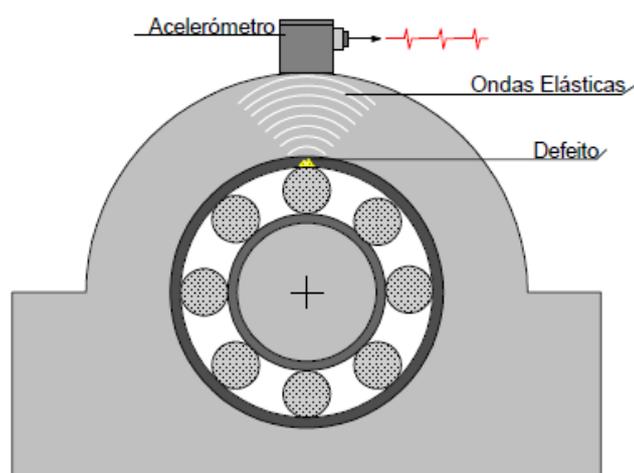


Figura 19. Rolamento defeituoso que causam ondas elásticas [4]

Os rolamentos são elementos rígidos e as falhas causadas sobre eles não ocorrem prematuramente, elas ocorrem por causa de forças externas e são as mesmas que causam as vibrações.

Existem diversos tipos de rolamentos, como os rolamentos auto-compensadores, rolamentos axiais de rolos cônicos, entre outros tipos, e para selecionar o rolamento correto a ser utilizado no aerogerador é necessário analisar os componentes que estão associados a ele.

No caso dos rolamentos auto-compensadores eles utilizados quando se pretende suportar cargas muito elevadas, deflexões ou até desalinhamento. Esse tipo de rolamento é projetado para permitir que desalinhamentos angulares entre os anéis externos e internos possam ser acomodados sem qualquer efeito sobre o desempenho do rolamento.

- **Lubrificação:**

A lubrificação de um determinado sistema é simplesmente a interposição de um filme entre dois corpos em contato com movimento relativo, com a finalidade de diminuir o atrito, o desgaste e a temperatura de funcionamento do sistema.

Alguns problemas físicos que influenciam a durabilidade do óleo na caixa multiplicadora são: a deformação plástica dos sólidos em contato, que ocorre devido a ação da carga aplicada, e o por causa do aumento da viscosidade do fluido lubrificante sob efeito da pressão.

A lubrificação incorreta causa diversos problemas nas engrenagens, mas as avarias encontradas nelas não são causadas por causa do lubrificante, mas sim por causa da seleção inadequada do lubrificante, ou de defeitos no sistema de lubrificação, ou até contaminação do lubrificante. Essa contaminação pode ser causada devido à presença de gases, sólidos ou líquidos, que prejudicam o funcionamento dos aditivos do lubrificante.

Aditivos são formados por compostos químicos que ao serem adicionados aos lubrificantes reforçam uma determinada propriedade que se deseja. Os aditivos de extrema pressão são utilizados para impedir o contato destrutivo entre as superfícies metálicas com movimento relativo e submetidas a cargas elevadas. Os aditivos anti-desgaste são compostos que reduzem ou eliminam o desgaste por atrito. Por isso o lubrificante tem um papel muito importante na fadiga devido à ação da carga aplicada, logo é necessário a seleção de um lubrificante que contenha aditivos de extrema-pressão.

Alguns fatores influenciam na degradação do lubrificante como:

- ✓ Oxidação;
- ✓ Perda de aditivos;
- ✓ Variação da viscosidade;
- ✓ Contaminação.

As elevadas temperaturas e cargas que surgem na partida ou na parada do aerogerador, causam diminuição da viscosidade do lubrificante consequentemente aumentando a interação dos contaminantes.

O lubrificante também pode ser contaminado devido a presença de partículas, sendo elas responsáveis por:

- ✓ Desgaste;
- ✓ Abrasão;
- ✓ Fadiga;
- ✓ Erosão.

O surgimento dessas partículas faz com que se acelere o processo de oxidação do óleo e assim aumenta-se a viscosidade do lubrificante, prejudicando o seu desempenho.

- **Manutenção da Caixa multiplicadora e demais componentes dos aerogeradores:**

A manutenção da caixa multiplicadora dos aerogeradores é feita segundo os planos de manutenção dos fabricantes. Logo para cada fabricante existem recomendações que devem ser seguidas para garantir o bom funcionamento do sistema. Como exemplo, pode-se citar que é recomendado que seja feita a verificação de falhas nos apoios da caixa com uma periodicidade de 3, 6 e 12 meses.

As manutenções realizadas em aerogeradores algumas vezes provocam paradas devido a necessidade de:

- ✓ Troca de óleo do sistema hidráulico;
- ✓ Revisão geral no gerador;
- ✓ Nivelamento e balanceamento do gerador;
- ✓ Correção de defeitos no controle das pás da turbina;
- ✓ Correção de defeitos na conversora de frequência;
- ✓ Manutenção corretiva das pás.

Os fabricantes de aerogeradores garantem disponibilidade mínima de 97 %, segundo literatura.

Como a produção de energia elétrica é feita em usinas compostas por um grande número de aerogeradores, por vezes na ordem de dezenas, as disponibilidades individuais das máquinas não trazem maiores transtornos à produção de energia elétrica uma vez que as manutenções são programadas de forma escalonada. Adicionalmente, o conhecimento do comportamento do vento no local permite que as programações de parada dos aerogeradores para manutenção sejam feitas em períodos de ventos mais fracos e, dessa forma, a redução na produção de energia é minimizada [2].

## **1.2. Geradores – Mancais e Ventilação**

Os Geradores apresentam perdas mecânicas que são causadas devido ao atrito das partes móveis, como os mancais e a ventilação.

## **2. Elétrica - Componentes Críticos: Geradores e Transformadores**

- **Falhas nos geradores:**

As principais perdas elétricas que ocorrem nos geradores são causadas devido a circulação de corrente elétrica nos seus rolamentos, pois devido ao efeito Joule, parte da energia é transformada em calor. E o fluxo magnético presente no núcleo do gerador, tanto no estator como no rotor, acabam provocando perdas por histerese, por corrente parasita e por saturação magnética, as quais também produzem calor.

No caso da formação de corrente parasita, ela forma um circuito elétrico no qual o rotor é a fonte, a carcaça do estator é a carga e os mancais (rolamentos) são a conexões do circuito, e isso se deve ao desalinhamento eletromagnético que ocorre no rotor ou no estator.

- **Falhas nos Transformadores:**

Os transformadores também apresentam perdas eletromagnéticas bastante semelhantes aos geradores, mas como os transformadores são equipamentos estáticos, não apresentam perdas associadas à movimentos.

### **3. Estrutural**

É importante se ter conhecimento das características dinâmicas da estrutura de um aerogerador. Devido ao fato do aerogerador ficar posicionado numa estrutura de cerca de 80 m de altura é normal que tenda a ocorrer ressonância, a qual gera grandes oscilações que podem provocar rupturas do material. A ressonância ocorre quando a frequência (todos os componentes de um sistema mecânico apresentam uma frequência natural) da força externa coincide com a frequência natural do sistema. Essas ressonâncias que ocorrem na estrutura estão relacionadas diretamente aos componentes fixos da máquina como os mancais e os suportes.

Uma das formas de corrigir a vibração ressonante do sistema é através da alteração das condições da força excitadora, é necessário fazer com que a frequência deixe de coincidir com a frequência natural da máquina ou da estrutura. Quando não é possível mudar a frequência da força excitadora, pode-se simplesmente modificar a frequência natural do sistema, para isso altera-se a rigidez ou a massa da máquina.

## CAPÍTULO 4

### Resultados

## 4. RESULTADOS

---

Diante de todo o estudo realizado verificou-se que ocorrem diversas avarias nos aerogeradores e que a caixa multiplicadora apresenta o maior número de falhas mecânicas em seus componentes. A seguir serão apresentados em separado os resultados das avarias de cada parte estudada no trabalho:

- **Parte mecânica:**

As perdas geradas na caixa multiplicadora podem ser minimizadas com o uso de óleo para lubrificação e refrigeração das engrenagens. O óleo necessita de viscosidade adequada e deve ser substituído periodicamente, pois o calor e o atrito provocam sua degradação e com isso diminui o rendimento do multiplicador.

Os causadores que dão origem às falhas presentes nos elementos que compõem os rolamentos são: instalação defeituosa, o atrito, a pré-carga incorreta, o desalinhamento, a sobrecarga, a vedação defeituosa e a lubrificação inadequada.

Mais uma vez a lubrificação é um importante componente, pois além de evitar o desgaste, protege também contra corrosão, aumentando ainda mais o desempenho das peças.

- **Parte Elétrica:**

De um modo geral as perdas que ocorrem nos sistemas elétricos dos aerogeradores estão associados aos fenômenos eletromagnéticos (efeito Joule e Corona) e isso depende do tipo de dispositivo. As perdas que ocorrem nesses sistemas são devido ao uso de disjuntores, chaves, cabos, capacitores e até pontes conversoras, os quais apresentam diversas perdas. Entretanto, esses equipamentos são caracterizados por apresentarem altos rendimentos, superior a 95 % [2], e para o cálculo total do rendimento de um aerogerador, todas as perdas devem ser levadas em consideração.

- **Parte Estrutural:**

Para a parte estrutural, no caso de problemas com a ressonância que possa vir a acontecer e com isso danificar o aerogerador, uma das formas de evitar que isso ocorra é modificando a rigidez ou a massa da máquina como mencionado anteriormente.

Então o presente trabalho sugere a implantação de manutenção preditiva em aerogeradores com o intuito de conferir aos sistemas uma maior confiabilidade e, assim, reduzir os custos com manutenção, conseqüentemente aumentando a disponibilidade dos aerogeradores em funcionamento.

As técnicas de manutenção preditivas recomendadas são:

- **Análise de óleo:**

Realizar coletas de amostras de óleo em períodos determinados e em pontos estratégicos. Os ensaios recomendados para o óleo são:

- ✓ Teor de água – Medido em PPM;
- ✓ Teor de acidez – Medido em mgKOH/g;
- ✓ Teor de basicidade – Medido em mgKOH/g;
- ✓ Viscosidade a 40°C – Medido em cST;
- ✓ Espectrometria atômica – Medida em PPM;
- ✓ Contagem de partículas – Não apresenta unidade (partículas sólidas presente no óleo);
- ✓ Ferrografia (presença de partículas ferrosas de desgastes);

Através dessa análise do lubrificante utilizado nos aerogeradores, é possível monitorar os equipamentos de forma a aumentar sua viabilidade e diminuir o tempo de parada, além de diminuir o surgimento de avarias.

Algumas condições devem ser obedecidas com relação ao armazenamento do óleo e à coleta das amostras evitando assim a sua contaminação. A seguir algumas condições:

- ✓ Retirar a amostra sempre do mesmo ponto (antes do filtro);
- ✓ A amostra deve ser retirada ainda com o óleo quente;
- ✓ Armazenar num frasco de vidro transparente e incolor;
- ✓ Não utilizar a mesma mangueira para diferentes coletas (no caso de usar bomba de vácuo);
- ✓ Horas de funcionamento da máquina;
- ✓ Data da coleta;
- ✓ Identificação do Aerogerador.

Após a análise do óleo caso contenha alguns elementos como: Ferro, Cobre, Níquel, Estanho, Chumbo, Zinco e Alumínio, há a indicação de que está ocorrendo desgaste nas peças. Já a presença de Cálcio em nível elevado, Magnésio, Silício, Potássio, Sódio, Tungstênio e água indicam contaminação do óleo. O gráfico a seguir mostra a análise de uma determinada amostra de óleo retirada de um Parque Eólico em Portugal.

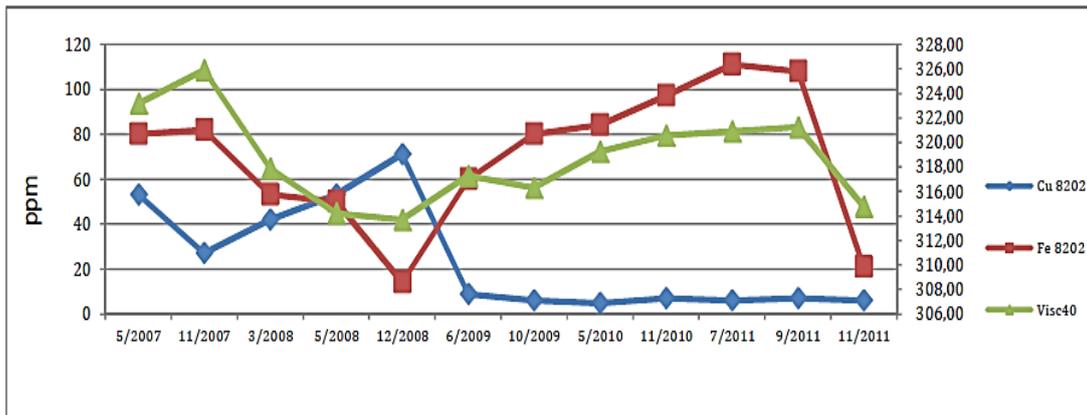


Gráfico 2 Análise do óleo de um aerogerador [4]

De acordo com o gráfico verifica-se que o Ferro em dezembro de 2008 estava com uma concentração de aproximadamente 19 ppm e aumentou para aproximadamente 110 ppm em Julho de 2011, ou seja, ocorreu um aumento de 5,6 vezes em sua concentração, demonstrando desgastes dos componentes mecânicos. Para o Cobre a partir de maio de 2010 sua concentração foi constante até a última data de coleta, não acarretando em muito desgaste para as peças. Pelo gráfico também é possível notar que a viscosidade variou muito em diferentes datas, mas deve-se verificar se essa variação esteve dentro dos limites recomendados.

- **Análise de Vibração:**

Os parâmetros principais para análise de vibração são:

- ✓ Frequência;
- ✓ Deslocamento.

Estes parâmetros podem ser medidos com o uso de acelerômetros.

As vibrações que ocorrem nas estruturas eólicas são motivo de preocupação. Cada vez mais estão sendo desenvolvidas técnicas para minimizar os danos causados pelas

ações externas, como as vibrações provocadas por ventos. Essas forças provocam ressonância na estrutura provocando assim a sua ruptura, conforme ilustrado abaixo:



Figura 20. Ruptura da estrutura de um Aerogerador [4]

- **Termografia:**

A temperatura é utilizada para indicar das condições das máquinas e equipamentos. Os técnicos sabem que temperaturas anormais costumam indicar um problema potencial. Para obter uma indicação quantitativa de temperatura, termômetros de contato direto costumam ser utilizados e termômetros infravermelhos são frequentemente utilizados em aplicações perigosas ou de difícil acesso.

Porém, os termômetros infravermelhos medem a temperatura média de uma área e, para medições precisas, o usuário precisa estar próximo da aplicação. A termografia permite visualizar o calor. A radiação infravermelha da aplicação é convertida em uma imagem visual por uma câmera termográfica.

As diferentes temperaturas são indicadas como cores ou tons de cinza diferentes. As câmeras termográficas permitem comparações de temperatura sobre uma área ampla, permitindo que pontos quentes potencialmente problemáticos sejam localizados rapidamente, a figura 21 mostra um ensaio de termografia.

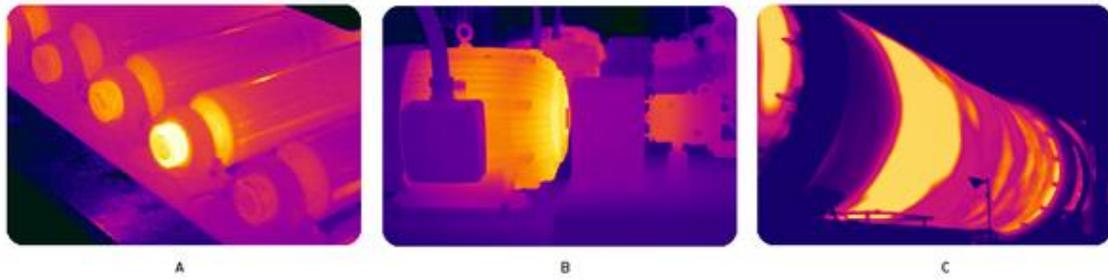


Figura 21 Equipamentos mecânicos. A) Superaquecimento em rolamento de transportador B) Superaquecimento de motor C) Revestimento refratário danificado.

Conforme proposto no presente trabalho, segue em anexo um plano de manutenção preventiva que é recomendado para Aerogeradores. O principal objetivo desse plano é evitar que ocorram falhas catastróficas que ocasionam grandes prejuízos.



CAPÍTULO 5  
Conclusões e Sugestões

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

### 1. Conclusões

Após todo levantamento feito no presente trabalho, pode-se obter as seguintes conclusões:

- 1- Os sistemas mecânicos apresentaram uma maior criticidade quanto às paradas de aerogeradores;
- 2- A caixa multiplicadora é o item de maior criticidade do aerogerador, na qual várias avarias ocorrem em diferentes peças mecânicas;
- 3- Foi verificado que as principais perdas elétricas provocavam perdas por histerese, por corrente parasita e por saturação magnética;
- 4- As falhas estruturais são provocadas principalmente por erros de projeto;
- 5- A análise de óleo lubrificante quantifica os valores das propriedades físico-químicas e da quantidade de partículas de desgaste, influenciando diretamente no monitoramento da condição dos componentes mecânicos evitando, assim, falhas catastróficas;
- 6- A análise de vibração indica os níveis de deslocamento dos componentes críticos do aerogerador, influenciando diretamente no monitoramento da condição dos componentes mecânicos e evitando, assim, a ocorrência de falhas;
- 7- Em ocasiões em que a velocidade do vento for muito alta de maneira que a rotação do aerogerador ultrapasse a rotação máxima permitida, deve-se verificar a integridade física do sistema de frenagem, pois um mal funcionamento do mesmo provocará uma rotação excessiva que prejudicará as pás e a estrutura do aerogerador;
- 8- A termografia mostra os pontos em que ocorre elevação da temperatura de operação acima do valor recomendado, sendo esta ferramenta de grande importância para a saúde dos equipamentos analisados;
- 9- As técnicas de manutenção preditiva surgem como uma excelente ferramenta para monitoramento e prolongamento da vida útil dos aerogeradores;
- 10- Com a utilização adequada do plano de manutenção preditiva, isso irá garantir uma diminuição do número de paradas dos aerogeradores e conseqüentemente, aumento de sua disponibilidade e redução de custos.

## **2. Sugestões**

- 1- Realizar o presente estudo experimentalmente nos Parques Eólicos do Estado do Rio Grande do Norte utilizando técnicas de manutenção industrial como forma de otimizar a integridade física dos componentes mais críticos dos aerogeradores e aumentar sua vida útil;
- 2- Realizar testes de ensaios destrutivos em amostras da base do aerogerador para verificar causas de falhas estruturais;
- 3- Realizar um caso de estudo das principais avarias que ocorrem nos aerogeradores dos Parque Eólicos do Estado do Rio Grande de Norte, e estudar as possíveis causas dessas avarias e as possíveis medidas que podem ser tomadas para evitar que venham a acontecer novamente.

CAPÍTULO 6  
Referências Bibliográficas

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral; PHILIPPI JUNIOR, Arlindo. **Energia Eólica**. São Paulo: Manole, 2011. 285 p. (Sustentabilidade);
- [2] CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica: Para Produção de Energia Elétrica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2013. 320 p;
- [3] NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2002. 1 v;
- [4] SEQUEIRA, CLÁDIA DIAS; A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (Dissertação de Mestrado). FCT, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012;
- [5] Wind System Fail and Crashes. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=CqEccgR0q-o>>. Acesso: 20 de maio de 2014;
- [6] Taylor, James I. (2000) “The gear analysis handbook, a practical guide for solving vibration problems in gears”, Vibration consultants, inc. 1ª Ed, Florida, ISBN: 0-9640517-1-0. pp. 5 – 20;
- [7] Principais avarias eléctricas e mecânicas em Aerogeradores – Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.dihitt.com/barra/principais-avarias-electricas-e-mecanicas-em-aerogeradores-energia-eolica>>. Acesso: 20 de maio de 2014;
- [8] SIMÕES, M.G.; FARRET F.A. **Alternative Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators**. 2.ed. Nova York: CRC Press, 2008;
- [9] Wind Turbine Ice Throw. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=4EmYe2u6J6g>>. Acesso: 20 de maio de 2014;

[10] Eficiência energética de um sistema eólico isolado. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100056](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100056)>. Acesso: 20 de maio de 2014;

[11] História da Energia Eólica e suas utilizações. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=201>>. Acesso: 25 de maio de 2014;

[12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEL);

[13] Análise Termográfica. Disponível em: <<http://www.multierri.com.br/analise-termografica>>. Acesso: 09 de junho de 2014;

[14] BANDEIRA, Guilherme. **Trabalho de Manutenção Industrial de Frotas: Vibração e Ruído em Manutenção Preditiva**. 2010. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2010. Cap. 3.

# ANEXO

Plano de manutenção aplicada ao sistema elétrico do aerogerador.

- ✓ Plano executado com equipamento energizado (Trimestral)
  - Inspeccionar o aterramento do motor quanto a corrosão e fixação, corrigir caso necessário.
  - Verificar a existência de ruídos anormais;
  - Medir temperatura dos mancais dianteiro e traseiro do motor com medidor de temperatura a laser;
  - Medir a vibração dos mancais nas tampas;
  - Medir corrente elétrica do motor com alicate amperímetro CAT IV, cada fase R, S e T. Confrontar com corrente nominal do motor;
  - Registrar as medidas realizadas na ordem de serviço;
  - Registrar as pendências e abrir uma solicitação de serviço;
  - Limpar e organizar o local de execução do serviço;

Plano de manutenção aplicada a caixa multiplicadora:

- ✓ Um inspetor qualificado deve remover qualquer porta de acesso ou tampa para proceder à uma inspeção visual completa das superfícies da engrenagem. São recolhidas amostras de óleo, que serão posteriormente analisadas para detectar potenciais problemas, como partículas metálicas, alterações na química do óleo e contaminante induzidas pelo calor. Será efetuada uma análise/teste de vibração para confirmar o funcionamento adequado da caixa de engrenagem, incluindo a engrenagem deslizante, o alinhamento mecânico e um movimento adequado dos rolamentos.
- ✓ Procede-se à desmontagem completa da caixa de engrenagem e das engrenagens, chaves e eixos para realizar exame completo, que poderá incluir técnicas de teste não destrutivo, tais como penetrante de corantes e borracha magnética.