

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração

Aloísio Chaves de Carvalho

**Avaliação da Disponibilidade e Desempenho de Um Parque Eólico após 10
Anos de Operação**

Belo Horizonte

2020

Aloísio Chaves de Carvalho

**Avaliação da Disponibilidade e Desempenho de Um Parque Eólico após 10
Anos de Operação**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Victor Flores Mendes

Belo Horizonte

2020



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO ALOÍSIO CHAVES DE CARVALHO

Realizou-se, no dia 14 de outubro de 2020, às 09:00 horas, em ambiente a distância (skype), da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Avaliação da Disponibilidade e Desempenho de Um Parque Eólico após 10 Anos de Operação*, apresentada por ALOÍSIO CHAVES DE CARVALHO, número de registro 2018745578, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Victor Flores Mendes - Orientador (Departamento de Eng. Elétrica-UFMG), Prof(a). Heverton Augusto Pereira (Universidade Federal de Viçosa).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 14 de outubro de 2020.

Prof(a). Victor Flores Mendes (Doutor)

Prof(a). Heverton Augusto Pereira (Doutor)

Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

à Deus, em primeiro lugar, pela oportunidade da vida e por todas as bênçãos recebidas;

aos meus pais, Gonçalo e Terezinha, e minhas irmãs, pelo apoio e carinho durante toda a vida;

às minhas filhas, pela paciência, compreensão e amor,

e à Jô, por cuidar delas com tanto carinho e dedicação;

aos colegas de especialização pela amizade e ajuda nos trabalhos;

ao professor Victor Flores Mendes, meu orientador, pelo conhecimento, paciência e dedicação no direcionamento desse trabalho;

ao professor Heverton Augusto Pereira, por participar da banca examinadora e pelas contribuições no trabalho final;

aos professores do curso, por todas as aulas ministradas com entusiasmo e dedicação;

e aos colegas de trabalho, que me ajudaram com os dados para o presente estudo.

RESUMO

O presente estudo conta a história de um parque eólico que completou dez anos de operação. Composto por 28 aerogeradores de 1,5 MW cada, a Central Eólica objeto do estudo passou por muitas ocorrências, falhas no isolamento dos geradores, problemas de vedação, corrosão dos ímãs permanentes e de partes metálicas, que prejudicaram bastante seu desempenho. Para contar essa história, o presente estudo buscou analisar os fatos ocorridos, as soluções implementadas, os históricos de disponibilidade do parque e uma breve análise de desempenho dos aerogeradores.

Com o objetivo de mergulhar no tema proposto, o trabalho faz um *overview* sobre a expansão eólica no Brasil e no Mundo. Também faz uma breve revisão bibliográfica, buscando contextualizar os principais aspectos tecnológicos e de funcionamento dos aerogeradores, passando desde a extração da energia cinética do vento, até a entrega da energia elétrica gerada para o sistema elétrico. Outro ponto importante que o trabalho buscou apresentar é em relação as principais falhas em aerogeradores descritas em trabalhos científicos na área.

Em relação ao parque em estudo, primeiro, o trabalho apresenta os aspectos construtivos e tecnológicos dos aerogeradores, buscando descrever os detalhes em relação ao funcionamento de cada componente, ressaltando suas principais características. Segundo, apresenta as principais falhas ocorridas no parque e as soluções implementadas. E por último, apresenta uma análise da disponibilidade e desempenho dos aerogeradores.

Palavras-chave: Aerogeradores, conversores de frequência, falhas em aerogeradores, máquinas síncronas a ímãs permanentes, corrosão em partes metálicas, desempenho de aerogeradores.

ABSTRACT

The present study tells the story of a wind farm that completed ten years of operation. Composed of 28 wind generators of 1.5 MW each, the Wind Power Plant object of the study went through many occurrences, failures in the isolation of the generators, sealing problems, corrosion of the permanent magnets and metallic parts, which severely impaired its performance. To tell this story, the present study sought to analyze the facts that occurred, the solutions implemented, the history of the park's availability and a brief analysis of the wind turbines' performance.

In order to dive into the proposed theme, the work provides an overview of wind expansion in Brazil and in the world. It also makes a brief bibliographic review, seeking to contextualize the main technological and operational aspects of the wind turbines, ranging from the extraction of kinetic energy from the wind, to the delivery of the electricity generated to the electrical system. Another important point that the work sought to present is in relation to the main failures in wind turbines described in scientific works in the area.

In relation to the park under study, first, the work presents the constructive and technological aspects of the wind turbines, seeking to describe the details in relation to the operation of each component, highlighting its main characteristics. Second, it presents the main failures in the park and the solutions implemented. Finally, it presents an analysis of the availability and performance of the wind turbines.

Keywords: Wind turbines, frequency converters, wind turbine failures, permanent magnet synchronous generator, corrosion in metallic parts, wind turbine performance.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Evolução da Capacidade Eólica no Mundo – GW (Fonte: GWEC- GLOBAL WIND REPORT 2019)..... | 17 |
| Figura 2 - Maiores Produtores de Energia Eólica “Onshore” no Mundo (Fonte: GWEC – GLOBAL WIND REPORT 2019) | 18 |
| Figura 3 - Maiores Produtores de Energia Eólica “Offshore” no Mundo (Fonte: GWEC – GLOBAL WIND REPORT 2019) | 18 |
| Figura 4 - Evolução da Capacidade Instalada Eólica no Brasil (Fonte: Abeeólica – InfoVento 15) | 19 |
| Figura 5 - Matriz de Energia Elétrica Nacional (Fonte: Abeeólica - InfoVento 15 - março/2020)..... | 19 |
| Figura 6 - Relação Potência eólica x velocidade do vento (Próprio autor)..... | 22 |
| Figura 7 - Coeficiente de potência em função da relação de velocidades(λ) e ângulo de passo(β) (Silva, 2013)..... | 23 |
| Figura 8 - Características C_P e C_T da turbina Eólica (Adaptado de (Silva, 2013)..... | 24 |
| Figura 9 - Característica de potência de uma turbina eólica (Silva, 2013)..... | 25 |
| Figura 10 - Ilustração de uma turbina eólica e grandezas associadas (Dobbin, 2014) | 25 |
| Figura 11 – Faixas de operação de uma aerogerador a velocidade variável (Dobbin, 2014)..... | 26 |
| Figura 12 – Diagrama exemplificando o agrupamento das tecnologias para formação das topologias de SCEE (Dobbin, 2014)..... | 27 |
| Figura 13 - Máquina de Indução com rotor gaiola diretamente conectada à rede (Junior, 2018)..... | 28 |
| Figura 14 - Gerador de indução com rotor bobinado diretamente conectado à rede (Junior, 2018) | 28 |
| Figura 15 - Gerador de indução duplamente alimentado (Junior, 2018)..... | 29 |
| Figura 16 - Gerador síncrono a ímãs permanentes (adaptado de Junior (2018)) | 29 |
| Figura 17 - Diagrama básico de aerogerador a ímã permanente (Oliveira, 2018) | 30 |
| Figura 18 - Diagrama simplificado de um conversor de frequência (Junior, 2014) .. | 31 |
| Figura 19 - Esquema representativo da interligação de um parque eólico (adaptado de (Silveira, 2015)..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Taxas de falha por componente de turbinas eólicas trabalhando Onshore e Offshore (Zhu, et al., 2018)..... | 32 |
| Figura 21 - Tipos de falha e ocorrências para geradores de 1 a 2 MW (Alewine, et al., 2012)..... | 33 |
| Figura 22 - Foto do Aerogerador do parque em estudo (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)..... | 34 |
| Figura 23 - Nacele e seus principais componentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 35 |
| Figura 24 - Partes principais do Gerador (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 36 |
| Figura 25 - Gerador síncrono a ímãs permanentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 37 |
| Figura 26 - Corte transversal do gerador e principais componentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 37 |
| Figura 27 - Bobinas pré-moldadas (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 38 |
| Figura 28 - Ímãs Permanentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)..... | 38 |
| Figura 29 - Modelo esquemático do sistema de refrigeração (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)..... | 39 |
| Figura 30 - Diâmetro do rotor e altura do gerador eólico de Volta do Rio (Fonte: Empresa proprietária do parque) | 40 |
| Figura 31 - Pá do aerogerador do parque em estudo (34 metros de comprimento e 5.720 kg) (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 41 |
| Figura 32 - Hub (6.500 kg) (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 41 |
| Figura 33 - Painéis e Sistema de Controle (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 42 |
| Figura 34 - Detalhe do Sistema Pitch (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 43 |
| Figura 35 - Detalhe do Sistema Yaw (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 43 |
| Figura 36 - Diagrama esquemático do Conversor de Frequência (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 - Diagrama esquemático do fluxo de ar do sistema de refrigeração (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 45 |
| Figura 38 - Diagrama unifilar 1- Subestação coletora - SE Volta do Rio (fonte: Empresa proprietária do parque) | 46 |
| Figura 39 - Diagrama unifilar 2- Subestação coletora - SE Volta do Rio (fonte: Empresa proprietária do parque) | 47 |
| Figura 40 - Potência gerada em função da velocidade do vento (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 48 |
| Figura 41 - Curva do coeficiente C_t (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 49 |
| Figura 42 - Curva do coeficiente C_p (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo) | 49 |
| Figura 43 - Ponto de entrada de umidade e ocorrência de curto-circuito..... | 51 |
| Figura 44 - Precipitação e Queimas de Aero geradores na Central Eólica em estudo (fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 52 |
| Figura 45 - Corrosão dos ímãs do rotor (fonte: Empresa proprietária do parque) | 52 |
| Figura 46 - Acúmulo de poeira no aerogerador e escorrendo pela torre (fonte: Empresa proprietária do parque). | 53 |
| Figura 47 - Pontos de oxidação na carcaça do aerogerador (fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 54 |
| Figura 48 - Exemplo de oxidação acentuada em alguns pontos (fonte: Empresa proprietária do parque) | 54 |
| Figura 49 - Oxidação das torres (fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 55 |
| Figura 50 - Exemplos de fornecedores contatados (Próprio autor)..... | 56 |
| Figura 51 - Cronograma da visita na China (Fonte: Empresa proprietária do parque) | 56 |
| Figura 52 - Destaques da Visita a Empresa 4 na China (Fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 57 |
| Figura 53 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 58 |
| Figura 54 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 55 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 59 |
| Figura 56 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)..... | 60 |
| Figura 57 - Protótipo recuperado e instalado em Set/2017 - Aerogerador nº05 (Fonte: Empresa proprietária do parque) | 61 |
| Figura 58 - Histórico de disponibilidade aerogeradores (Próprio autor)..... | 63 |
| Figura 59 - Histórico de disponibilidade aerogeradores reformados (Próprio autor)..... | 63 |
| Figura 60 - Histórico de geração x disponibilidade (Próprio autor)..... | 64 |
| Figura 61 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 03 (Próprio autor)..... | 65 |
| Figura 62 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 08 (Próprio autor)..... | 65 |
| Figura 63 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 09 (Próprio autor)..... | 65 |
| Figura 64 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 11 (Próprio autor)..... | 66 |
| Figura 65 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 22 (Próprio autor)..... | 66 |
| Figura 66 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 25 (Próprio autor)..... | 66 |
| Figura 67 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 06 (Próprio autor)..... | 67 |
| Figura 68 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 10 (Próprio autor)..... | 67 |
| Figura 69 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 13 (Próprio autor)..... | 67 |
| Figura 70 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 14 (Próprio autor)..... | 68 |
| Figura 71 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 19 (Próprio autor)..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 72 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 21 (Próprio autor)..... | 68 |
| Figura 73- Desempenho médio de geração dos Aerogeradores do projeto original - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor) | 69 |
| Figura 74 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores reformados - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor)..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Parâmetros eólicos para as classes de projeto (Lemos, 2012) | 40 |
| Tabela 2 - Principais características do SCEE do parque em estudo | 48 |
| Tabela 3 - Histórico de queima de aerogeradores do parque eólico em estudo (Elaborado pelo autor) | 50 |
| Tabela 4 - Cronograma de instalação dos Aerogeradores reformados (Fonte: Empresa proprietária do parque) | 62 |
| Tabela 5 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores do projeto original - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor) | 69 |
| Tabela 6 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores reformados - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor) | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PCHs - Pequenas Centrais Hidrelétricas

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

SCEE – Sistema de Conversão de Energia Eólica

MIRG – Máquina de indução com rotor gaiola

MIRB – Máquina de indução a rotor bobinado

MIDA – Máquina de indução duplamente alimentada

MSIP – Máquina síncrona a ímãs permanentes

PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*

FEM – Força eletromotriz

SVPWM - *Space Vector Pulse Width Modulation*

Sumário

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1. DESENVOLVIMENTO DOS AEROGERADORES E CRESCIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO | 17 |
| 1.2. CRESCIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL..... | 18 |
| 1.3. ESTUDO DE CASO | 20 |
| 1.4. OBJETIVO DO TRABALHO..... | 20 |
| 1.5. METODOLOGIA..... | 20 |
| 1.6. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO | 21 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDAS DO VENTO | 22 |
| 2.2. CONTROLE DE POTÊNCIA NO AEROGERADOR..... | 24 |
| 2.3. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA | 27 |
| 2.3.1. Gerador de indução com rotor gaiola diretamente conectado à rede..... | 28 |
| 2.3.2. Gerador de indução com rotor bobinado diretamente conectado à rede..... | 28 |
| 2.3.3. Gerador de indução duplamente alimentado..... | 29 |
| 2.3.4. Gerador síncrono a ímãs permanentes | 29 |
| 2.4. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA | 30 |
| 2.5. CONEXÃO À REDE ELÉTRICA | 31 |
| 2.6. FALHAS EM AEROGERADORES..... | 31 |
| CAPÍTULO 3 – O PARQUE EÓLICO..... | 34 |
| 3.1.1. Gerador..... | 36 |
| 3.1.2. Turbina | 39 |
| 3.1.3. Sistemas de Controle | 41 |
| 3.1.4. Conversor de Frequência | 43 |
| 3.1.5. Torre | 45 |

| | | |
|--------|---|-----------|
| 3.1.6. | Conexão com a rede elétrica | 46 |
| 3.2. | CURVAS CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR | 48 |
| | CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO | 50 |
| 4.1. | HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS..... | 50 |
| 4.1.1. | Queima dos Geradores | 50 |
| 4.1.2. | Corrosão dos ímãs do rotor | 52 |
| 4.1.3. | Acúmulo de poeira em várias partes internas do aerogerador | 53 |
| 4.1.4. | Oxidação das partes metálicas do aerogerador | 53 |
| 4.2. | SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS | 55 |
| 4.2.1. | Busca de fornecedores | 55 |
| 4.2.2. | Escopo da reforma..... | 58 |
| 4.2.3. | Protótipo montado e em funcionamento..... | 61 |
| 4.3. | HISTÓRICO DE DISPONIBILIDADE | 62 |
| 4.4. | HISTÓRICO DE GERAÇÃO | 64 |
| 4.5. | ANÁLISE DE DESEMPENHO | 64 |
| 4.5.1. | Comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores do projeto original, ainda não reformados..... | 65 |
| 4.5.2. | Comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores reformados..... | 67 |
| 4.5.3. | Desempenho médio dos Aerogeradores | 68 |
| | CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES | 72 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 74 |
| | Anexo 1 – Escopo Detalhado da Reforma | 76 |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. DESENVOLVIMENTO DOS AEROGERADORES E CRESCIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

A origem de utilização da força motriz dos ventos ou energia eólica pelo homem não é muito clara. Os primeiros relatos históricos de utilização dessa energia, apontam que ela teve origem no Oriente. A data é incerta, mas, pode ter se originado a cerca de 3000 anos (Pinto, 2012). Outros autores relatam que existem registros históricos que remontam ao ano 200 A. C. na Pérsia (Dutra, 2008), quando o homem se utilizava dessa energia para moagem de grãos e para bombeamento de água, utilizando-se dos chamados cata-ventos de eixo vertical. A história conta que, a partir do século XII, os cata-ventos de eixo vertical deram lugar aos de eixo horizontal, os moinhos de vento do tipo “holandês”, que se espalharam pela Holanda, Inglaterra, França, entre outros países. Um fato interessante de utilização dessa tecnologia, é que durante os séculos XVII a XIX, na Holanda, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve amplamente relacionado com a drenagem de terras baixas cobertas pelas águas, de forma a expandir o território. A utilização de cata-ventos de múltiplas pás para bombeamento de água no meio rural é amplamente utilizada até os dias de hoje em todo o mundo.

Em relação à utilização da força do vento para produção de eletricidade, os registros indicam que as primeiras aplicações de aerogeradores se iniciaram no final do século XIX, em 1888 (Dutra, 2008). Porém, foi somente a pouco mais de 20 anos que o mundo assistiu o grande avanço desta tecnologia, para produção de energia elétrica. Impulsionada pela iminente necessidade de redução da emissão de gases de efeito estufa, para frear o aquecimento global, e também pela busca de redução da dependência de plantas nucleares, após acidentes como Chernobyl e Fukushima, muitos países investiram maciçamente em energias renováveis. Com isto, houve grandes avanços tecnológicos e grande redução nos preços destas fontes, que impulsionaram o enorme crescimento em todo o mundo, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 1. Neste ponto, é importante ressaltar também o enorme desenvolvimento da eletrônica de potência, que permitiu o desenvolvimento dos conversores eletrônicos de potência, que rompeu barreiras de controle de frequência e de conexão de sistemas eólicos com a rede elétrica.

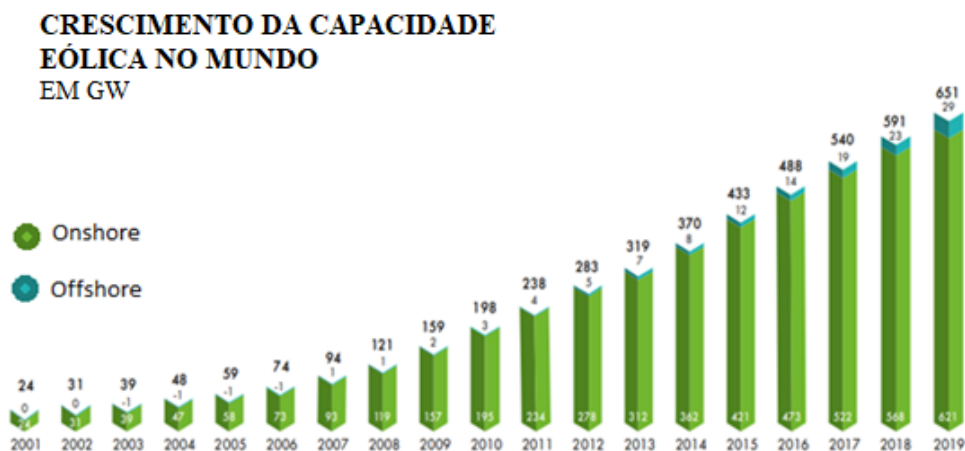


Figura 1 - Evolução da Capacidade Eólica no Mundo – GW (Fonte: GWEC- GLOBAL WIND REPORT 2019)

Como pode-se observar nas Figuras 2 e 3, os países que mais se destacam atualmente na produção de energia eólica no mundo *onshore* são China, EUA e Alemanha, e offshore são Reino Unido, Alemanha e China.

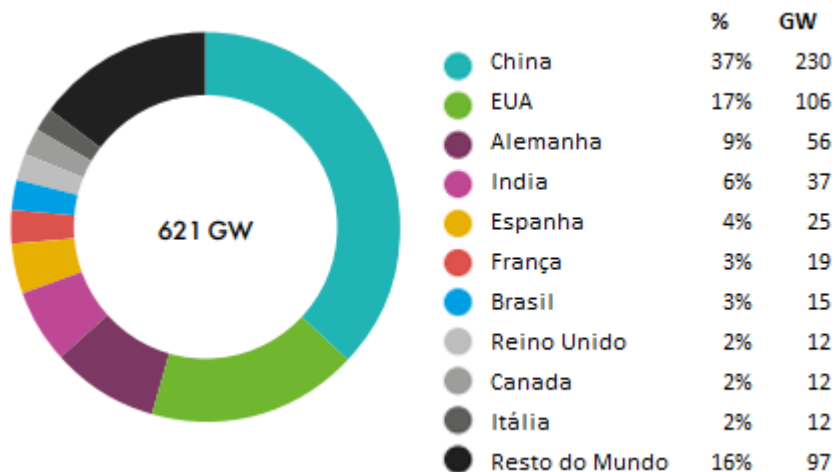


Figura 2 - Maiores Produtores de Energia Eólica "Onshore" no Mundo (Fonte: GWEC – GLOBAL WIND REPORT 2019)

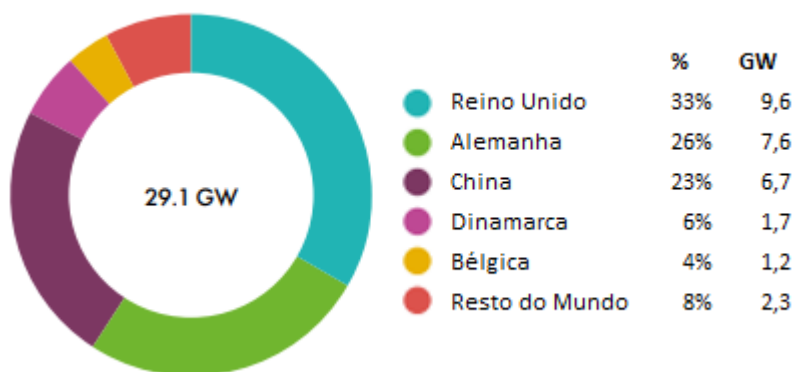


Figura 3 - Maiores Produtores de Energia Eólica "Offshore" no Mundo (Fonte: GWEC – GLOBAL WIND REPORT 2019)

1.2. CRESCIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A história da energia eólica no Brasil começa em 1992, em Fernando de Noronha, quando foi instalada a primeira turbina eólica, com capacidade de 0,075 MW. Dois anos depois, a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) instalou a primeira central eólica conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), na cidade de Gouveia - MG, com capacidade de 1 MW (Aneel) (Amarante, et al., 2010). Oito anos mais tarde, em 2002, o governo lança o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), para incentivar a expansão de outras fontes renováveis de energia elétrica, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Criado pelo governo federal através da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e revisado pela Lei no

10.762, de 11 de novembro de 2003, o PROINFA teve um papel fundamental no desenvolvimento da fonte eólica, internalizando a tecnologia e desenvolvendo a indústria local, sendo responsável pela contratação de 1.304 MW de Eólicas (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2018). Desde a implantação do programa, a capacidade instalada de energia eólica no Brasil aumentou de 22 MW em 2003 para 602 MW em 2009, atingindo 15.400 MW em 2019 (Figura 4) e 8,4% da matriz elétrica brasileira (Figura 5).

CRESCIMENTO DA CAPACIDADE EÓLICA NO BRASIL EM MW

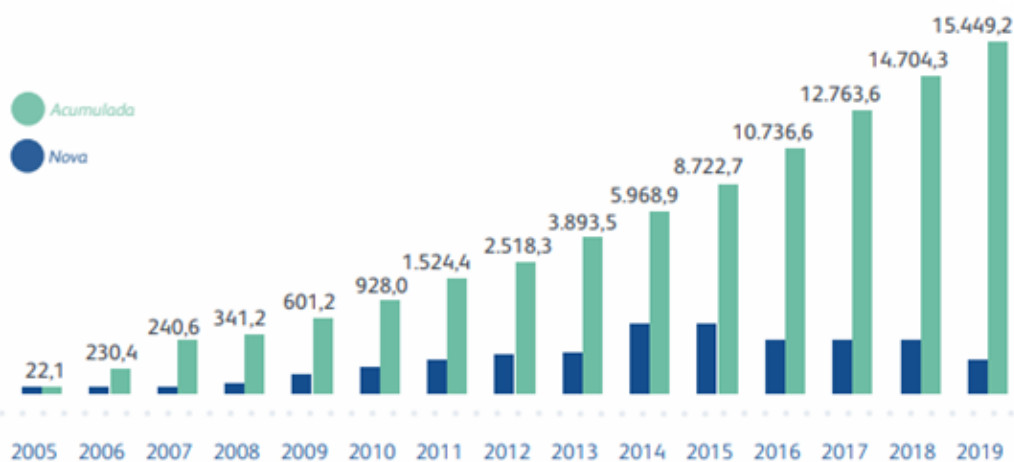
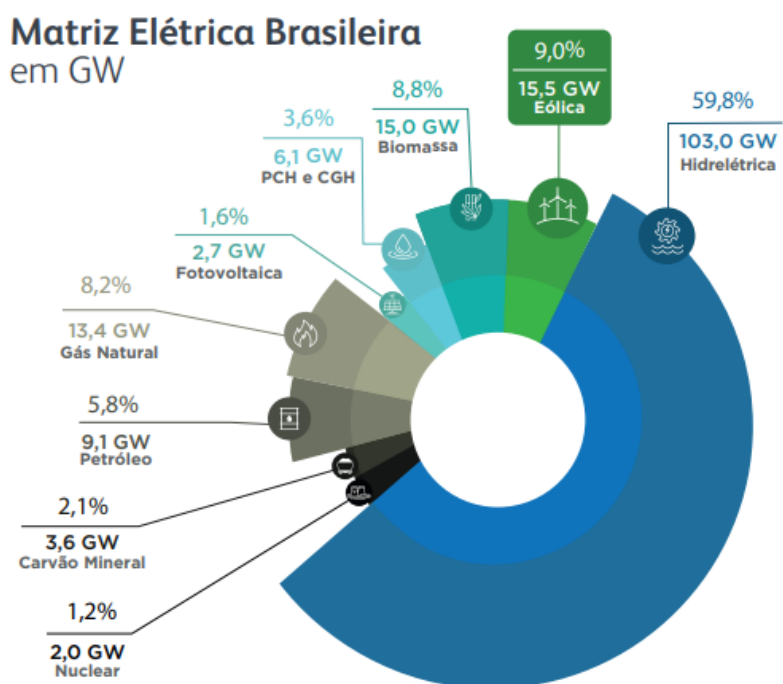


Figura 4 - Evolução da Capacidade Instalada Eólica no Brasil (Fonte: Abeeólica – InfoVento 15)



Fonte: ANEEL/Abeeólica

Figura 5 - Matriz de Energia Elétrica Nacional (Fonte: Abeeólica - InfoVento 15 - março/2020)

1.3. ESTUDO DE CASO

Após uma década desde o início de operação, a Central Eólica objeto do presente estudo, composta por 28 aerogeradores de 1,5 MW cada, passou por vários problemas como queima de aerogeradores, corrosão das torres, vandalismo, dentre outros.

O presente estudo busca recapitular quais foram os problemas vividos, as soluções implementadas, e como está o desempenho hoje do parque em operação. Esse será o objeto de estudo do presente trabalho.

Nota: A fim de resguardar os nomes das empresas relacionadas ao parque eólico, os nomes no decorrer do trabalho foram todos suprimidos.

1.4. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse trabalho é fazer um retrospecto da Central Eólica em estudo, desde a sua entrada em operação até os dias de hoje. Os seguintes aspectos serão abordados:

- aspectos da construção;
- histórico de disponibilidade;
- falhas ocorridas;
- soluções implementadas;
- performance;

Cada um desses pontos serão apresentados e discutidos ao longo da presente monografia.

1.5. METODOLOGIA

O presente trabalho de conclusão de curso utilizará a metodologia de pesquisa exploratória, onde se pretende avaliar os aspectos relacionados anteriormente na Seção 1.4.

As principais fontes de pesquisa para o presente estudo são os dados construtivos do parque, os relatos históricos de operação e manutenção e uma pesquisa bibliográfica para embasamento do estudo.

Também serão utilizados dados do sistema de supervisão do parque, de forma a buscar avaliar o desempenho dos aerogeradores, comparando os resultados com as curvas características de projeto.

1.6. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O CAPÍTULO 1 apresentou de forma sucinta o desenvolvimento da energia eólica no Brasil e no Mundo, a contextualização do objetivo do trabalho e a metodologia utilizada.

No CAPÍTULO 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, contextualizando a energia e potência extraída do vento, como é efetuado o controle de potência no aerogerador e um resumo das principais topologias de SCEE – Sistema de Conversão de Energia Eólica utilizadas no mundo. O básico de funcionamento dos conversores de frequência, aspectos de conexão à rede elétrica e falhas em aerogeradores.

No CAPÍTULO 3 é realizada uma descrição detalhada das características do parque em estudo, gerador, turbina, sistemas de controle, conversor de frequência, conexão com a rede elétrica e curvas características.

No CAPÍTULO 4 é apresentado o estudo referente aos dez anos de história do parque, histórico de ocorrências, soluções implementadas, histórico de disponibilidade e geração, bem como, uma análise de desempenho dos aerogeradores.

No CAPÍTULO 5 são apontadas as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e também uma proposta de continuidade do estudo.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão descritos os principais aspectos dos Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE), apresentando-se uma revisão bibliográfica sobre o tema.

2.1. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDAS DO VENTO

O aquecimento desigual da superfície do planeta pela radiação solar provoca o deslocamento das massas de ar, dando origem aos ventos.

Como nos explica Silva (2013), a energia cinética de um volume de vento se deslocando a uma dada velocidade, pode ser expressa em Joules/m³ por:

$$Ec = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (2.1)$$

Onde ρ é a massa específica de ar ($\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$) e V é a velocidade do vento.

A potência eólica disponível é calculada pela taxa de variação da energia eólica, expressa em Watts pela equação:

$$Pe = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (2.2)$$

Onde A é a área varrida pelo rotor eólico.

Interessante observar na Figura 6 que a potência eólica varia com o cubo da velocidade do vento, ou seja, se o vento duplica de velocidade, a potência eólica aumenta oito vezes.

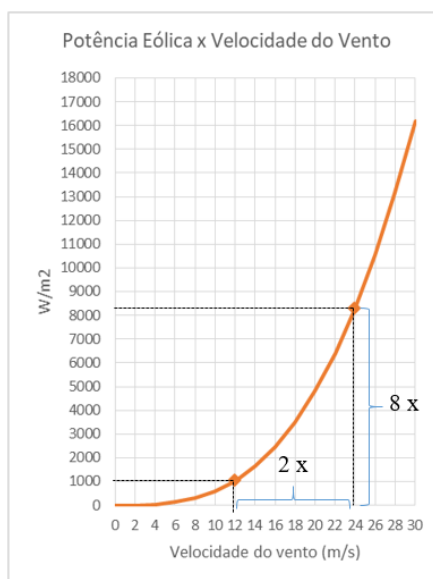


Figura 6 - Relação Potência eólica x velocidade do vento (Próprio autor)

Em uma turbina eólica, a potência de saída depende da velocidade do vento e da velocidade rotacional, conforme explica Silva (2013). A relação entre a velocidade do vento e a velocidade rotacional da turbina é um parâmetro adimensional e é definida pela equação 2.3.

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V} \quad (2.3)$$

Onde V é a velocidade do vento em m/s

ω é a velocidade angular do rotor em rad/s

R é o raio do rotor eólico em metros, medido na ponta da pá

Outra equação muito importante, que descreve as relações entre as grandezas físicas envolvidas no funcionamento de uma turbina eólica, também conhecida como rendimento aerodinâmico de uma turbina eólica, é o Coeficiente de Potência C_p , parâmetro adimensional, expresso em função da relação de velocidades λ e do ângulo de passo das pás β , conforme pode ser visto na Figura 7.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} * \rho * A * V^3} \quad (2.4)$$

Onde P é a potência mecânica na saída da turbina no instante t

ρ é a massa específica de ar ($\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$)

V é a velocidade do vento em m/s

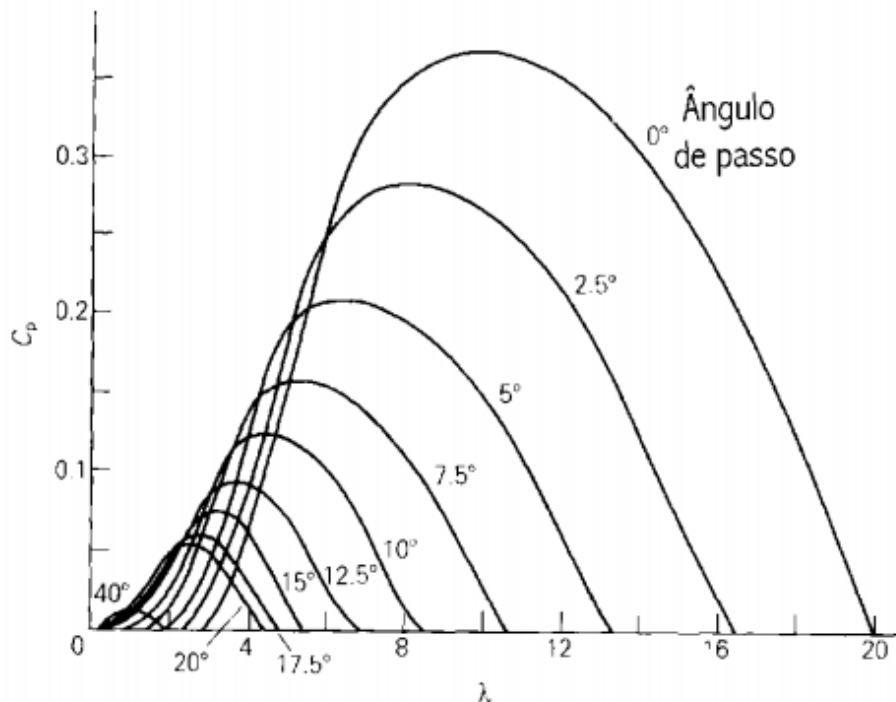


Figura 7 - Coeficiente de potência em função da relação de velocidades (λ) e ângulo de passo (β) (Silva, 2013)

O torque gerado pela turbina ou o Coeficiente de Conjugado C_T pode ser expresso pela seguinte equação:

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T}{\frac{1}{2} * \rho * A * R * V^2} \quad (2.5)$$

Onde T em N.m é o conjugado desenvolvido pela turbina eólica.

Conforme pode-se observar na Figura 8, a potência do gerador eólico é nula em dois momentos ($C_p = 0$): quando o rotor está estacionário e quando a velocidade na ponta da pá é várias vezes maior que a velocidade do vento. O ponto de máxima potência ($C_p \text{ max}$) é obtido num valor intermediário da relação de velocidades ($\lambda_o =$ relação ótima de velocidades). Da mesma maneira, existe um ponto de máximo conjugado, que ocorre no ponto $\lambda_{T\text{max}}$.

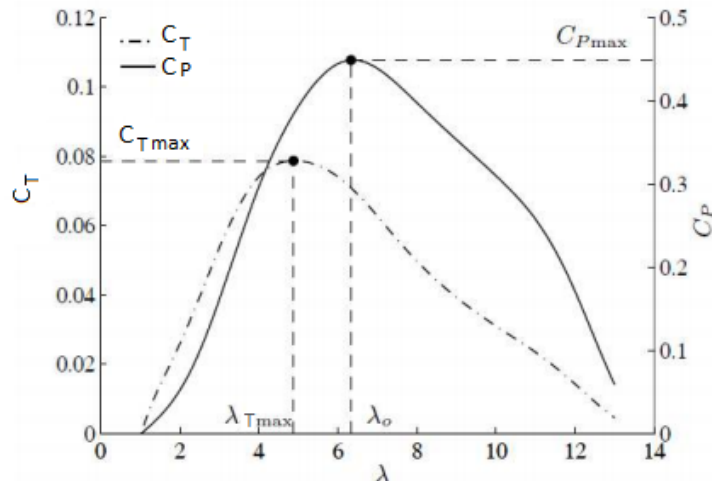


Figura 8 - Características C_p e C_T da turbina Eólica (Adaptado de (Silva, 2013))

Multiplicando-se o Coeficiente de Potência (C_p) pela equação 2.2, chega-se ao seguinte conceito, bastante intuitivo: a potência que pode ser extraída de um dado volume de vento depende não só da quantidade de energia cinética disponível, mas também das características do conversor eólico. Esta relação pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * V^3 \quad (2.6)$$

2.2. CONTROLE DE POTÊNCIA NO AEROGERADOR

Do que já foi visto até aqui, verifica-se que existe um ponto de operação da turbina eólica onde se é extraída a máxima potência. Esse ponto é o $C_{p\text{max}}$. Portanto, operar a turbina eólica no ponto de $C_{p\text{max}}$, significa maximizar a produção do aerogerador. Na Figura 9, pode-se observar que, para cada velocidade de vento, corresponde uma curva

de potência da turbina, e que, variando-se a rotação obtém-se maior ou menor potência, sendo possível, através da variação de velocidade, alcançar o ponto de C_{Pmax} .

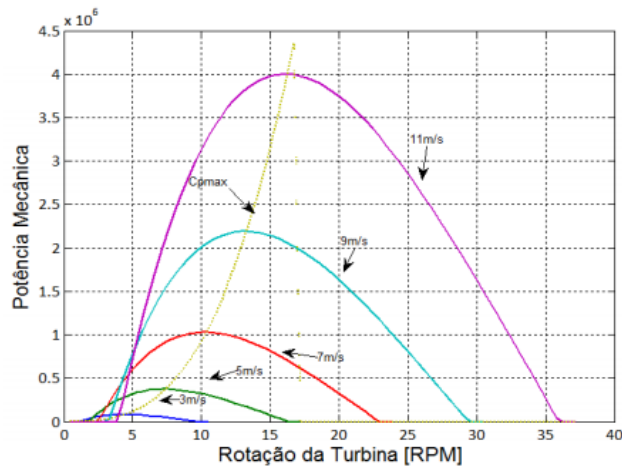


Figura 9 - Característica de potência de uma turbina eólica (Silva, 2013)

Conforme explica Pinto (2012), para controle do aerogerador, um completo sistema de hardware e software está constantemente em funcionamento. Sensores externos enviam informações ao sistema de controle que comanda os atuadores de passo, torque, freios e direção.

Na Figura 10 é possível observar o sentido de variação do ângulo de passo (β), e o sentido de rotação da turbina (ω_t).

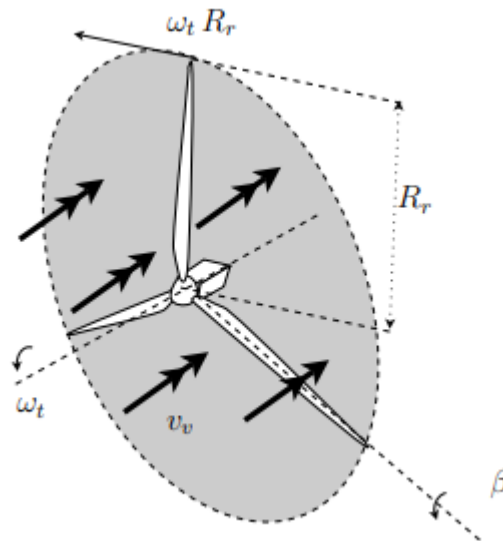


Figura 10 - Ilustração de uma turbina eólica e grandezas associadas (Dobbin, 2014)

A Figura 11 ilustra as faixas de atuação do sistema de controle de acordo com a velocidade do vento.

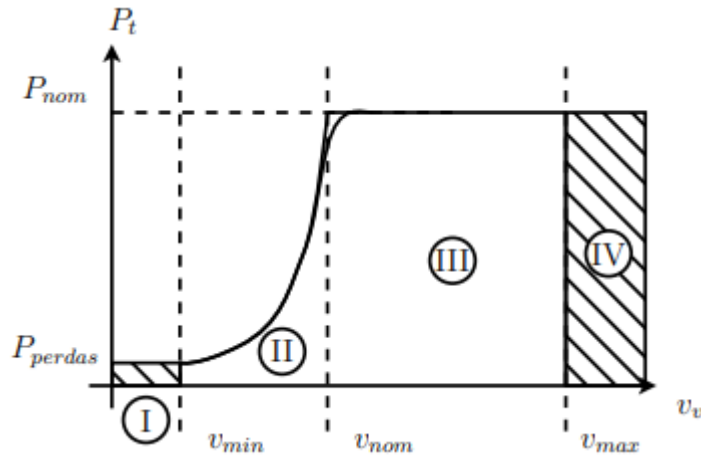


Figura 11 – Faixas de operação de uma aerogerador a velocidade variável (Dobbin, 2014)

Descrição das faixas de operação do aerogerador (Figura 11):

- Região I – Nesta região, a velocidade do vento é inferior ao vento de partida ou vento de Cut-in (v_{min}), e o aerogerador permanece estacionário.
- Região II – A partir do vento de cut-in até o vento nominal, o sistema de controle atua variando a velocidade do gerador de forma a sempre buscar a maximização da produção de energia, buscando sempre o ponto de máxima potência (C_{Pmax}), à medida da variação da velocidade do vento. Isto é feito pelo conversor eletrônico, atuando no torque elétrico do gerador. Nesta região o controle de passo está praticamente inativo, garantindo apenas que as pás do rotor estejam posicionadas de modo a se obter a máxima eficiência aerodinâmica.
- Região III – A partir do vento nominal (v_{nom}) até o vento de corte ou vento de Cut-out, o sistema de Pitch atua de forma a limitar a potência extraída do vento, de forma a manter a potência de saída do aerogerador igual à potência nominal, pois, como explicado no item 2.1, a potência eólica varia com o cubo da velocidade do vento.
- Região IV – A partir do vento de Cut-out, o controle de passo, juntamente com os freios mecânicos, atua de forma a parar o giro do rotor, colocando o ângulo de ataque das pás a 90° com a direção do vento (posição de bandeira), preservando assim a integridade do equipamento contra danos mecânicos nas pás.

2.3. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Uma vez extraída a energia cinética do vento pelas pás do aerogerador e transformada em potência mecânica no eixo do rotor, é preciso transformar essa energia mecânica em energia elétrica para a entregar a rede. Existem vários tipos de SCEE (Sistemas de Conversão de Energia Eólica), que podem variar conforme a tecnologia do gerador escolhido (indução ou síncrono), o tipo de conversor eletrônico de frequência (completo ou parcial), com caixa de transmissão ou acoplamento direto. No caso de geradores de indução, por exemplo, há a necessidade de caixas de transmissão, pois, este apresenta um reduzido número de polos, e como a rotação do rotor eólico é baixa, é preciso se multiplicar a rotação do rotor eólico para acoplamento com o gerador. Já no caso de geradores síncronos, isto não é normalmente necessário, pois, como podem ser construídos com elevado número de polos, podem ser acoplados diretamente ao eixo do rotor da turbina eólica. Na Figura 12 é apresentado um diagrama que mostra como as tecnologias são agrupadas de modo a formar as diferentes topologias de SCEE.

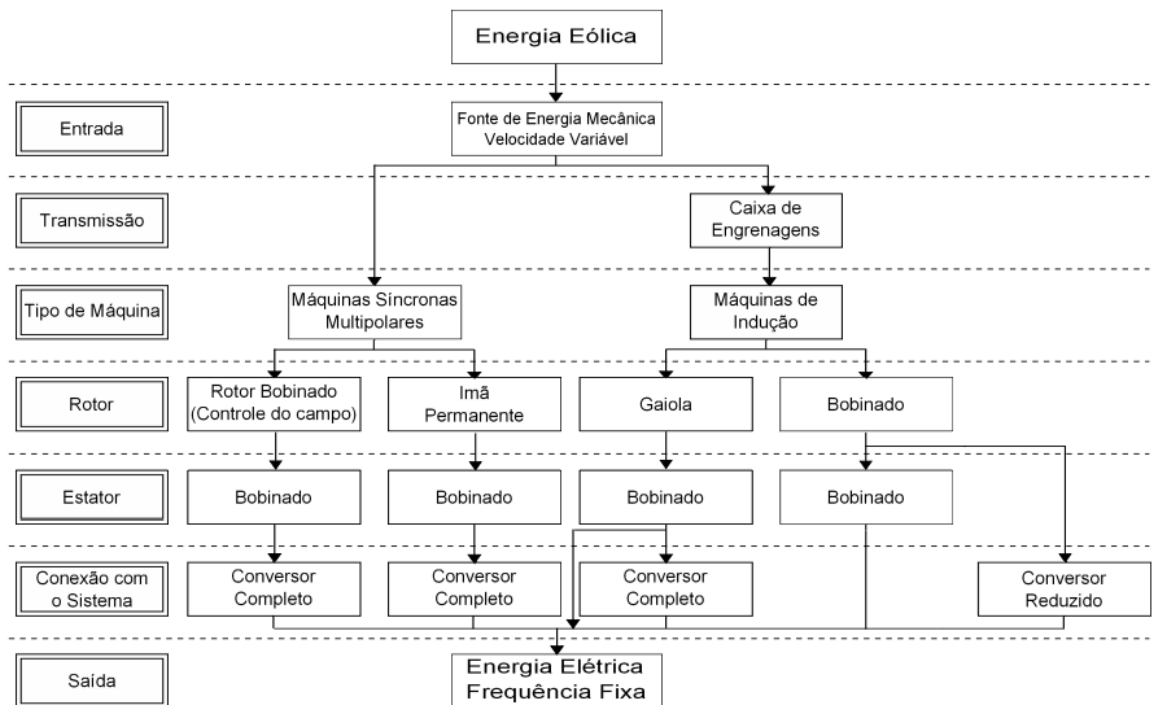


Figura 12 – Diagrama exemplificando o agrupamento das tecnologias para formação das topologias de SCEE (Dobbin, 2014)

Os itens a seguir mostram as principais topologias de SCEE utilizadas no mundo.

2.3.1. Gerador de indução com rotor gaiola diretamente conectado à rede

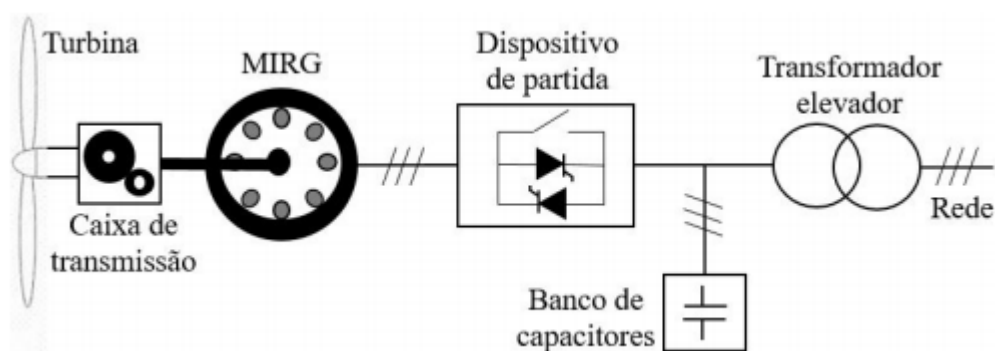


Figura 13 - Máquina de Indução com rotor gaiola diretamente conectada à rede (Junior, 2018)

Esse SCEE opera com velocidade constante, determinada pela frequência da rede. Conforme ilustrado na Figura 13, a baixa rotação do aerogerador é multiplicada por uma caixa de transmissão para acoplamento com o gerador elétrico, que por sua vez, é conectado diretamente à rede elétrica. Sua principal vantagem é a simplicidade e baixo custo. Porém, a extração de máxima potência ocorre em uma faixa estreita de velocidade de vento, e atualmente não é viável para altas potências, sendo mais utilizado em sistemas de pequeno porte.

2.3.2. Gerador de indução com rotor bobinado diretamente conectado à rede

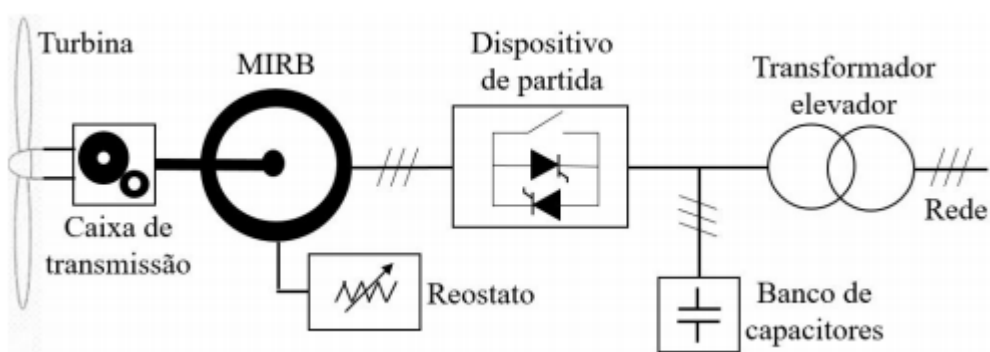


Figura 14 - Gerador de indução com rotor bobinado diretamente conectado à rede (Junior, 2018)

Uma melhoria em relação à topologia apresentada no item anterior, é que esse SCEE utiliza uma máquina de indução a rotor bobinado (Figura 14), que permite acrescentar um reostato no circuito de campo do rotor, permitindo variar levemente o ponto de operação nominal da máquina (Junior, 2018), variando parcialmente a velocidade e melhorando o rendimento do aerogerador em relação à topologia com velocidade constante. Também está restrito a pequenas potências.

2.3.3. Gerador de indução duplamente alimentado

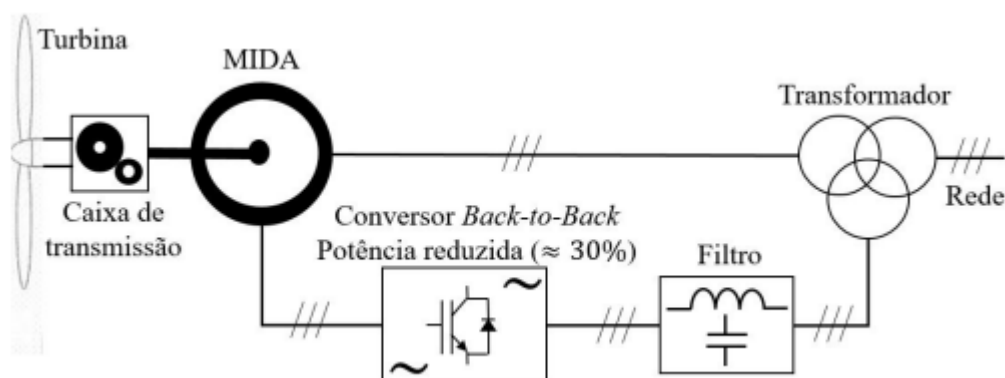


Figura 15 - Gerador de indução duplamente alimentado (Junior, 2018)

Esse SCEE é a tecnologia mais utilizada no mundo (Figura 15). Opera a velocidade variável, permitindo a operação no ponto de máxima potência. Como nos explica Mendes(2009), sua principal vantagem é que os conversores são projetados apenas para uma fração da potência do gerador (cerca de 30%), diminuindo o custo, o peso, o volume e as perdas elétricas. Sua desvantagem é que também utiliza caixa de transmissão, que apresenta maior necessidade de manutenção. Outra desvantagem é que, como o estator está conectado diretamente à rede, o gerador está mais susceptível a distúrbios provenientes de rede. A conexão do rotor à rede ocorre através de dois conversores de potência ligados por um elo de corrente contínua.

2.3.4. Gerador síncrono a ímãs permanentes

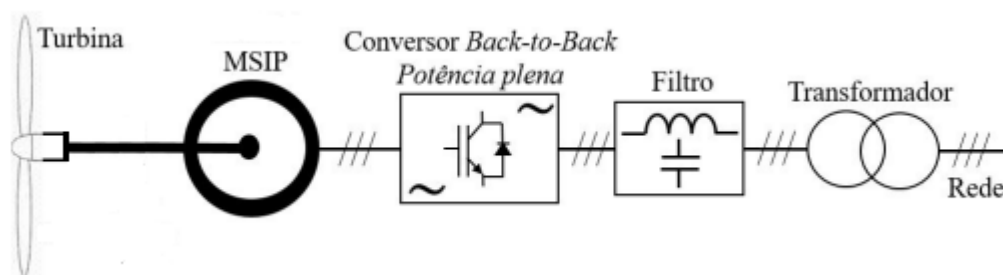


Figura 16 - Gerador síncrono a ímãs permanentes (adaptado de Junior (2018))

Também de velocidade variável, devido às vantagens descritas a seguir, esse SCEE tem se tornado a tecnologia que mais cresce no mundo, principalmente com os parques offshore. Segundo Junior(2018), a principal vantagem dessa tecnologia (Figura 16) é a não utilização de caixa multiplicadora, pois, como o gerador síncrono possui elevado número de polos, este pode-se conectar diretamente ao eixo do rotor da turbina eólica, sem a utilização de caixa de transmissão, que é um

ponto bastante crítico para manutenção. Outra grande vantagem é a utilização do rotor com ímãs permanentes, não necessitando de excitação do rotor e consequentemente, de anéis coletores. Por não apresentar anéis coletores e nem caixa de transmissão, esse conceito de SCEE apresenta menor custo de manutenção. Em contrapartida, o conversor eletrônico de frequência deve suportar toda a potência do aerogerador, pois, toda a potência ativa e reativa passa por ele, apresentando maior custo e maior nível de perdas elétricas.

2.4. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

No estudo de caso do presente trabalho, a tecnologia de aerogeradores empregada é a de gerador síncrono a ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* – PMSG). A Figura 17 apresenta um diagrama básico dessa tecnologia.

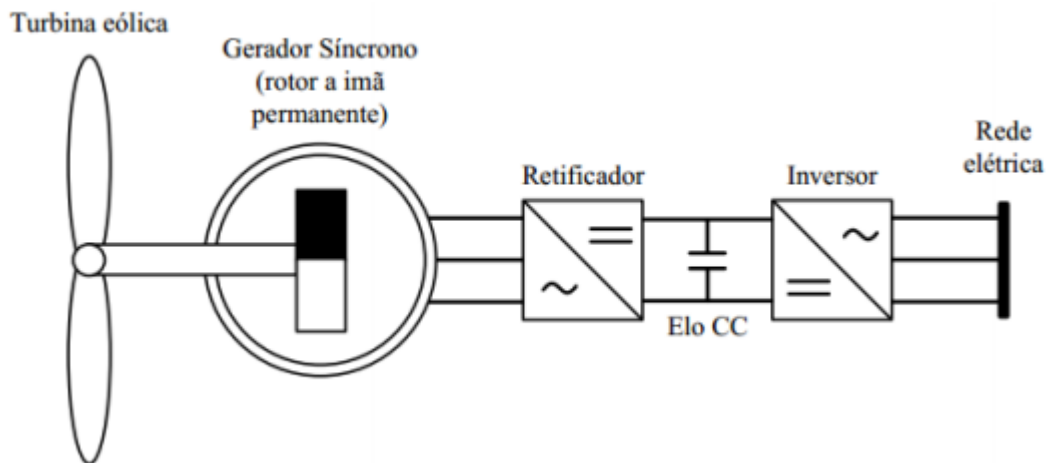


Figura 17 - Diagrama básico de aerogerador a ímã permanente (Oliveira, 2018)

A energia elétrica gerada pelo gerador possui frequência variável. Para estar em condição de ser transmitida à rede elétrica, precisa passar por um conversor eletrônico de frequência, de modo a assumir parâmetros elétricos compatíveis com a rede elétrica, isto é, tensão e frequência.

Existem várias tecnologias de conversores de frequência, mas, basicamente, eles possuem dois estágios: um primeiro estágio em que a corrente alternada produzida pelo gerador, operando à frequência variável, é retificada e transformada em corrente contínua. É um segundo estágio, onde a corrente contínua do barramento CC passa por um inversor de frequência, que irá transformá-la em corrente alternada novamente, porém, com tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica. Após esse estágio, a energia é entregue ao transformador elevador, que irá elevar a tensão, de modo a poder transmitir a energia gerada pelo aerogerador até a subestação coletora do parque eólico. Um diagrama simplificado do conversor de frequência é apresentado na Figura 18. Esta configuração é basicamente a mesma utilizada no parque em estudo. Conforme se pode observar, tem-se um retificador a diodos na saída do gerador e um conversor *chopper* elevador para conexão no barramento CC. Do lado da rede tem-se um inversor a IGBTs.

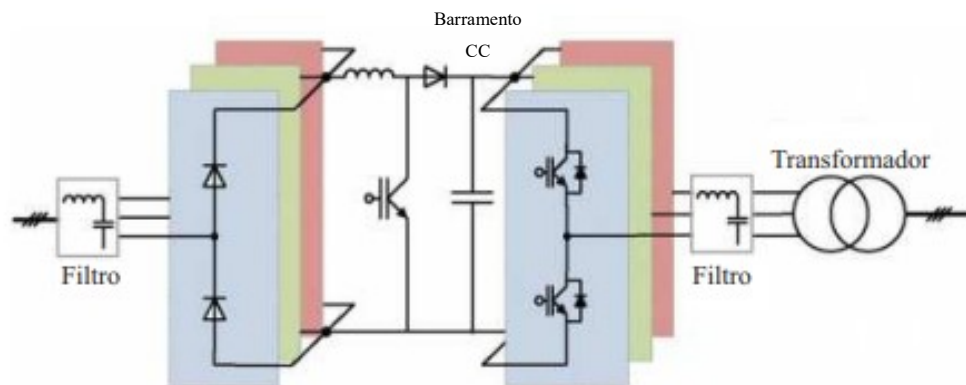


Figura 18 - Diagrama simplificado de um conversor de frequência (Junior, 2014)

2.5. CONEXÃO À REDE ELÉTRICA

A saída de cada transformador elevador de cada SCEE é levada então à subestação coletora do parque eólico, que por sua vez, irá elevar novamente a tensão de modo a transmitir a energia para o Sistema Elétrico de Potência. Na Figura 19 é apresentado um esquema representativo da interligação de um parque eólico.

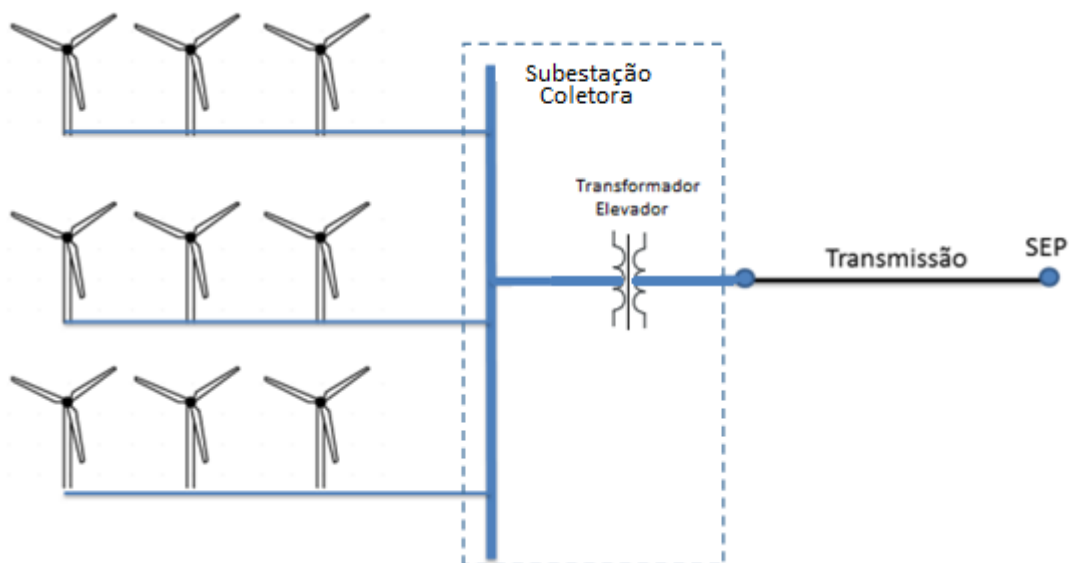


Figura 19 - Esquema representativo da interligação de um parque eólico (adaptado de (Silveira, 2015))

2.6. FALHAS EM AEROGERADORES

Como visto no capítulo 1, nas últimas duas décadas, a fonte eólica cresceu significativamente, passando a ocupar lugar de destaque nas matrizes de energia elétrica ao redor de todo o mundo. Conforme Zhu, et al.(2018), com o crescente número de turbinas eólicas, a indústria ainda precisa enfrentar inúmeros desafios. Vários componentes do aerogerador estão sujeitos a falhas, e é difícil e caro repará-los ou substituí-los. Por exemplo, rolamentos, inversores e caixas de engrenagens elevam os custos de manutenção.

A Figura 20 mostra as taxas de falha de sistemas e componentes de aerogeradores. Como se pode observar, alguns componentes têm taxas de falha mais altas do que outros, como gerador, caixa de transmissão e pás do rotor, e os mesmos componentes trabalhando *offshore* têm taxas de falha mais altas do que quando trabalhando *onshore*.

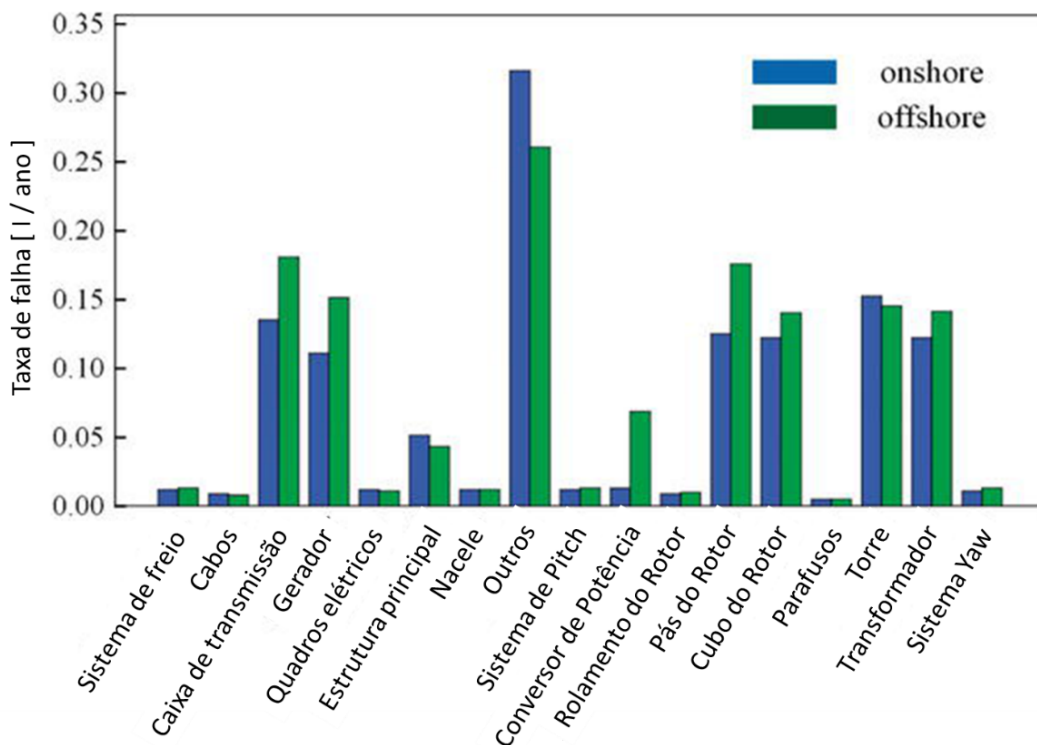


Figura 20 - Taxas de falha por componente de turbinas eólicas trabalhando Onshore e Offshore (Zhu, et al., 2018)

A taxa de falha (l) é calculada pelo nº de falhas dividido pelo número de horas de funcionamento do equipamento, num dado período de tempo. No gráfico da Figura 20, o período de tempo é igual a ano, ou seja, ele mostra o nº de falhas por horas de funcionamento por ano.

O acompanhamento da taxa de falha de cada componente permite avaliar se o equipamento está no período normal de vida útil ou em final de vida útil, por exemplo. Permite também calcular a confiabilidade do equipamento, ou seja, a probabilidade de o equipamento falhar num dado período de tempo.

Conforme será mostrado no capítulo 4, no caso da Central Eólica em estudo, o principal componente que apresentou falhas foi o gerador elétrico. Um estudo apresentado por Alewine, et al.(2012), quantificando os modos de falha de mais de 1200 geradores de turbinas eólicas, dos mais diversos fabricantes, reparados ou substituídos desde 2005, revelou que menos da metade das falhas foram de natureza elétrica, e dentre essas, a maioria foi devido a falhas mecânicas, como desprendimento das cunhas dos enrolamentos. Nesse estudo foram coletados os seguintes modos de falha:

- Danos no isolamento do rotor;
- Danos no isolamento do estator;
- Falhas de rolamento;
- Falhas no cabo do rotor;
- Curto-circuito em anéis coletores;
- Falhas de cunha magnética;
- Falhas do sistema de refrigeração;
- Outros danos mecânicos.

Os resultados para geradores na faixa de potência de 1 a 2 MW estão apresentados na Figura 21.

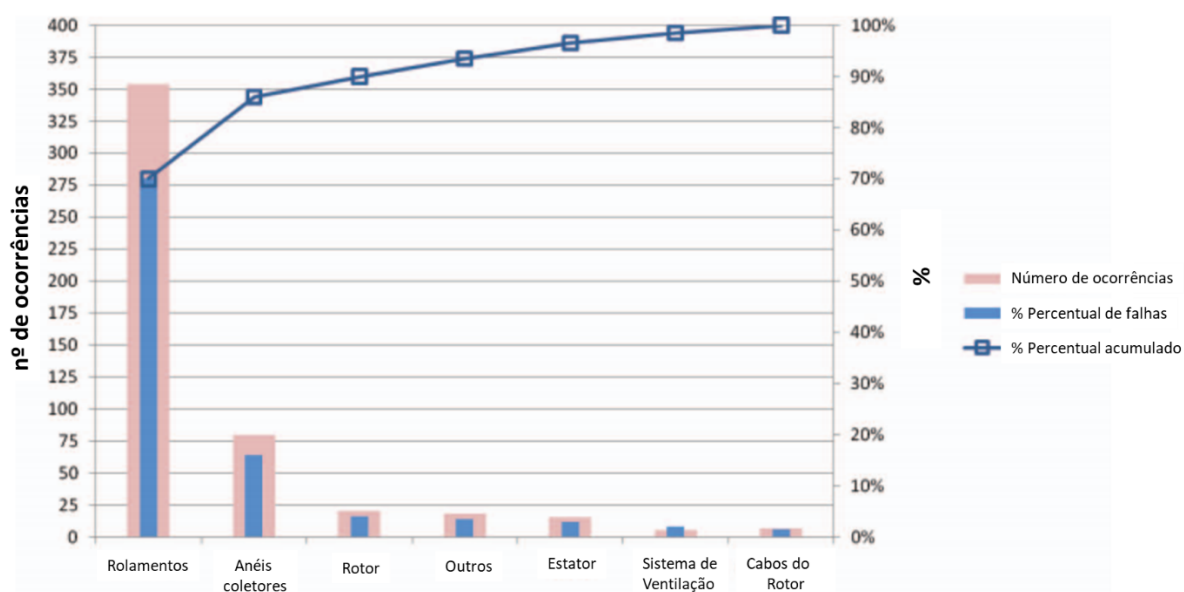


Figura 21 - Tipos de falha e ocorrências para geradores de 1 a 2 MW (Alewine, et al., 2012)

Um ponto interessante levantado pelos autores, e que é causa de várias das falhas verificadas, é relativo a contaminação dos componentes do aerogerador pelo ambiente. Normalmente, as turbinas eólicas estão instaladas em locais remotos e em condições ambientes bastante severas. Ambientes salinos, como aqueles *offshore* ou próximos à costa, estão sujeitos a umidade, poeira, areia, e a uma atmosfera bastante corrosiva, que podem penetrar na nacele, afetando vários componentes, e principalmente o gerador.

Essa atmosfera também irá afetar todos os componentes com conteúdo ferroso, como a estrutura do gerador, torre, enrolamentos e circuitos. Se não forem protegidos, esses processos de oxidação irão levar a problemas e inúmeras falhas.

Materiais, revestimentos protetores e processos de fabricação adequados devem ser selecionados durante o projeto dessas máquinas, de forma a reduzir ou mesmo eliminar a maioria dos problemas.

Claro que, verificações regulares, processos adequados de manutenção preventiva e preditiva também são chave para conservação dos componentes, prevenção de falhas e manutenção do desempenho do parque eólico.

CAPÍTULO 3 – O PARQUE EÓLICO

3.1. DESCRIÇÃO DO PARQUE E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

A Central Geradora Eólica do presente estudo iniciou sua operação comercial em 2010. Está localizada no Estado do Ceará e é composta por 28 aerogeradores, com potência unitária de 1,5 MW e altura do eixo do rotor de 85 m.

Desenvolvido por empresa alemã com mais de 20 anos de experiência, e com equipamentos instalados em várias partes do mundo, o gerador eólico do parque em estudo, Figura 22 e Figura 23, é um conversor de energia que não faz uso de caixa multiplicadora. Está equipado com um rotor de três pás, controle de pitch, e potência nominal de saída de 1500 kW (Máxima 1580 KW).



Figura 22 - Foto do Aerogerador do parque em estudo (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

O gerador elétrico é do tipo síncrono, com ímãs permanentes, gera energia elétrica com frequência variável, a uma velocidade de rotação compreendida entre 9 rpm e 19 rpm, e pode trabalhar com velocidades de vento na faixa de 3 m/s a 25 m/s. Um conversor de frequência adequa a potência elétrica produzida pelo gerador, à frequência variável, à frequência da rede.

O equipamento possui dois sistemas de freio independentes. O primeiro é o freio aerodinâmico, que varia o ângulo de ataque de cada pá (controle de Pitch), e o segundo é o freio mecânico, que é utilizado para fazer a manutenção da máquina.

A máquina possui um sistema de energia de emergência composto por um conjunto de ultra-capacitores. Este sistema é utilizado quando ocorre problemas na rede elétrica, fornecendo a energia necessária para os motores do sistema de pitch moverem as pás para a posição de bandeira (90° com a direção do vento), parando o gerador eólico.

Sensores situados no alto da nacelle, medem a direção e velocidade do vento e transmitem a informação para o sistema de controle, que atua no sistema de Yaw, posicionando a nacelle de frente à direção do vento. Quando o vento percorre o perfil das pás é gerada uma diferença de pressão entre os lados de cada pá, originando uma força que se distribui ao longo das suas superfícies. Esta força é a responsável pelo movimento de rotação do gerador eólico.

A rotação do eixo da máquina faz com que o campo magnético criado pelos polos magnéticos gere uma força eletromotriz (FEM) no estator. Esta, por sua vez, gera uma corrente elétrica que é direcionada ao conversor eletrônico, que a adequa às características da rede elétrica, para então, ser direcionada ao transformador elevador, e depois, à subestação coletora do parque.

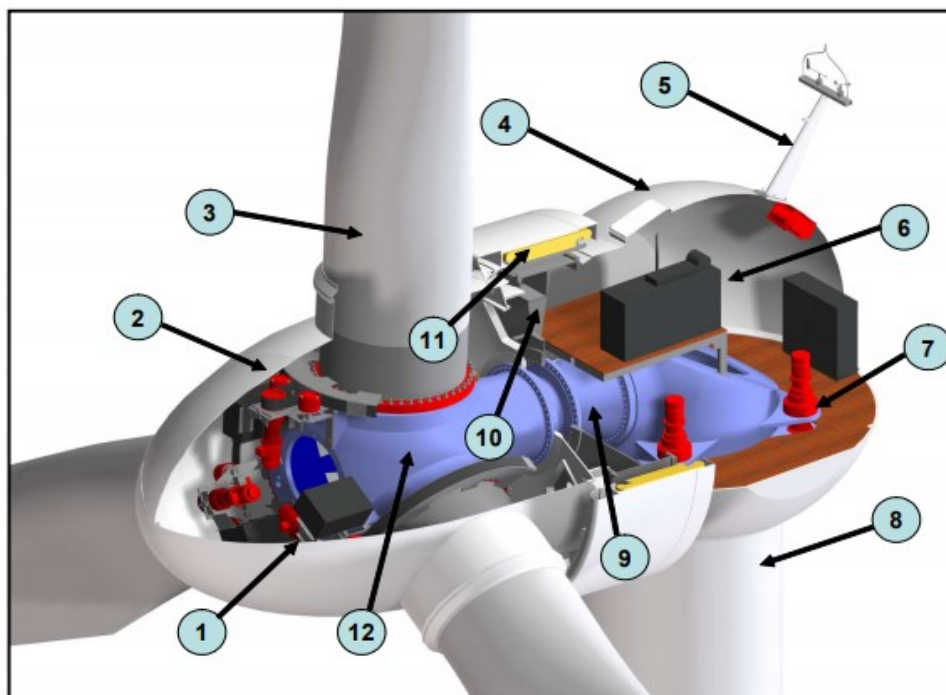


Figura 23 - Nacelle e seus principais componentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. Ultra Capacitores e Controles. | 7. Sistema Yaw. |
| 2. Sistema motor dos controles de Pitch. | 8. Torre. |
| 3. Pá. | 9. Estrutura principal/Eixo fixo. |
| 4. Carenagem da Nacelle. | 10. Rotor. |
| 5. Instrumentos de medição. | 11. Estator. |
| 6. Painel de Controle. | 12. Hub. |

3.1.1. Gerador

O gerador utilizado é do tipo síncrono multipolo diretamente acoplado, com excitação fornecida através de ímãs permanentes. Detalhes do gerador podem ser vistos na Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

Estator (interno)



Rotor (externo) – Ímãs Permanentes

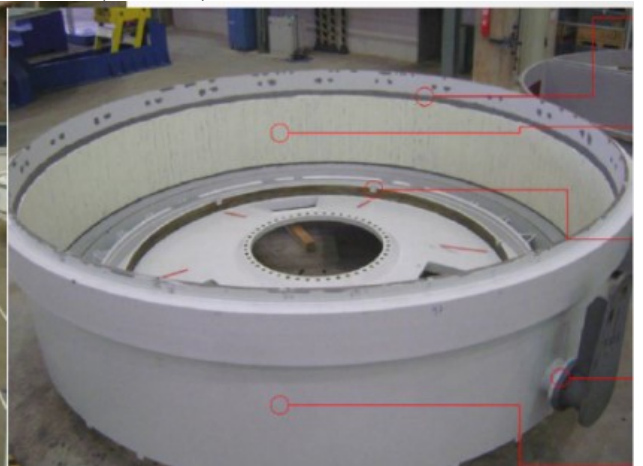


Figura 24 - Partes principais do Gerador (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

Como o gerador está diretamente acoplado ao rotor, não é necessário o uso de caixa multiplicadora, diminuindo assim, a necessidade de manutenção e o tempo de parada da máquina. Para permitir esse acoplamento direto entre o rotor do aerogerador, que gira a baixa velocidade (rotação nominal = 17,3 rpm) e o gerador, é necessário que este apresente um elevado número de polos (88 polos). A frequência nominal na saída do gerador é de 12,7 Hz.

$$f = \frac{120 \cdot Ns}{p} \quad (2.7)$$

Onde: f é a frequência de saída do gerador

Ns é a rotação do rotor

p é o número de polos

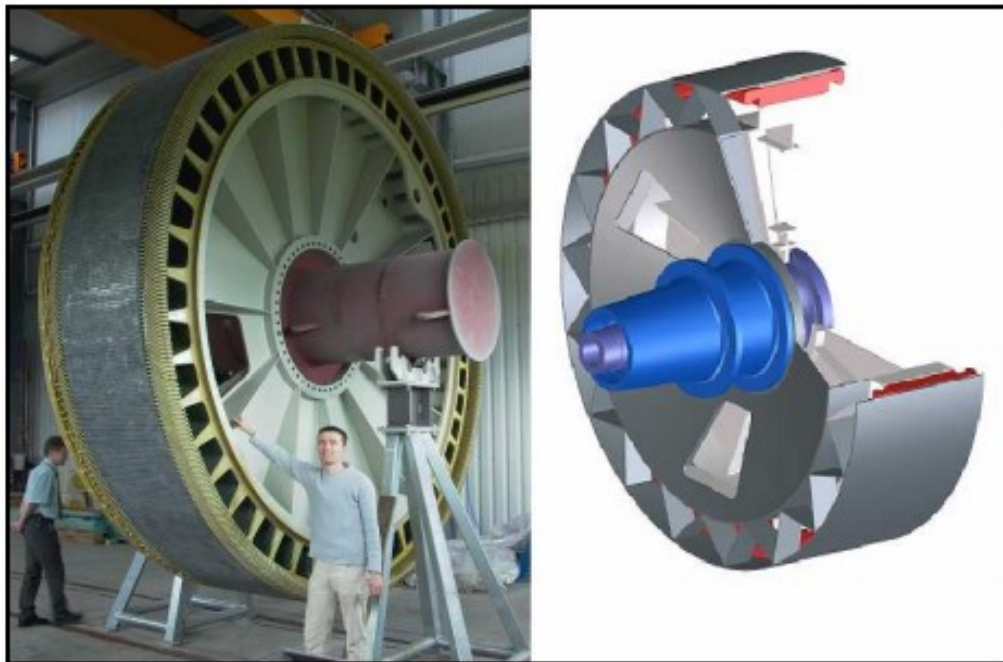


Figura 25 - Gerador síncrono a ímãs permanentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

FICHA TÉCNICA DO GERADOR:

- Polos: Ímãs permanentes de alta permeabilidade magnética
- Isolação: Classe F
- Estrutura: Conformada de aço soldado, fabricada em chapa de qualidade S355 J2G3 segundo DIN EN 10025
- Núcleo: Chapa magnética (mais de 25.000 peças)
- Dimensões: menor diâmetro 5 m; menor comprimento 1,5 m, peso completo aproximado: 40.000 kg

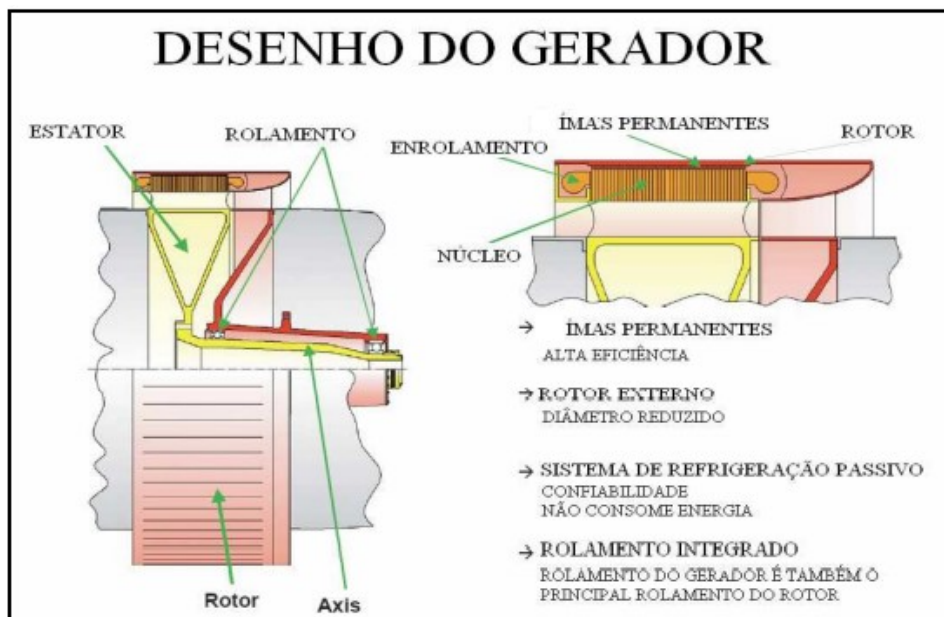


Figura 26 - Corte transversal do gerador e principais componentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.1.1. Estator

O Estator possui três fases e está conectado em estrela. As espiras (Figura 27) são isoladas e inseridas no núcleo, e este é impregnado com resina classe F. O material isolante é selecionado de modo a resistir à tensão de operação e aos pulsos de tensão que a máquina apresenta durante a operação, devido ao conversor de frequência do tipo IGBT.



Figura 27 - Bobinas pré-moldadas (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.1.2. Polos

A excitação do gerador é produzida por ímãs permanentes de alta qualidade (Figura 28), fabricados com material neodímio-ferro-boro, acoplados diretamente ao rotor, protegidos do ambiente externo e com uma permanente proteção contra corrosão.

O uso de ímãs permanentes faz com que não haja a necessidade de produzir corrente direta para excitação do gerador, prescindindo do uso de anéis coletores e escovas, diminuindo a necessidade de paradas para manutenção.

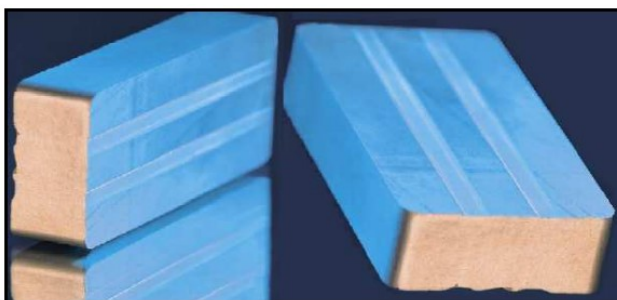


Figura 28 - Ímãs Permanentes (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.1.3. Sistema de refrigeração

O gerador eólico do parque em estudo possui um sistema passivo de refrigeração (Figura 29). Através de dutos especialmente desenhados, o fluxo de ar fresco que chega no rotor é direcionado para as partes mais quentes do gerador, não sendo necessários ventiladores ou unidades de controle adicionais.

Outro destaque importante do projeto desse aerogerador é que, o enrolamento do gerador está protegido das substâncias nocivas contidas no ar, o que é de extrema importância em geradores instalados em áreas litorâneas e com alto nível de corrosão.

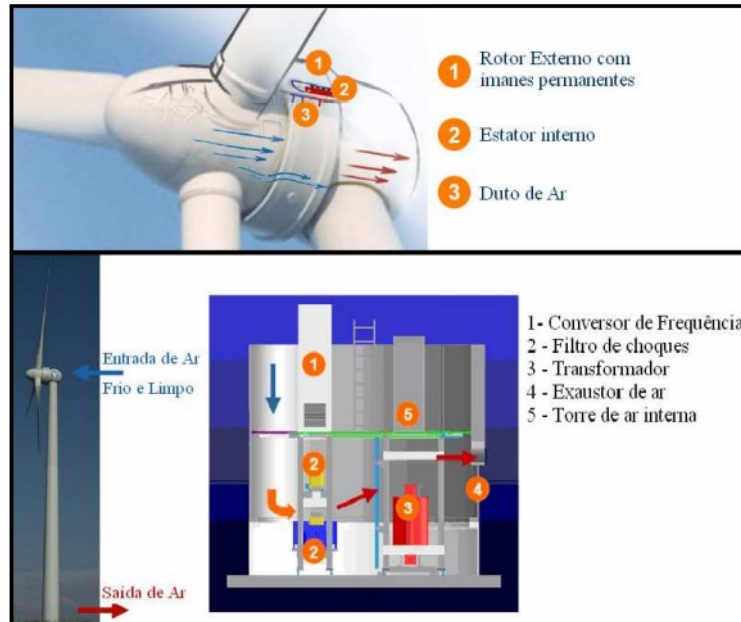


Figura 29 - Modelo esquemático do sistema de refrigeração (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.2. Turbina

O rotor (turbina) do aerogerador do parque em estudo, classe IEC IIa, tem um diâmetro de 70 metros e uma área de varredura de 3850 m², possui três pás, ligadas ao cubo do rotor por rolamentos que permitem o ajuste do ângulo de ataque da pá (controle de pitch). Suas dimensões e peso podem ser vistas na Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

Conforme explica Lemos(2012), a norma IEC 61400-1:2005 define os requisitos de projeto para aerogeradores de grande porte, de modo a garantir a segurança do aerogerador e dos principais sistemas que o compõe.

Os principais esforços aos quais um aerogerador é submetido são fortemente dependentes da intensidade e turbulência do vento onde ele será instalado. Desta forma, são definidas três condições padrões, a serem adotadas, para três classes de projeto, onde a primeira classe é associada a velocidade de referência do vento (definida como a velocidade máxima medida em 10 minutos, com período de recorrência de 50 anos). Cada classe ainda pode ser associada a três categorias de turbulência diferentes, A, B e C, definidas pelo valor de Intensidade de turbulência de referência - Iref, conforme Tabela 1.

| Parâmetro de Projeto | Classe I | Classe II | Classe III | Classe S |
|---|----------|-----------|------------|--|
| Velocidade de referência | 50 | 42,5 | 37,5 | Definidos pelo projetista do aerogerador |
| Velocidade média anual | 10 | 8,5 | 7,5 | |
| Rajada de 1s com recorrência de 50 anos | 70 | 59,5 | 52,5 | |
| Rajada de 1s com recorrência de 1 ano | 52,5 | 44,6 | 39,4 | |
| Categoria A para turbulência alta, I_{ref} | 0,16 | | | |
| Categoria B para turbulência média, I_{ref} | 0,14 | | | |
| Categoria C para turbulência alta, I_{ref} | 0,12 | | | |

Tabela 1 - Parâmetros eólicos para as classes de projeto (Lemos, 2012)

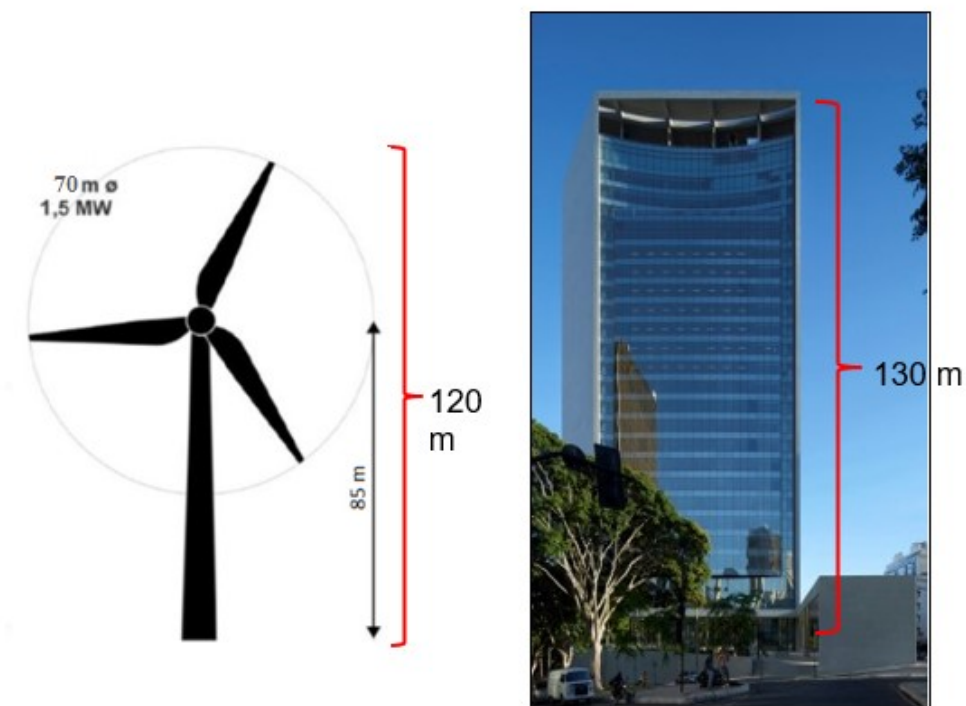


Figura 30 - Diâmetro do rotor e altura do gerador eólico de Volta do Rio (Fonte: Empresa proprietária do parque)



Figura 31 - Pá do aerogerador do parque em estudo (34 metros de comprimento e 5.720 kg) (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)



Figura 32 - Hub (6.500 kg) (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.3. Sistemas de Controle

O aerogerador do parque em estudo tem um controle baseado em um PLC que ajusta e controla independentemente a operação dos parâmetros da turbina, não necessitando de controle externo.

A unidade de controle (Figura 33) utiliza sensores para receber as informações das condições externas (velocidade do vento e direção) e de todos os parâmetros operativos do gerador eólico (potência, velocidade do rotor, posição das pás e etc.). Baseado nestes dados, o sistema supervisor controla a turbina para otimizar sua produção de potência e assim, garantir uma operação segura do gerador eólico.

O controle de pitch, responsável por controlar o ângulo de ataque das pás, foi desenhado para ser suficientemente rápido para reagir antes que a velocidade do rotor alcance níveis perigosos, sobre tudo, diante de possíveis rajadas de vento. A operação normal do gerador eólico é ajustada de modo a operar dentro da faixa de velocidade de vento entre 3 m/s e 25 m/s.



Figura 33 - Painéis e Sistema de Controle (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.3.1. Sistema Pitch e Sistema de Freio

O aerogerador do parque em estudo é um aerogerador de velocidade e passo variáveis, ou seja, a velocidade de rotação das pás varia em função da velocidade do vento, com o objetivo de maximizar a produção de energia. Uma vez alcançada a potência nominal do gerador, o controle de passo das pás atua, de modo a manter a potência de saída constante. Nesse ponto, o sistema de controle de passo das pás limita a produção de energia do gerador eólico. Se necessário, esse sistema também pode atuar como um freio aerodinâmico, diminuindo ou parando a rotação da turbina, modificando o ângulo de captação de energia das pás. Assim, os freios do rotor, que são suscetíveis à grandes desgastes, não são empregados nessas condições.

O Sistema de Pitch é composto por três motores elétricos independentes entre si, alimentados por ultra-capacitores, que são responsáveis pelo fornecimento de energia no caso de falha da rede elétrica. Os motores são ligados ao rotor das pás através de correias dentadas, que não requerem lubrificação, deixando o sistema imune à umidade e à sujeira.

O funcionamento dos motores é monitorado pelo controle principal do sistema, e caso ocorra alguma falha na sua operação, o controle ordena uma operação de segurança, iniciando um imediato movimento das pás até a posição de bandeira.

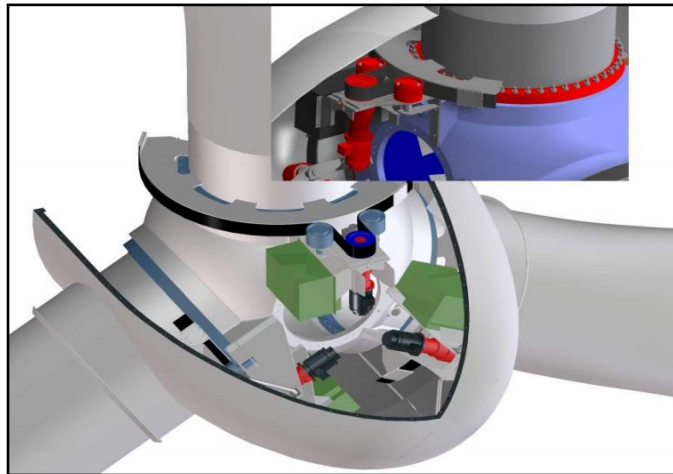


Figura 34 - Detalhe do Sistema Pitch (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.3.2. Sistema de Controle Yaw

O sistema Yaw (Figura 35), através de motores elétricos, alinha o rotor com a direção do vento, que é determinada pelo sistema de medição direcional de vento instalado na parte superior da nacela. Estes motores estão localizados sobre o rolamento de Yaw, que vincula a torre à base da nacela.

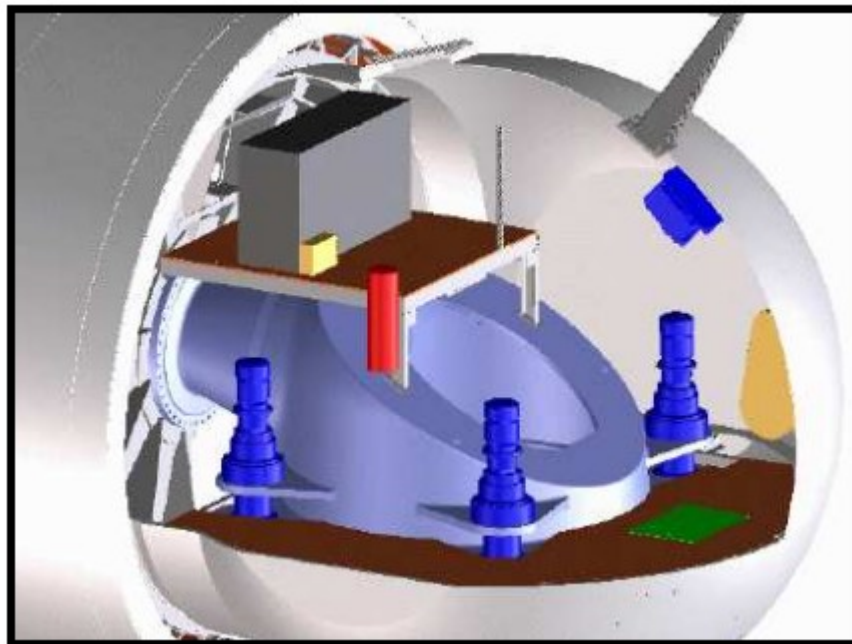


Figura 35 - Detalhe do Sistema Yaw (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.4. Conversor de Frequência

O conversor de frequência (Figura 36) é o equipamento responsável por adequar a potência elétrica produzida pelo gerador à frequência variável, às características da rede elétrica (frequência de 60 Hz e tensão trifásica senoidal).

Diodos semi-condutores são utilizados para retificar a corrente no lado do gerador do sistema conversor, aumentando a confiabilidade do sistema, reduzindo as perdas de energia e prevenindo picos de tensão nos enrolamentos do gerador, além de reduzirem as interferências eletromagnéticas (EMI).

Após essa retificação, o nível da Corrente Contínua é aumentado através de uma fonte comutadora elevadora (*Boost-up Switching Power Supply*) que entrega a energia ao barramento CC. A Corrente Contínua produzida é então conduzida até o módulo inversor.

No módulo inversor, a corrente contínua do barramento CC, será então chaveada pelos IGBTs, que são controlados pelo módulo de controle do sistema inversor, com saída SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*), de forma a gerar tensões e correntes trifásicas senoidais, defasadas de 120° , com frequência de 60 Hz. Como se pode notar na Figura 36, o módulo inversor é formado por dois inversores em paralelo, de modo que cada um é responsável por 50% da potência, o que contribui para diminuição das perdas na conversão.

O filtro de linha limita a emissão de harmônicos, produzidos pelo módulo conversor, a valores permitidos para o fornecimento da energia à rede elétrica.

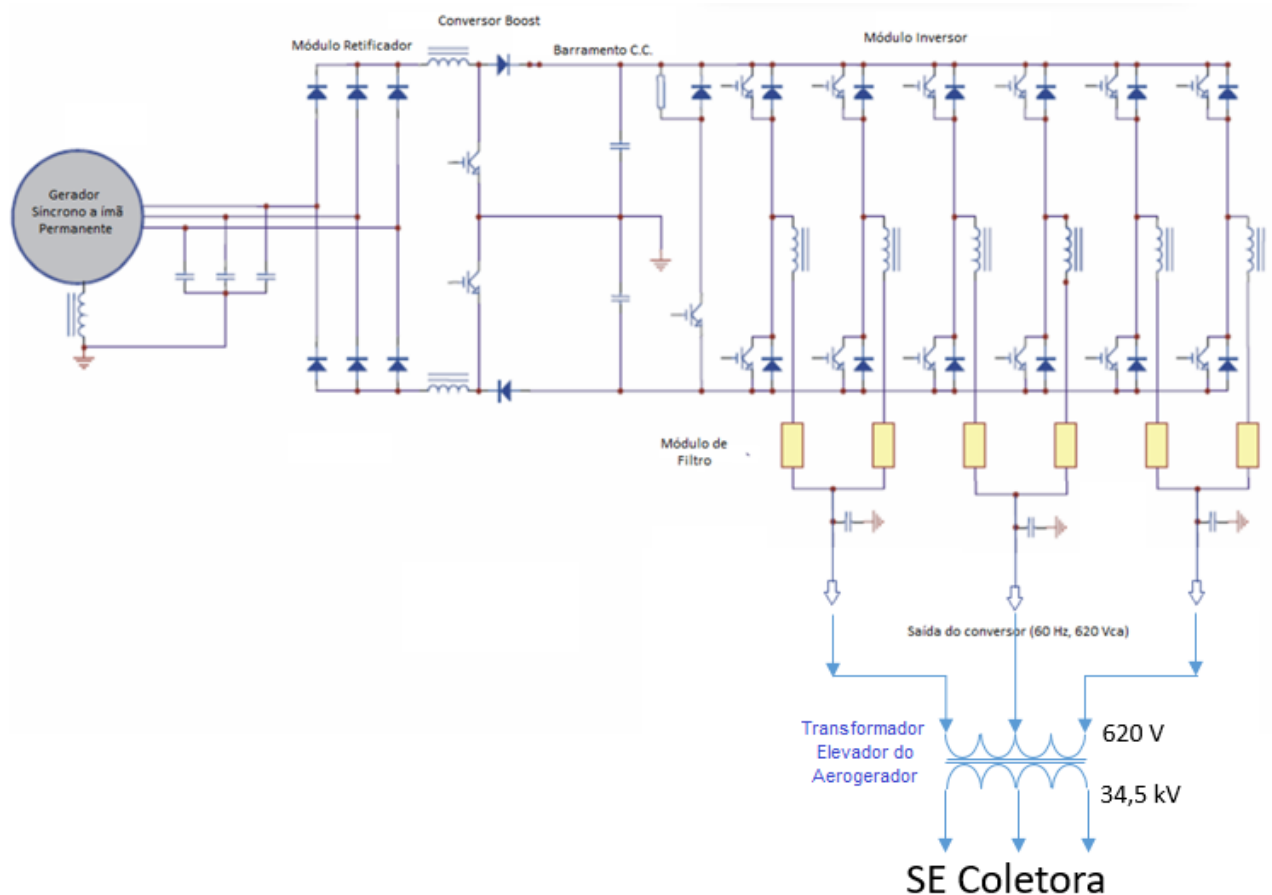


Figura 36 - Diagrama esquemático do Conversor de Frequência (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

O conversor de frequência também pode operar recebendo sinais externos de comando, limitando a potência de saída do gerador às necessidades da rede. A potência reativa de saída também pode ser totalmente controlada, conforme a necessidade da rede, de modo a manter a tensão da rede a mais estável possível.

O conversor de frequência, o filtro de linha e o transformador de energia, efetuam a conexão do gerador eólico com a rede de transmissão. Todos estes componentes estão instalados no interior da base da torre (Figura 37).

A temperatura ideal para o funcionamento dos conversores de energia é mantida por um sistema passivo de refrigeração, conforme pode ser visto na Figura 37, garantindo uma alta eficiência e eliminando as falhas de operação.

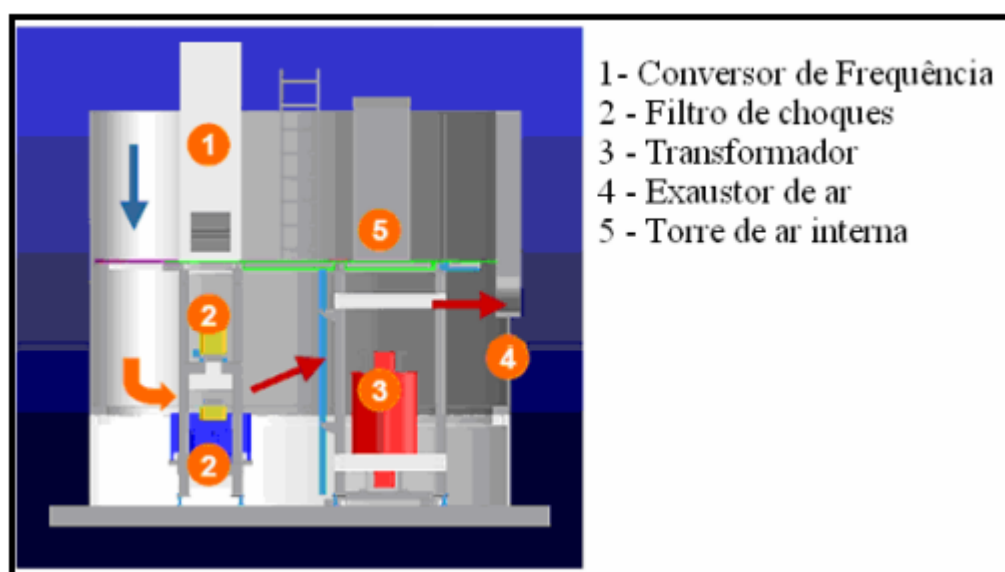


Figura 37 - Diagrama esquemático do fluxo de ar do sistema de refrigeração (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

3.1.5. Torre

A torre de aço dá sustentação à nacela e ao rotor. Ela consiste em segmentos vinculados entre si, por intermédio de flanges. A torre é conectada eletricamente à terra através de um circuito de aterramento colocado na fundação do gerador eólico.

O rolamento de Yaw está fixado diretamente no extremo superior da torre. Os gabinetes de controle, o conversor, o transformador e o disjuntor de media tensão estão montados na base da torre. A torre está equipada com uma escada interna que permite subir à nacela, e um sistema de segurança antiqueda. Plataformas de segurança são instaladas com distâncias de segurança no interior da torre. A plataforma superior possui uma escada que permite acesso à nacela. Tanto a torre como a nacela contam com sistemas de iluminação normal e de segurança.

No interior da torre também existem cabos de potência e de fibra ótica que são utilizados para o monitoramento do sistema. Os cabos estão disponibilizados de forma a permitir que a nacela gire três voltas completas. Após o giro destas três voltas, o sistema

de controle gira a nacelle no sentido contrário para posicionar os cabos em sua posição original.

3.1.6. Conexão com a rede elétrica

A saída do conversor de frequência em 620 Vca (Figura 36) é conectada a um transformador elevador de 620 Vca / 34,5 kV, de 1600 kVA, situado na base da torre (Figura 37). Após elevada a tensão para 34,5 kV, a energia gerada por cada aerogerador é levada por meio de cabos subterrâneos até a subestação coletora (circuitos 1, 2 e 3), conforme pode-se observar no diagrama da Figura 38. Na SE coletora a tensão é elevada para 69kV e interligada ao SIN através da linha de transmissão de conexão do parque eólico (Figura 39).

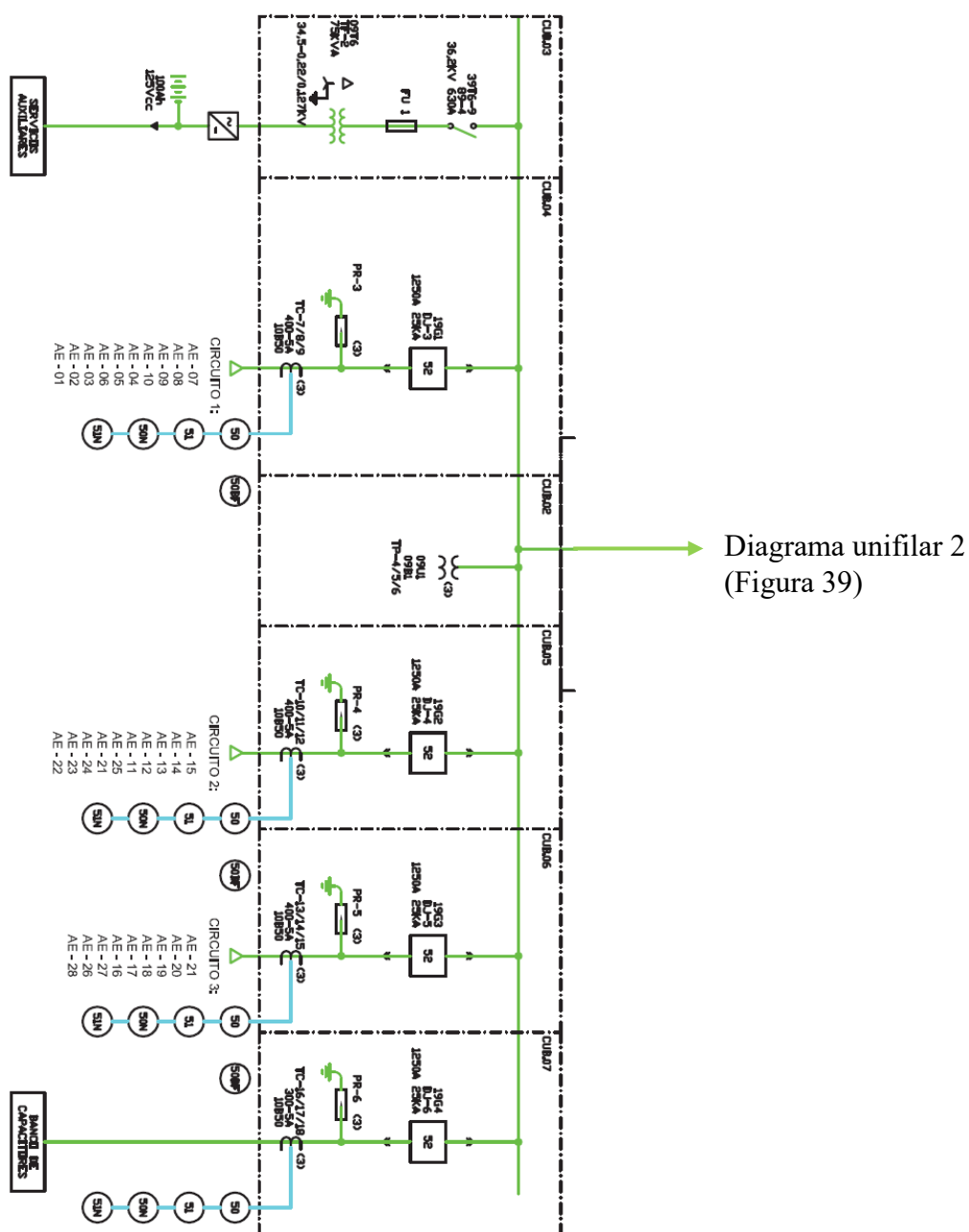


Figura 38 - Diagrama unifilar 1- Subestação coletora - SE Volta do Rio (fonte: Empresa proprietária do parque)

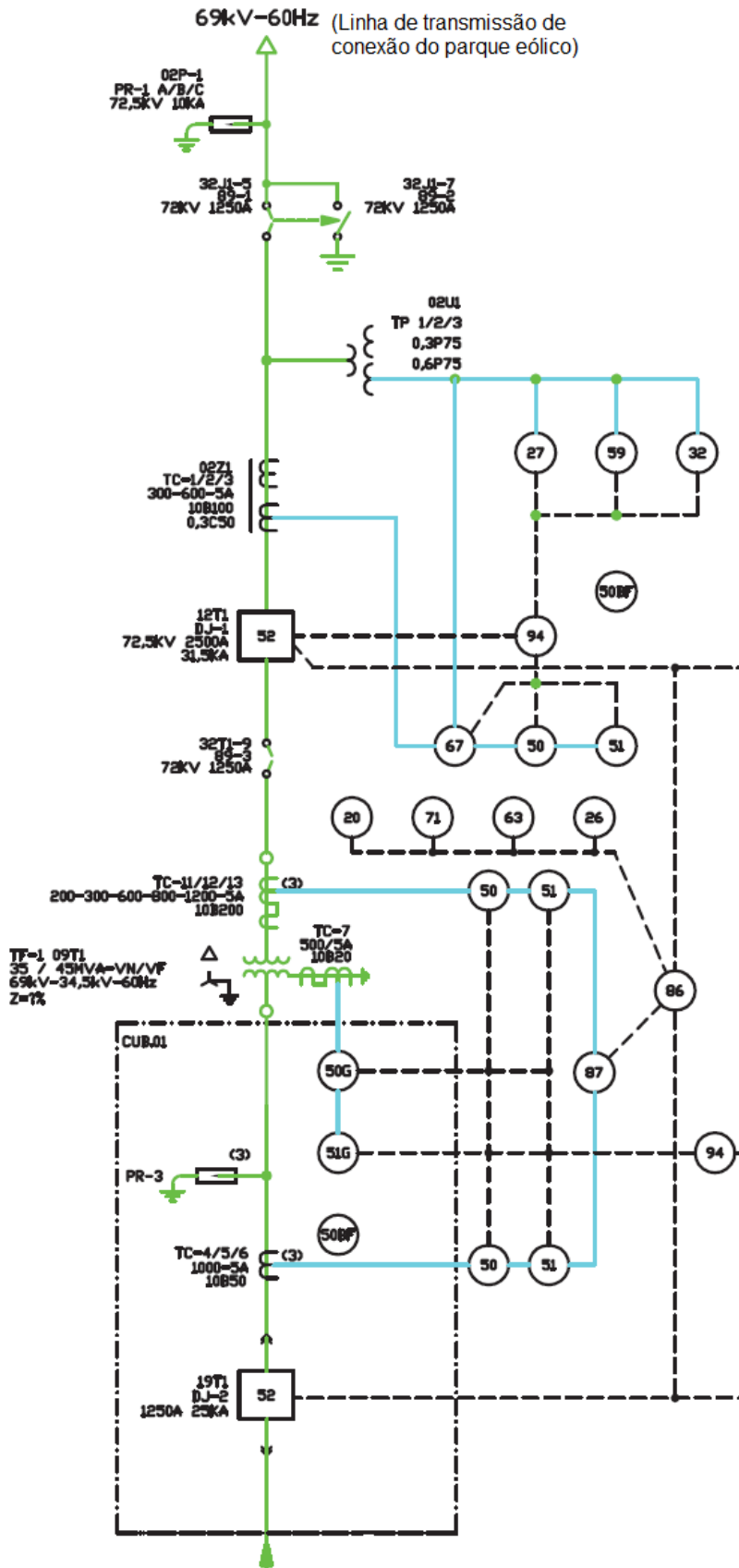


Figura 39 - Diagrama unifilar 2- Subestação coletora - SE Volta do Rio (fonte: Empresa proprietária do parque)

3.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR

A Tabela 2 sintetiza as principais características do SCEE empregado no parque eólico e a Figura 40 a curva de potência.

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Potência nominal | 1500 kW |
| Velocidade de “cut-in” | 3,0 m/s |
| Velocidade de “cut-out” | 25,0 m/s |
| Velocidade de vento nominal | 11,7 m/s |
| Pá do rotor | LM34,0p |
| Diâmetro do rotor | 70,0 m |
| Densidade do ar | 1.225 kg/m ³ |
| Intensidade da turbulência | 10% const. |
| Expoente de cisalhamento do vento | 0,16 |

Tabela 2 - Principais características do SCEE do parque em estudo

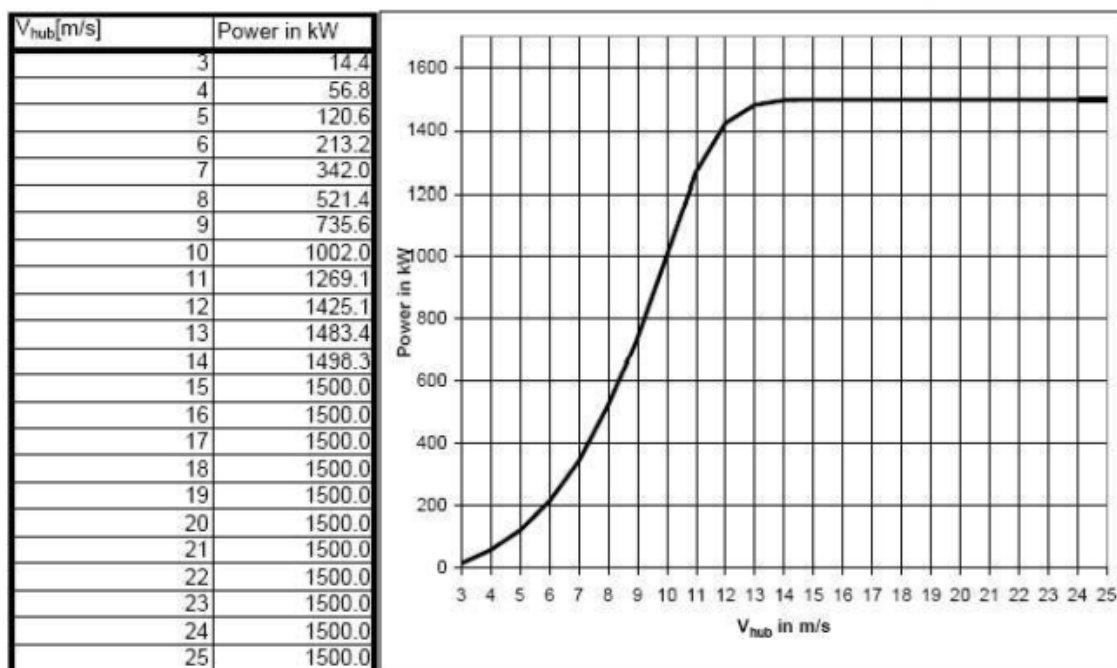


Figura 40 - Potência gerada em função da velocidade do vento (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

A Figura 40 mostra, conforme explicado no item 2.2 (Figura 11), que entre o vento de *cut-in* e o vento nominal, o controle do aerogerador atua de forma a buscar a maximização da potência. A partir do vento nominal até o vento de *cut-out*, o controle de pitch atua de forma a limitar a potência gerada, de forma a não ultrapassar a potência nominal do gerador. Acima de 25m/s atinge-se o limite operacional e o sistema é desligado.

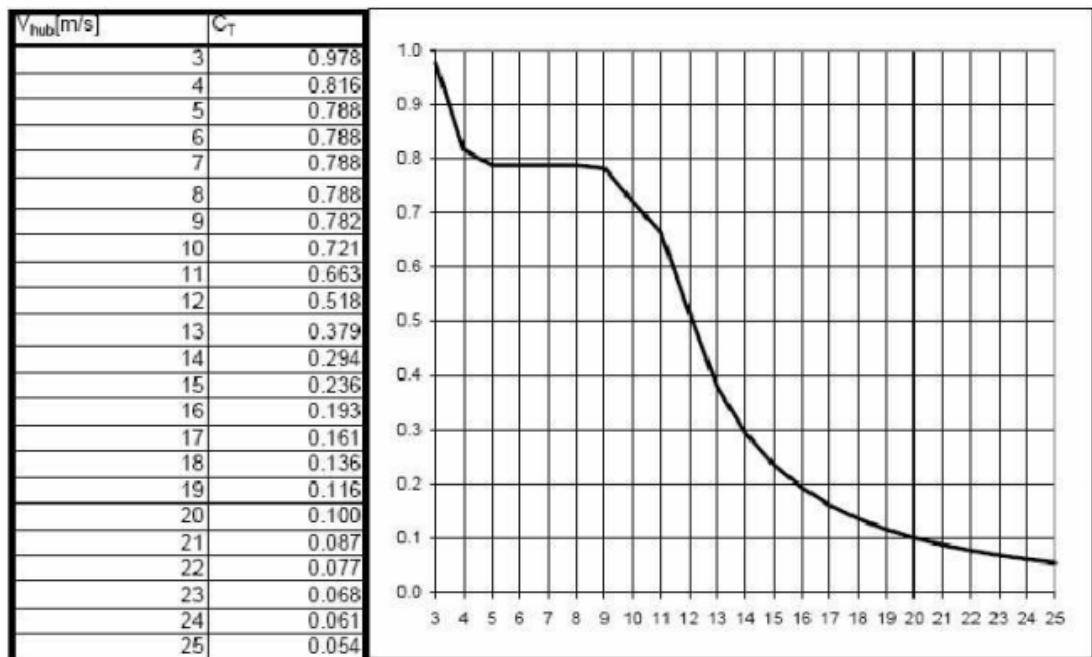


Figura 41 - Curva do coeficiente C_t (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

A curva do coeficiente C_t ou coeficiente de torque do aerogerador, mostrada na Figura 41, evidencia que o torque é máximo no vento de *cut-in* (vento de partida). Se estabiliza após a partida, depois vai diminuindo, à medida que o controle de passo atua no ângulo de ataque das pás, até o torque mínimo no vento de *cut-out*.

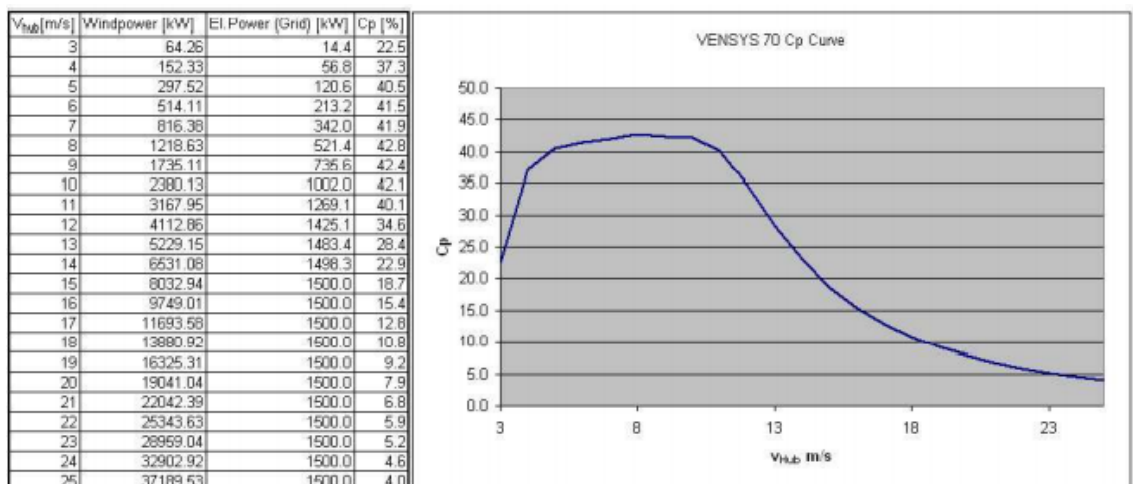


Figura 42 - Curva do coeficiente C_p (Fonte: Descrição técnica do parque em estudo)

Conforme se pode observar na curva do coeficiente de potência C_p (Figura 42), entre o vento de *cut-in* e o vento nominal, o sistema de controle atua no torque elétrico do aerogerador, controlando sua velocidade e buscando a máxima produtividade C_{pmax} . Ao se aproximar do vento nominal e até o vento de *cut-out*, o C_p vai diminuindo, devido ao controle de limitação da potência exercido pelo sistema de Pitch.

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO

Após uma década desde o início de operação, o parque eólico em estudo passou por várias ocorrências. Nas seções a seguir, será realizado um retrospecto dos principais problemas ocorridos e as soluções implementadas. Por fim, será avaliado o desempenho atual dos aerogeradores.

4.1. HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

4.1.1. Queima dos Geradores

Desde a sua entrada em operação, o principal problema verificado no parque eólico em estudo foi a queima dos aerogeradores. Conforme pode-se observar na Tabela 3, desde os primeiros meses de operação, ainda no período de garantia do fabricante, iniciou-se um intenso processo de queima dos aerogeradores.

| AEROGERADOR | 1º QUEIMA | 1º TROCA | 2º QUEIMA | 2º TROCA | 3º QUEIMA | 3º TROCA | 4º QUEIMA |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| AG01 | 05/04/2011 | 09/05/2011 | 21/07/2012 | 25/09/2012 | 16/02/2015 | | |
| AG02 | 24/02/2012 | 26/10/2012 | 22/05/2015 | | | | |
| AG03 | 17/04/2011 | 06/05/2011 | 29/02/2012 | 29/09/2012 | | | |
| AG04 | 05/05/2011 | 12/05/2011 | - | 19/01/2013 | 21/02/2013 | 21/03/2013 | 01/04/2016 |
| AG05 | 11/04/2012 | 20/10/2012 | 13/05/2015 | | | | |
| AG06 | 20/10/2011 | 16/01/2013 | 11/10/2016 | | | | |
| AG07 | 25/11/2010 | 23/04/2011 | 08/09/2012 | 06/10/2012 | 19/08/2016 | | |
| AG08 | 22/09/2010 | 03/05/2011 | 16/02/2012 | 15/10/2012 | | | |
| AG09 | 15/03/2011 | 26/04/2011 | 14/02/2012 | 19/10/2012 | | | |
| AG10 | 22/09/2010 | 20/04/2011 | 29/08/2012 | 29/10/2012 | 07/01/2016 | | |
| AG11 | 16/12/2010 | 30/03/2011 | 24/10/2012 | 14/11/2012 | | | |
| AG12 | 01/12/2010 | 06/04/2011 | 16/02/2012 | 07/11/2012 | 23/10/2014 | | |
| AG13 | 07/11/2010 | 10/04/2011 | 17/02/2012 | 01/11/2012 | 16/02/2015 | | |
| AG14 | 29/09/2010 | 14/04/2011 | 23/03/2012 | 31/10/2012 | 05/03/2016 | | |
| AG15 | 11/07/2010 | 18/04/2011 | 23/05/2012 | 31/10/2012 | 16/08/2019 | | |
| AG16 | 24/02/2011 | 17/05/2011 | 20/10/2011 | 18/01/2013 | 17/06/2016 | | |
| AG17 | 01/02/2011 | 16/04/2011 | 04/07/2012 | 03/01/2013 | | | |
| AG18 | 22/03/2011 | 19/04/2011 | 26/04/2012 | 18/12/2012 | 11/01/2015 | | |
| AG19 | 09/02/2011 | 01/05/2011 | 28/02/2012 | 23/11/2012 | 18/05/2017 | | |
| AG20 | 02/01/2011 | 06/05/2011 | 02/04/2012 | 22/11/2012 | 03/04/2015 | | |
| AG21 | 08/02/2011 | 12/05/2011 | 26/02/2012 | 19/11/2012 | 02/05/2017 | | |
| AG22 | 14/02/2011 | 04/04/2011 | 14/07/2012 | 17/12/2012 | | | |
| AG23 | 10/01/2011 | 07/04/2011 | 04/07/2012 | 14/12/2012 | 07/09/2019 | | |
| AG24 | 21/11/2010 | 11/04/2011 | 17/02/2012 | 13/12/2012 | 01/10/2015 | | |
| AG25 | 13/01/2011 | 26/05/2011 | 25/10/2012 | 04/12/2012 | | | |
| AG26 | 01/12/2010 | 02/04/2011 | 02/10/2011 | 01/11/2011 | 20/04/2012 | 10/12/2012 | 27/03/2015 |
| AG27 | 07/02/2011 | 25/03/2011 | 25/10/2012 | 27/11/2012 | 24/07/2014 | | |
| AG28 | 19/10/2010 | 18/03/2011 | 11/02/2012 | 13/12/2012 | 31/01/2019 | | |
| Máquinas do projeto original que ainda estão em operação | | | | | | | |

Tabela 3 - Histórico de queima de aerogeradores do parque eólico em estudo (Elaborado pelo autor)

Conforme se pode observar na Tabela 3, apenas 06 (seis) aerogeradores do projeto original ainda permanecem em operação depois da 2ª troca. Os demais todos queimaram pela 3ª e até 4ª vez.

Verificou-se que haviam problemas relacionados à vedação (entrada de umidade), e principalmente, baixo isolamento do gerador. Constatou-se que, normalmente, após ou durante a ocorrência de chuvas, se verificava a queima dos geradores. Tentativas de melhoria da vedação foram feitas, mas, sem sucesso.

O diagnóstico de especialistas em aerogeradores, chamados para analisar o problema e propor soluções, concluiu que houve falha na tropicalização do projeto original. Os geradores não estavam preparados para suportar as condições de clima da região Nordeste brasileira, associadas a umidade, calor e salinidade do ambiente litorâneo.

A Figura 43, mostra um dos pontos de entrada de umidade e de ocorrência de curto-circuito.



Figura 43 - Ponto de entrada de umidade e ocorrência de curto-circuito

Além dos registros de operação da central, indicando as condições do tempo nos momentos de queima, no gráfico da Figura 44 é possível verificar uma relação entre o histórico de queimas e a quantidade de chuvas.

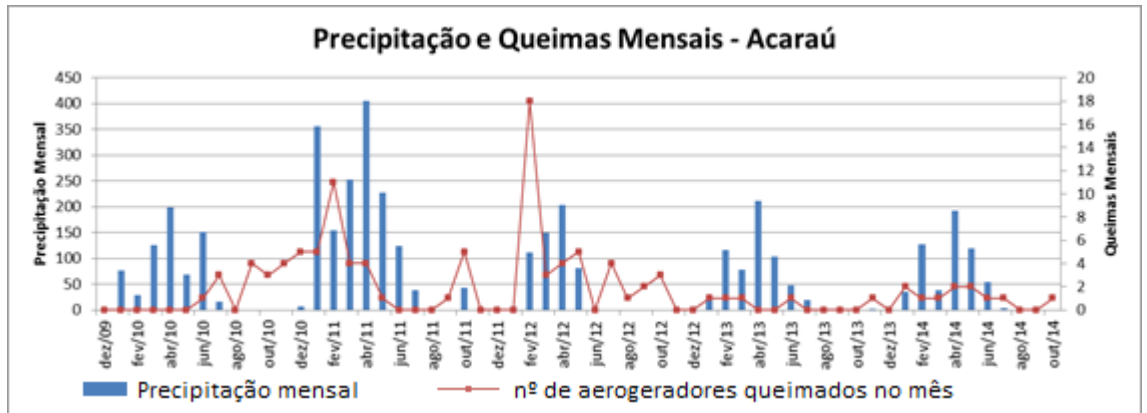


Figura 44 - Precipitação e Queimas de Aerogeradores na Central Eólica em estudo (fonte: Empresa proprietária do parque)

O que se verificou é que, as queimas dos geradores ocorriam devido a curto-circuito no enrolamento do estator, normalmente devido a falhas no isolamento.

4.1.2. Corrosão dos ímãs do rotor

Outro problema relativo à vedação e isolamento, foi a grande corrosão, com acentuada perda de material e deslocamento, verificada nos ímãs do rotor, após cinco anos de operação, conforme se pode observar na Figura 45.



Figura 45 - Corrosão dos ímãs do rotor (fonte: Empresa proprietária do parque)

4.1.3. Acúmulo de poeira em várias partes internas do aerogerador

Outro problema relativo à vedação, foi a grande quantidade de poeira acumulada em pontos internos e externos do aerogerador, contribuindo para diminuição do isolamento elétrico, prejudicando componentes móveis e danificando o revestimento de componentes. Mesmo instalado a 85 m de altura, verificou-se que, devido a falhas na vedação, poeira da areia da praia, carregada pelo vento, acabava se acumulando em vários pontos do aerogerador, chegando a escorrer pela torre nos momentos de chuva (Figura 46).



Figura 46 - Acúmulo de poeira no aerogerador e escorrendo pela torre (fonte: Empresa proprietária do parque).

4.1.4. Oxidação das partes metálicas do aerogerador

Projetado para operar durante 20 anos, o que se verificou em vários pontos da máquina e da torre é que, com menos da metade desse tempo, surgiram muitos pontos de falhas no revestimento e oxidação. Como se pode observar nas Figura 47, Figura 48 e Figura 49, em vários pontos, a oxidação chegou a evoluir para os graus de corrosão e ferrugem, sendo necessária a parada do aerogerador para recuperação dos componentes metálicos, de forma a se evitar a perda precoce das estruturas do aerogerador e sua diminuição de vida útil.



Figura 47 - Pontos de oxidação na carcaça do aerogerador (fonte: Empresa proprietária do parque)



Figura 48 - Exemplo de oxidação acentuada em alguns pontos (fonte: Empresa proprietária do parque)



Figura 49 - Oxidação das torres (fonte: Empresa proprietária do parque)

4.2. SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS

4.2.1. Busca de fornecedores

Conforme relatado no Capítulo 1, o desenvolvimento da indústria de geração eólica no Brasil é relativamente recente, pouco mais de uma década. Passado o primeiro momento de implantação dos parques, e os equipamentos vão envelhecendo, começam a surgir desafios de manutenção dos ativos. Estes desafios passam pelo desenvolvimento de fornecedores especializados em aerogeradores, pois, no início, os fornecedores de serviços de manutenção, na área de energia, só tinham experiência em reformas de máquinas hidráulicas. Além de expertise, outro ponto importante é a questão de logística, pois, muitos parques estão instalados em regiões remotas, longe de qualquer infraestrutura, na região Nordeste do Brasil. No início, a maioria dos grandes fornecedores de manutenção, na área de energia, estavam somente nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. E por fim, custos adequados, e peças para substituição, pois, muitos equipamentos são importados.

Após a identificação das causas do baixo isolamento, foram realizados contatos com diversos fornecedores de serviços, dentro e fora do Brasil. Na Figura 50 está a localização dos fornecedores selecionados.

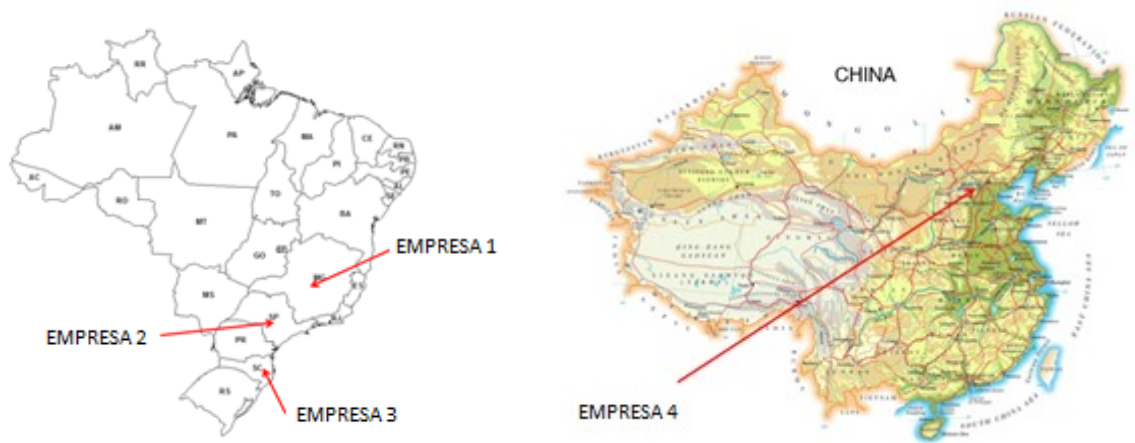


Figura 50 - Exemplos de fornecedores contatados (Próprio autor)

Os dois fornecedores que mais se destacaram foram a Empresa 4, na China e a Empresa 3, no Brasil, que no final, acabou sendo a empresa contratada para reforma dos aerogeradores.

Para seleção dos fornecedores, foram feitas visitas às fábricas das empresas, de forma a se verificar a capacidade técnica e a qualidade dos serviços por eles prestados. Nas Figura 51 e Figura 52 estão alguns destaques da visita realizada pela equipe à China.



Figura 51 - Cronograma da visita na China (Fonte: Empresa proprietária do parque)

Destaques da Visita à Empresa 4 na China



Fábricas grandes e bem organizadas.



Vários geradores em produção.

Figura 52 - Destaques da Visita a Empresa 4 na China (Fonte: Empresa proprietária do parque)

Destaques da Empresa 4 da China durante o período de avaliação das propostas:

Prós

- Experiência - grande fabricante de aerogeradores;
- Fabricam o mesmo modelo utilizado no parque em estudo;
- Implementaram algumas melhorias no projeto original;
- Custo relativamente baixo para a substituição.

Contras

- Não vendiam somente um protótipo;
- Fornecedor internacional (receio com garantia);
- A proposta para o fornecimento incluía a substituição de todos os geradores e gestão do O&M.

O outro fornecedor que também se destacou, e que acabou sendo o escolhido para fornecimento do escopo da reforma dos aerogeradores, foi a Empresa 3 nacional, cujos destaques seguem a seguir:

- Excelente referencial técnico – empresa grande, com larga experiência em geradores e motores;
- Já atuando na fabricação de aerogeradores;
- Fábrica localizada no Brasil;
- Menor custo;
- Poderiam fornecer um protótipo, e em caso de sucesso, fechar o contrato de reforma do parque.

4.2.2. Escopo da reforma

O escopo detalhado da reforma, contratada e especificada juntamente com a Empresa 3, encontra-se no *Anexo 1*.

A seguir, seguem as fotos do Aerogerador após serviços de recuperação na fábrica da Empresa 3. (Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56).

PARTE INFERIOR



Figura 53 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)



Figura 54 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)

PARTE SUPERIOR



Figura 55 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)

PARTE EXTERNA



Figura 56 - Partes do Aerogerador após recuperação (Fonte: Empresa proprietária do parque)

4.2.3. Protótipo montado e em funcionamento

Após todo um trabalho de desmontagem, peritagem, reengenharia, especificação e reforma, o primeiro protótipo (Figura 57) foi montado, comissionado e entrou em operação em setembro/2017



Figura 57 - Protótipo recuperado e instalado em Set/2017 - Aerogerador nº05 (Fonte: Empresa proprietária do parque)

Figura 57

Logo após o sucesso de recuperação do protótipo, foi assinado imediatamente o contrato para reforma dos demais aerogeradores, que promoveu a imediata desmontagem e encaminhamento à fábrica da Empresa 3, contratada para reforma, de 14 aerogeradores. Desse total, já em 2018, foram instalados 05 aerogeradores, totalizando 06 aerogeradores recuperados.

Devido a questões de reestruturação societária da empresa proprietária do parque eólico, o processo de instalação dos aerogeradores recuperados foi momentaneamente interrompido, retornando em 2020, com a instalação de mais 07 aerogeradores.

O cronograma previsto para instalação dos aerogeradores recuperados segue conforme Tabela 4.

Cronograma de instalação dos aerogeradores após serviços de recuperação e reforma.

| AEROGERADOR | MONTAGEM (1ª fase) | MONTAGEM (retomada) | MONTAGEM AEROGERADORES PÓS REFORMA (CRONOGRAMA) | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|------------------------|---|------------|------------|------------|--------|------------|--------|--------|------------|------------|
| | | | ago/20 | set/20 | out/20 | nov/20 | dez/20 | jan/21 | fev/21 | mar/21 | abr/21 | mai/21 |
| AG01 | | | | | | | | | | | 24/03/2021 | |
| AG02 | | | | | | | | | | | | 12/04/2021 |
| AG03 | | | | | | | | | | | 13/03/2021 | |
| AG04 | | | | | 01/10/2020 | | | | | | | |
| AG05 | | | | 25/09/2020 | | | | | | | | |
| AG06 | 07/09/2017 | | | | | | | | | | | |
| AG07 | | | | 10/09/2020 | | | | | | | | |
| AG08 | | | | | | | | 22/12/2020 | | | | |
| AG09 | | | | | | | | 07/12/2020 | | | | |
| AG10 | 14/03/2018 | | | | | | | | | | | |
| AG11 | | | | | | 09/11/2020 | | | | | | |
| AG12 | | | 26/08/2020 | | | | | | | | | |
| AG13 | 09/04/2018 | | | | | | | | | | | |
| AG14 | 28/03/2018 | | | | | | | | | | | |
| AG15 | | 14/07/2020 | | | | | | | | | | |
| AG16 | | | 11/08/2020 | | | | | | | | | |
| AG17 | | 31/07/2020 | | | | | | | | | | |
| AG18 | | 23/07/2020 | | | | | | | | | | |
| AG19 | 21/02/2018 | | | | | | | | | | | |
| AG20 | | | | | | | | | | | | 21/04/2021 |
| AG21 | 08/03/2018 | | | | | | | | | | | |
| AG22 | | | | | | | | 28/11/2020 | | | | |
| AG23 | | 24/06/2020 | | | | | | | | | | |
| AG24 | | 01/07/2020 | | | | | | | | | | |
| AG25 | | | | | | 29/10/2020 | | | | | | |
| AG26 | | | | | | | | | | | | 06/05/2021 |
| AG27 | | | | | | | | | | | | 16/05/2021 |
| AG28 | | 07/07/2020 | | | | | | | | | | |

Tabela 4 - Cronograma de instalação dos Aerogeradores reformados (Fonte: Empresa proprietária do parque)

4.3. HISTÓRICO DE DISPONIBILIDADE

Decorridos 10 anos de operação e superados muitos desafios, acredita-se que o pior momento do histórico de disponibilidade desse parque já tenha passado, e quando as disponibilidades dos novos geradores passarem a incorporar o histórico, espera-se que alcance valores bem melhores do que os verificados no passado. E isto é possível afirmar observando o histórico de disponibilidade dos aerogeradores reformados em 2017/2018. Na Figura 58 e na Figura 59 é apresentado o histórico de disponibilidade completo, e também, dos aerogeradores reformados, respectivamente.

Parque Eólico em Estudo - Disponibilidade Média

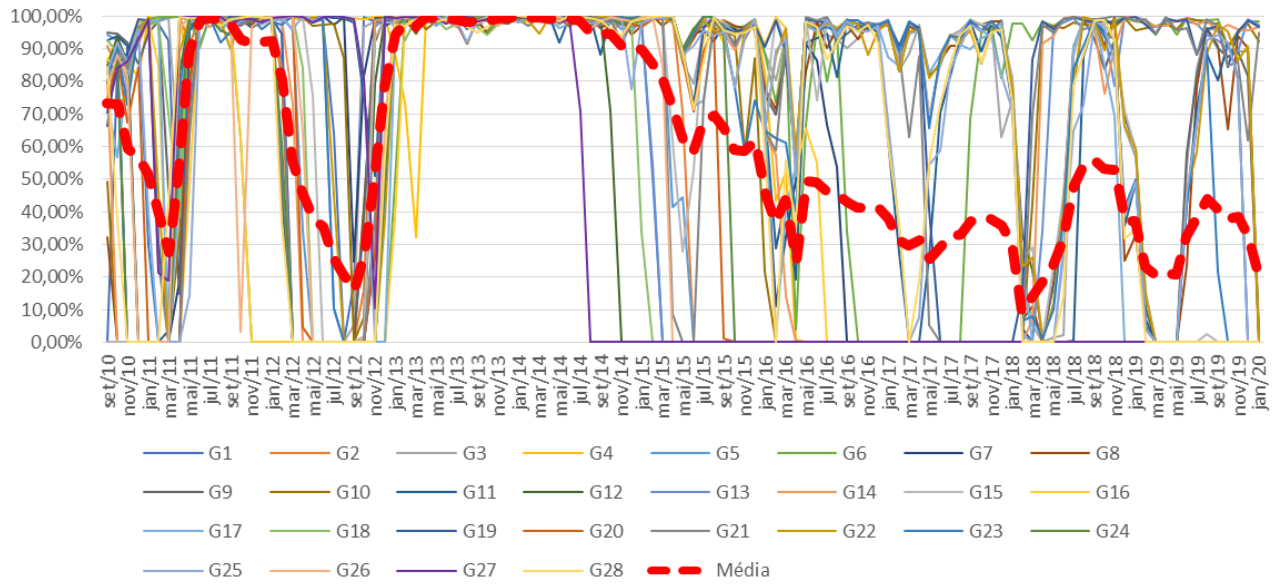


Figura 58 - Histórico de disponibilidade aerogeradores (Próprio autor)

Parque Eólico em Estudo - Disponibilidade Média Aerogeradores Reformados

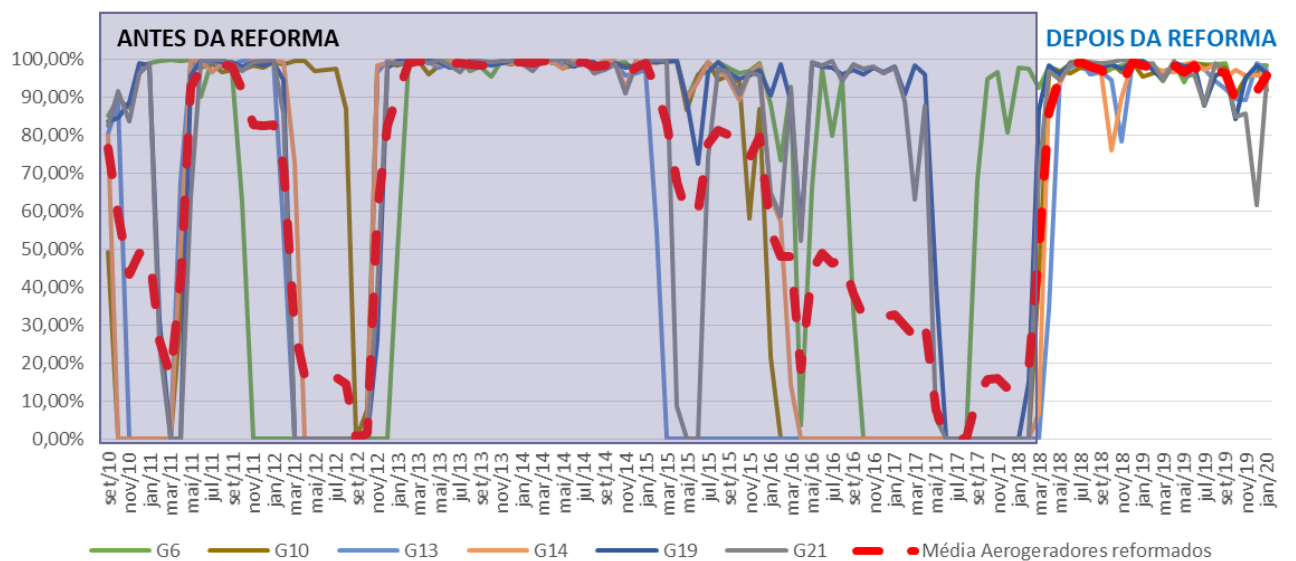


Figura 59 - Histórico de disponibilidade aerogeradores reformados (Próprio autor)

Conforme se pode observar na Figura 59, a disponibilidade média dos aerogeradores reformados, saiu de 0% (zero por cento) em julho/2017 e atingiu disponibilidade plena pós reforma.

4.4. HISTÓRICO DE GERAÇÃO

Na Figura 60 é mostrado o histórico de geração do parque, juntamente com o histórico de disponibilidade. Observando o gráfico, é possível notar como a baixa disponibilidade prejudicou a produção de energia do parque. Outro ponto importante, observando o histórico, são os meses de maior quantidade de vento e de produção de energia, que são os meses entre junho e janeiro, de cada ano. Isto quer dizer que, a janela de manutenção programada nesse parque está situada entre os meses de março a maio, quando as intervenções irão provocar menos perda energética.

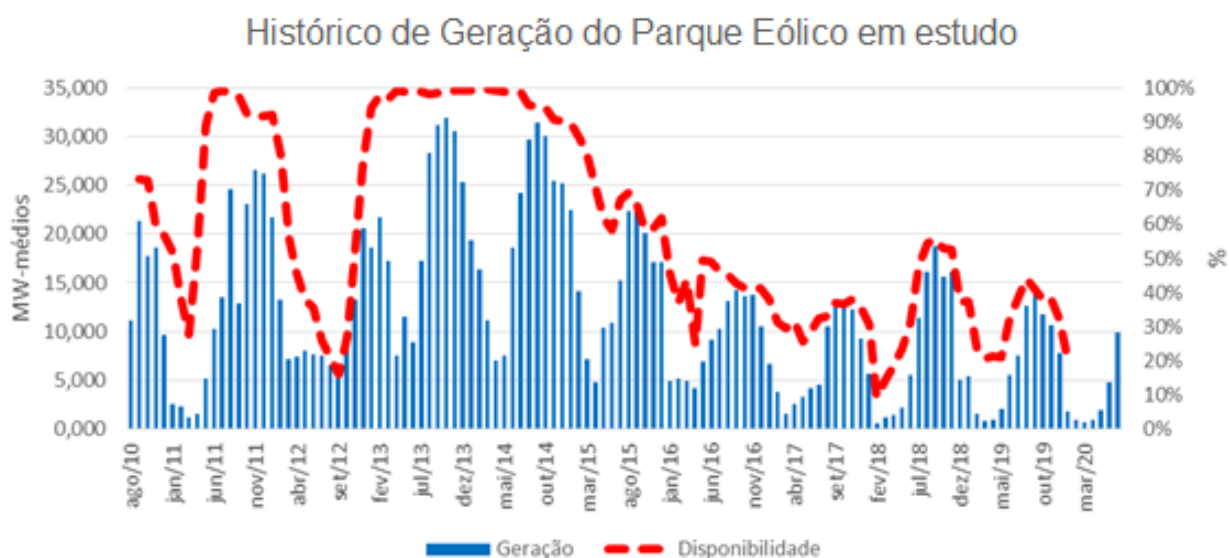


Figura 60 - Histórico de geração x disponibilidade (Próprio autor)

4.5. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A fim de se avaliar o desempenho dos aerogeradores, tanto do projeto original, ainda em funcionamento, quanto dos aerogeradores já reformados, foram buscados todos os registros disponíveis no banco de dados, relativos a velocidade do vento, geração e disponibilidade, por aerogerador, com discretização temporal a cada 10 minutos, para o período entre julho/2019 e julho/2020. Os registros foram comparados com as curvas características dos aerogeradores, de forma a se obter os desvios médios entre os valores de geração esperados e os verificados. Os resultados estão mostrados nas Figura 61 a Figura 72.

É importante ressaltar que se trata de uma análise inicial dos dados e, no presente trabalho, não foi realizado nenhum tratamento prévio dos dados, de forma a se excluir falhas de registros e *outliers*. Mesmo assim, como a quantidade de registros é significativa, para uma primeira análise, os resultados foram bastante satisfatórios (para cada aerogerador, no período analisado, a quantidade de pontos em cada gráfico é da ordem de 50.000 pontos).

4.5.1. Comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores do projeto original, ainda não reformados

Conforme mostrado na Tabela 3, 06 aerogeradores do parque (AE 03, AE 08, AE 09, AE 11, AE 22, AE 25), ainda em funcionamento, são máquinas do projeto original, ou seja, não passaram ainda pelo processo de reforma.

A seguir, nas Figura 61 a Figura 66, é mostrado a comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores.

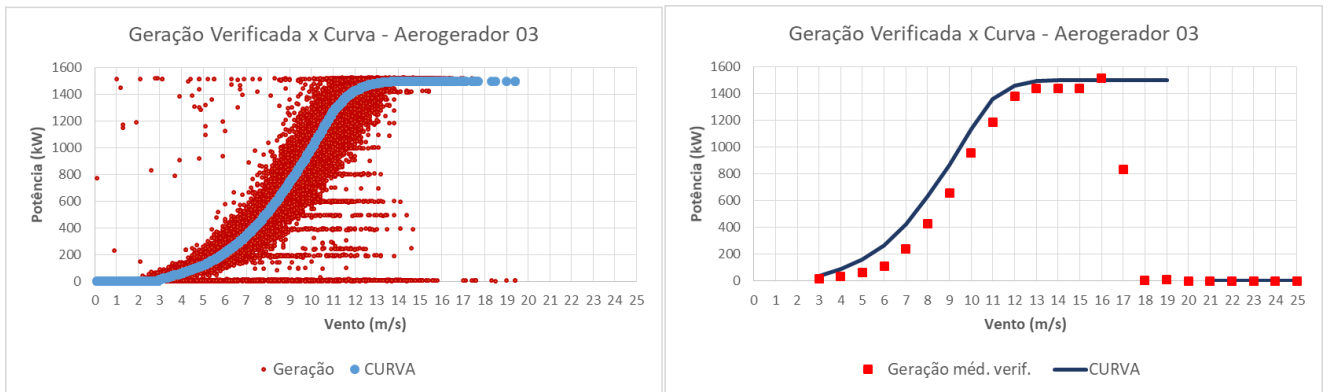


Figura 61 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 03 (Próprio autor)

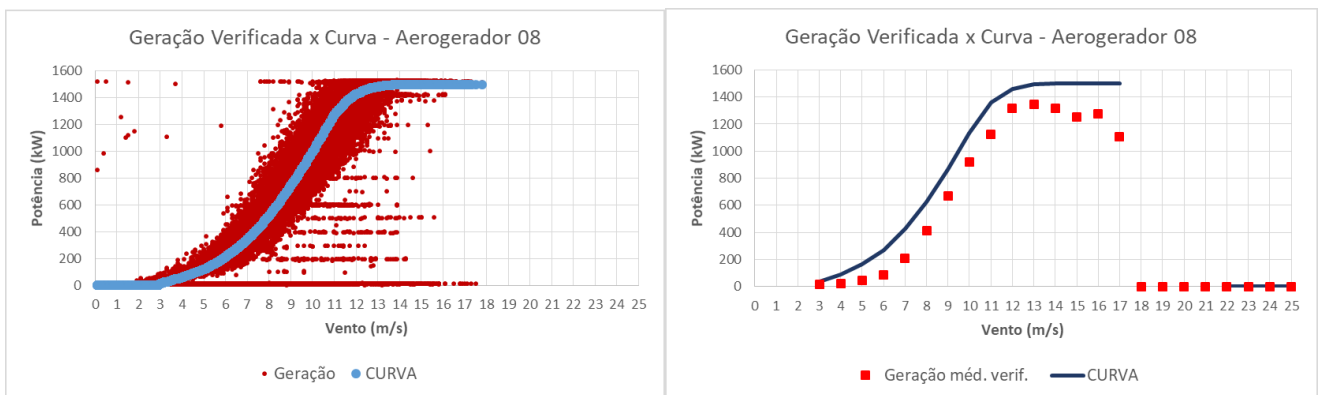


Figura 62 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 08 (Próprio autor)

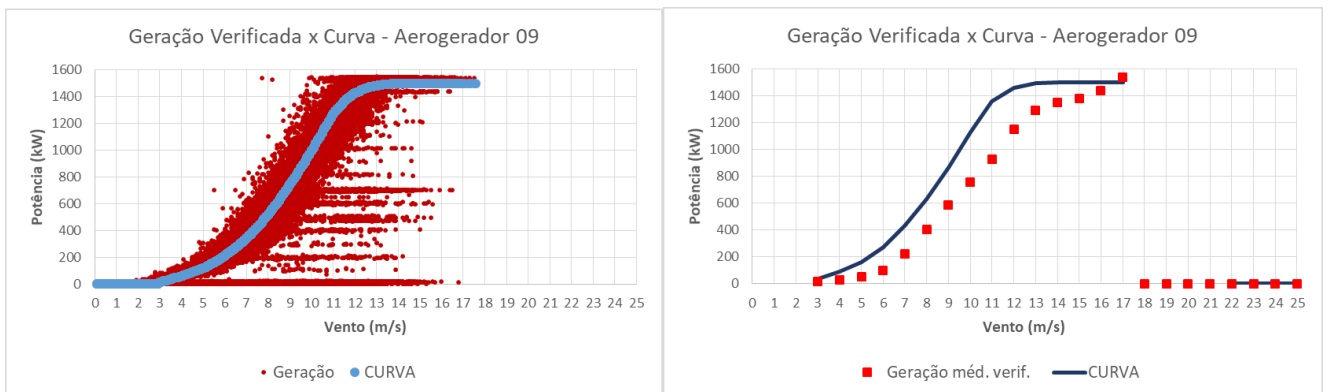


Figura 63 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 09 (Próprio autor)

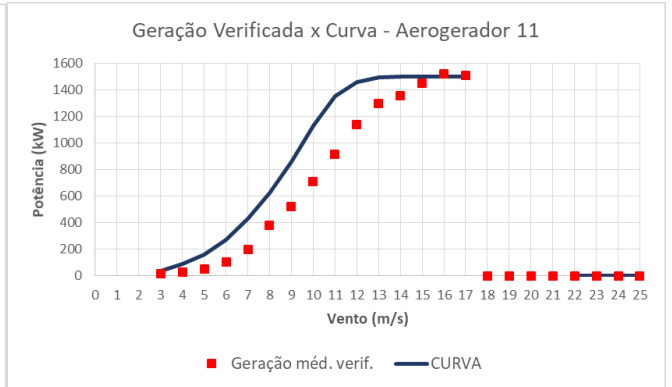
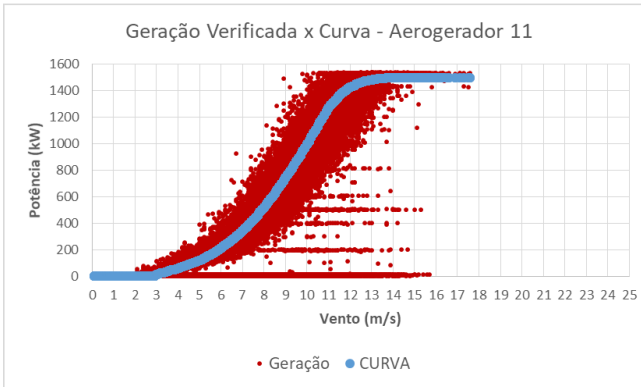


Figura 64 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 11 (Próprio autor)

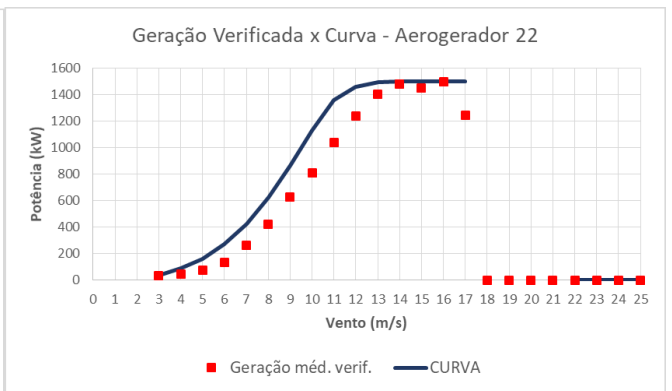
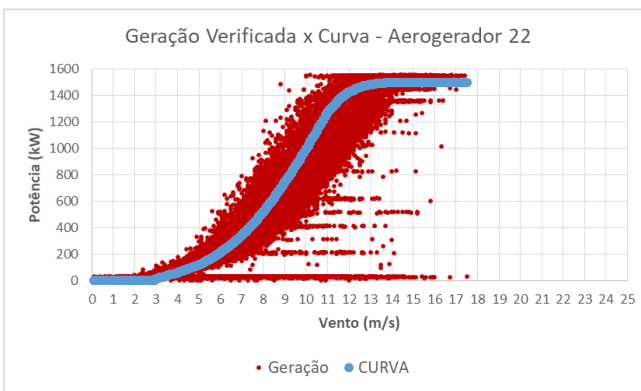


Figura 65 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 22 (Próprio autor)

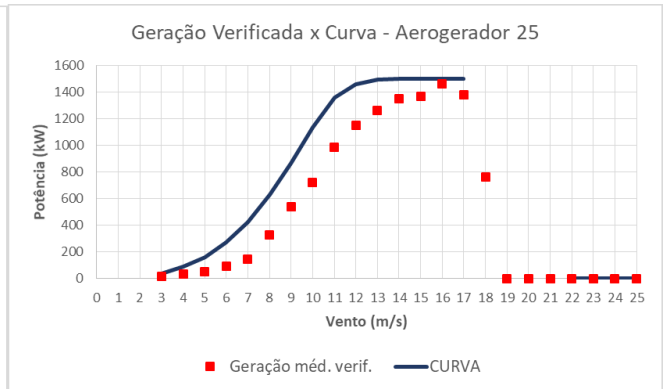
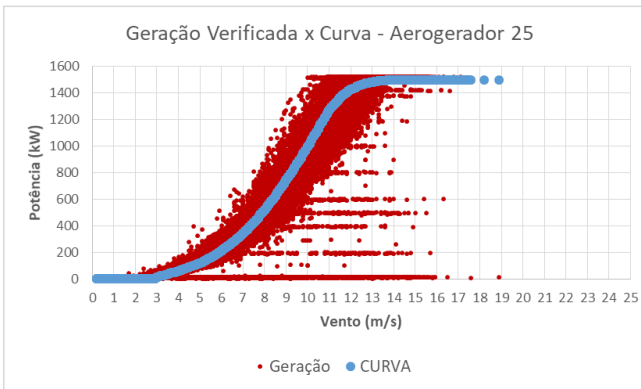


Figura 66 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 25 (Próprio autor)

4.5.2. Comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores reformados

Da mesma forma como no item anterior, porém, para os aerogeradores reformados, é mostrado a seguir nas Figura 67 a Figura 72, a comparação entre as gerações verificadas e as curvas características de potência dos aerogeradores reformados (AE 06, AE 10, AE 13, AE 14, AE 19, AE 21).

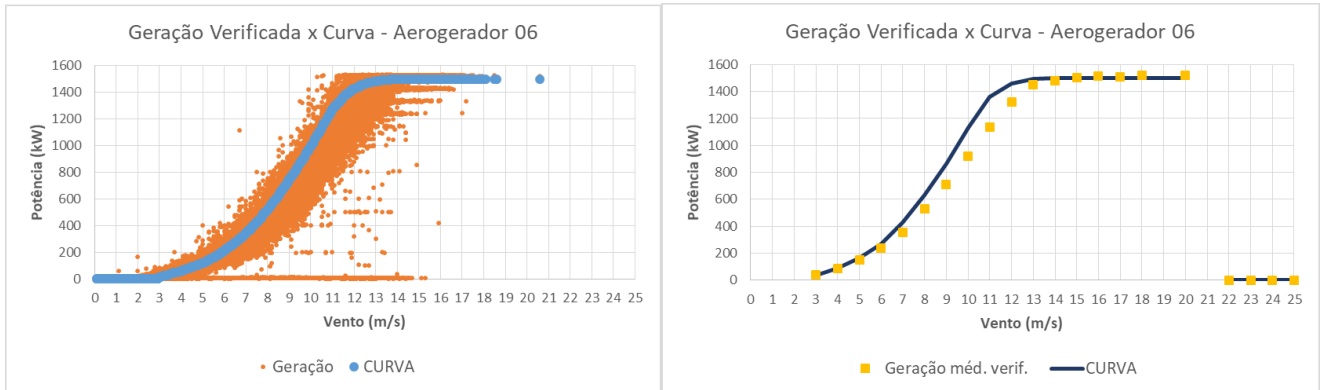


Figura 67 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 06 (Próprio autor)

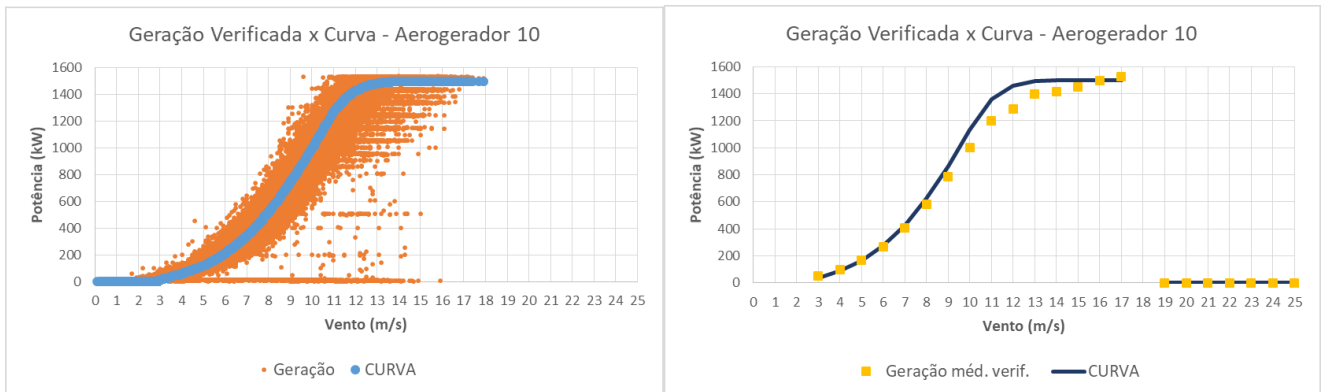


Figura 68 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 10 (Próprio autor)

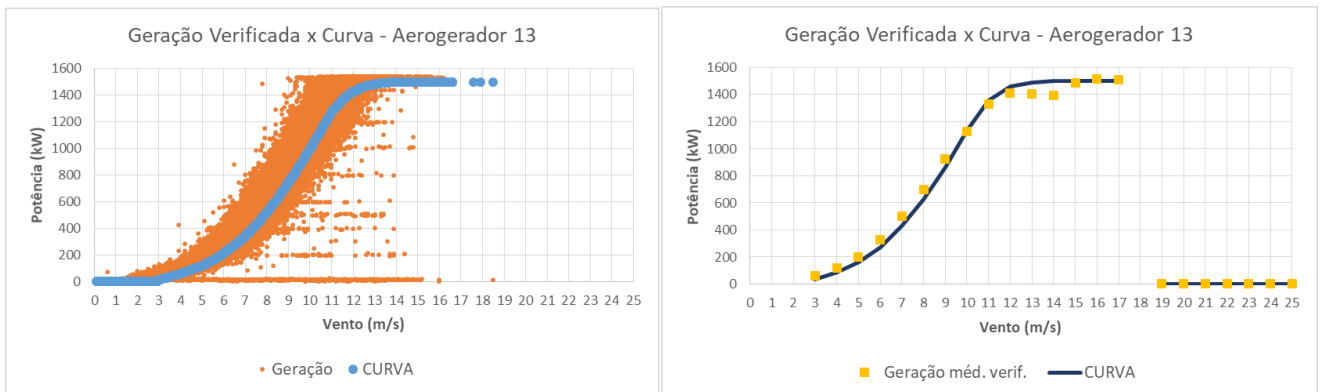


Figura 69 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 13 (Próprio autor)

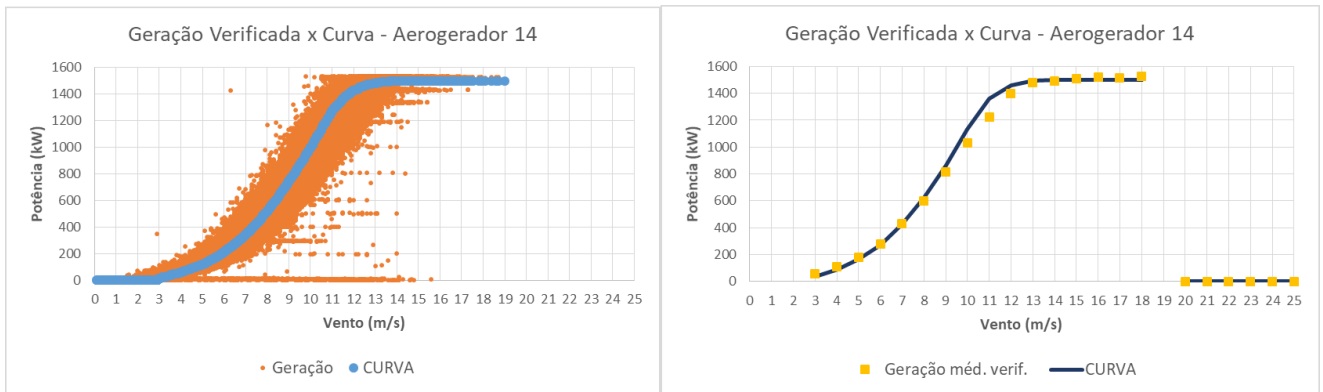


Figura 70 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 14 (Próprio autor)

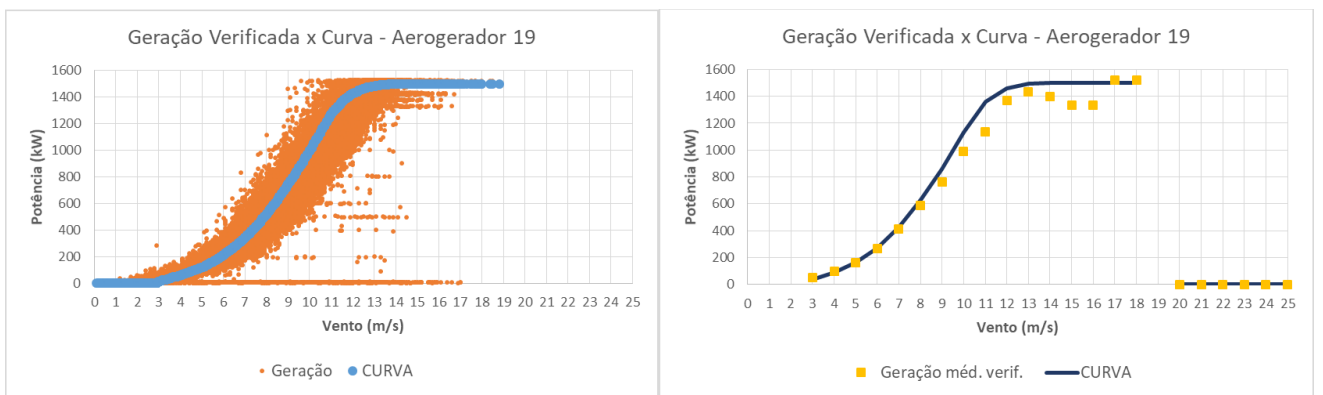


Figura 71 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 19 (Próprio autor)

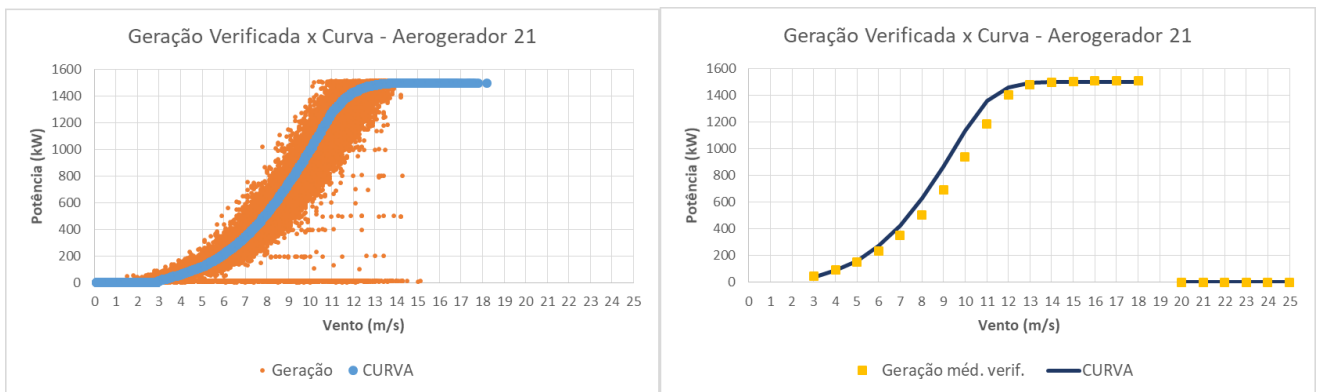


Figura 72 - Comparação entre o desempenho esperado x verificado - AE 21 (Próprio autor)

4.5.3. Desempenho médio dos Aerogeradores

Dos dados aqisitados na presente análise, foram obtidos os desvios médios, para cada faixa de velocidade de vento, por aerogerador, e os desvios médios do período entre julho/2019 e julho/2020.

Os resultados dos aerogeradores do projeto original, ainda não reformados seguem na Tabela 5 e no gráfico da Figura 73. E os resultados dos aerogeradores reformados seguem na Tabela 6 e no gráfico da Figura 74, a seguir.

| DESEMPENHO MÉDIO DOS AEROGERADORES DO PROJETO ORIGINAL, NÃO REFORMADOS | | | | |
|--|--------------------|------------------|-----------------------------------|--------------|
| | Geração verificada | Geração esperada | Disponibilidade dos aerogeradores | Desvio médio |
| AE03 | 500,3 | 620,9 | 39,02 | -19% |
| AE08 | 430,5 | 581,6 | 29,79 | -26% |
| AE09 | 391,6 | 583,8 | 32,89 | -33% |
| AE11 | 333,7 | 528,9 | 28,75 | -37% |
| AE22 | 430,4 | 576,1 | 34,32 | -25% |
| AE25 | 428,6 | 644,9 | 30,54 | -34% |

Tabela 5 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores do projeto original - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor)

Desempenho médio dos Aerogeradores no Período de Julho/2019 a Julho/2020

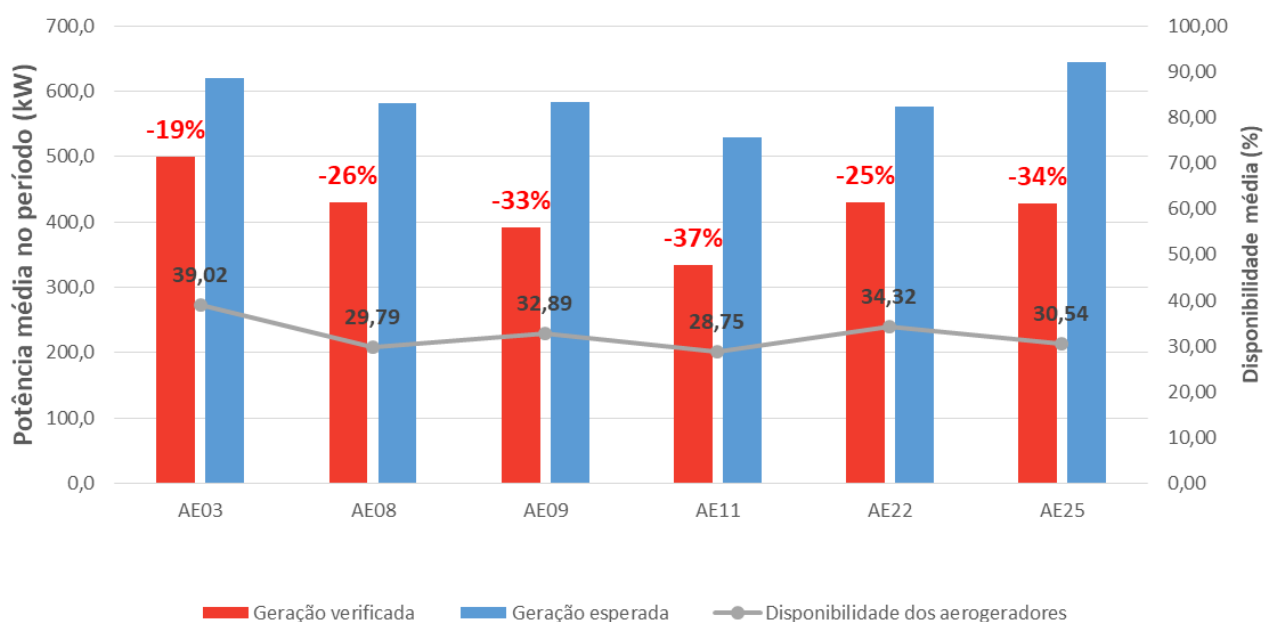


Figura 73- Desempenho médio de geração dos Aerogeradores do projeto original - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor)

DESEMPENHO MÉDIO DOS AEROGERADORES REFORMADOS

| | Geração verificada | Geração esperada | Disponibilidade dos aerogeradores | Desvio médio |
|------|--------------------|------------------|-----------------------------------|--------------|
| AE06 | 606,6 | 684,3 | 98,61 | -11% |
| AE10 | 609,2 | 665,7 | 96,38 | -8% |
| AE13 | 583,0 | 555,8 | 96,24 | 5% |
| AE14 | 623,2 | 646,1 | 96,69 | -4% |
| AE19 | 552,6 | 602,0 | 96,68 | -8% |
| AE21 | 595,3 | 668,1 | 96,18 | -11% |

Tabela 6 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores reformados - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor)

Desempenho médio dos Aerogeradores no Período de Julho/2019 a Julho/2020

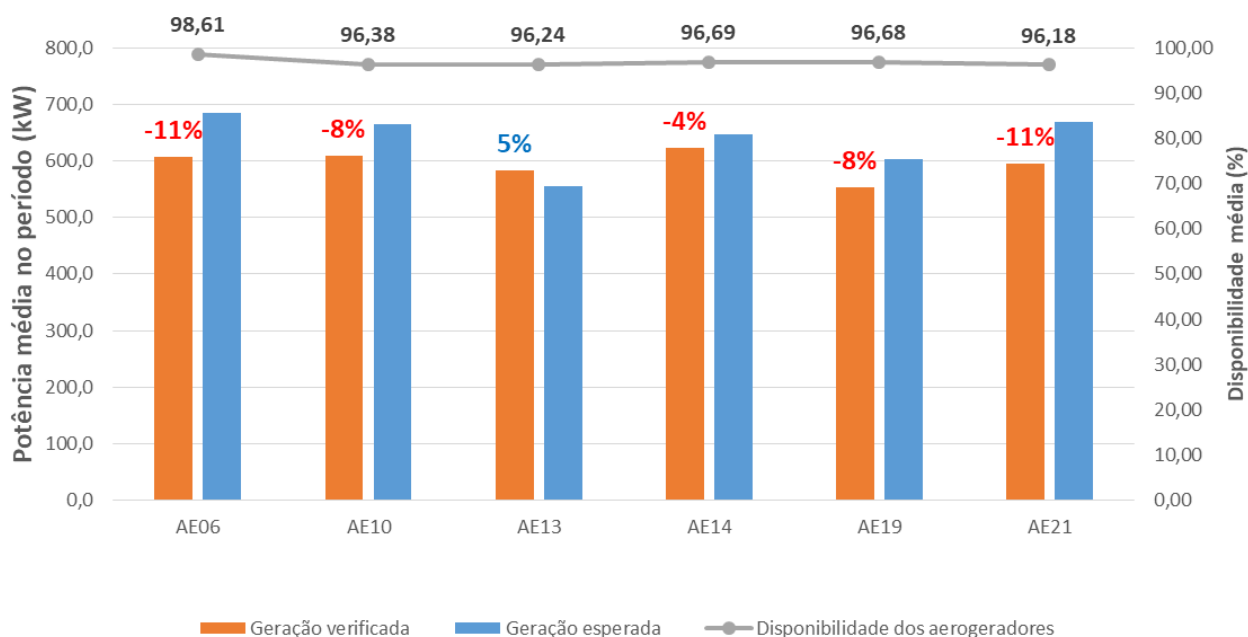


Figura 74 - Desempenho médio de geração dos Aerogeradores reformados - período: julho/2019 a julho/2020 (Próprio autor)

Como se pode analisar na Figura 73 e na Tabela 5, os aerogeradores do projeto original estão com desempenho bastante prejudicados, principalmente pela baixa disponibilidade, que se verificou em 32,6% de disponibilidade média, no período. O desvio médio de geração, em relação ao esperado, nos momentos em que os aerogeradores estavam em funcionamento, ficou em -29%.

Já em relação aos aerogeradores reformados, a situação é bem diferente. As disponibilidades médias ficaram acima de 96%, e os desvios entre a geração esperada e a

verificada ficaram da ordem de 10%, sendo que, um aerogerador (AE13) apresentou inclusive um desempenho acima do esperado.

Para uma primeira análise dos dados, pode-se considerar que o desempenho dos aerogeradores reformados, de forma geral, foi bastante satisfatório.

Os resultados atestam a qualidade da reforma dos aerogeradores e mostram a importância de se avaliar constantemente o desempenho dos aerogeradores.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Avaliando toda a descrição do projeto dos aerogeradores detalhada no CAPÍTULO 3, verifica-se que todos os componentes foram pensados de forma a se buscar o melhor desempenho em termos operacionais e de minimização de manutenção. Alguns pontos principais do projeto são:

- Projeto desenvolvido por empresa alemã com mais de 20 anos de experiência e em funcionamento em vários países.
- Gerador síncrono, multipolos, com tecnologia a ímã permanente, sem caixa de transmissão e sem anéis coletores, que são componentes que apresentam elevado índice de falhas em outras topologias e grande necessidade de manutenção.
- Enrolamento do gerador protegido contra substâncias nocivas contidas no ar, o que é extremamente importante em geradores instalados em áreas litorâneas e com alto índice de corrosão.

Apesar desses qualitativos, verificou-se que falhas na execução do projeto original, principalmente em relação a vedação e ao isolamento dos geradores, levaram a inúmeras queimas, prejudicando drasticamente a disponibilidade e o desempenho do parque.

A busca de bons fornecedores no mercado, culminando com a contratação de uma excelente empresa nacional, que refez toda especificação técnica dos aerogeradores, empregando as melhores práticas de recuperação e fabricação dos componentes, tem mostrado a excelente qualidade da solução empregada, refletida diretamente na disponibilidade dos aerogeradores recuperados (as disponibilidades médias estão acima de 96%).

A análise dos dados de disponibilidade, velocidade do vento e geração dos aerogeradores reformados, aponta que os desvios entre a geração esperada e a verificada ficaram da ordem de 10%, atestando preliminarmente a qualidade da reforma dos aerogeradores.

A análise também mostra a importância de se avaliar constantemente o desempenho dos aerogeradores, de forma a diagnosticar possíveis falhas e agir preventivamente.

Um trabalho importante de continuidade do presente estudo, a fim de refinar a análise de desempenho, pode ser no sentido de realizar um tratamento estatístico dos dados, buscando identificar dados incorretos oriundos do sistema de aquisição, de modo a removê-los da análise e melhorar a avaliação.

Outra importante continuidade poderá buscar cruzar as informações de desempenho, para cada faixa de velocidade do vento, com outros dados do sistema digital do parque, de forma a identificar os motivos dos desvios e as possíveis soluções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alewine, Kevin e Chen, William. 2012. A Review of Electrical Winding Failures in Wind Turbine Generators. *Artigo*. s.l. : IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012. Vols. Vol. 28, No. 4.

Amarante, Odilon A. Camargo do, et al. 2010. Atlas Eólico Minas Gerais. *Atlas Eólico Minas Gerais*. Belo Horizonte, MG : Cemig, 2010. 551.5185098151.

Aneel. Energia Eólica. *Energia Eólica 6*.

Dobbin, Trevor Matheus Carlos Vilella do Carmo. 2014. Modelagem e Controle de Um Aerogerador Duplamente Alimentado Com Turbina de Velocidade Variável para Estudos de Estabilidade Eletromecânica. *Dissertação de Mestrado - COPPE - UFRJ*. Rio de Janeiro : s.n., 2014.

Dutra, Ricardo. 2008. *Energia Eólica - Princípios e Tecnologias*. Rio de Janeiro : CEPTEL, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2018. *PARTICIPAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS NOS LEILÕES DE ENERGIA NO BRASIL*. Rio de Janeiro : EPE, 2018. EPE-DEE-NT-041/2018-r0.

Junior, Ernano Arrais. 2014. Estratégia de Conversor para Interligação de Sistema de Geração Eólica à Rede Elétrica. *Dissertação de mestrado - UFRN*. Natal : s.n., 2014.

Junior, Valmor Ricardi. 2018. Acionamento de Geradores Síncronos a Ímas Permanentes com Bobinas Abertas em Sistemas de Conversão de Energia Eólica. *Dissertação de mestrados - Programa de Pós Graduação da UFMG*. Belo Horizonte : s.n., 2018.

Lemos, Daniel Faro Amaral. 2012. Aspectos Técnicos da Energia Eólica. *Apostila*. Natal : Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis– CTGÁS-ER, 2012.

Mendes, Victor Flores. 2009. Avaliação do Comportamento de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado Durante Afundamentos de Tensão Equilibrados e Desequilibrados. *Dissertação de*

mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Belo Horizonte : s.n., 2009.

Oliveira, João Paulo Jorge de. 2018. Geradores Síncronos a Imãs Permanentes Aplicados a Aerogeradores: Modelagem, Obtenção de Parâmetros e Validação Laboratorial. *Dissertação de Mestrado - UNB.* Brasília : s.n., 2018.

Pinto, Milton de Oliveira. 2012. *Fundamentos da Energia Eólica.* Rio de Janeiro : LTC, 2012. ISBN 978-85-216-2160-7.

Silva, Prof. Selênio Rocha. 2013. “Tecnologia em Aerogeradores”. *Apostila “Tecnologia em Aerogeradores”.* Belo Horizonte : s.n., 2013.

Silveira, Karoline Claro Pereira. 2015. Análise de Uma Configuração de Parque Eólico Baseada em Sistema de Transmissão Multiterminal CC Com Conversores Multinível Modular. *Dissertação de Mestrado - COPPE - UFRJ.* Rio de Janeiro : s.n., 2015.

Zhu, Caichao e Li, Yao. 2018. Reliability Analysis of Wind Turbines. *Artigo de Revista Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines.* Chongqing, China : Edited by Kenneth Eloghene Okedu, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74859.

Anexo 1 – Escopo Detalhado da Reforma

(Fonte: Empresa proprietária do parque eólico em estudo)

ESCOPO

- Desmontagem da máquina em fábrica
 - Registro fotográfico das condições de recebimento da máquina;
 - Desmontagem do rolamento do eixo oco;
 - Saque do rotor;
 - Saque do eixo principal;
 - Inspeção da condição do rolamento;
 - Inspeção visual da condição de conservação da carcaça;
 - Inspeção visual e avaliação da condição do sistema de freio;
 - Inspeção visual da condição do pacote de chapas;
 - Inspeção visual dos parafusos;
 - Inspeção visual da condição das roscas do eixo e necessidade de recuperação com Helicoli;
 - Elaboração do escopo final consolidado a partir das informações levantadas da máquina.

- Inspeção e avaliação das roscas estruturais
 - Inspeção visual da condição e do nível de oxidação das roscas estruturais;
 - Definição da quantidade e posição das roscas a serem recuperadas.

- Rebobinagem do estator
 - Remoção das bobinas originais
 - Corte e remoção das ligações do enrolamento;
 - Remoção dos anéis de fechamento e ligação das bobinas;
 - Remoção das cunhas magnéticas de fechamento das ranhuras;
 - Remoção das bobinas individualmente;
 - Limpeza das ranhuras eliminando os resíduos dos isolantes das bobinas;
 - Limpeza completa das ranhuras e correção de irregularidades; e
 - Verificação completa das ranhuras eliminando possíveis irregularidades dos canais e chanfros de fixação das cunhas.

- Fabricação do conjunto de bobinas
 - Bobinas do tipo pré-moldada multi-espiras para impregnação pelo sistema VPI;
 - Bobinas fabricadas a partir das informações do projeto original e adequadas ao sistema de isolamento WEG;
 - Isolação das bobinas com materiais de classe "F" ou superior;
 - Realização da limpeza das pontas das bobinas permitindo a posterior conexão entre elas e o fechamento das ligações do enrolamento;
 - Fornecimento de todos os materiais de montagem do enrolamento, incluindo separadores, calços, cunhas, cordões de amarração, resinas e vernizes. Todos estes com classe "F" ou superior;
 - Amarração das cabeças das barras realizada através de calços separadores com propriedades expansivas quando submetidas à impregnação e cura; e
 - Fabricação de estocos, calços das ranhuras entre bobinas e calços de amarração das cabeças em classe "F" de isolamento.

- Rebobinagem
 - Inserção das novas bobinas na ranhura;
 - Amarração das bobinas através de calços com isolante expansivo;
 - Travamento e fixação das bobinas com calço e cunha nas extremidades;
 - Execução de testes elétricos para identificar falhas no processo;
 - Montagem das cunhas em todas as ranhuras, utilização de cunhas magnéticas para fechamento das ranhuras;
 - Instalação de 12 (doze) sensores de temperatura tipo PT-100 no enrolamento do estator;
 - Reisolação dos barramentos dos circuitos das fases com materiais e procedimento semelhantes ao de isolamento das barras;
 - Execução do fechamento das bobinas interligando todos os condutores com solda a base de prata mantendo os mesmos isolados entre si;
 - Montagem do barramento dos circuitos das fases e grupos, e buchas isolantes com solda a base de prata e isolamento dos pontos de conexão

com os mesmos materiais e procedimento da isolação das conexões das bobinas inferiores e superiores;

- o Substituição dos cabos de ligação, utilizando cabos extra flexíveis com isolamento de silicone classe de temperatura "H", conforme original;
 - o Limpeza geral dos resíduos;
 - o Inspeção elétrica conforme ensaios estáticos abaixo:
 - o Hipot CA (2Un+1) kV com mínimo de 1500 V;
 - o Resistência de isolamento;
 - o Loop test;
 - o Resistência ôhmica dos enrolamentos; e
 - o Surge test.
- Impregnação
 - o Limpeza geral dos resíduos existentes e preparação para impregnação;
 - o Tratamento térmico do estator completo bobinado;
 - o Dupla impregnação a vácuo e pressão (VPI) com resina epóxi classe de temperatura "F";
 - o Tratamento térmico do estator após impregnação para cura completa da resina isolante; e
 - o Limpeza dos resíduos de impregnação.
 - Inspeção final elétrica do estator
 - o Realização dos seguintes ensaios:
 - o Hipot CA (2Un+1) kV com mínimo de 1500 V;
 - o Resistência de isolamento;
 - o Loop test;
 - o Resistência ôhmica dos enrolamentos;
 - o Surge test; e
 - o Spray test.

- Substituição dos ímãs do rotor
 - Remoção dos ímãs
 - Aplicação de calor na superfície dos ímãs;
 - Remoção do sistema de proteção e isolamento dos ímãs;
 - Remoção dos ímãs já desmagnetizados através de choque mecânico;
 - Remoção de todos os ímãs;
 - Limpeza completa manual da superfície do costado do rotor;
 - Realização de jateamento com abrasivo adequado eliminando irregularidades existentes na superfície da peça;
 - Limpeza completa das peças e preparação da superfície para pintura;
 - Pintura da carcaça do rotor; e
 - Limpeza dos resíduos e proteção das partes usinadas.

- Instalação dos ímãs
 - Jateamento com granalha especial na região dos ímãs;
 - Preparação da resina para colagem dos ímãs;
 - Instalação de um conjunto de polos simultaneamente;
 - Aplicação de resina preenchendo todos os espaços vazios entre ímãs e costado do rotor;
 - Cura da resina de fixação;
 - Remoção do dispositivo;
 - Limpeza do dispositivo;
 - Posicionamento dos ímãs no dispositivo;
 - Inspeção dos ímãs posicionados, avaliando possível danos existentes;
 - Montagem de todos os polos, consecutivamente;
 - Aplicação de resina de proteção final da superfície dos polos; e
 - Acabamento final da superfície de isolamento dos ímãs.

- Substituição dos rolamentos
 - Remoção dos rolamentos originais;
 - Fornecimento dos novos rolamentos;
 - Substituição da graxa (Mobil SHC Grease 460 WT); e
 - Montagem dos rolamentos.

- Componentes diversos
 - Vedação da carcaça lado DOWNWIND
 - Fabricação da defletora com escova;
 - Fabricação de chicane de vedação; e
 - Montagem e instalação do sistema de vedação na máquina.

- Alteração da conexão do anel de ligação
 - Soldagem dos cabos de ligação aos barramentos;
 - Isolação dos pontos de conexão; e
 - Fixação de prensa-cabos na região de passagem dos cabos pela defletora respectiva.

- Substituição dos rebites da defletora de água
 - Remoção dos rebites originais;
 - Fixação dos novos rebites em aço inox rosçáveis; e
 - Instalação de amuelas em aço inox para fixação da defletora.

- Jateamento e pintura intermediária da estrutura do estator e roda polar
 - Jateamento abrasivo;
 - Recuperação parcial de pontos de corrosão; e
 - Tratamento com pintura das peças jateadas.
 - Substituição da caixa de ligação de acessórios por modelo padrão WEG
 - Substituição dos tampões de borracha circulares do anel de reforço
 - Substituição de todos os elementos de fixação, considerados como estruturais, dos seguintes componentes:
 - Tampas de fechamento dos rolamentos UPWIND e DOWNWIND;
 - Conjunto de freio;
 - Eixo oco na roda polar;
 - Eixo principal na estrutura do estator; e
 - Anel de reforço.

- Montagem em fábrica
 - Montagem do eixo principal no estator;
 - Montagem do rolamento no eixo;
 - Montagem do rotor;
 - Medição do entreferro; e
 - Montagem do eixo oco.

- Pintura e preparação das peças para transporte
 - Aplicação de óleo anti-corrosivo nas partes usinadas e de encaixes;
 - Identificação dos cabos de ligação;
 - Pintura conforme Plano de Pintura WEG 212 P na cor original;
 - Inspeção de pintura; e
 - Embalagem e acomodação no caminhão para transporte.

- Substituições ou serviços adicionais realizados
 - Substituição de mangueira hidráulica 3/8" + conexões referente ao freio;
 - Substituição parafuso do flange do volante do rotor lock de travamento do rotor Sext IN RP M8x60;
 - Substituição do pino de travamento da grade de acesso ao freio;
 - Substituição da chapa de travamento radial da grade de acesso ao freio;
 - Substituição do pino de travamento do rotor lock;
 - Substituição do feltro da tampa externa UPWIND;
 - Substituição do feltro do suporte do selo do rolamento DOWNWIND no eixo principal;
 - Polimento do Ø460 do eixo principal referente ao rolamento UPWIND;
 - Polimento do Ø710 do eixo principal referente ao rolamento DOWNWIND;
 - Substituição do tampão em formato oblongo de borracha do anel de reforço;
 - Substituição de 4 defletoras externas UPWIND do rotor;
 - Substituição de 1 defletora interna UPWIND do rotor;
 - Substituição da tampa cega de acesso ao freio;
 - Recuperação de 30 chapas de fixação das defletoras externas da roda polar;

- Substituição das chapas inox de nivelamento do rolamento upwind interno 460x320x0,1mm;
 - Substituição das chapas inox de nivelamento do rolamento upwind externo 800x655x0,1mm;
 - Substituição das chapas inox de nivelamento do rolamento downwind 970x870x0,1mm;
 - Retirada da resina original impregnada na estrutura do estator.
- Exclusões do escopo de fornecimento
 - Reparo e/ou substituição do conjunto de freio;
 - Transporte da máquina do parque eólico até a WEG e, vice-versa;
 - Serviços nos sistemas de retificação, de proteção, de comando e demais componentes do sistema de controle do aerogerador;
 - Desmontagem, montagem e remoções em campo;
 - Custos de inspeções dos representantes por parte do cliente;
 - Fornecimento do conjunto de freio do gerador;
 - Fornecimento dos estudos de engenharia relativos à avaliação do projeto da máquina; e
 - Start-up, comissionamento e/ou acompanhamento de partida da máquina em campo.