

**Universidade Feevale
Programa Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais**

**PRODUÇÃO TÉCNICA: PRODUTO
MATERIAL NÃO PATENTEÁVEIS**

Moisés de Mattos Dias

Alessandro Sarmento dos Santos

Jonata Rocha Fett

Ramon Fernando Hans

**Novo Hamburgo
2018**

INTRODUÇÃO

A presente produção técnica tem como objetivo registrar junto a biblioteca o produto não patenteável desenvolvido durante o Programa Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, no qual um dos participantes foi o aluno Alessandro Sarmiento dos Santos. A pesquisa foi realizada no período de 2016 a 2018. O produto desenvolvido se refere ao **DESENVOLVIMENTO (PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTES) DE UM AEROGERADOR HORIZONTAL DE 2,5 kW**

Este projeto teve por objetivo o desenvolvimento (concepção, construção e testes) de um aerogerador de pequeno porte, 2,5 kW, tomando como base um equipamento comercial de mesma magnitude. O projeto consistiu no desenvolvimento do gerador elétrico, das pás, do controlador e das principais peças mecânicas móveis e fixas. O gerador síncrono trifásico, com ímãs permanentes, foi montado sobre a carcaça de um motor de indução de mesma potência, alterando-se o bobinamento e o núcleo do rotor, o qual, além de ímãs permanentes, foi construído através dos processos da Metalurgia do Pó, utilizando-se ferro puro sinterizado. As pás foram desenvolvidas a partir de fibra de vidro com resina epóxi reforçada. O controlador é constituído de um retificador, um conversor CC-CC e de um inversor, todos controlados por um CLP, que também monitora as tensões geradas pelo aerogerador, possibilitando assim que o mesmo seja freado quando do excesso de vento, controle o qual se realiza através de um curto circuito das bobinas do gerador, a partir de um contator. Um segundo controlador também desenvolvido, de características mais simples. Por questões de segurança também foi acoplado um freio mecânico. A relação entre o giro das pás e do eixo do gerador trifásico realiza-se através de um multiplicador de velocidade de 1 para 6, ou seja, enquanto o eixo das pás gira em média a 300 RPM, o eixo do gerador gira uma velocidade média de 1.800 RPM. Também foram desenvolvidas e especificadas as peças móveis, como engrenagens, eixo e acoplamentos, bem como as fixas, relativas a carenagem e ao leme. Finalmente o aerogerador foi montado no telhado do prédio verde da Universidade Feevale, sendo submetido a testes de desempenho, comparados a um aerogerador comercial implantado no mesmo local.

Para o cadastro da presente produção técnica foi utilizado o Relatório de Produção Técnica da CAPES, o qual apresenta metodologias de avaliação da produção Técnica e Tecnológica, com 21 diferentes produtos. O presente produto

desenvolvido refere-se a um: Processo / Tecnologia e Produto / Material não patenteáveis (CAPES, 2019).

PRODUTO / MATERIAL NÃO PATENTEÁVEIS

Definição: Aerogerador Horizontal de 2,5 kW.

Descrição do produto e de sua finalidade: Aerogerador de 2,5 kW com gerador síncrono trifásico de 4 pólos, com ímãs permanentes de Nd-Fe-B e núcleo do rotor a partir de ferro sinterizado. As pás possuem 1,8 m, construídas a partir de fibra de vidro com resina epóxi reforçada. Velocidade nominal das pás de 300 RPM e eixo do gerador de 1.800 a partir de um multiplicador mecânico. Controlador capaz de gerar tensão alternada trifásica de 220 v / 60 Hz.

Avanços tecnológicos/grau de novidade:

- (X) Produção com alto teor inovativo: Desenvolvimento com base em conhecimento inédito;
- () Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos;
- () Produção com baixo teor inovativo: Adaptação de conhecimento existente;
- () Produção sem inovação aparente: Produção técnica.

Para o desenvolvimento deste produto, se objetivou atender a uma necessidade da indústria, utilizando conhecimentos teóricos e práticos no desenvolvimento de Aerogeradores de Pequeno Porte. Assim a partir de um Aerogerador de 2,5 kW importando, este foi estudado e, a partir do mesmo, foi desenvolvido outro aerogerador de potência similar, contudo, após estes estudos preliminares e o entendimento do funcionamento de todas as partes deste aerogerador, para o protótipo desenvolvido neste projeto, praticamente este foi totalmente modificado, resultando em um projeto muito diferente do aerogerador importado. Com exceção da torre, por questões de segurança e certificação, todas as outras partes que

constituem um aerogerador foram desenvolvidas na Universidade ou empresas prestadoras de serviços, como o gerador síncrono trifásico, as pás, toda a parte mecânica, e o controlador. Cita-se que, até onde se tem conhecimento, nenhuma universidade ou instituição de ensino do Brasil desenvolveu um Aerogerador desta faixa de potência, totalmente funcional, em operação.

Modalidade:

- Processos/produtos industriais não patenteáveis
- Técnica na área de saúde
- Material de referência
- Cepas não patenteadas
- Produtos naturais
- Outro: _____

Titular: Moisés de Mattos Dias

Co-titulares: Alessandro Sarmiento dos Santos
Jonata Rocha Fett
Ramon Fernando Hans

Há licenciamento: sim
 não

O produto não foi licenciado, entretanto, durante o período da pesquisa, foram realizados testes de geração de energia elétrica, comparativamente à aerogeradores comerciais, e o aerogerador desenvolvido mostrou-se praticamente com o mesmo desempenho dos aerogeradores produzidos nacionalmente ou importados. Os ensaios foram realizados nas instalações dos laboratórios de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Feevale. Cita-se que o aerogerador desenvolvido neste projeto, embora tenha se baseado em um aerogerador de mesma potência, ou seja, de 2,5 kW, o gerador trifásico desenvolvido apresentou potência superior a 2,9 kW, contudo, o mesmo foi limitado em 2,5 kW devido as limitações das outras partes que compõe a máquina,

como as pás, a estrutura mecânica e o controlador. O projeto também serviu para a concepção de outros aerogeradores, com topologias diferentes, os quais estão previsto para serem desenvolvidos futuramente na Universidade Feevale. Cita-se também que o Me Alessandro Sarmiento dos Santos, aluno do mestrado que realizou sua dissertação sobre o desenvolvimento deste aerogerador, é empresário do setor de energia, e já demonstrou a intenção em, futuramente, montar uma planta para a produção industrial deste aerogerador, contudo, a conjuntura econômica no Brasil, não é propícia a grandes investimentos, pelo menos no presente momento.

Inventores/autores:

Docentes Autores: Moisés de Mattos Dias

Docentes Autores: Ramon Fernando Hans

Discentes Autores: Alessandro Sarmiento dos Santos

Discentes Autores: Jonata Rocha Fett

Conexão com a Pesquisa

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Mestrado Profissional em Tecnologia dos Materiais e Processos Industriais

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais.

Recursos e vínculos da Produção Tecnológica

Data início:01/03/2016 Data término: 31/12/2018

Total investido: R\$ 50.000,00

Fonte do Financiamento: SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Demandante: () Demanda externa

() Edital

(X) Demanda interna

Há um esforço do governo federal e de certa forma global, no sentido de descentralizar a produção de energia das grandes usinas hidráulicas bem como parques eólicos e solar, e neste sentido, o governo vem incentivando a produção local de energia, no caso, a partir de pequenos painéis solar e aerogeradores. Além do mais, a produção de energias renováveis reduz a emissão de poluentes na atmosfera no caso da geração a partir de usinas termoelétricas. Por este motivo foi proposto este projeto da área de energias renováveis, o qual, além da implantação de um Sistema Híbrido para Geração de Energia a partir de Fontes Renováveis, também foi desenvolvido um aerogerador de 2,5 kW.

Situação atual da Produção:

- Piloto/Protótipo
- Em teste
- Finalizado/implantado

Aplicabilidade da Produção Tecnológica:

Descrição da Abrangência realizada: Aplicação da técnica para identificar e relacionar todas as etapas para a construção e testes de um aerogerador horizontal de pequeno porte de 2,5 kW.

Descrição da Abrangência potencial: Replicar essa técnica de desenvolvimento e construção de aerogeradores de pequeno porte, seja em escala industrial possibilitando a fabricação destes, ou mesmo em pequena escala para quem tem interesse na montagem e uso destes aerogeradores.

Descrição da Replicabilidade: Dispositivo relativamente fácil de replicar, sem dificuldade operacional para produzir.

A produção necessita estar no repositório? Sim

Classificar e justificar as produções e subtipos em técnico ou tecnológico:

Este produto é tecnológico, pois, como já mencionado pode ser utilizado para gerar energia a partir de aerogeradores de pequeno porte. Além disso pode ser reproduzido com facilidade.

Documentos Anexados (em PDF)

- (x) Declaração emitida pela organização cliente
- (x) Relatório completo em PDF

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS ESTÃO NO FINAL DO RELATÓRIO DETALHADO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

- 1.1.1. **Geração Distribuída e Microgeração**
- 1.1.2. **Caracterização da Geração de Energia Elétrica no Brasil**
- 1.1.3. **Geração Energia Renováveis Conectadas ao Sin**
- 1.1.4. **Geração Distribuída com Enfoque Microgeração no Brasil**

1.2. OBJETIVO GERAL

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

2.2. AEROGERADORES

- 2.2.1. **Contexto Histórico dos Aerogeradores e Energia Eólica**
- 2.2.2. **Funcionamento Básico de um Aérogerador**
- 2.2.3. **Aerogerador Horizontal de Pequeno Porte**
- 2.2.4. **Componentes de um Aérogerador de Eixo Horizontal**

2.3. METALURGIA DO PÓ E MATERIAIS MAGNÉTICOS

- 2.3.1. **Metalurgia do Pó**
- 2.3.2. **Materiais Magnéticos Macios e Ligas Sinterizadas**
- 2.3.3. **Ímãs Permanentes**

2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

2.5. GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

- 2.5.1. **Campo, Indução e Fluxo Magnéticos**
- 2.5.2. **Permeabilidade Magnética Relativa**
- 2.5.3. **Magnetização e Curva de Histerese**
- 2.5.4. **Indução Magnética em Núcleos**

2.6. MÁQUINAS ELÉTRICAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS

- 2.6.1. **Máquinas Síncronas Convencionais**
- 2.6.2. **Perdas e Fatores que Melhoram o Desempenho em Máquinas Elétricas**
- 2.6.3. **Máquinas Síncronas com Ímãs Permanentes**
- 2.6.4. **Máquinas Síncronas com Núcleos por Metalurgia do Pó**

2.7. SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

3.2. ESTUDO DO FERRO SINTERIZADO

3.2.1. Obtenção dos Corpos de Prova

3.2.2. Microestrutura e Análise Dimensional

3.2.3. Propriedades Elétricas e Magnéticas

3.2.4. Propriedades Mecânicas

3.3. DESENVOLVIMENTO DO GERADOR TRIFÁSICO

3.3.1. Desenvolvimento do Rotor

3.3.2. Simulação da Máquina Trifásica

3.3.3. Montagem da Máquina Síncrona Trifásica

3.3.4. Ensaio da Máquina Síncrona em Bancada

3.4. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA MECÂNICA

3.4.1. Sistema Mecânico

3.4.2. Pás e Bico do Aerogerador

3.4.3. Torre do Aerogerador

3.5. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO FERRO SINTERIZADO

4.1.1. Análise Dimensional e Micrografias

4.1.2. Análise das Propriedades Físicas do Ferro Sinterizado

4.2. GERADOR TRIFÁSICO

4.2.1. Resultado das Simulações

4.2.2. Resultados dos Ensaio em Bancada

4.3. TESTES DO AEROGERADOR

4.4. QUADRO COMPARATIVO COM AEROGERADORES COMERCIAIS

5. CONCLUSÕES

ANEXO – DESENHO DIMENSIONAL DAS PEÇAS DO AEROGERADOR

REFERÊNCIAS. BIBLIOGRÁFICAS

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1. Geração Distribuída e Microgeração

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, traduzido pela ampliação do potencial econômico, da inclusão massiva populacional com acesso ao sistema de fornecimento de energia, bem como pela evolução tecnológica ligada necessidades de suprimento e ou controle elétrico, vetorizadas tanto aos setores produtivos, como indústria, comércio e agricultura, quanto aos de lazer e domésticos, geraram maiores preocupações com as formas de geração de energia, principalmente nos quesitos de deterioração de recursos naturais, degradação do meio ambiente, e nos aspectos relativos a sustentabilidade.

Uma forma alternativa de energia é a geração distribuída (GD), onde inscrito neste campo da matriz elétrica Nacional, encontra-se a microgeração, a qual apresenta grande representatividade no tocante quantitativo e de capacidade de geração instalada. Ainda no subgrupo da microgeração, observa-se pelos indicadores, o crescimento acentuado desta modalidade ao longo dos últimos três anos, fatores que se devem principalmente em face a desmistificação tecnológica, redução dos custos de implantação, e por consequência o retorno mais rápido do investimento, bem como pelo fato de incentivos legislativos.

Pois é na área da microgeração, que se enquadra a aplicabilidade do equipamento por este projeto proposto, um aerogerador de baixa potência 2,5 kW, que intenciona numa proposta futura, servir comercialmente como uma fonte alternativa complementar de energia à pequenos consumidores, de forma a propiciar o crédito de energia em suas curvas de carga mensais.

A seguir apresenta-se de forma resumida um panorama simplificado da matriz de geração no Brasil, com enfoque nos números das energias renováveis, e ainda sob o horizonte da microgeração.

1.1.2. Caracterização da Geração de Energia Elétrica no Brasil

O comportamento da geração de energia, em GWh, apresentados juntos aos resultados históricos da operação do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), disponibilizados no seu site, resumido entre os anos de 2010 e 2017, e ainda observado as contribuições das principais fontes de geração interligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), está ilustrado conforme a figura 1 [1].

Já na tabela 1, apresenta-se um horizonte da capacidade instalada de geração potência elétrica ativa estipulada ao SIN, discriminada de acordo com as tipologias de fontes utilizadas no Brasil, dados de 2016 disponibilizados no site do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

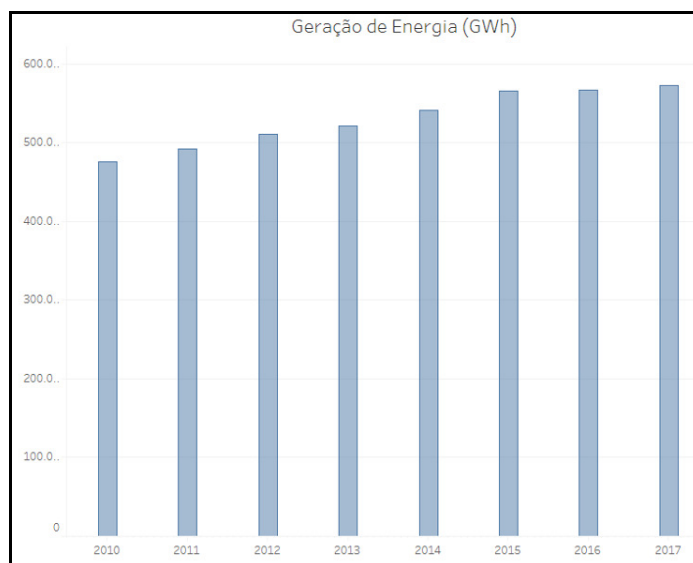


Figura 1 – Geração de energia elétrica do SIN em GWh [1]

Tabela 1 – Capacidade de geração instalada do SIN em MW ano de 2016 [1]

Item	Tipologia de Geração	Potência Instalada [MW]	%
1	Hidroelétrica	101598	73,16%
2	Termoelétrica Gás + GNL	12414	8,94%
3	Eólica	9611	6,92%
4	Termoelétrica Óleo + Diesel	4732	3,41%
5	Biomassa	7640	5,50%
6	Solar	16	0,01%
7	Nuclear	1990	1,43%
8	Outras	867	0,62%
Resumo		138868	100,00%

De acordo com Giannini, Dutra e Guedes (2013), a demanda de energia elétrica no mundo continuará a crescer até 2035, onde estima-se que a taxa deste incremento seja em torno de 45% desta demanda, o que condiciona uma preocupação com o planejamento acerca do suprimento de energia elétrica as necessidades da nação, sob a ótica da sustentabilidade do fornecimento, correlacionado a utilização de recursos fósseis, bem como pelas formas de geração convencionais, no Brasil sendo as principais, hidroelétrica, termoelétricas (gás, óleo, diesel) e nuclear ONS, que contribuem de uma forma ou de outra com efeitos nocivos ao meio ambiente [1].

1.1.3. Geração Energia Renováveis Conectadas ao SIN

Aspectos como alto custo de implantação, desconhecimento tecnológico e questões de confiabilidade, ainda são fatores que contribuem para com as dificuldades do avanço da magnitude do percentual de fontes de geração utilizando energias renováveis, as quais são oriundas de recursos naturais que são naturalmente restabelecidos.

De forma a atenuar a necessidade da ampliação nas matrizes de geração convencional, em evidência destacaram-se as gerações por fontes de energia renováveis, no Brasil sendo as principais, eólica, solar e biomassa, ONS, que vem se expandindo no território Nacional. A figura abaixo mostra a evolução da geração eólica no Brasil, compreendida dos anos de 2010 e 2017, em GWh, que em 2017. As principais tipologias de usinas interligadas ao SIN são eólicas e solares, onde conforme tabela abaixo, observa-se o predomínio da primeira em potência média aferida (MW-médio) e volume de energia (GWh) gerada [1].

Tabela 2 – Fontes de Geração de Energia Renováveis Interligadas ao SIN [1]

Item	Tipologia de Geração	MW-médio		GWh	
		2017	2018	2017	2018
1	Eólica	4833	3962	42336	5610
2	Solar	74	236	652	334

A tabela 2, cujos dados de 2018 referem-se até a data do dia 28 de fevereiro inclusive, ressalta também um crescente aumento da geração de potência atribuídas as usinas solares, as quais estão interligadas ao SIN. A evolução do volume da geração de energia elétrica, associado a fonte de tipologia eólica, ao longo dos anos de 2010 e 2017, estão representados na figura 2 como segue [1].

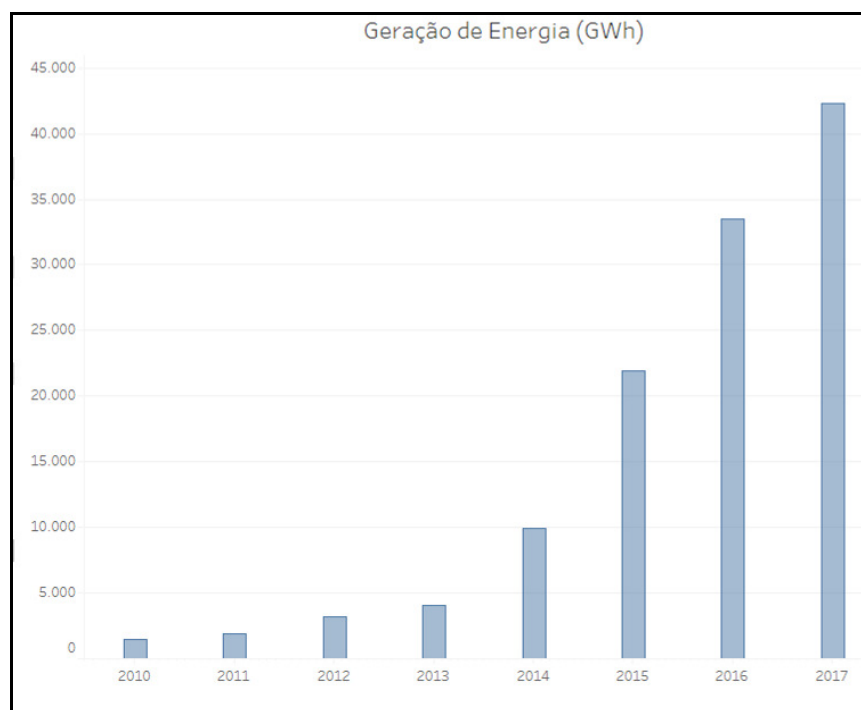


Figura 2 – Evolução da geração de energia eólica no SIN em GWh [1]

Já a figura 3 mostra um panorama relativo a energia gerada, por tipologia de usina, no ano de 2017, oriunda dos dados disponibilizados no site do NOS [1].

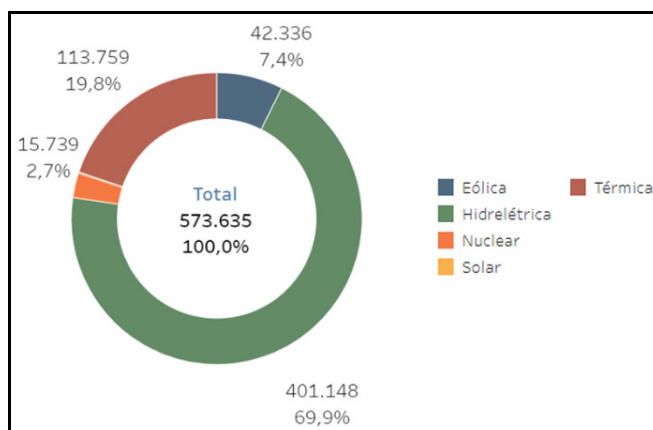


Figura 3 – Geração de energia no Brasil por usina de tipologia eólica, em 2017 [1]

1.1.4. Geração Distribuída com Enfoque Microgeração no Brasil

Outra forma da geração de energia elétrica, a denominada geração distribuída (GD), que é um dos temas mais discutido no âmbito do planejamento energético mundial, e apontada como o futuro da produção de energia elétrica [2]. Segundo Pererermans et al. [3], em uma definição mais geral, a geração distribuída pode ser concebida como um sistema de potência de capacidade reduzida, alocado nas proximidades do centro de consumo, sem a necessidade de extensas redes para sua transmissão e ou distribuição.

Segundo a ANEEL (482/2012) [4], a definição de microgeração distribuída trata de uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, a qual utiliza fontes renováveis de energia elétrica, conectada à rede de distribuição da Concessionária por meio de instalações das unidades consumidoras. Já a minigeração, também definida conforme ANEEL (482/2012), diz respeito a unidades de geração mais robustas, cujo o intervalo de potência utilizando fontes renováveis fica compreendido entre 75 kW e 5 MW.

Conforme observa-se na figura 4, entre o intervalo dos anos de 2013 e 2017, segundo a ANEEL (0056/2017), o processo de micro e minigeradores distribuídos começou a acelerar em 2016, aumentando aproximadamente de forma exponencial o número de conexões de sistemas com estas características, bem como o número de consumidores, os quais recebem créditos de energia por geração. Os números da micro e minigeração distribuída no Brasil é formada quase que na integralidade por unidades de geração solares do tipo fotovoltaicos, 99%, seguido da pela fonte eólica, que conforme observa-se na figura 5. A magnitude da potência instalada por tipologia de micro e minigeração está ilustrada conforme figura 6. Já um percentual das tipologias de unidades consumidoras envolvidas na micro e minigeração está representada na figura 7 [5].

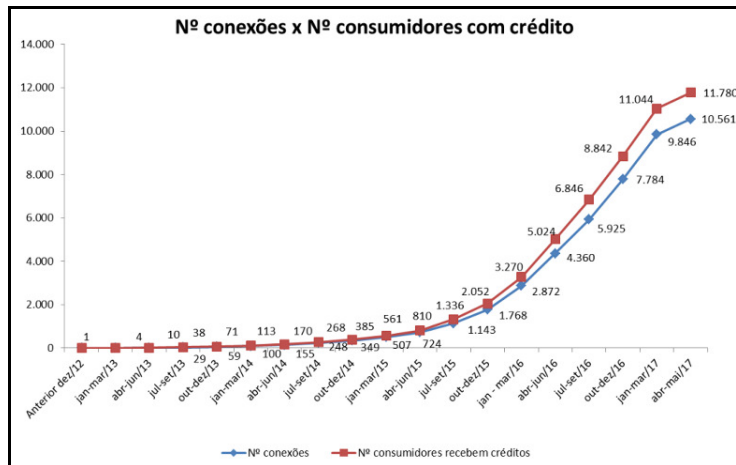


Figura 4 – Números de micro e minigeradores até 23/05/2017 [5]

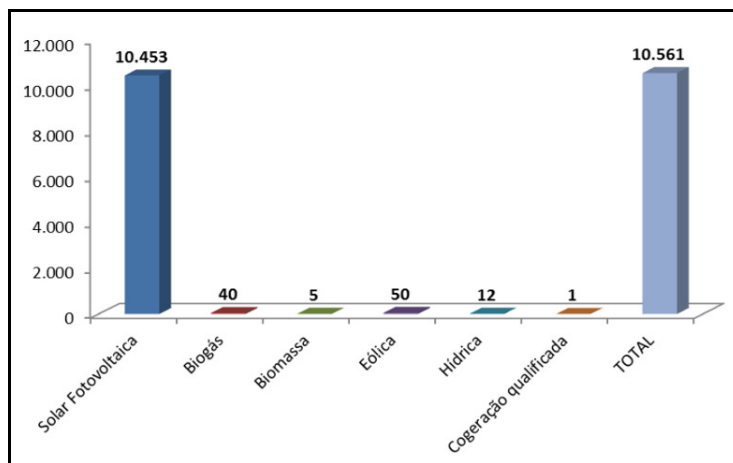


Figura 5 – Conexão por tipo de fonte até 23/05/2017 [5]

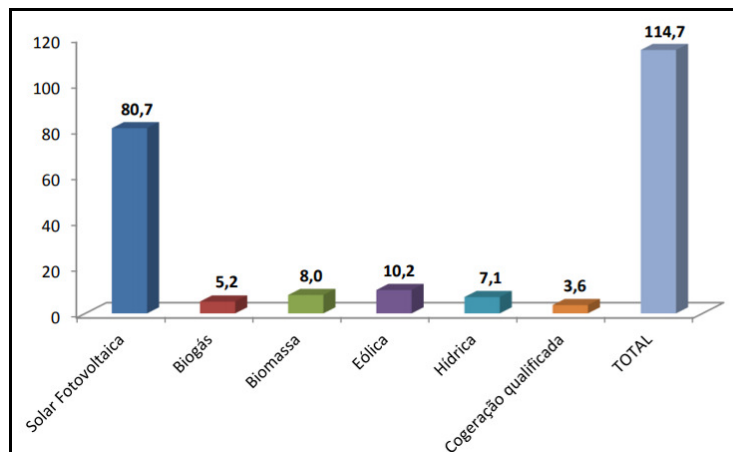


Figura 6 – Potência instalada por tipo de fonte até 23/05/2017 [5]

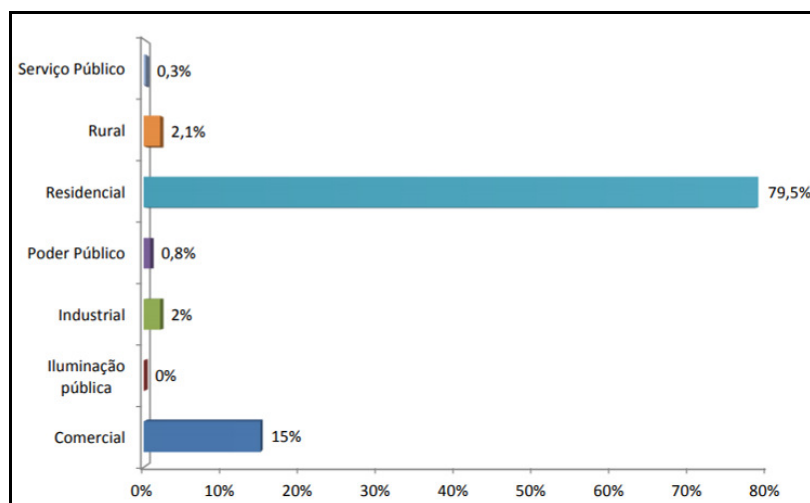


Figura 7 – Consumidores envolvidos na micro e minigeração até 23/05/2018 [5]

Com relação as faixas de potência, segundo a ANEEL (0056/2017), a representatividade dos equipamentos de potência igual ou inferior a 5 kW, representa 72%, de acordo com a figura 8, correlacionando que a magnitude maior de participação na microgeração, se deve a consumidores da tipologia residencial [5].

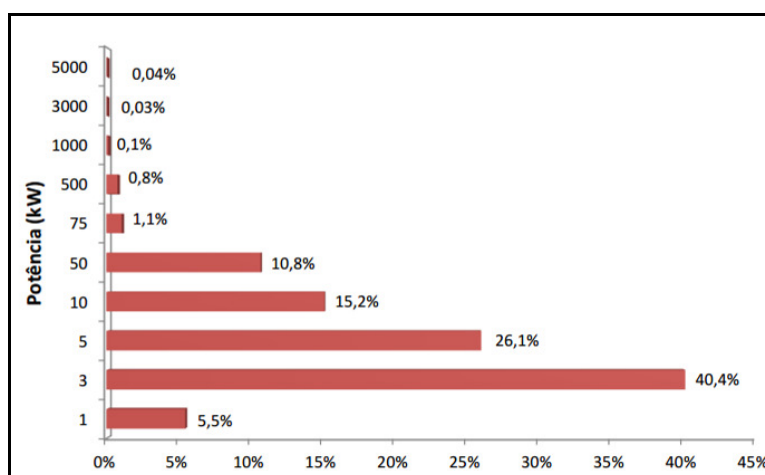


Figura 8 – Expressividade da faixa de potência dos geradores até 23/05/2018 [5]

Uma estimativa do crescimento das quantidades unidades consumidoras de tipologia comercial e residencial, as quais irão instalar sistemas de microgeração ou creditar energia, na modalidade fonte solar, projetada segundo a ANEEL (0056/2017) para o ano de 2024, está ilustrada na figura 9 que segue [5].

Já um panorama estimado sobre a capacidade de geração instalada, também projetado pela ANEEL (0056/2017), está discriminado conforme a figura 10 [5].

Segundo ANEEL (0056/2017), nas estimativas as unidades residenciais e comerciais, utilizaram unidades de gerações fotovoltaicas com potências máximas de 3 e 10 kW, respectivamente [5].

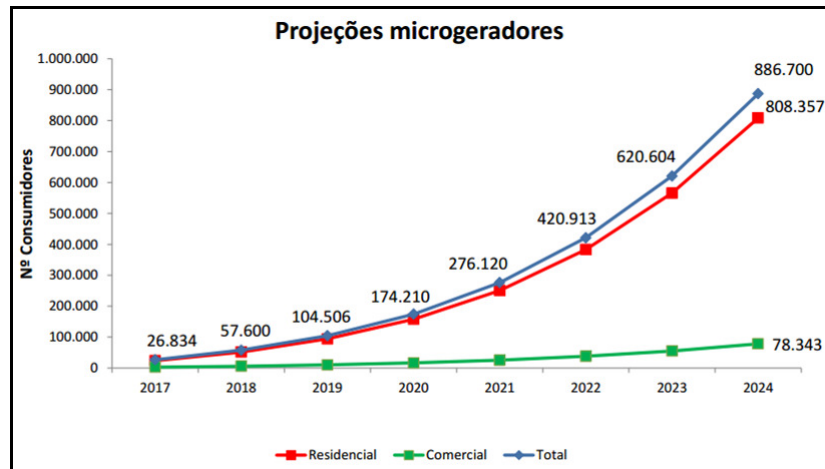


Figura 9 – Projeção de unidades consumidoras com sistema de microgeração [5]

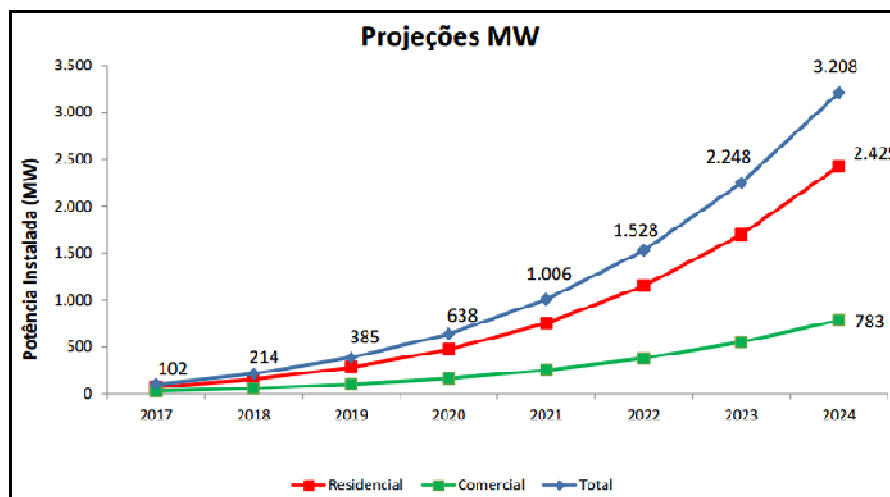


Figura 10 – Projeção da potência instalada de microgeradores [5]

1.2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva desenvolver (projeto, construção e testes) um aerogerador de 2,5 kW, tomando como base um equipamento comercial de mesma potência

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar aerogeradores de pequeno porte e seus aspectos funcionais e topologias;
- Estudar a construção das partes individuais, gerador trifásico, pás, torre, controlador, engrenagens e partes mecânicas móveis, carenagem e leme;
- Projetar e Construir as partes individuais;
- Montar o aerogerador;
- Testar o aerogerador.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INTRODUÇÃO

Conforme mensurado no capítulo 1.1, as preocupações com a utilização responsável dos recursos naturais, bem como as que envolvam aspectos de mitigação de efeitos nocivos ao meio ambiente, são os principais fatores que incentivam a busca por alternativas na geração de energia elétrica a nível mundial, sendo que uma das soluções encontradas é utilização de energia renováveis nas matrizes elétricas de suprimento.

Segundo ANEEL (0056/2017), é notório o crescimento quantitativo e de potência instalada, da utilização centrais solares fotovoltaicas no campo da microgeração, perpetuando-se no ambiente residencial, com equipamentos de potência máxima de até 3 kW [5]. Uma alternativa para ser utilizada para pequenas gerações é utilização de geradores eólicos de pequeno porte, o qual é objeto da proposta deste projeto de pesquisa.

2.2. AEROGERADORES

2.2.1. Contexto Histórico dos Aerogeradores e Energia Eólica

O homem há vários séculos vem utilizando a energia dos ventos de forma a auxiliá-lo em diversas atividades, como por exemplo, na impulsão de velas acopladas a embarcações, na moagem de grãos em moinhos de vento, ou ainda em aparatos para sistema de bombeamento de água. Segundo o MME, Energia Eólica no Brasil e Mundo, o primeiro moinho utilizado para a geração de energia elétrica foi implantado na Escócia no ano de 1987, pelo professor James Blyth, implantado em uma torre de 10 m de altura no jardim de sua casa, na cidade de Marykirk [6].

Entre os anos de 1887 e 1888, em Cleveland, Ohio (EUA), um moinho de vento foi construído por Charles F. Brush, onde era composto por um rotor de 17 m de diâmetro, formado por 144 lâminas, implantado sobre uma torre de 18 m de altura, o qual o sistema aerogerador era capaz de gerar 12 kW de potência, interligado a um banco de baterias, que alimentava lâmpadas incandescentes e motores no laboratório de Brush [7].

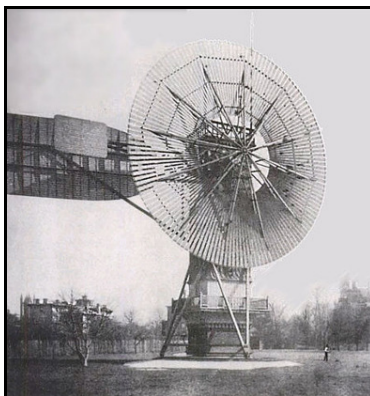


Figura 11 – Moinho de vento de Charles F. Brush em 1888 [7]

Por volta de 1930 a tecnologia e aplicações acerca da energia eólica estavam em evolução, onde, nos Estados Unidos cerca de 600.000 moinhos de vento supriam áreas rurais com eletricidade e serviços de bombeamento hídrico. Ainda nesta década, a difusão da distribuição da energia elétrica em larga escala, alcançando inclusive fazendas e cidades do interior, causou o decréscimo da utilização da energia eólica, a qual voltou à tona no início dos anos 70 [8].

Segundo Monteiro et al [8], nos últimos 30 anos, os incentivos fiscais do governo, o interesse renomado pelo aspecto da denominada geração verde de energia, a qual utiliza recursos renováveis, causaram variações no processo de desenvolvimento de turbinas eólicas, que por volta dos anos 80, tinham uma capacidade nominal máxima de 150 kW, em 2006, já em escala de geração pública comercial, atribuíam uma potência superior a 1 MW, estando disponíveis até a capacidade de 4 MW.

Um esquemático evolutivo simplificado da história da energia eólica mundial, de acordo com Dutra [9], estão representados abaixo nas figuras 12 e 13.

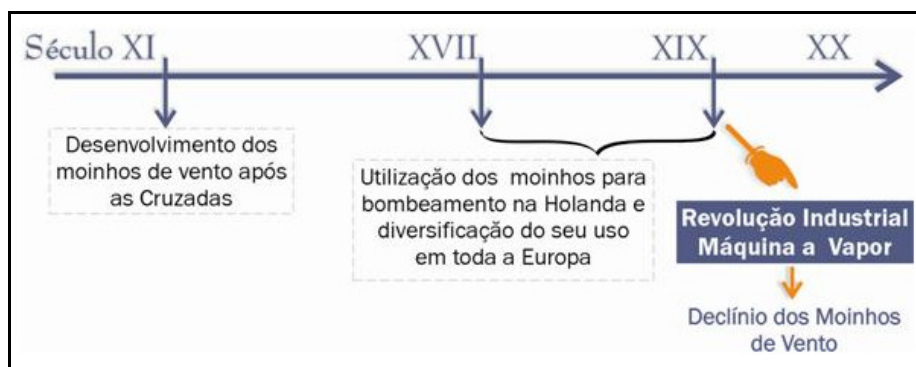


Figura 12 – Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica no período entre os séculos XI e XIX [9]

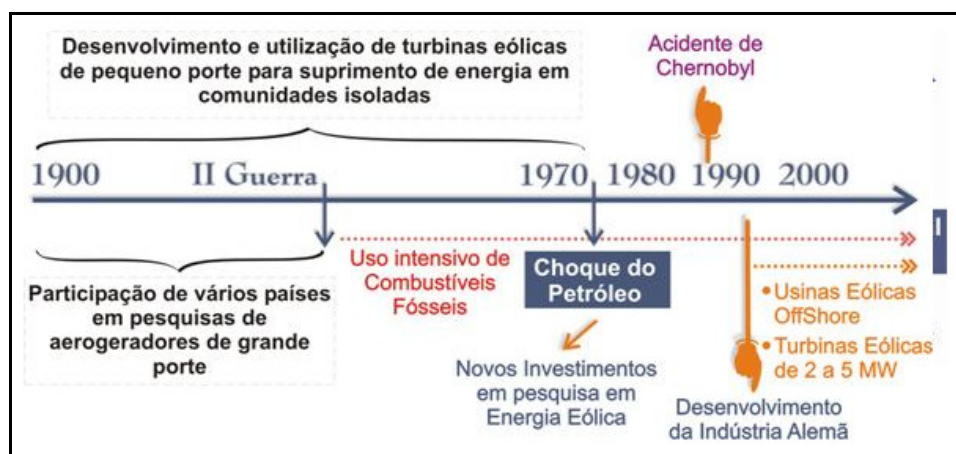


Figura 13 – Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica no século XX [9]

2.2.2. Funcionamento Básico de um Aérogerador

De acordo com Pereira [10], a funcionalidade básica de um aerogerador compreende os processos de conversão, nos quais o rotor absorve a energia cinética do vento convertendo-a em torque mecânico, que por sua vez transforma-se em energia elétrica no componente gerador, como esquematizado na figura 14.

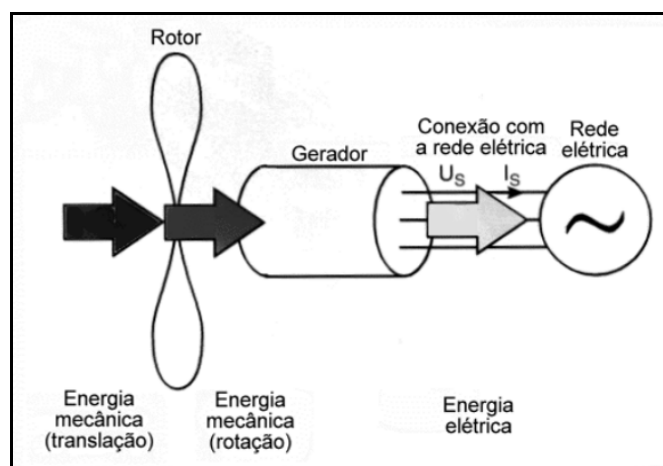


Figura 14 – Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica no século XX [10]

Pereira [10] ressalta também, que embora o funcionamento de um aerogerador seja de fácil compreensão, o equipamento em si condiciona um sistema complexo, onde as áreas do conhecimento como aerodinâmica, mecânica, elétrica e controle estão profundamente relacionadas.

De acordo com Sguarez e Cardoso [11], sistemas de conversão com estas características, são constituídos por uma turbina eólica, um gerador elétrico, um conversor eletrônico de potência e um sistema de controle para aplicação. O artigo ressalta também que o conversor eletrônico permite ao gerador operar com controle de velocidade variável, sendo empregado de acordo com a tipologia de máquina usada.

2.2.3. Aerogerador Horizontal de Pequeno Porte

Segundo Pereira, Dutra e Montezano [12], a faixa de aerogeradores de pequeno porte (APP) fabricados no Brasil é muito ampla, compreendida entre 350 W e 100 kW, mas sendo a maioria dos modelos disponíveis nas potências de 1 a 6 kW, assim como 80% dos APP's disponíveis a nível mundial.

Aos APP's disponíveis no mercado são atribuídas características insatisfatórias como desempenho inferior ao esperado, problemas de baixa resistência mecânicas e de vibração, pás e torres sujeitas a rupturas, conforme ressalta [8].

De acordo com a IEC 61400-2:2006 os APP's são categorizados pelas dimensões dos rotores, que vão até 200 m², onde para uma média de 350 W/m², integraliza uma potência

de 70 kW, bem como pela limitação da altura da torre de sustentação em 20 m (IEC-NORM 61400-2:2006 – Design Requirement for Small Turbines, 2006).

Os APP's operam pelas forças aerodinâmicas, uma de sustentação (perpendicular à direção do movimento), e outra de arraste (na direção do movimento), como aponta Vogt (2010), onde um objeto que obstrui a passagem do vento sofre ação destas forças, as quais ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento, dependendo da geometria das pás e do ângulo de chamado ângulo de ataque [8]. A figura 15 ilustra o somatório vetorial das forças aerodinâmicas e resultantes sobre a pá de um aerogerador [13].

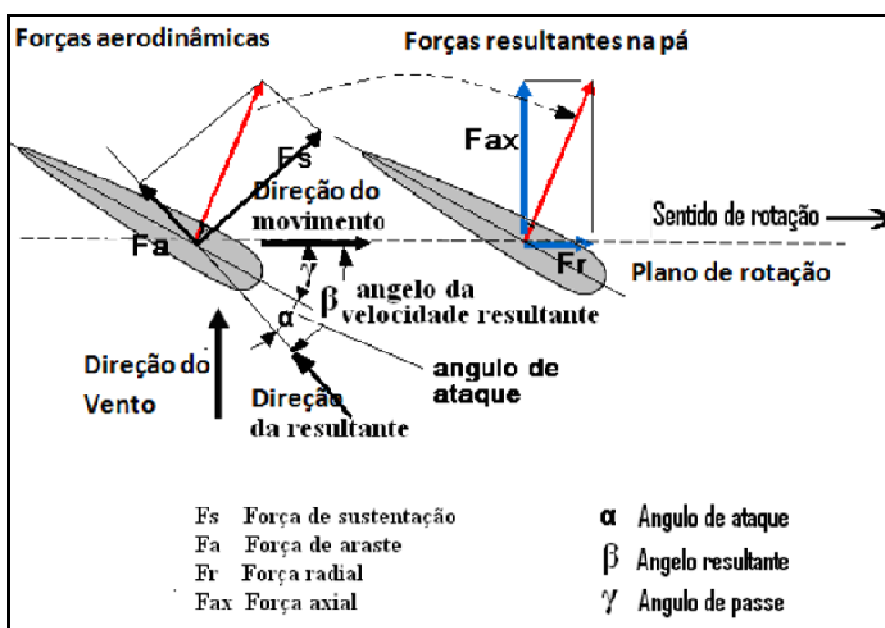


Figura 15 – Esquema das forças aerodinâmicas e resultantes sobre a pá [13]

Nos APP's de eixo horizontal são movidos predominantemente por forças de sustentação, devendo possuir mecanismos que garantam que o plano circular varrido pelas pás, forma um ângulo perpendicular ao vetor velocidade relativa do vento [8].

2.2.4. Componentes de um Aérogerador de Eixo Horizontal

Segundo Dutra [14], os aerogeradores são diferenciados pelo tamanho e formato da nacele, pela presença ou não de caixa multiplicadora, e pelo tipo de gerador. A figura 16 elucida esquematicamente os principais componentes deste equipamento.

Gerador Elétrico Trifásico (Máquina Elétrica Síncrona Rotativa): A conversão de energia mecânica em elétrica é realizada no gerador, equipamento o qual já possui uma ampla e conhecida tecnologia embarcada, disponibilizado por vários fabricantes. Segundo Dutra [14], a integração de geradores elétricos em sistemas de conversão eólica envolve problemas como:

- Variações na velocidade do vento, ocasionando uma faixa de frequências angulares distintas para a geração;
- Variações de torque no eixo, ocasionadas também pela alternância da velocidade do vento, induzindo intercorrências de potências disponíveis.

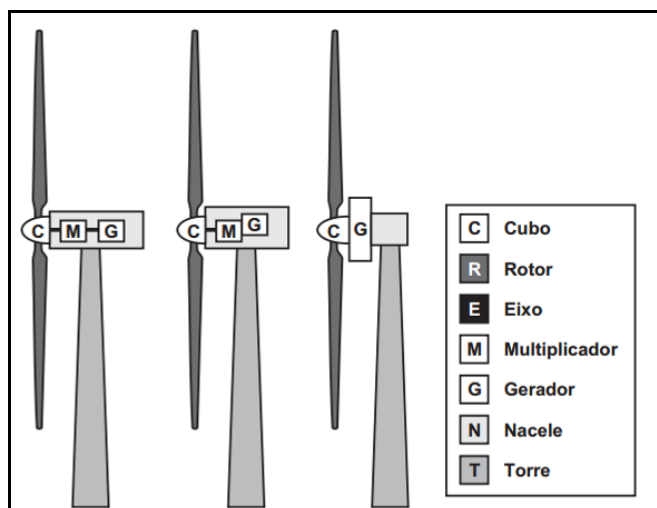


Figura 16 – Principais componentes de um aerogerador horizontal [14]

Nacele: O termo refere-se a carenagem, a qual possui uma base rotativa modelada em torno de um eixo horizontal instalada no topo da torre, de forma a permitir a rotação do sistema para um melhor posicionamento em relação ao vento. É esta que serve como base para as instalações do rotor com cubo e pás, do ajuste angular das pás, do leme, da engrenagem e transmissão mecânica, dos circuitos eletrônicos e o gerador [8].

Pás de Aerogeradores: Segundo Dutra [14], as pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela conversão de parte da energia cinética dos ventos em trabalho mecânico. Conforme Monteiro et al. [8], as primeiras pás eram construídas de alumínio, sendo atualmente confeccionadas em compósitos de fibra de vidro com epóxi ou poliéster. Possuem ainda perfis dimensionais variados, de forma a otimizar sua eficiência na captação de parte da energia proporcionada pela faixa de velocidades do vento.

Cubo: O conjunto de pás é fixado através de flanges em uma estrutura metálica a frente do gerador, a qual é denominada de cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência, conforme aponta Dutra [14], cuja principal função é a transmissão da energia mecânica de rotação ao eixo, obtida pela captação da energia dos ventos pelas pás [8].

Eixo: O eixo do aerogerador horizontal que permite o acoplamento do cubo ao gerador, transferindo a energia mecânica da turbina, sendo o mesmo construído em aço ou liga metálica de alta resistência.

Multiplicador: Segundo Dutra [14], a transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade acoplar o rotor, de forma a implementar um ganho de velocidade angular, ao gerador elétrico. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e

acoplamentos. Entretanto, nos Aerogeradores de pequeno porte modernos não há multiplicadores, e os eixos das pás e gerador são únicos, aumentando-se, portanto, o número de pólos e reduzindo a tensão gerada, a qual é compensada (ajustada à rede) pelo controlador.

Torre: As torres são necessárias para sustentação e posicionamento do sistema formado pelo aerogerador. Segundo Monteiro et al. [8], a função de elevar o mecanismo, visa o aproveitamento das correntes mais favoráveis dos ventos, onde a velocidade dos mesmos é maior e menos sujeita a perturbações, ocasionadas por atrito viscoso e turbulências ocorrentes na proximidade do solo. As torres normalmente são construídas de aço e podem possuir dimensões tubulares ou treliçadas. O custo deste elemento, está ligado ao peso do equipamento a ser sustentado, bem como da altura de posicionamento do aerogerador [14]. Os critérios para escolha das torres entre tubulares e treliçadas, em geral, ficam condicionadas ao custo, impacto visual, e valor unitário agregado ao consumo gerado MONTEIRO et al., [8]).

2.3. METALURGIA DO PÓ E MATERIAIS MAGNÉTICOS

2.3.1. Metalurgia do Pó

A M/P (Metalurgia do Pó) é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir dos pós constituintes. Os processos básicos da M/P são [15-17]:

- Obtenção dos pós
- Mistura
- Compactação
- Sinterização

As vezes é necessária uma quinta etapa como a retificação. Na M/P os pós, depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica. Salienta-se que, pós de diferentes naturezas química podem ser obtidos, desde que os pós sejam misturados homogeneamente [15-17]. A figura 17-(a) mostra o desenho esquemático e a figura. 17-(b) a fotografia, de uma matriz de duplo efeito, utilizada para compactação de pós metálicos e cerâmicos.

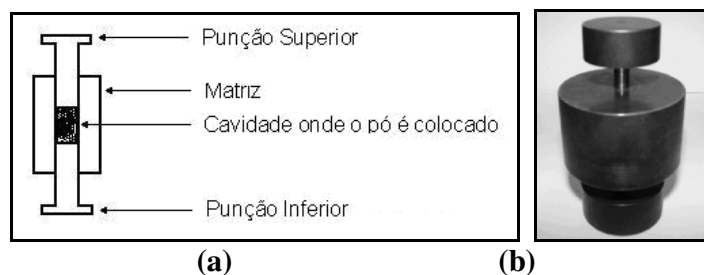


Figura 17 – **Matriz de duplo efeito utilizada para compactação de materiais magnéticos – (a) Desenho esquemático – (b) Fotografia [18]**

A figura 18 mostra, esquematicamente, as várias etapas da técnica de metalurgia do pó, e a figura 19 mostra peças produzidas por M/P por Metalpó.

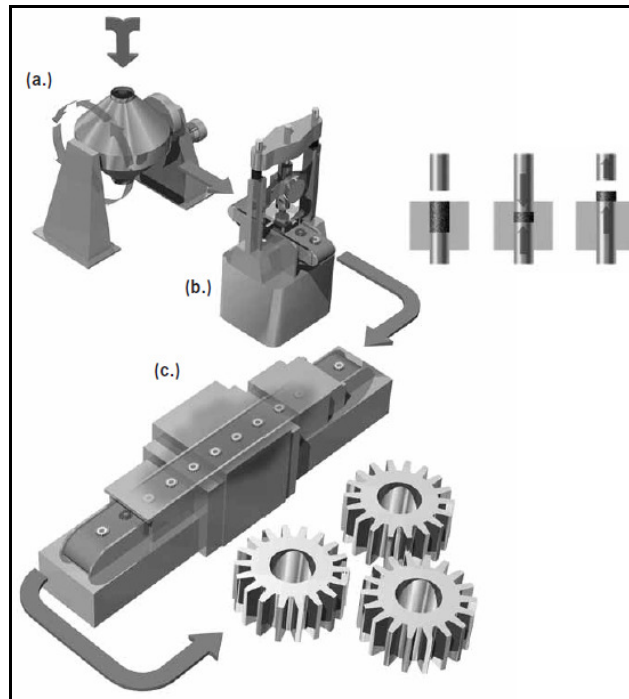


Figura 18 – Principais etapas para obtenção de peças por M/P - (a) Mistura - (b) Compactação - (c) Sinterização [19]



Figura 19 – Peças produzidas por M/P pela empresa Metalpo [20]

2.3.2. Materiais Magnéticos Macios e Ligas Sinterizadas

Basicamente os materiais magnéticos podem ser de dois tipos. Materiais magnéticos de coercitividade e retentividade elevadas são denominados de *materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes*. Materiais magnéticos de coercitividade baixa e elevada permeabilidade relativa são denominados de *materiais magnéticos macios* [21-23].

Na construção de máquinas elétricas e transformadores, que trabalham com tensão elétrica alternada, são empregados materiais magnéticos macios, uma vez que há uma alternância no sentido do fluxo magnético e a coercitividade deve ser baixa. Os ímãs são empregados na construção de dispositivos ou equipamentos onde é necessário um fluxo magnético constante e contínuo, do qual originam-se forças de atração/repulsão ou torque, como microfones, alto falantes, motores, equipamentos de medição, e outros [24-27].

Os materiais magnéticos macio compreendem as ligas de aço para as máquinas elétricas (aço baixo carbono, aço-silício com grãos orientados e não orientados), as ligas especiais a base de ferro-níquel (Permalloy) e ferro-cobalto (Permendur), as ferritas macias e as ligas sinterizadas a base de ferro e níquel. Ligas como ferro-níquel apresentam alta permeabilidade relativa, tendo como inconveniente o preço do níquel. As ferritas macias são largamente utilizadas na construção de núcleo de indutores, que são utilizados na fabricação de aparelhos de recepção de ondas de rádio. Atualmente as pesquisas se concentram na obtenção de materiais magnéticos macios por metalurgia do pó (sinterizados) como as ligas ferro-níquel, ferro-silício e ferro-fósforo [21-23].

2.3.3. Ímãs Permanentes

A produção de materiais magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas a este processo, permite obter características únicas de desempenho, como por exemplo a *orientação magnética*, muito utilizada nos ímãs [22].

Existem 4 grandes grupos de ímãs comercializados atualmente. Os ímãs cerâmicos (ferritas), as ligas de AlNiCo, as ligas ferro-cobalto, e os ímãs obtidos a partir de ligas terras raras como samário-cobalto e neodímio-ferro-boro. Outros ímãs como o Cunife e as ligas platina-cobalto são pouco utilizados. As ferritas compõe o grupo de maior demanda, sendo o de menor custo de produção [27,28]. Entretanto com a entrada dos orientais no mercado, o preço dos terras raras vem diminuindo gradativamente, substituindo, em algumas aplicações, os ímãs de ferrita.

Na obtenção de ímãs *anisotrópicos*, o processo de compactação se dá sob a ação de um forte campo magnético gerado a partir de bobinas, processo este necessário para orientação das partículas do pó antes da consolidação. Ímãs compactados sem campo (compactação convencional) são denominados de ímãs *isotrópicos* [22,23,28]. A magnitude deste campo magnético aplicado pode atingir até milhões de A/m, sendo por este motivo, necessário fontes de tensão ou corrente elétrica elevadas, da ordem de centenas de Volts e/ou Ampères.

2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

O uso de determinado material para os núcleos de máquinas elétricas rotativas é determinado por algumas de suas propriedades físicas. No caso da máquina desenvolvida neste trabalho, o núcleo do rotor, usualmente construído a partir de chapas de aço laminadas, foi substituído por blocos maciços de ferro sinterizado, obtido a partir dos processos da metalurgia do pó. As propriedades físicas de interesse para uso de um determinado material e processo em núcleos de máquinas elétricas rotativas ou motores elétricos estão relacionadas a seguir [26,29]:

- Propriedades Magnéticas (coercitividade, permeabilidade, indução de saturação)
- Resistividade Elétrica
- Propriedades Mecânicas (dureza e curvas de compressão / tensão de escoamento)

Com relação às propriedades magnéticas, os materiais a serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem possuir: elevada permeabilidade magnética, o que reduz a relutância do circuito magnético dos núcleos de ferro, concentrando todo o campo magnético no entreferro; elevada indução de saturação, o que possibilita trabalhar com maior fluxo magnético, resultando maior torque na ponta de eixo; e baixa coercitividade, o que reduz as perdas por ciclo de histerese [26,29].

Com relação à resistividade elétrica, esta deve possuir o maior valor possível, para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) sobre este núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, uma vez que esta isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menor a espessura das chapas, menores são as correntes parasitas e menores as perdas de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas também pode ser obtida desde um acréscimo da resistência elétrica da peça, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que resistência ou resistividade e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, máquinas elétricas de alto rendimento são construídas com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono [26,29].

Com relação às propriedades mecânicas, materiais possíveis de serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem suportar os esforços causados pelo torque resistivo da carga e vibrações, entre outros. Assim, devem ser realizados ensaios de dureza ou ductilidade, curva de compressão *versus* deformação ou curva de escoamento e avaliação de microestrutura. Em resumo, o material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor deve apresentar as seguintes propriedades [26,29]:

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Elevada Indução de Saturação;
- Dureza ou Ductilidade compatíveis com as vibrações as quais a máquina é submetida.

2.5. GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

O estudo apropriado das máquinas elétricas inicia pela compreensão das principais grandezas físicas relacionadas com o eletromagnetismo, bem como um estudo sobre as principais unidades de medidas do magnetismo. Esta revisão se faz necessária para esclarecer, por exemplo, as diferenças entre as unidades de campo magnético, indução

magnética e fluxo magnético. Portanto, a seguir é apresentado, uma breve revisão sobre as grandezas eletromagnéticas mais importantes.

2.5.1. Campo, Indução e Fluxo Magnéticos

Uma carga elétrica estática produz um campo elétrico \mathbf{E} . De acordo com a lei de Ampère uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica \mathbf{I} produz, além deste campo elétrico, um campo magnético \mathbf{H} [21-23].

$$\oint \overline{\mathbf{H}} d\overline{\mathbf{l}} = \int_s \mathbf{J} ds = I \quad \text{Equação [1]}$$

onde H = campo magnético [A/m]

l = comprimento infinitesimal [m]

J = densidade de corrente [A/m²]

S = elemento infinitesimal de superfície [m²]

I = corrente elétrica [A]

A integral de linha \mathbf{H} ao longo do caminho fechado é igual a corrente no fio quando os caminhos envolvem o fio (figura 20). O sentido do campo magnético também pode ser dado pela regra do saca-rolha (mão direita). O polegar aponta na direção de \mathbf{I} e os outros dedos na direção de \mathbf{H} [21-23].

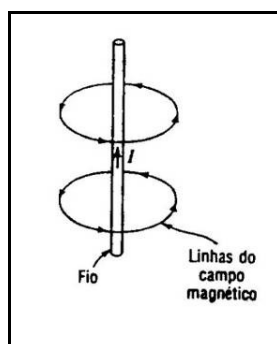


Figura 20 – Campo magnético \mathbf{H} a partir de corrente elétrica \mathbf{I} [21]

No sistema internacional de unidades MKS (metro-kilograma-segundo) \mathbf{H} é expresso em Ampère/metro [A/m]. No sistema CGS (centímetro-grama-segundo) \mathbf{H} é expresso em Oersted [Oe] tal que [21-23]:

$$0,01256.Oe = 1.A/m \quad \text{Equação [2]}$$

Um campo magnético \mathbf{H} induz linhas de fluxo magnético ou indução magnética \mathbf{B} , que se relacionam através da permeabilidade magnética do meio μ tal que [21-23]:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad \text{Equação [3]}$$

onde B = indução magnética [T] ou [Wb/m²]

μ = permeabilidade magnética do meio [H/m]

H = campo magnético [A/m]

No sistema CGS **B** é expresso como Gauss [G] tal que [21-23]:

$$\boxed{1.T = 10^4 G} \quad \text{Equação [4]}$$

Para a maioria dos materiais **B** e **H** tem mesma direção e sentido (meios isotrópicos) e μ é um escalar (número real). Em alguns cristais **B** pode não ter a mesma direção de **H** (meios anisotrópicos) e μ é um tensor (matriz). Para **B** uniforme e superfície plana o fluxo magnético total φ perpendicular à superfície pode ser escrito como [21-23]:

$$\boxed{\varphi = BA} \quad \text{Equação [5]}$$

onde φ = fluxo magnético total [Wb]

B = indução magnética [T]

A = área da seção, transversal às linhas de fluxo [m²]

Quando as linhas de indução magnéticas não são perpendiculares a área A (figura 21), a equação 5 fica [21-23]:

$$\boxed{\varphi = BA \cdot \cos \alpha} \quad \text{Equação [6]}$$

onde α é o ângulo entre a perpendicular à área A e a direção de **B**. Se **B** não for uniforme sobre uma área, a equação 6 se generaliza de tal forma que [21-23]:

$$\boxed{\varphi = \int B \cdot \cos \alpha \cdot ds} \quad \text{Equação [7]}$$

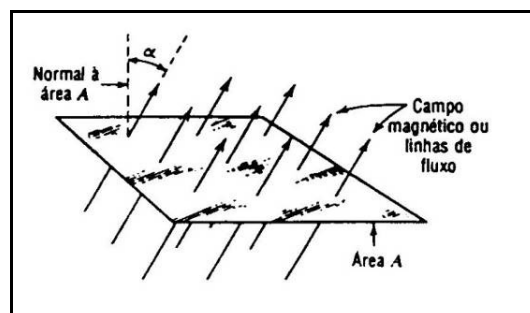


Figura 21 – Linhas de fluxo magnético através da área A [21]

2.5.2. Permeabilidade Magnética Relativa

A permeabilidade magnética do meio é representada como [21-23]:

$$\boxed{\mu = \mu_r \mu_0} \quad \text{Equação [8]}$$

onde μ = permeabilidade magnética do meio [H/m]

μ_r = permeabilidade magnética relativa [adimensional]

μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

A tabela 3 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos. A partir da tabela 1 pode-se concluir o seguinte [21]:

μ_r (substâncias diamagnéticas) \Rightarrow ligeiramente menor que 1

μ_r (substâncias paramagnéticas) \Rightarrow ligeiramente maior que 1

μ_r (substâncias ferromagnéticas) \Rightarrow muito maior que 1

Outros tipos de materiais são o antiferromagnético, *ferromagnético* e *superparamagnético*. Um exemplo de material antiferromagnético é o óxido de ferro. A ferrita macia é um material ferromagnético e a fita magnética é um material superparamagnético [21-23].

Tabela 3 – Permeabilidade Relativa de alguns materiais [21]

Substância	Grupo	μ_r
Bismuto	Diamagnético	0,99983
Prata	Diamagnético	0,99998
Cobre	Diamagnético	0,999991
Água	Diamagnético	0,999991
Vácuo	Não-magnético	1
Ar	Paramagnético	1,0000004
Alumínio	Paramagnético	1,00002
Paládio	Paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	Ferromagnético	$1,3 \times 10^2$
Cobalto	Ferromagnético	$2,5 \times 10^2$
Níquel	Ferromagnético	$6,0 \times 10^2$
Ferroxcube 3	Ferromagnético	$1,5 \times 10^3$
Aço doce	Ferromagnético	$2,0 \times 10^3$
Ferro (0,2% de impurezas)	Ferromagnético	$5,0 \times 10^3$
Permalloy 78	Ferromagnético	$1,0 \times 10^5$
Supermalloy	Ferromagnético	$1,0 \times 10^6$

2.5.3. Magnetização e Curva de Histerese

Se uma peça (por exemplo cilíndrico) for colocada dentro de uma bobina (fio enrolado com várias voltas ou espiras), e circular por esta bobina uma corrente elétrica I , um campo magnético H será gerado no interior desta bobina, e a peça irá sofrer uma indução magnética B [21-23].

Se o material do qual foi obtido a peça for diamagnética ou paramagnética pouca linha de fluxo magnética serão induzidas e a relação $B \times H$ será mais ou menos linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a

relação $B \times H$ será uma curva (figura 22-a). Observe que esta apresenta uma histerese sendo portanto denominada de *curva de histerese* ou *ciclo de histerese*. Estes materiais também são conhecidos como *materiais magnéticos* [21-23].

O ponto em que a curva corta o eixo de B no quadrante superior esquerdo é denominado de *magnetismo remanente* ou *retentividade* B_r (quando o material foi saturado) e representa a indução magnética residual que permanece no espécime mesmo após a sua retirada de dentro da bobina ou seja sem campo magnético aplicado ($H = 0$). O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* ou *coercitividade* H_c (quando o material foi saturado) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($B = 0$). Outro fator importante na identificação dos materiais magnético é o produto energético BH_{max} que está associado com a densidade de energia armazenada no material [21-23].

A figura 22-b mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um *material magnético duro* também conhecido como ímã permanente, e um estreito que representa um *material magnético macio*. Os materiais magnéticos duros também são conhecidos por ímãs permanentes e devem apresentar elevada retentividade e coercitividade magnéticas. Os materiais magnéticos macios, são os aços magnéticos em geral (com exceção de algumas ligas de aço inox que são paramagnéticas) utilizados na construção de núcleos magnéticos, os SMCs, e as ferritas macias utilizadas na construção de indutores [21-23].

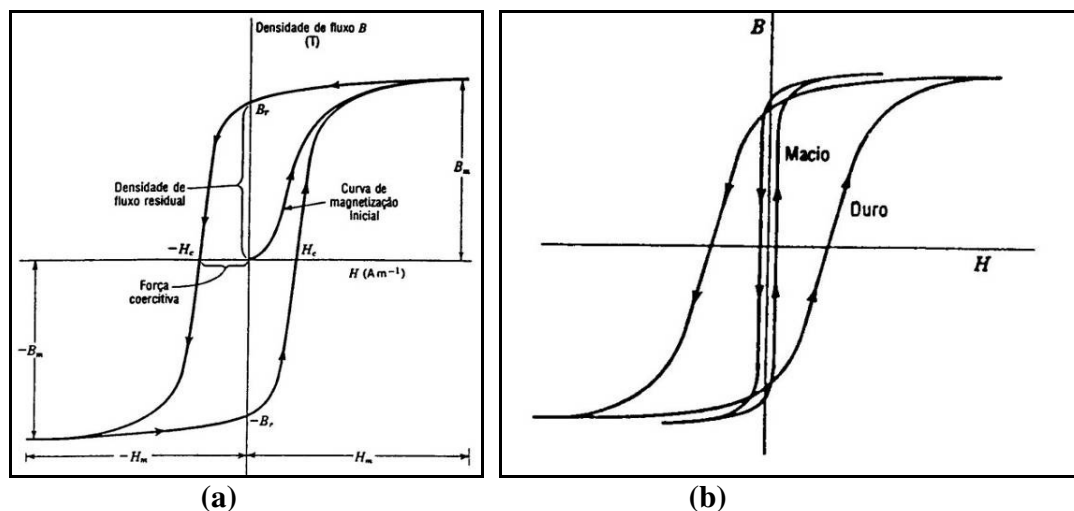


Figura 22 – Curvas Magnéticas – (a) Laço de Histerese e Curva de Magnetização – (b) Material Magneticamente Macio e Duro [21]

A figura 23 mostra um MAV (Magnetômetro de Amostra Vibrante), dispositivo para traçar curvas de Histerese de Materiais Magnéticos Duros. O MAV é composto de uma bobina principal (figura 23-a), na qual existe a circulação de uma corrente contínua de valor elevado responsável por gerar um Campo Magnético no Entreferro, campo este medido a partir de um sensor Hall (que além de indução, também pode medir Campo Magnético). Neste mesmo entreferro há uma haste que vibra (daí a origem do nome), no qual fragmentos dos ímãs são colocados. Uma bobina secundária também é colocada ali próxima ao ímã que, ao vibrar próximo a esta bobina secundária, induz uma tensão, a qual é

proporcional a indução magnética B , gerada pelo ímã. Assim são obtidas as duas grandezas para o traçado das curvas, ou seja, o Campo Magnético (através do sensor Hall) e a Indução Magnética (através da bobina de indução). Um dispositivo eletrônico (figura 23-b) capta os sinais gerados e, a partir de um computador e um software, gera as curvas [22].

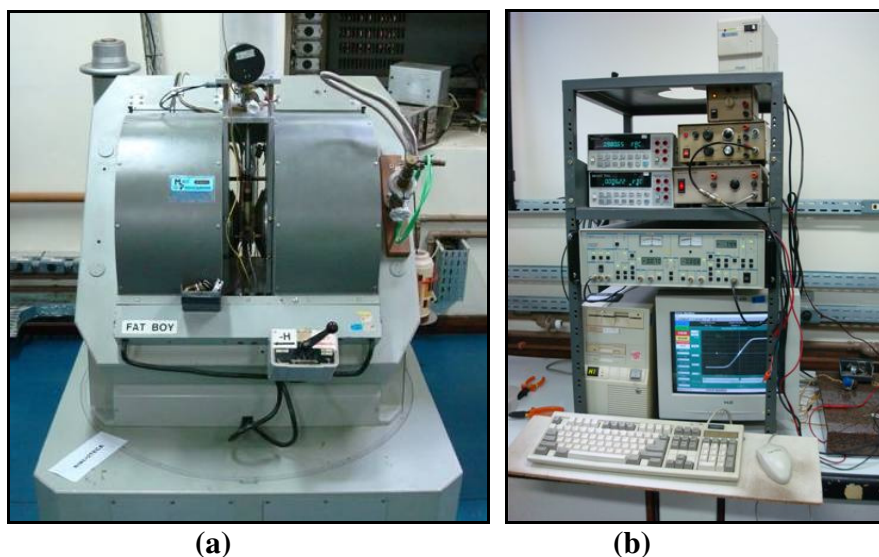


Figura 23 – Magnetômetro de amostra vibrante – (a) Dispositivo com as bobinas e haste vibratória – (b) Sistema de Aquisição de Dados e Traçador de Curva [30]

A figura 24-a apresenta uma curva de histerese com magnetização paralela e a figura 24-b mostra uma curva de magnetização perpendicular. A unidade da ordenada está em unidade de magnetização (emu/g). Para converter para indução utiliza-se a equação 9 [21-23].

$$B_r = 4\pi \frac{\text{emu}}{g} \rho \quad \text{Equação [9]}$$

na qual ρ é a densidade.

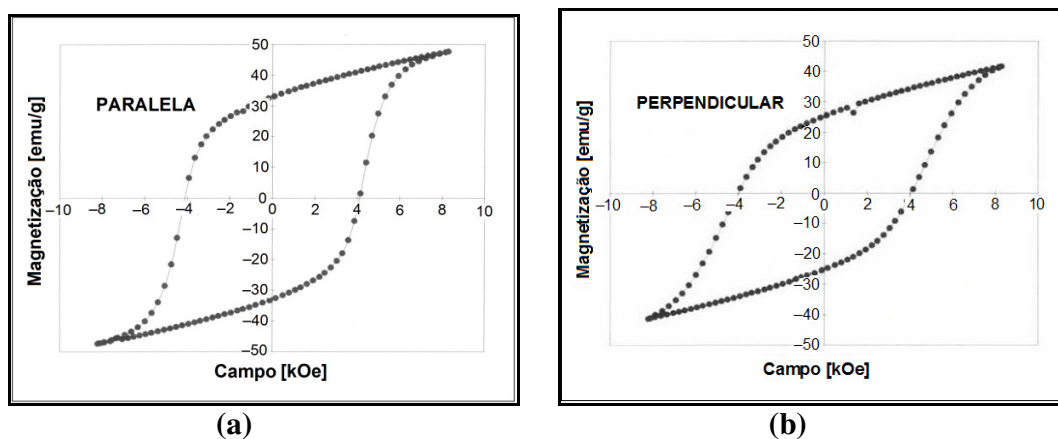


Figura 24 – Curva de histerese de ímãs de ferrita de estrôncio [30]

2.5.4. Indução Magnética em Núcleos

Seja uma bobina de comprimento l , raio r e N espiras (figura 29-a). A indução magnética \mathbf{B} no centro da bobina pode ser calculada a partir da lei de Biot Savart como [21-23]:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu N I}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \quad \text{Equação [10]}$$

Seja um toróide com N espiras distribuídas uniformemente e corrente I , raio médio r e comprimento médio l (figura 25-b). A indução magnética \mathbf{B} pode ser calculada a partir da lei de Biot Savart sendo [21-23]:

$$\mathbf{B} \frac{\mu N I}{l} = \mu \mathbf{H} \quad \text{Equação [11]}$$

ou, com alguma manipulação algébrica [21-23]:

$$\mathbf{B} l = \mu N I \Rightarrow \mu \mathbf{H} l = \mu N I \Rightarrow N I = \mathbf{H} l \quad \text{Equação [12]}$$

Resultando, então, a equação básica para o estudo de circuitos eletromagnéticos que a relação *Ampère.espira* é idêntica ao relação campo magnético \mathbf{H} em todo o caminho l [21-23]. Para traçar curvas magnéticas de material magnético macio é utilizado uma amostra toroidal, de comprimento muito maior que a seção transversal, com duas bobinas (secundário e primário), conhecido por anel de Rowland (figura 25-c) [8,10].

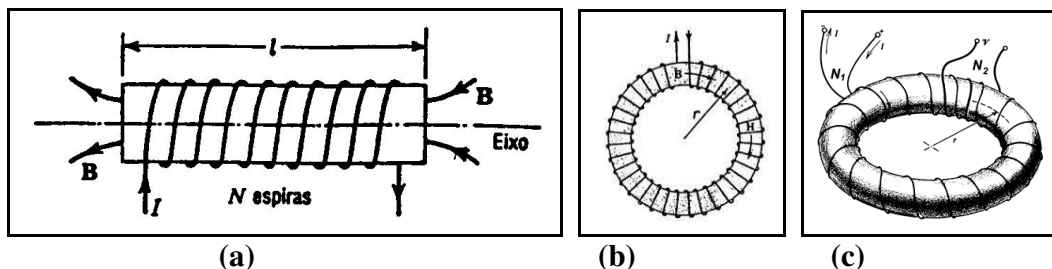


Figura 25 – Linhas de fluxo magnético – (a) Bobina – (b) Núcleo Toroidal [21] – (c) Anel de Rowland [30]

2.6. MÁQUINAS ELÉTRICAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS

2.6.1. Máquinas Síncronas Convencionais

As máquinas síncronas trifásicas podem funcionar como motor ou gerador. Como motor operam a velocidade constante, independente da carga acoplada ao eixo, até a potência nominal. Como gerador, são utilizadas na geração de energia elétrica alternada trifásica, como por exemplo, nas hidroelétricas, termoeletricas e geradores a combustão [26,29,30].

Os enrolamentos de armadura, fixados no estator, são alimentados com corrente alternada trifásica defasadas de 120° . Os enrolamentos de armadura são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante. Os enrolamentos de campo, fixados no rotor, são alimentados com corrente elétrica contínua. Em alguns tipos de máquinas, esta corrente contínua, é obtida a partir de uma fonte de tensão contínua ajustável, externa à máquina, e são levadas até eles através de anéis deslizantes e escovas. Os enrolamentos de campo são dispostos de tal forma a produzir uma onda de fluxo magnético estática que atravessa o núcleo do rotor [26,29,30].

No funcionamento como motor, o fluxo magnético estático, produzido pelos enrolamentos de campo, tendem a se alinhar com a onda de fluxo do campo girante, fazendo com que o rotor do motor gire em sincronismo com o campo girante. Como gerador, o eixo deve ser acionado a um velocidade angular constante. Nesta circunstância a máquina gera uma tensão alternada trifásica de frequência constante [26,29,30].

Em algumas máquinas síncronas, um pequeno gerador interno a máquina fornece a corrente contínua ao enrolamentos de campo. Neste caso, este gerador é conhecido como excitatriz, dispensando a fonte cc externa. Em outras máquinas síncronas mais modernas, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanente, dispensando também a fonte cc externa e as escovas [26,29,30].

O estator e o rotor são construídos de chapas de aço laminadas, isoladas e justapostas no sentido longitudinal da máquina. Com isto diminuem consideravelmente as perdas por correntes parasitas, aumentando o rendimento da máquina. As máquinas síncronas convencionais são classificadas em dois tipos, e esta classificação está relacionada com a construção do rotor [26,29,30]:

- **Polos lisos (Rotor cilíndrico):** A figura 26-a mostra a configuração deste tipo de rotor. São mais utilizados na construção de máquinas que operam a altas velocidades tais como os turbogeradores.
- **Polos Salientes:** A figura 26-b mostra a configuração deste tipo de rotor. São mais utilizados na construção de máquina que operam a baixas velocidade como os geradores hidráulicos.

Uma observação importante quanto ao motor síncrono é que este não possui torque de partida e uma das alternativas deve ser realizada [26,29,30]:

- Construção de uma gaiola envolvendo o rotor, ou seja, a colocação de barras no sentido longitudinal da máquina, curto-circuitadas nas extremidades por anéis. Nesta configuração, na partida, correntes bastantes elevadas são induzidas nestas barras em função da baixa impedância, aumentando consideravelmente o fluxo magnético, fazendo com que o motor parta. Quando o rotor da máquina está girando em regime permanente, à velocidade síncrona com o campo girante, nenhuma tensão é induzida nestas barras e elas simplesmente não agem.

- Dispositivo de partida externa, ou seja, outro motor acoplado ao eixo, fornece o torque suficiente para a partida do motor síncrono.
- Utilizando um conversor com frequência ajustável, tem-se então um campo girante com velocidade angular variável. Nesta circunstância, inicialmente regula-se o conversor para geração de um campo girante com uma frequência baixa, de tal forma que o rotor comece a girar. A seguir, aumenta-se a frequência do campo girante até a velocidade síncrona.

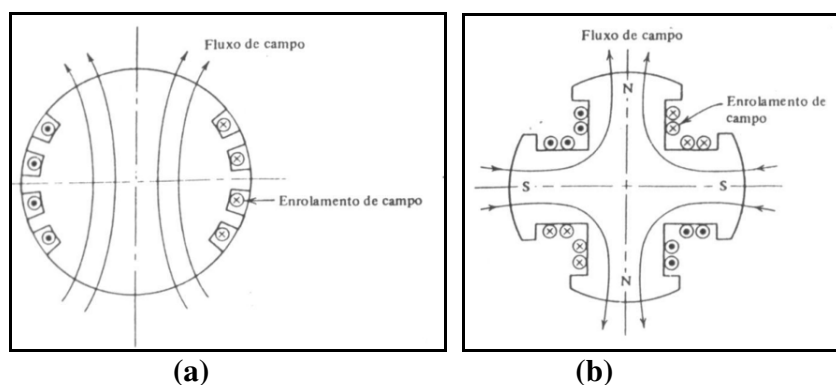


Figura 26 – Rotor de uma máquinas síncrona - (a) polos lisos - (b) polos salientes [29]

Os enrolamentos de armadura estão distribuídos no estator de tal forma que este apresente 4 polos, e o passo polar, de 9 dentes, é ligeiramente maior que o passo da bobina, de 8 dentes. Então, ele é um enrolamento de *passo fracionário*. O número de ranhuras por polos por fase é 3. Os enrolamentos da armadura consistem de bobinas interconectadas. A figura 27 mostra um enrolamento trifásico, onde cada ranhura contém 2 lados de bobinas. Tal enrolamento é um enrolamento de *dupla camada* [29].

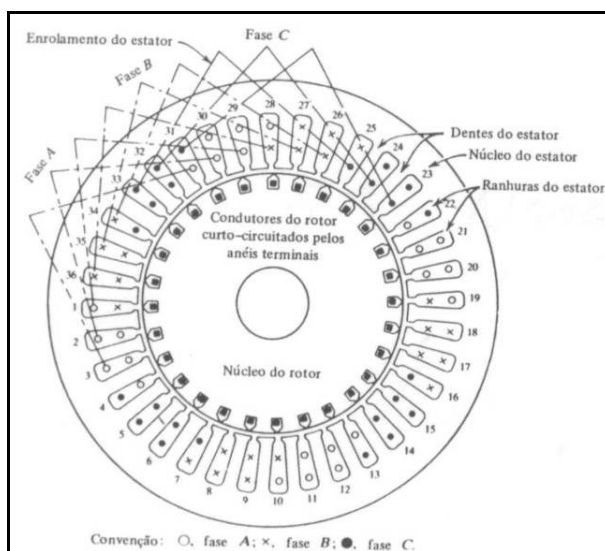


Figura 27 – Disposição das ranhuras e bobinas num enrolamento trifásico com 4 polos [29]

A figura 28-a mostra o estator de uma máquina trifásica com 2 polos, com 4 ranhuras por polo por fase, e dois condutores por ranhura. A figura 28-b mostra a **fmm** (força magnetomotriz) constituída por uma série de degraus. Sua componente espacial fundamental é mostrada pela senoide. Pode ser visto que o enrolamento distribuído produz uma aproximação melhor a uma onda de **fmm** senoidal do que a bobina concentrada (figura 28-b) [26].

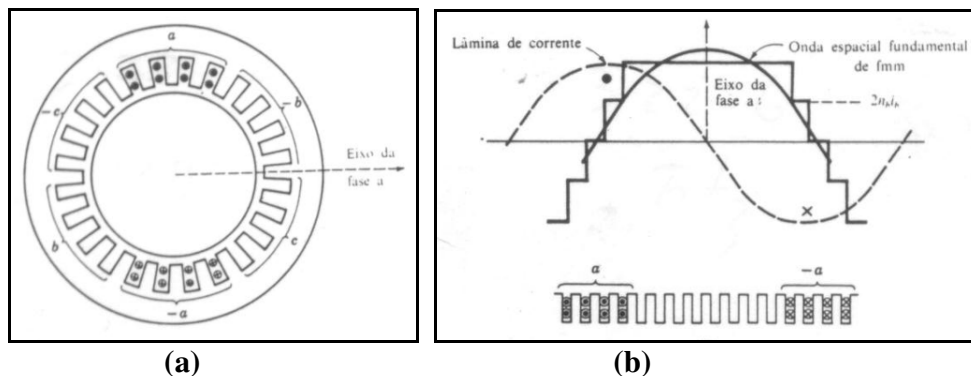


Figura 28 – Máquina c.a. com – (a) Estator Trifásico - (b) Força Magnetomotriz [26]

A figura 29-a mostra o estator de uma máquina c.a trifásica com 2 polos, 3 fases e uma espira por fase, alimentadas por corrente alternada trifásica defasadas de 120° (figura 29-b), indicadas pelas equações a seguir [26]

$$i_a = I_{\max} \cos(\omega t) \quad \text{Equação [13]}$$

$$i_b = I_{\max} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \text{Equação [14]}$$

$$i_c = I_{\max} \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \text{Equação [15]}$$

onde I_{\max} é a amplitude da onda de corrente.

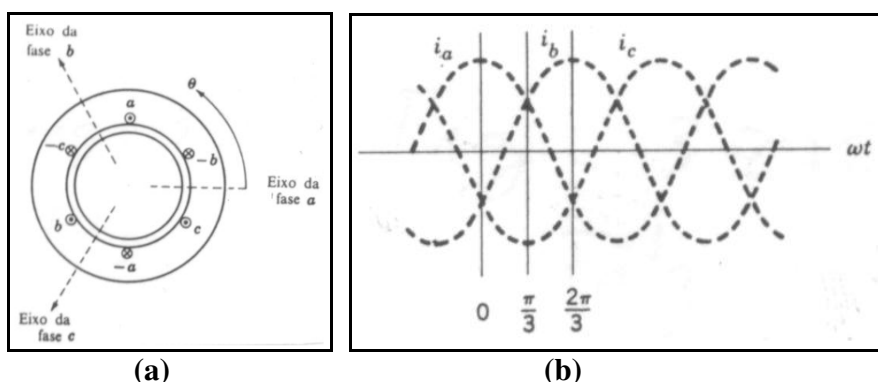


Figura 29 – Máquina Trifásica – (a) Enrolamento de estator trifásico, 2 polos, simplificado – (b) correntes trifásicas instantâneas [26]

As correntes por fase indicadas são responsáveis pelo surgimento de 3 fmm \mathfrak{S} representadas em 3 tempos instantâneos diferentes nas figuras 30(a-c) e indicadas pelas equações a seguir [26]

$$\mathfrak{S}_a = \mathfrak{S}_{a(\max.)} \cos(\omega t) \quad \text{Equação [16]}$$

$$\mathfrak{S}_b = \mathfrak{S}_{b(\max.)} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \text{Equação [17]}$$

$$\mathfrak{S}_c = \mathfrak{S}_{c(\max.)} \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \text{Equação [18]}$$

e a amplitude da onda \mathfrak{S}_{\max} é dada por [26]

$$\mathfrak{S}_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_s}{P} I_{\max} \quad \text{Equação [19]}$$

onde K_w é o fator de enrolamento, N_s é o número de espiras por fase e p o número de pólos.

Pode-se observar das figuras 30(a-c) que, em função da distribuição espacial das três fases na periferia do estator, todas as fmm contribuem positivamente para uma fmm resultante a saber [26]:

$$\mathfrak{S}(\theta, t) = \mathfrak{S}_a + \mathfrak{S}_b + \mathfrak{S}_c = \frac{3}{2} \mathfrak{S}_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad \text{Equação [20]}$$

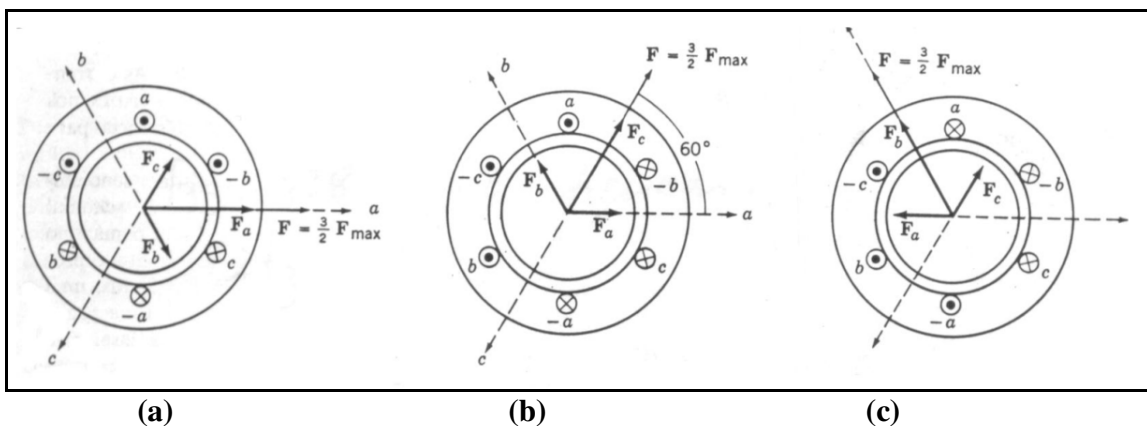


Figura 30 – Representação do campo girante como resultante da fmm das 3 fases em 3 instantes diferentes (a) (b) (c) [26]

onde a fmm resultante apresenta uma amplitude constante 50% maior que a amplitude da fmm de qualquer das fases constituintes. Esta fmm nada mais é do que uma *onda de fluxo magnético que gira* no interior do estator também conhecida como *campo girante*. A

velocidade do campo girante, também conhecida como *velocidade síncrona*, é calculada como [26,29,30]

$$\boxed{n_s = \frac{120f}{p}} \quad \text{Equação [21]}$$

onde n_s é a velocidade síncrona dada em [rpm] e f é a frequência das correntes de alimentação [Hz].

2.6.2. Perdas e Fatores que Melhoram o Desempenho em Máquinas Elétricas

As perdas nas máquinas elétricas podem ser avaliadas a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia, onde energia elétrica é transformada em energia mecânica. As potências envolvidas numa máquina elétrica relacionam-se como [26,29,30]:

$$\boxed{P_i = P_o + P_R + P_{mag} + P_M + P_d} \quad \text{Equação [22]}$$

onde todos os fatores representados na equação 22 são potências dadas em [Watts], e representam [26.29,30]:

- P_i \Rightarrow potência elétrica de entrada, fornecida pela fonte de tensão elétrica;
- P_o \Rightarrow potência mecânica de saída, fornecida à carga acoplada ao eixo do motor;
- P_{Ra} \Rightarrow potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos da máquina;
- P_{mag} \Rightarrow potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault;
- P_M \Rightarrow potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais;
- P_d \Rightarrow potência representando outras perdas diversas.

O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento η , que considera as perdas na máquina relacionando a potência de entrada e a potência de saída, ou seja [26.29,30]:

$$\boxed{\eta = \frac{P_o}{P_i}} \quad \text{Equação [23]}$$

Um fator importante no desempenho das máquinas elétricas rotativas são as perdas magnéticas. Fatores como aumento da resistividade elétrica e diminuição da coercitividade magnética dos núcleos do estator e do rotor diminuem estas perdas aumentando o rendimento da máquina. Os fatores que melhoram o desempenho das máquinas elétricas, com a utilização de outros materiais na sua construção, estão relacionados a seguir [26,29]:

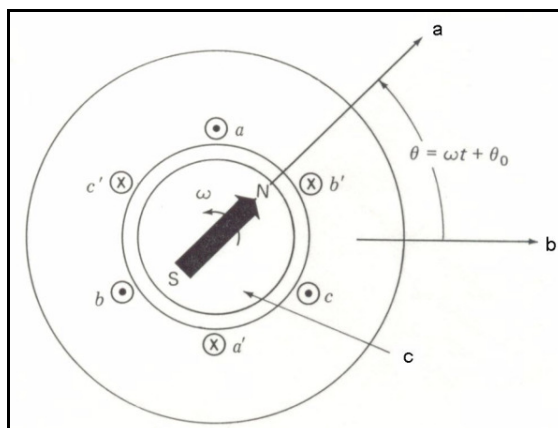
- **Aumento na permeabilidade magnética:** Numa máquina elétrica quanto maior a permeabilidade magnética relativa dos núcleos, tanto do estator como do rotor, maior será o campo magnético no entreferro, maior será o fluxo magnético produzido para uma

mesma corrente elétrica, e maior será o torque. Uma melhor performance da máquina ocorrerá com o desenvolvimento de materiais com *permeabilidade magnética relativa maiores*.

- **Diminuição na coertividade magnética:** Integrando a área contida dentro de cada ciclo de histerese, resulta uma quantidade de energia, que representa as perdas por ciclo de histerese num circuito magnético alimentado com corrente alternada. Portanto, quanto mais estreito for cada ciclo da curva de histerese menor será a perda por ciclo de histerese e uma melhor performance da máquina ocorrerá com o desenvolvimento de materiais com *baixa coercitividade magnética*.
- **Aumento da resistividade elétrica:** As corrente de Foucault são correntes parasitas induzidas no estator e no rotor da máquina pela variação do fluxo magnético gerado a partir dos enrolamentos do estator. Uma melhor performance da máquina ocorrerá com o desenvolvimento de materiais com *alta resistividade elétrica*.
- **Aumento da indução de saturação:** A partir da utilização de materiais com maior indução de saturação, a máquinas poderá operar com maior fluxo no entreferro, o que reduz o volume da máquina.
- **Possibilidade de construção dos núcleos do rotor e do estator num bloco único:** Com isto, não haverá a necessidade de laminação, estampagem, isolamento, tratamento químico e empacotamento dos núcleos do estator e do rotor, ocasionando uma redução na quantidade de energia despendida no processo de construção, reduzindo também custos de fabricação.
- **Substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes:** Como os enrolamentos de campo fixados no rotor, servem exclusivamente para a produção de um fluxo magnético contínuo e estático, estes podem ser substituídos por ímãs permanentes, eliminando com isto, além destes enrolamentos, fontes de tensão contínua externa, escovas, anéis coletores (no caso de máquinas com alimentação de campo externa) e de excitatrizes (no caso de alimentação de campo com gerador cc no próprio eixo da máquina).

2.6.3. Máquinas Síncronas com Ímãs Permanentes

Motores de Corrente Alternada com ímã permanentes são máquinas elétricas síncronas polifásicas com ímã permanentes no rotor, muito semelhantes às máquinas síncronas convencionais, onde os enrolamentos de campos são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. A figura 31 mostra um diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. Uma análise desta figura permite observar as semelhanças entre a máquina trifásica com ímã permanente e a máquina síncrona convencional. Por este motivo, as máquinas trifásicas com ímã permanente podem ser analisadas a partir de cálculos muito semelhantes àqueles utilizados para análise das máquinas síncronas convencionais, simplesmente considerando que a máquina é excitada por uma corrente de campo de valor constante, fazendo-se as devidas correções [32].



- a – eixo magnético do rotor**
- b – eixo magnético da fase 2**
- c – rotor de ímãs permanente**

Figura 31 – Diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. As setas indicam a direção da magnetização do rotor [32]

A figura 32 mostra uma vista em corte de um típico motor síncrono trifásico com ímã permanente. Esta configuração de motor possui um sensor de velocidade e de posição montado no eixo do rotor. Várias técnicas podem ser usadas para sensoriar a posição do eixo, incluindo dispositivos de efeito Hall, LEDs e fototransistores (encoder ótico), e variação de indutância [32].

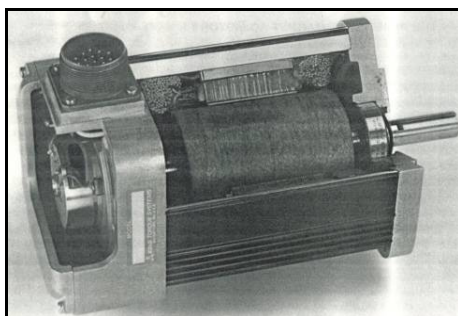


Figura 32 – Vista em corte de um motor síncrono trifásico com ímã permanente com o sensor de velocidade e posição para controle do motor [32]

A partir das informações do sensor de posição do eixo, os enrolamentos por fase do motor são sequencialmente excitados de tal modo a produzir o torque e velocidade desejadas. A velocidade do motor é determinada pela frequência da rede de alimentação. A posição angular entre o eixo magnético do rotor e uma determinada fase, determina o torque desenvolvido pela motor [32].

Em função da capacidade para medição de velocidade e posição do rotor a partir de sensores, bem como a possibilidade de aplicação de frequência e amplitude de excitação de corrente variável, a partir de conversores, determina que motores síncronos trifásicos com

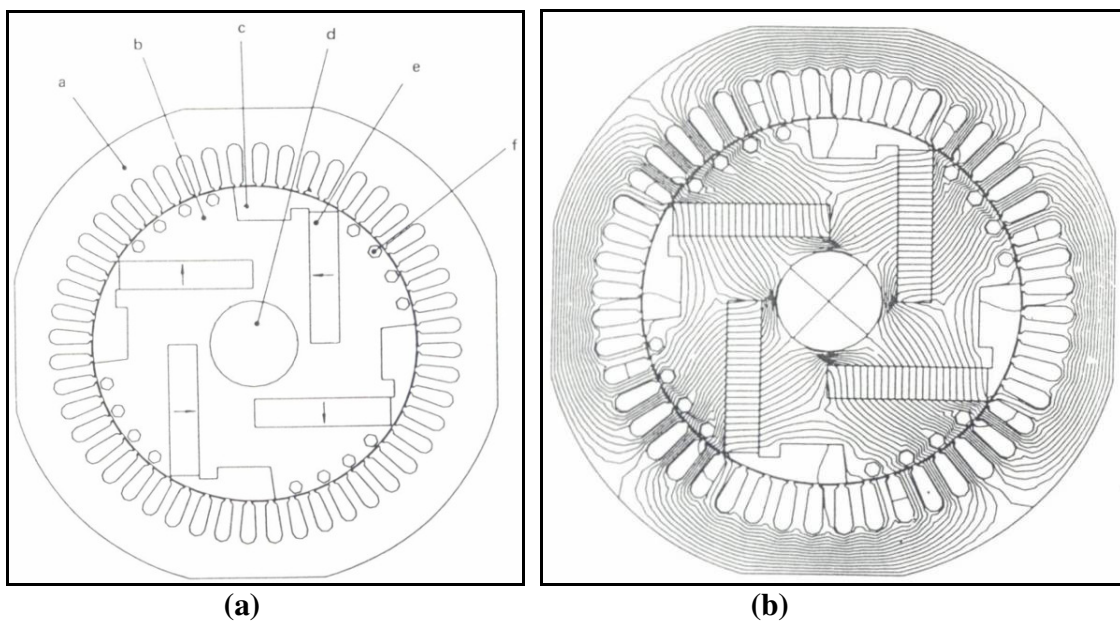
ímã permanente, como este mostrado na figura 32, são bastante controláveis. Como resultado, estes motores são atualmente encontrados em muitas aplicações que anteriormente eram quase exclusivamente do domínio de motores **cc** (corrente contínua). Motores síncronos trifásicos com ímã permanente são frequentemente chamados de motores brushless (sem escovas) ou motores cc sem escovas [32].

Atualmente, o uso de ímãs permanentes com alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas, têm aumentado consideravelmente. Esta tendência é devido à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis produzidos a partir de ímãs de ferrita que, dependendo da aplicação, são adequados. Entretanto, um desenvolvimento mais importante, se deu a partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de terras raras (super ímãs), que possuem um produto energético muito superior às ferritas. Estes super ímãs utilizados são conhecidos por sua composição, ou seja, o neodímio-ferro-boro ou NdFeB e o samário-cobalto ou SmCo. A utilização dos super ímãs em novas configurações, resultou em um alto rendimento destas máquinas elétricas bem como em outras características que são difíceis de comparar com máquinas sem ímãs permanentes (máquinas convencionais). A utilização dos super ímãs diminui sensivelmente os riscos de desmagnetização dos ímãs uma vez que estes ímãs possuem elevada coercitividade (campo desmagnetizante), além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com uma elevada relação torque/volume [33]. Atualmente, os ímãs permanentes são disponíveis em uma larga faixa de características magnéticas e permitem uma considerável gama de possibilidades na escolha do ímã mais adequado [34].

A relação torque/volume mais elevadas são obtidas em máquinas síncronas com ímãs permanentes. Estas máquinas tem melhor rendimento que máquinas com enrolamento de campo porque elas não têm nenhuma perda de excitação de campo, uma vez que não possuem enrolamentos no motor, exceção feita as máquinas que, além dos ímãs, possuem uma gaiola. Os ímãs ocupam menos espaço que campo com enrolamentos, e para tamanhos de armadura pequenos esta vantagem é significativa, e o custo reduzido, particularmente quando ímãs cerâmicos (ferritas) são usados, tende a fazer estes motores com custo bastante competitivo. Alguns projetos apresentam geometrias relativamente precárias que desperdiçam o material de ímã, que no caso de ímãs de terra raros é caro. O uso de ímãs de entreferro em máquinas síncronas é um exemplo disto; a densidade da forma do gap é inevitavelmente menor que no ímã, grosseiramente na razão do arco do pólo para a inclinação do polo. Esta limitação é bastante desnecessária para muitas aplicações [33].

A Siemens desenvolveu, na década de 80, um motor síncrono com ímãs de ferrita posicionado internamente no núcleo do rotor, e foi considerada a primeira topologia de núcleo do rotor com ímã embutidos, fabricada. Após, uma nova configuração de motor com ímã permanente com partida própria foi proposta e largamente desenvolvida para um faixa de aplicações. Nesta configuração, utiliza-se ímãs de ferrita de bário ou estrôncio (custo menor) ou ímãs terras raras (maior custo). Uma configuração típica de quatro polos é mostrada na figura 33. Os ímãs são dispostos em uma formação de T para qualquer par de polos adjacentes com uma seção retangular simples. Através de um projeto metucioso, é possível eliminar quase completamente a perda de fluxo magnético. A densidade de fluxo do gap, normalmente excede a densidade no ímã. Esta configuração se assemelha superficialmente com a primeira máquina com ímãs embutidos, mas há diferenças

importantes no modo de produção de fluxo a partir dos ímãs. Na máquina da Siemens, o rotor tem um espaço não magnético entre o ímã e o eixo para formar efetivamente uma barreira de fluxo, e isto também serve para fornecer fluxo de um ímã adjacente para atravessar outro ímã. O rotor da figura 33-a, por outro lado, tem uma ponte de ferro entre o ímã e o eixo não magnético. Parte do fluxo originado de um determinado pólo, passa através de um ímã somente, enquanto o restante atravessa dois ímãs. O fluxo total por pólo portanto excede o fluxo total do ímã. Isto é mostrado na figura 33-b, onde pode-se observar que pode ser alcançada uma densidade de fluxo de entreferro alta. Os polos salientes deste projeto apresentam uma razão de arco-de-polo aproximadamente de 90 por cento [33].



→ direção de magnetização
 a – estator com chapas de aço laminadas
 b – rotor com chapas de aço laminadas
 c – materiais não magnético
 d – eixo de aço não magnético
 e – ímãs
 f – barras da gaiola do rotor (circular)

tensão nos terminais = 476 V
 corrente do estator = 50 A
 potência de saída = 39,7 kW
 frequência = 60 Hz
 materiais magnético = H-90 B (terra rara de cobalto)
 entreferro radial = 0.838 mm
 espessura do ímã = 19.8 mm
 largura do ímã = 92 mm

Figura 33 – Motor Síncronos com Ímãs Embutidos – (a) Configuração de um projeto inicial de 45 kW – (b) Distribuição de Fluxo Magnético [33]

2.6.4. Máquinas Síncronas com Núcleos a partir da Metalurgia do Pó

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador, e possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos, atualmente, a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de

maior rendimento, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento fundamenta-se em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, há a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidas pelos fabricantes com uma pintura a base de óxidos sobre uma das superfícies [26,29,30].

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, nas quais circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos à ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault [26,29,30].

Com relação à construção, mudanças na forma e acionamento das máquinas elétricas encontram-se no limite do aprimoramento tecnológico e somente mudanças drásticas nos materiais utilizados na construção dos núcleos das máquinas elétricas ocasionarão melhora de rendimento das mesmas. Tal fato também ocorre com relação ao acionamento, no qual dispositivos a partir de semicondutores, como os inversores, igualmente se encontram no limite do desenvolvimen tecnológico [34].

Contudo, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P), é possível construir tais núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica, se comparadas ao aço convencional, o que reduz as correntes parasitas. No caso da aplicação deste processo na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas, poderá haver algumas vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Assim, na medida em que for possível construir núcleos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e, naturalmente, menos energia será consumida na fabricação das mesmas. Salienta-se também que com a utilização de ligas magnéticas de maior resistividade na construção dos núcleos do estator e do rotor haverá uma redução nas perdas por correntes parasitas, ocasionando um maior rendimento, resultando assim economia de energia elétrica [34-36].

Atualmente, a aplicação da M/P em núcleos de máquinas elétricas está restrita a motores elétricos especiais para os quais o rendimento não é o critério mais importante, como no caso de minimotores de geometria complexa, em alguns servomotores nos quais os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada e partes de máquinas nas quais não há variação de fluxo, como núcleos de rotores de máquinas síncronas. Entretanto, alguns estudos estão sendo realizados em outros tipos de máquinas obtidas a partir da M/P no intuito de se comprovar ou descartar a aplicação desta tecnologia nestas máquinas [34].

A Universidade FEEVALE vem desenvolvendo em parceria com outras universidades como o LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica) da UFRGS, ULBRA e outras

instituições, projetos de máquinas elétricas trifásicas a serem utilizados em pequenos aerogeradores de até 10 kW. Nestes estudos, a carcaça, eixo, tampas e rolamentos são de um motor de indução trifásico de 10 cv. O núcleo do estator foi construído de chapas ou material sinterizado, e três topologias de rotor com material sinterizado e ímãs permanentes foram estudados e construídos. A figura 34-a mostra o núcleo do estator das máquinas utilizadas como base, e a figura 34-b mostra o estator embutido na carcaça da máquina (Voges Motores) [30].

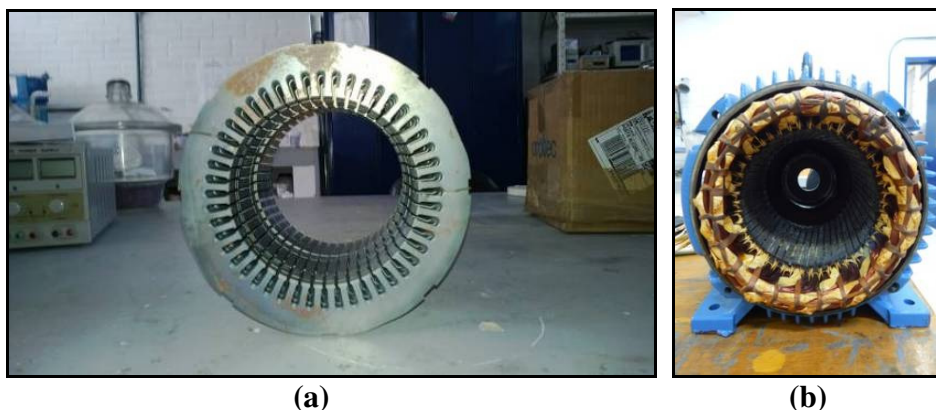


Figura 34 – Motor utilizado base – (a) Estator – (b) Estator embutido na carcaça [30]

A figura 35 mostra o rotor de polos salientes, a figura 36 o rotor de polos lisos e a figura 37 o rotor com ímãs embutidos [30].

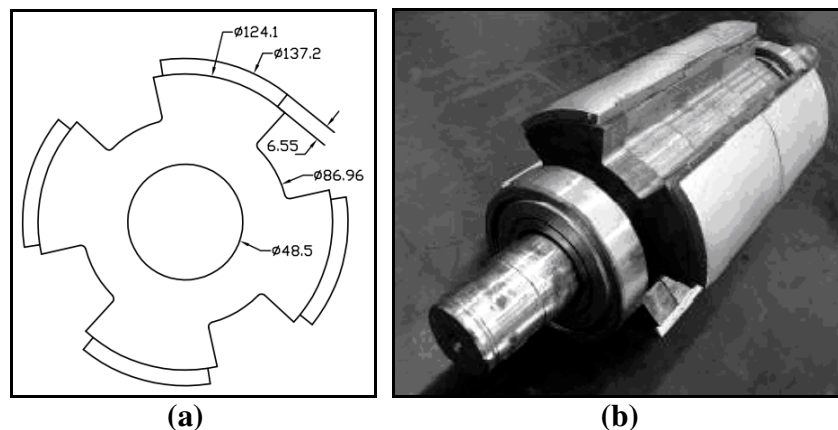


Figura 35 – Rotor de polos salientes – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [30]

Os rotores mostrados foram construídos com ferro puro sinterizado e ímãs de Nd-Fe-B. Considerando dados bibliográficos, a adição de silício, fósforo, níquel e outros elementos de liga melhora algumas propriedades físicas do ferro puro, como aumento da permeabilidade relativa e da resistividade elétrica, o que implicaria em máquinas de melhor desempenho, se comparada aquelas com núcleos de ferro puro. Assim, as pesquisas no desenvolvimento destas máquinas na Universidade, tem por objetivo o estudo das

propriedades físicas destes materiais sinterizados a partir do acréscimo destes elementos de liga aos núcleos da máquinas estudadas [30].

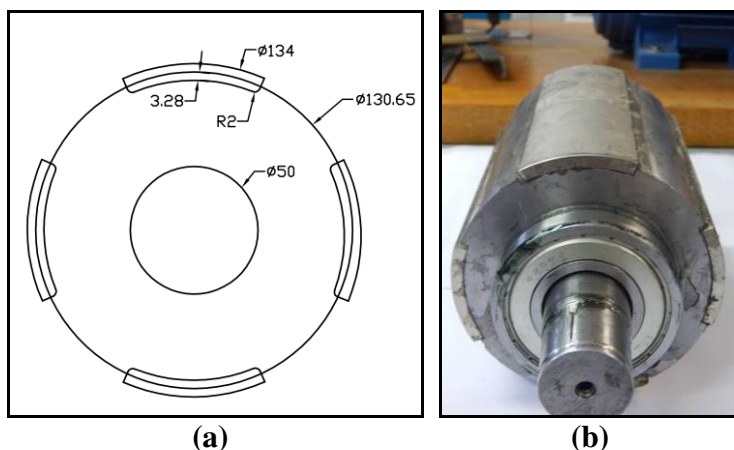


Figura 36 – Rotor de polos lisos – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [30]

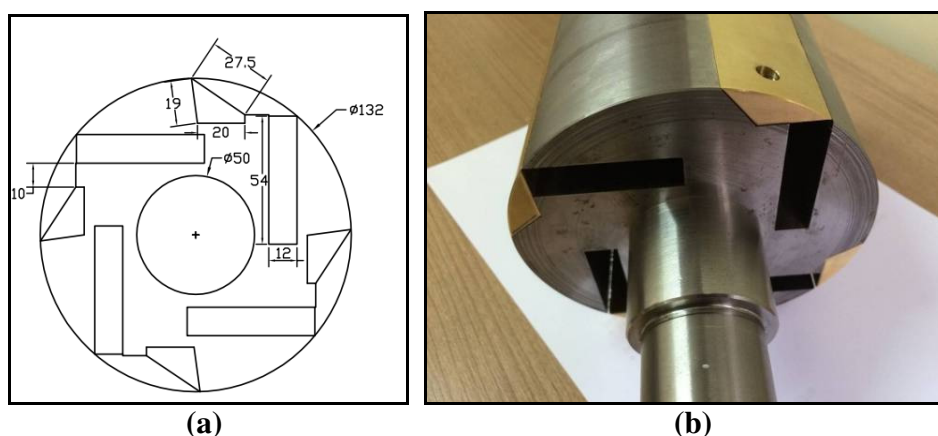


Figura 37 – Rotor com ímãs embutidos – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [30]

2.7. SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Os resultados das interações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em programa de elementos finitos FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A ideia principal é dividir o material em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples. Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo. A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida é possível resolver o problema ou sistema de equações mais facilmente. Através do processo de discretização é gerado um sistema de álgebra linear com milhares de variáveis. A solução do sistema ocorre com o auxílio de processadores os quais através de algoritmos, são capazes de resolver o sistema em pouco tempo. A figura 38 mostra um diagrama esquemático sobre a Metodologia FEMM [37].

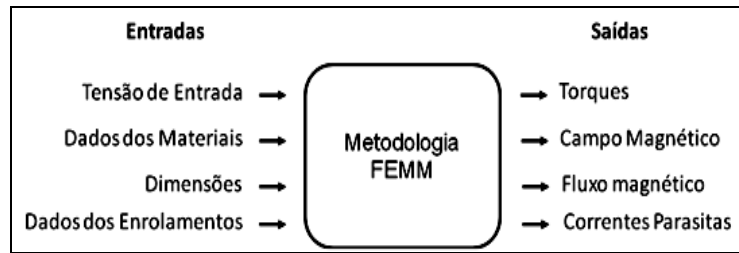


Figura 38 – Metodologia FEMM 4.2 [37]

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

O Aerogerador desenvolvido neste projeto, foi baseado no Aerogerador Horizontal de 2,5 kW modelo FD3.8-2.5kW da empresa Shandong Huaya Ltda (figura 39), contudo somente as dimensões foram mantidas, principalmente das pás, e outras características, como potência, o qual ficou limitada em 2,5 kW. A velocidade nominal do Aerogerador importado é de 350 RPM, enquanto do Aerogerador desenvolvido neste projeto é de 300 RPM, devido a características construtivas. O Aerogerador Modelo FD3.8-2.5kW foi adquirido, estudado e escaneado em scanner 3 D (figuras 40 e 41) para melhor avaliação de sua estrutura. Assim, foram dimensionadas as pás, o bico, o cubo, o leme, bem como toda a parte estrutural da Aerogerador.



- Potência Máxima: 3500 W
- Diâmetro do Rotor: 3,8 m
- Número de Pás: 3
- Velocidade Inicial: 3 m/s
- Velocidade de Potência Nominal: 12 m/s
- Velocidade Máxima de Trabalho: 50 m/s
- Área do Rotor: 11,3 m²
- Altura da Torre: 8 a 15 m
- Torque Inicial (produzido): 1,5 Nm

Figura 39 – Aerogerador Modelo FD3.8-2.5kW tomado como base

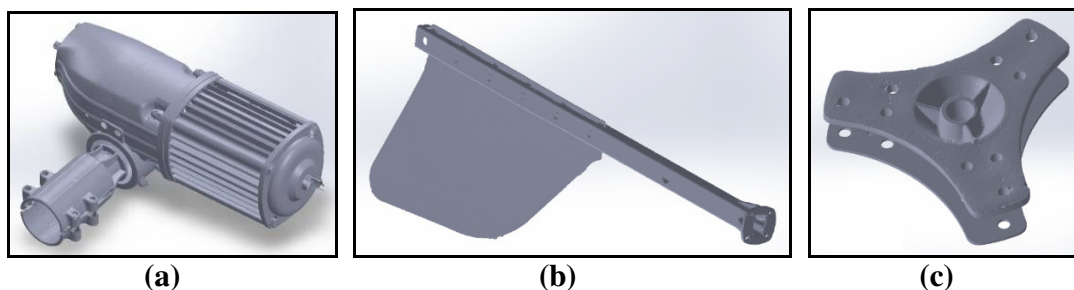


Figura 40 – Peças Mecânicas do Aerogerador FD3.8-2.5kW – (a) Conjunto gerador-redutor-suporte de Fixação na torre – (b) Leme – (c) Suporte de fixação das pás

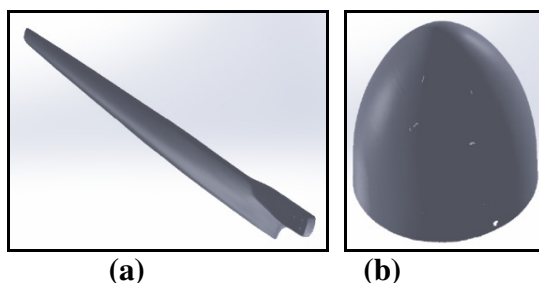


Figura 41 – Peças em Fibra de Vidro do Aerogerador FD3.8-2.5kW – (a) Pás – (b) Bico

O Gerador Trifásico do Aero gerador, foi uma Máquina Elétrica Síncrona Trifásica com Ímãs Permanentes com Núcleo do Rotor a partir de Ferro Sinterizado, desenvolvida a partir de um Motor de Indução Trifásico de 4 cv, substituindo-se o núcleo rotor e rebobinando a estator, conservando-se todas as outras partes da máquina, como carcaça, eixo, tampas e rolamentos. Inicialmente foi realizado um estudo do ferro sinterizado para obtenção de suas propriedades elétricas, Posteriormente a partir destes dados e das especificações do motor de indução tomado como base, foi projetado o rotor e redimensionado os enrolamentos do estator, etapa na qual também foram realizadas simulações da máquina. A seguir, a máquina foi montada e testada em bancada para obtenção dos parâmetros como tensão induzida, potência e rendimento.

O controlador consiste de retificador, conversor CC e inversor, capaz de adequar as tensões e frequência geradas para as características da rede, ou seja, 220V / 60 Hz.

3.2. ESTUDO DO FERRO SINTERIZADO

A construção do rotor da máquina foi a partir de blocos maciços de ferro sinterizado. Assim, inicialmente foram confeccionados corpos de prova para determinação de suas propriedades físicas como resistividade elétrica, propriedades magnéticas como curvas de histerese e magnetização e propriedades físicas como dureza e tensão de escoamento, além de análise de microestrutura a partir da metalografia e MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

3.2.1. Obtenção dos Corpos de Prova

O pó de ferro utilizado foi o *ASC100.29*, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm adquirido junto à *Höganäs do Brasil Ltda*. Para a compactação dos corpos de prova, foi adicionado ao pó de ferro 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco, em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Para análise da dureza, tensão de escoamento e metalografia do ferro sinterizado, utilizou-se a matriz da figura 42-a, obtendo-se corpos de prova na forma de cilindros de diâmetro de 13,45 mm (figura 42-b). Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da figura 43-a, para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis com diâmetro externo de 50 mm e interno de 41,95 mm (figura 43-b).

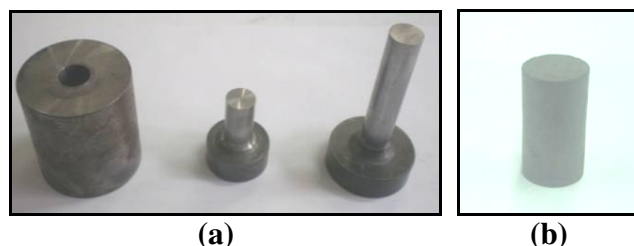


Figura 42 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova



Figura 43 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova

Os corpos de prova foram compactados com pressão de 600 MPa, segundo dados de literatura [16,17]. Para compactação dos cilindros (figura 42-b), foi utilizada uma prensa hidráulica manual de 40 toneladas, marca *Bovenau* (figura 44-a), aplicando sobre a matriz (figura 42-a) uma força de 8,5 toneladas. Para compactação dos anéis (figura 43-b), foi utilizada uma prensa hidráulica manual de 200 toneladas, marca *Nowik* (figura 44-b), aplicando sobre a matriz (figura 43-a) uma força de 34 toneladas. Nas compactações, tanto dos cilindros quanto dos anéis, a altura do pó na cavidade sobre redução entre 50 e 51%.

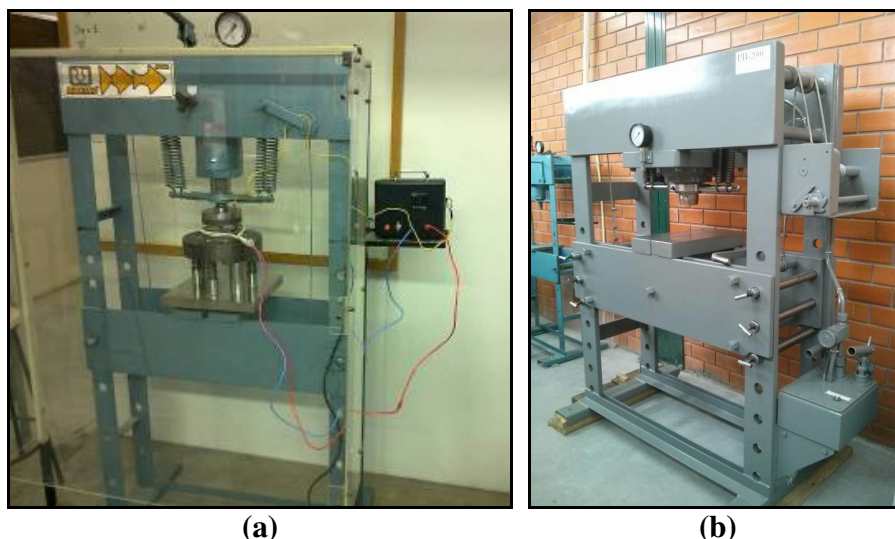


Figura 44 – Prensas Hidráulicas utilizadas para compactação dos corpos de prova – (a) Bovenau de 40 toneladas – (b) Nowik de 200 toneladas

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla marca *Sanchis* (figura 45-a), temperatura máxima de 1.250 °C, com sensor termopar tipo K, e resistências de Kanthal A-1, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500 °C, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura por 60 minutos (patamares segundo dados bibliográficos [16,17]). Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A figura 45-b mostra os patamares de sinterização.

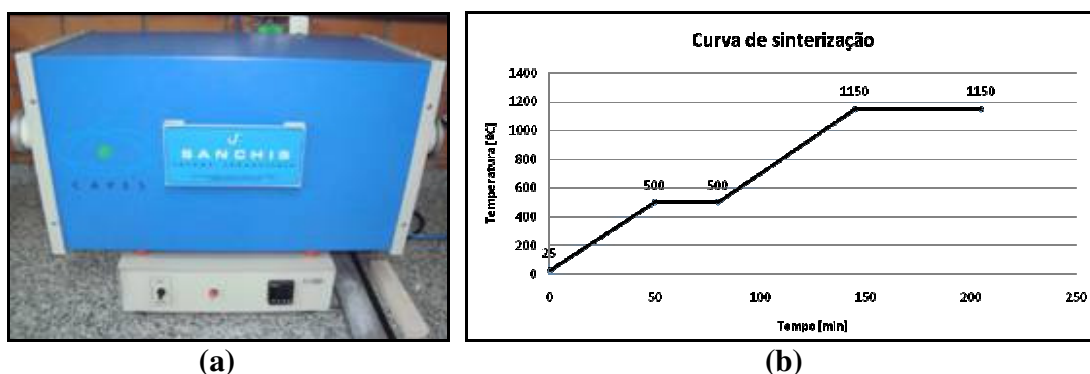


Figura 45 – Sinterização dos Corpos de Prova – (a) Forno utilizado – (b) Patamares de Sinterização

3.2.2. Análise Dimensional e Microestrutura

A tabela 4 mostra os dados dos corpos de prova na forma de cilindro compactados, e a tabela 5 mostra os dados após a sinterização.

Tabela 4 – Corpos de Prova na forma de Cilindro – Compactados

Corpos de Prova	Altura [cm]	Diâmetro [cm]	Volume [cm ³]	Massa [g]	Densidade [g/cm ³]
I	1,06	1,36	1,52	10,31	6,78
II	1,10	1,36	1,59	10,48	6,59
III	1,13	1,36	1,63	10,99	6,75
Média					6,71

Tabela 5 – Corpos de Prova na forma de Cilindro – Sinterizado

Corpos de Prova	Altura [cm]	Diâmetro [cm]	Volume [cm ³]	Massa [g]	Densidade [g/cm ³]
I	1,05	1,35	1,50	10,24	6,83
II	1,08	1,35	1,55	10,45	6,76
III	1,17	1,35	1,61	10,95	6,81
Média					6,80

O corpo de prova na forma de cilindro foi cortado e polido (figura 46-a) para análise metalográfica, utilizando o Microscópio marca *Pantec*, Modelo NMM 800 TRF (figura 46-b), com as capturas pelo software TCCapture.

Foram realizadas análise da microestrutura a partir do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), tanto do pó de ferro, quanto do ferro consolidado (compactado e sinterizado), utilizando o dispositivo *Scanning Eletron Microscope*, Modelo *JSM-6510LV* (figura 47).

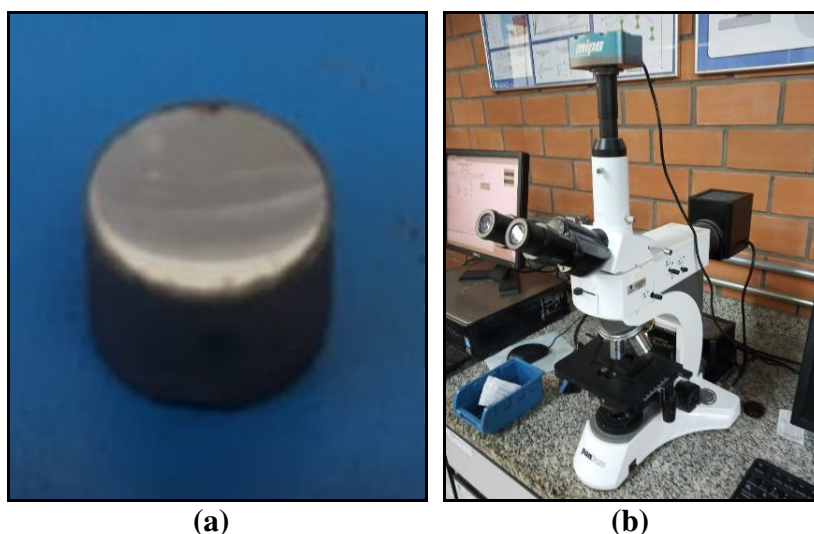


Figura 46 – Metalografia – (a) Corpo de prova polido – (b) Microscópio utilizado



Figura 47 – Microscópio Eletrônico de Varredura Modelo *JSM-6510LV*

3.2.3. Propriedades Magnéticas e Resistividade Elétrica

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam campo magnético \mathbf{H} aplicado a um material com a indução magnética \mathbf{B} resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, foi observada a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) [21]. A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773 [38], a partir do corpo de prova sinterizados na forma de anel (anel de Rowland). Inicialmente, os anéis foram isolados com fita isolante e, em seguida, bobinados com fio de cobre AWG 26 (0,41mm de diâmetro). Foi obtido o número de espiras da bobinagem secundária. Posteriormente, foram isolados novamente com fita adesiva e bobinados com fio de cobre AWG 23 (0,57mm de diâmetro). Também, contou-se o número de espiras da bobinagem primária. O equipamento e o

software para a aquisição dos dados utilizados foram o Global Mag, modelo TLMP-TCH-14 (figura 48-a). Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5A e frequência de 0,05Hz. A figura 48-b mostra o anel conectado ao traçador. Os dados de entrada para a obtenção da curva de histerese foram [39]:

- Densidade de espiras do primário (n° de voltas/m).
- Número de espiras do secundário.
- Resistência do fio de cobre (padrão – 0,2 Ohms).
- Área secção Transversal (mm^2).
- Densidade do material (kg/m^3).



Figura 48 – Traçador de Curvas Magnéticas – (a) Modelo TLMP-TCH-14 – (b) Conectado ao anel bobinado

A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multiteste, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal [40]. A figura 49-a mostra o anel cortado com os fios soldados e a figura 49-b mostra o anel conectado a uma fonte de tensão contínua, com medição de corrente e tensão.

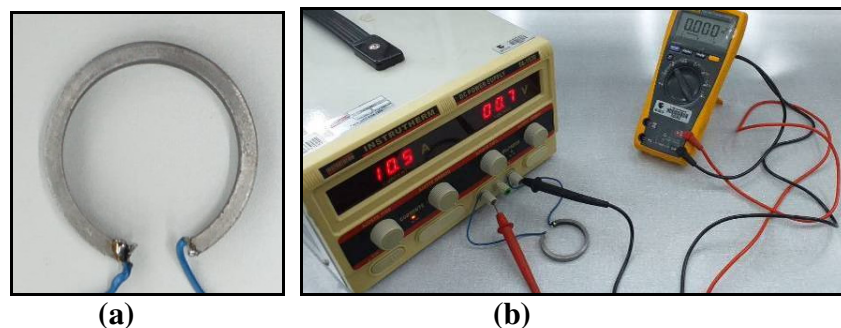


Figura 49 – Determinação da Resistividade – (a) Anel cortado – (b) Terminais soldados e conectados a fonte elétrica e medição

A corrente de valor constante foi fornecida por uma Fonte de Tensão Contínua Ajustável Instrutherm, Modelo FA 1030, com tensão e corrente máximas de 30V e 10A, e mediu-se a tensão sobre o anel com o auxílio de voltímetro de precisão Fluke, modelo 179 True-RMS-Multimeter. A resistividade elétrica foi calculada com a equação 24, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel [39,40].

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow R = \frac{V}{I} \Rightarrow \rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot l} \quad \text{Equação 24}$$

onde:

- ρ - Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)
- R - Resistência Elétrica (Ω)
- l - Comprimento do Anel (m)
- A - Área da Seção Transversal (m^2)
- V - Tensão Elétrica (V)
- I - Corrente Elétrica Aplicada (A)

3.2.4. Propriedades Mecânicas

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova na forma de cilindro, a saber, a dureza e tensão de escoamento. Os ensaios de dureza (escala HRB) foram realizados em um durômetro Pantec, modelo RASN / N°496-00 (figura 50-a), utilizando o padrão Rockwell B empregado em ligas de cobre, níquel, alumínio e aços não temperados, com penetrador de esfera 1/16" e carga de 100kgf (980,7N), segundo a norma ASTM E18 [41]. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000 com célula de carga até 200kN (figura 50-b), utilizando-se velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9 [42].

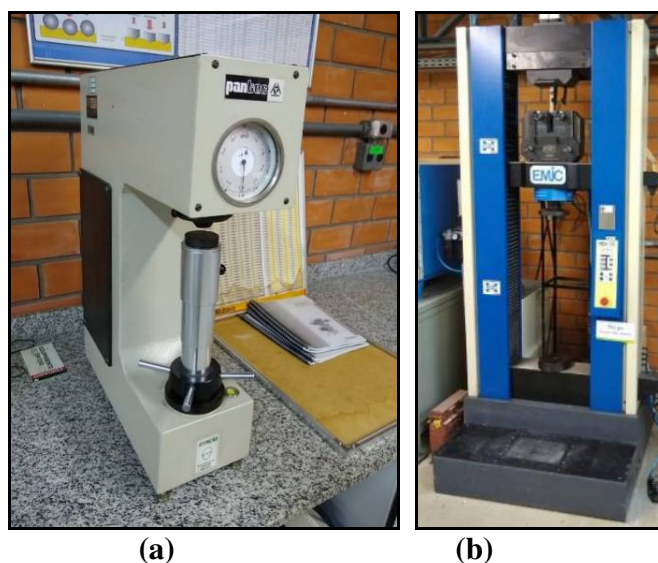


Figura 50 – Ensaios mecânicos – (a) Durômetro Pantec modelo RASN / N°496-00 – (b) máquina de ensaios universal Emic DL20000 com célula de carga até 200kN

3.3. DESENVOLVIMENTO DO GERADOR TRIFÁSICO

O Gerador Elétrico para o Aerogerador de 2,5 kW foi montado sobre uma base de um Motor de Indução Trifásico 4 polos, 4 cv, fabricado pela Voges Motores, do qual foram aproveitados, a carcaça, as chapas do núcleo do estator, o eixo, rolamentos e tampas (figura 51), que são peças comuns para vários tipos de motores AC (corrente alternada). Cita-se que um motor é, em última análise, uma Máquina Elétrica Rotativa, e com raras exceções, funciona como Motor e Gerador. O desenvolvimento consistiu em fabricar um novo rotor a partir de material sinterizado de alta resistividade elétrica (e não chapas como os geradores convencionais) embutindo-se ímãs permanentes de Nd-Fe-B (neodímio-ferro-boro) de elevada retentividade e coercitividade. Além de um novo rotor, também o estator foi rebobinado a fim de suportar os novos níveis de tensão e fluxo magnético de entreferro, bem como as novas potências envolvidas. Nesta configuração, é possível modificar um Motor de Indução Comum em um Gerador Trifásico de Alto Desempenho e Rendimento.



Figura 51 – Peças de um Motor de Indução de 4 cv tomado como base

3.3.1. Desenvolvimento do Rotor

O projeto do rotor baseou-se em uma Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes, desenvolvida pela fábrica de Motores Siemens [33], no qual os ímãs são embutidos no interior do núcleo do rotor. A figura 52-a mostra o detalhe do núcleo do rotor com os sulcos, no qual os ímãs são inseridos, e a figura 52-b mostra o desenho dimensional do rotor.

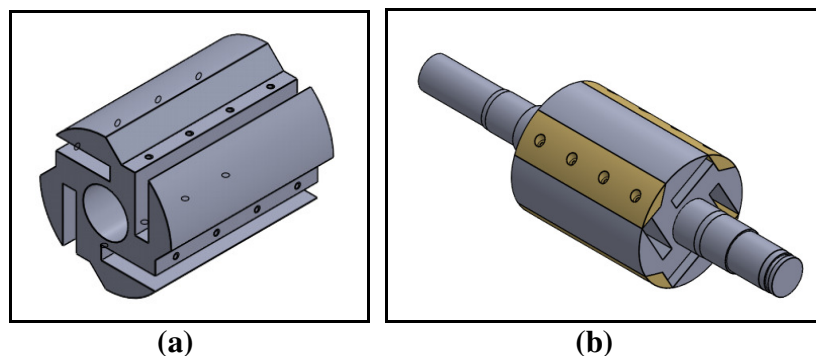


Figura 52 – Projeto do Rotor – (a) Detalhe dos sulcos para inserção dos ímãs – (b) Desenho dimensional

A montagem do rotor foi a partir de blocos maciços de Ferro Puro obtido a partir da Metalurgia do Pó convencional empregando os mesmos parâmetros na compactação e sinterização utilizados na obtenção dos corpos de prova. A compactação foi realizada no LdTM / UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica) coordenado pelo Prof. Dr. Lício Schaeffer, utilizando-se uma prensa de 750 toneladas marca FKL (figura 53-a), e uma matriz com diâmetro de cavidade e punções de 15 cm. A figura 53-b mostra o detalhe desta matriz preso na mesa da prensa. Assim, foram obtidos blocos de 15 cm de diâmetro e alturas variadas entre 5 a 8 cm (figura 53-c). As peças foram sinterizadas em um forno de esteira (figura 54-a) resultando em blocos maciços conforme mostra a figura 54-b.

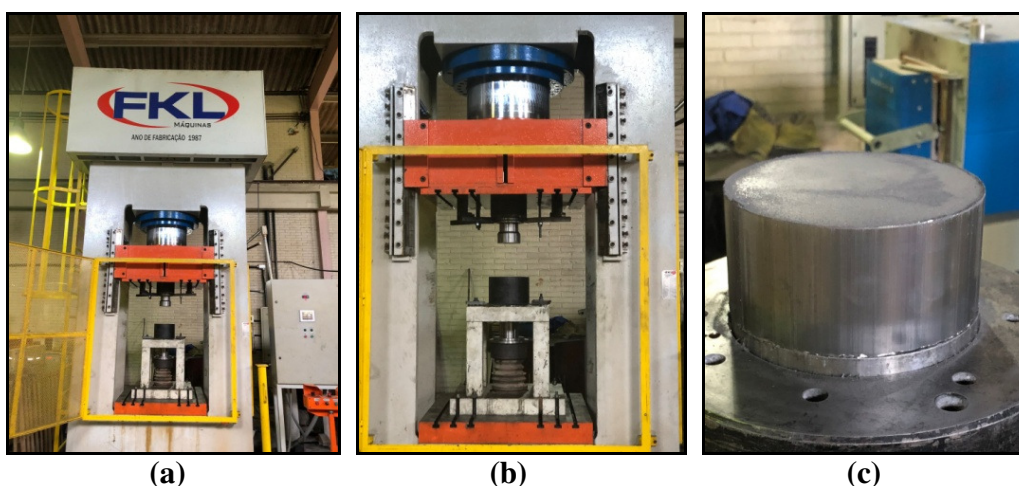


Figura 53 – Compactação dos blocos para o rotor – (a) Prensa FKL – (b) Detalhe da matriz – (c) Bloco compactado



Figura 54 – Sinterização dos blocos do rotor – (a) Forno de esteira – (b) Bloco sinterizado

Após, os blocos foram usinados (figuras 55-a, 55-b e 55-c), e inseridas no eixo para retificação (figura 55-d). Após foram usinados os sulcos (figuras 55-e e 55-f) nos quais foram embutidos os ímãs de Nd-Fe-B (figura 55-g), resultando no rotor da figura 55-h.

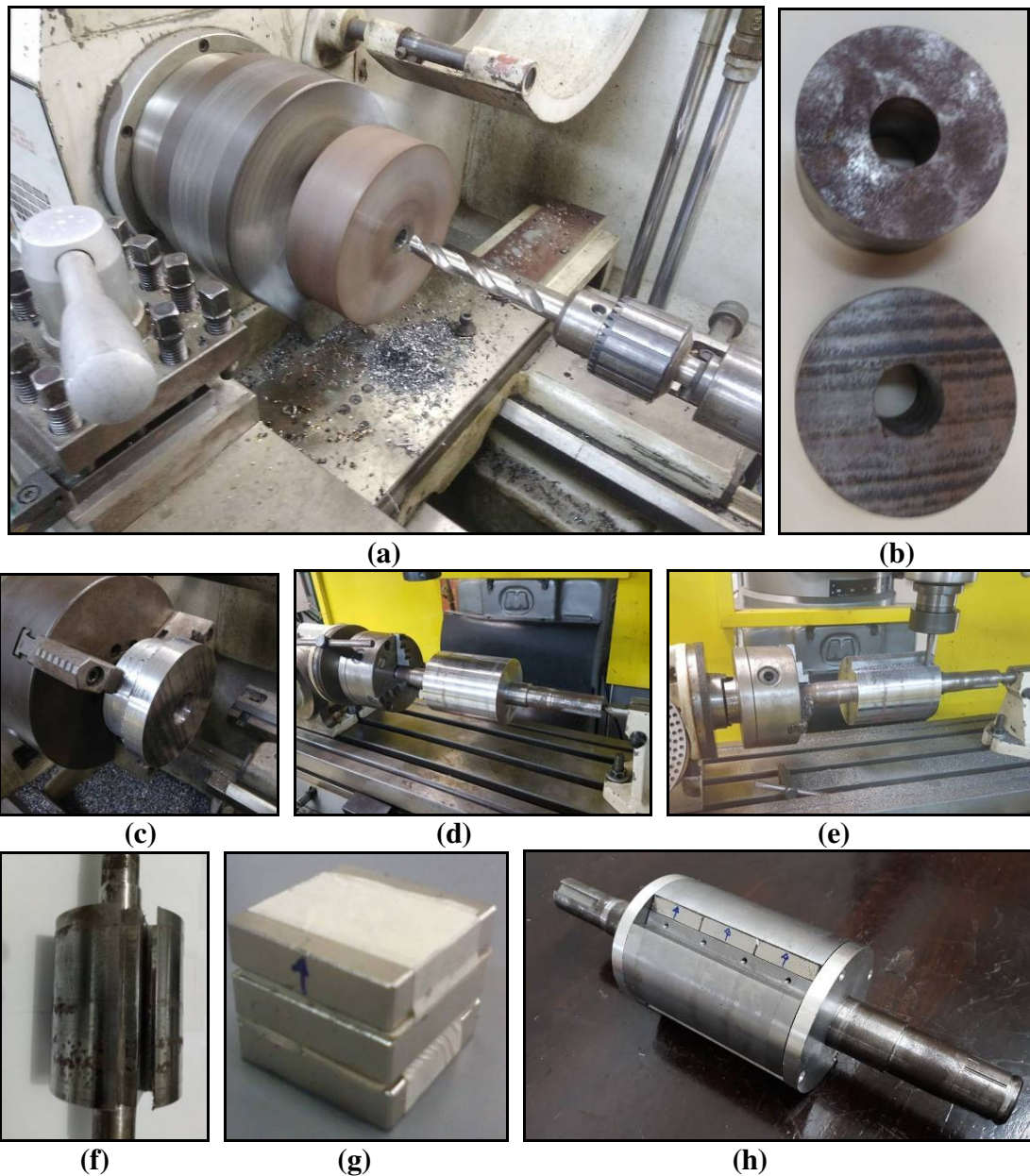


Figura 55 – Sequência de passos para fabricação do Rotor do Gerador para o Aerogerador de 2,5 kW – (a) Furação dos Blocos – (b) Blocos furados – (c) Blocos sendo usinados – (d) Retificação do Rotor – (e) Fresa de Topo para usinagem dos Sulcos – (f) Rotor com os Sulcos – (g) Ímãs de Nd-Fe-B – (h) Rotor montado

3.3.2. Simulação da Máquina Trifásica

Para efeito de comparação, a partir do software FEMM 4.2 foram realizadas simulações com estator de chapas M15 e núcleo do rotor também com chapas M15 mas também com ferro sinterizado em uma máquina similar, contudo de 10 cv. A figura 56 mostra, à esquerda (a), a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e a direita (b), as linhas de

fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina com rotor de chapas de aço M15. A figura 57 mostram os mesmos gráficos para o rotor com ferro sinterizado.

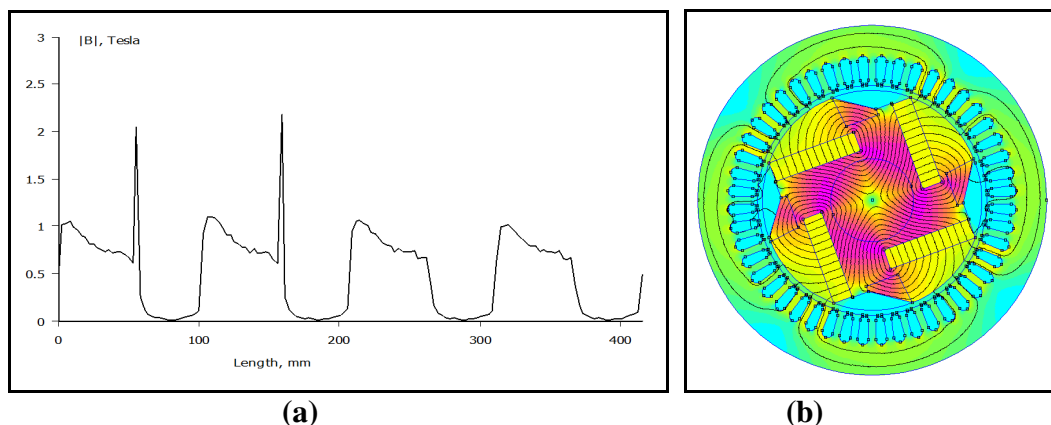


Figura 56 – Simulação da máquina com rotor a partir de chapas aço M15 – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

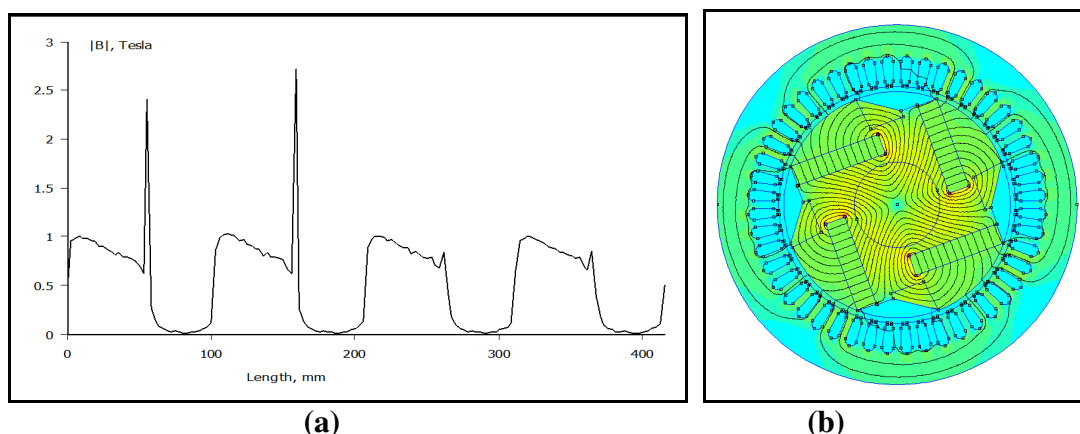


Figura 57 – Simulação da máquina com rotor a partir de ferro sinterizado – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

3.3.3. Montagem da Máquina Síncrona Trifásica

Para montagem dos estator as chapas foram agrupadas com uma inclinação de uma ranhura por pacote (figura 58-a), prensadas e colocado cordões de solda para a formação do pacote, e após foi colocado um cordão de solda para inserção na carcaça (figura 58-b). A figura 58-c mostra o estator inserido na carcaça. O bobinamento do Gerador Elétrico (esquema elétrica na figura 59) foi baseado na bobinagem do Motor de Indução de 4 cv, 4 polos da Voges Motores, e realizado na Casa dos Motores em Sapucaia, com os seguintes especificações: Passe 8-10-12, fio 3x22 AWG, com 40 espiras por ranhura [43]. A figura 60 mostra o Gerador Elétrico do Aerogerador completamente montado.

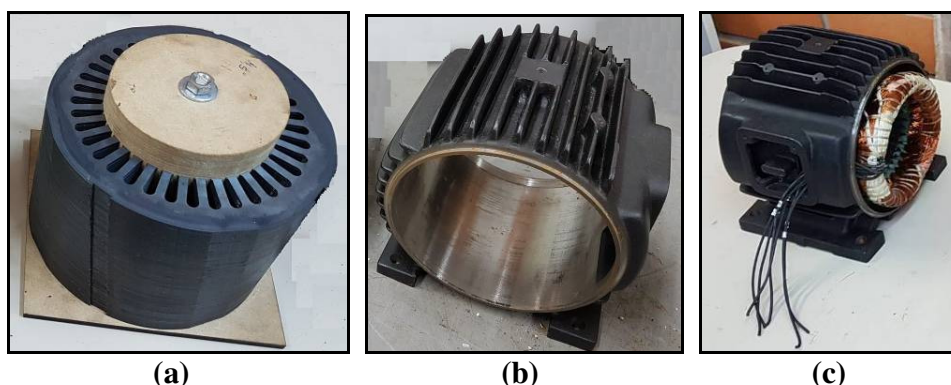


Figura 58 – Montagem do Estator do Gerador para o Aerogerador – (a) Pacote de Chapas – (b) Carcaça – (c) Estator montado

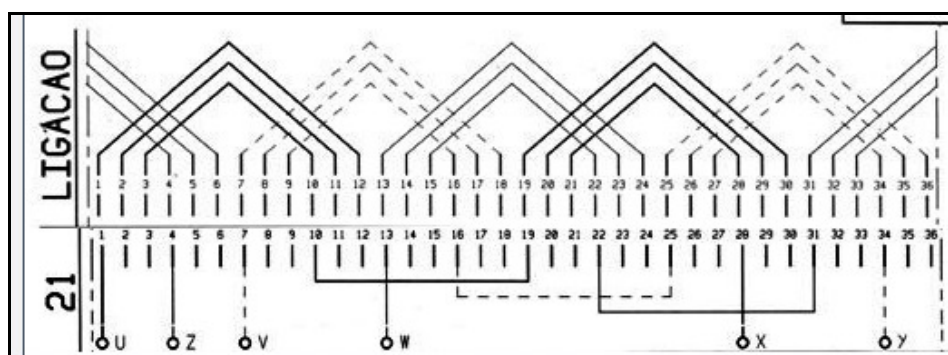


Figura 59 – Esquema Elétrico do bobinamento do Gerador Elétrico do Aerogerador [43]

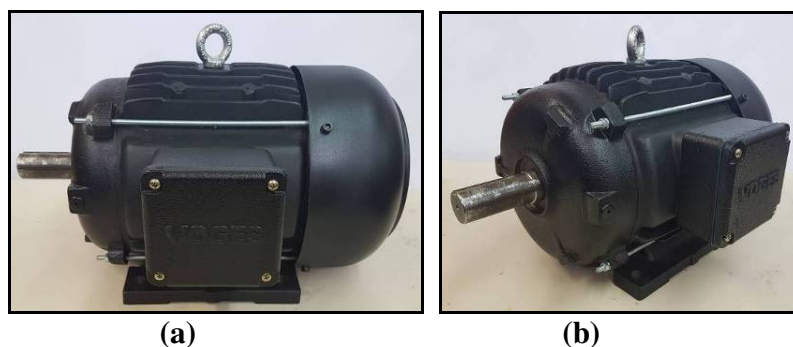


Figura 60 – Gerador Elétrico do Aerogerador completamente montado – (a) Vista Lateral – (b) Vista em Perspectiva

3.3.4. Ensaios da Máquina Síncrona em Bancada

A bancada de Ensaios (figura 61) é essencial, para os testes da Máquina Síncrona Trifásica. Cita-se que uma **Máquina Elétrica Rotativa Síncrona** com ímãs permanentes pode funcionar tanto como Motor e como Gerador. Assim, a Máquina Elétrica a ser testada como Gerador Elétrico (à direita nas figuras 61), é acoplada a um Motor (à esquerda nas figuras 66), com uma célula de carga entre as máquinas para medição do torque resultante entre os eixos das mesmas (detalhe na figura 61-c).

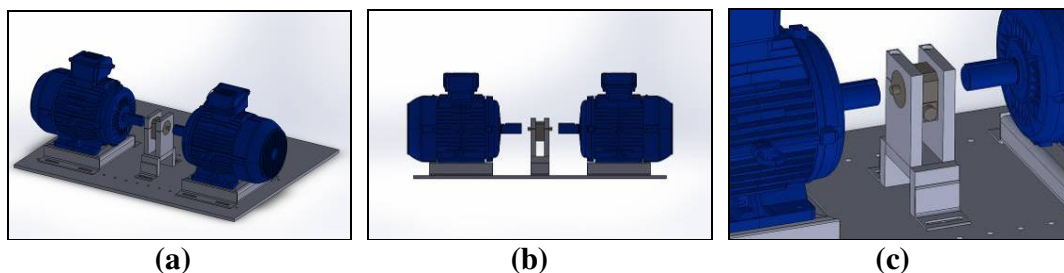


Figura 61 – Esquema para testes dos Geradores – (a) Vista em perspectiva – (b) vista frontal – (c) Detalhe da célula de carga

A figura 62 mostra o esquema geral da bancada para ensaios de máquinas elétricas rotativas para testes como Gerador.

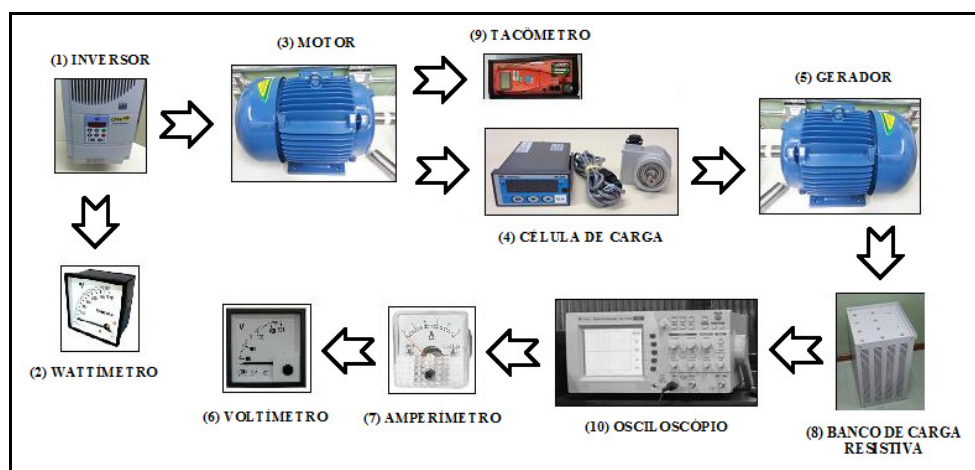
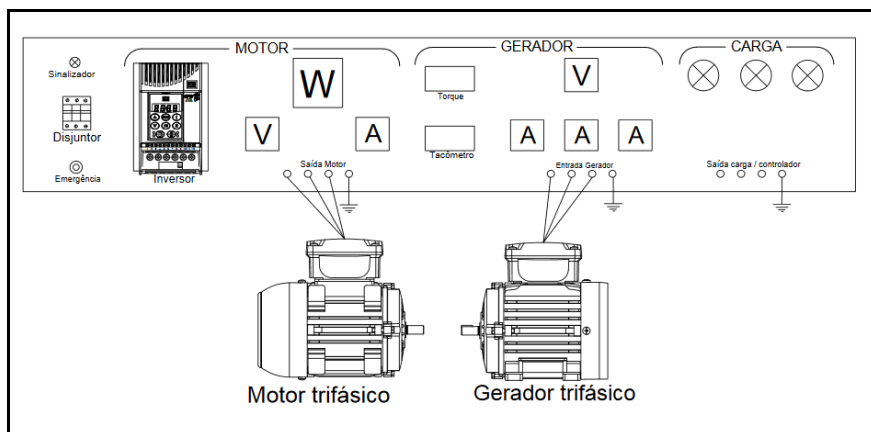


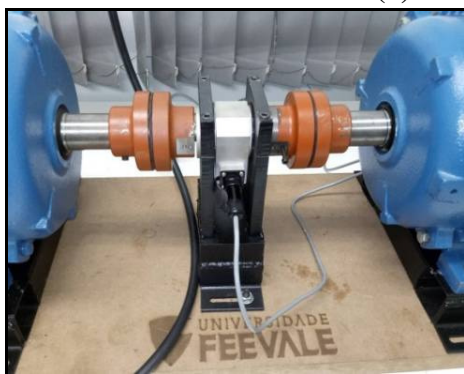
Figura 62 – Esquema da bancada proposta para testes dos Geradores

No funcionamento como Motor, a máquina a ser testada (5), é acionada pelo inversor Trifásico (1), o qual, além de proporcionar uma variação na velocidade da máquina, também informa a Tensão e a Corrente, sendo possível assim, determinar a Potência Aparente. A partir do Wattímetro (2) é possível determinar a Potência Ativa na entrada do Motor. O Gerador (5) funciona como Carga para o Motor (3) e ambos são acoplados a partir de uma Célula de Carga (4) com a qual é possível medir o torque no eixo e, portanto da carga. O Gerador (5) alimenta um Banco de Carga Resistiva (8), e a partir do Voltímetro (6) e Amperímetro (7) é possível determinar a Potência Ativa na saída do Gerador (5). A partir do Tacômetro (9) é possível medir a Velocidade Angular em RPM (rotação por minutos) no eixo entre as máquinas. A partir da velocidade e torque, determina-se a Potência Mecânica entre os eixos das máquinas. Um Osciloscópio (10) está ligado na saída do Gerador (5) para visualização de formas de onda de Tensão deste. No caso dos testes da máquina síncrona como Gerador, a máquina a ser testada é o gerador e o motor é convencional. Assim, a partir desta bancada, é possível determinar a potência e níveis de tensão dos geradores desenvolvidos neste projeto, bem como a tensão nominal e visualização de formas de onda. A figura 63-a mostra o desenho esquemático da bancada, a figura 63-b mostra o detalhe da célula de carga do sensor de torque e a figura 63-c mostra o banco de cargas resistivo de 7,5 kW com 9 resistências e tensão nominal, por resistência, de

de 220 V. Após a montagem final, a Máquina Síncrona Trifásica foi levado para a Bancada de Ensaios (figura 64) para os testes de Potência, Tensão, Corrente Elétricas e Rendimento.



(a)



(b)



(c)

Figura 63 – Bancada para testes dos Geradores – (a) Desenho esquemático – (b) Detalhe da Célula de Carga – (c) Detalhe do Banco de Carga Resistiva



Figura 64 – Máquina Síncrona Trifásica do Aerogerador na Bancada de Ensaios

3.4. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA MECÂNICA

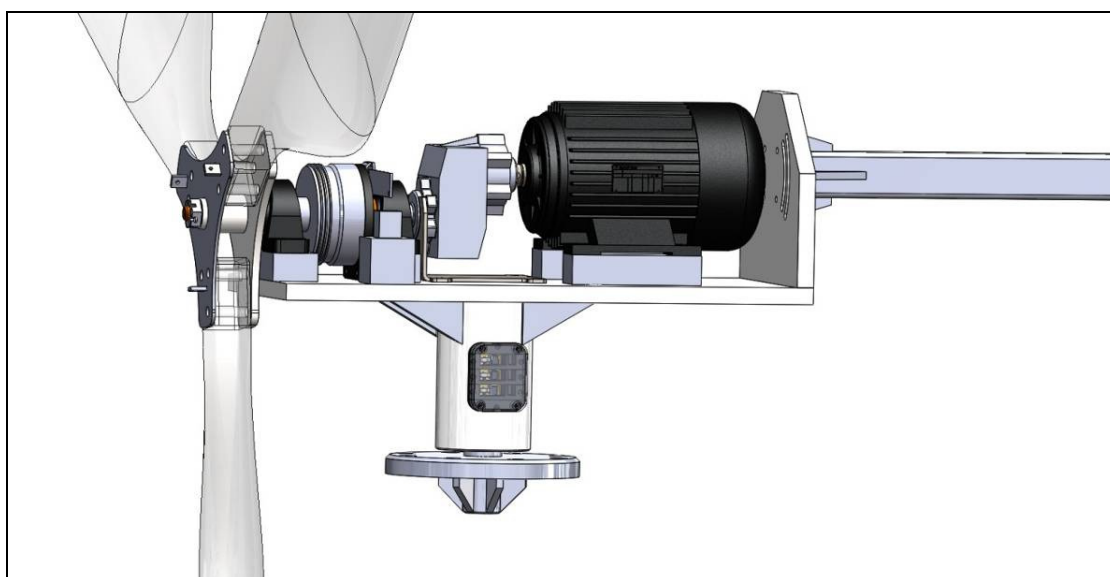
A partir do estudo e após muitas modificações, o Aerogerador de 2,5 kW desenvolvido neste trabalho, foi projetado e os desenhos dimensionais encontram-se no Anexo I.

3.4.1. Sistema Mecânico

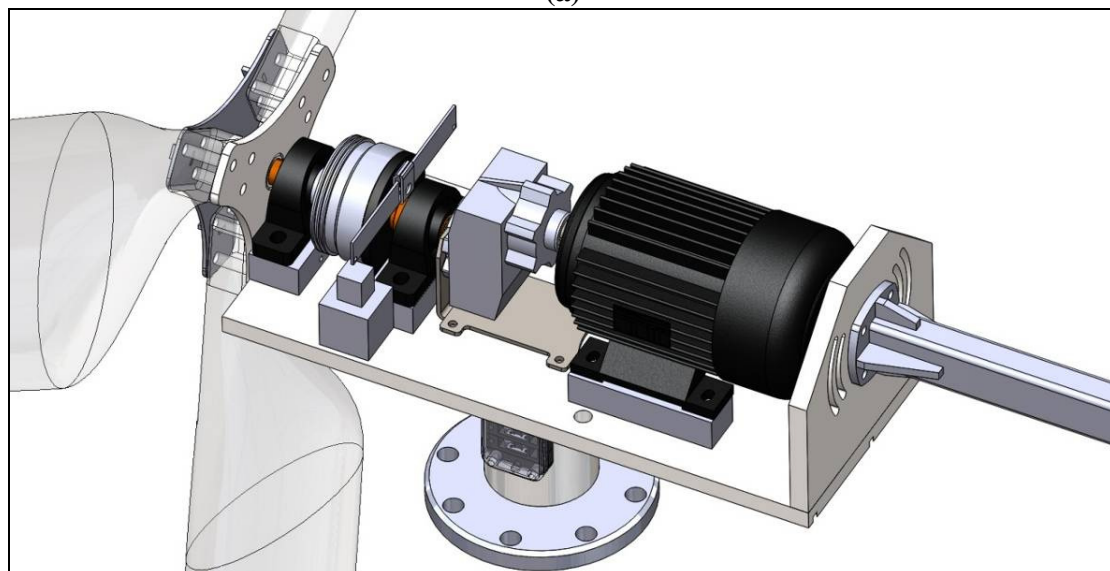
A estrutura mecânica foi concebida a partir de estudos de outros aerogeradores de 2,5 kW, particularmente o modelo FD3.8-2.5kW da empresa Shandong Huaya Ltda cujas imagens foram digitalizadas a partir de scanner 3D. A figura 65 mostra a Estrutura Interna do Aerogerador, a figura 66-a mostra a vista detalhada lateral interna e a figura 66-b mostra a vista detalhada interna em perspectiva do Aerogerador.



Figura 65 – Vista Estrutural interna do Aerogerador



(a)



(b)

Figura 66 – Detalhes Internos do aerogerador – (a) Vista Lateral – (b) Vista em Perspectiva

O ajuste das velocidades de giro do eixo das pás da turbina hidráulica e do eixo do gerador trifásico será realizado a partir de um redutor-multiplicador (figura 67), que possui uma relação de 1 para 6. Cita-se que, enquanto o eixo do gerador trifásico gira a 1800 RPM, o eixo das pás possui velocidade nominal de 300 RPM. Esta relação é exatamente de 1 para 6. O Aerogerador desenvolvido neste projeto possui um freio eletromagnético, no qual os terminais dos enrolamentos de armadura são curto-circuitados através de uma contatora, comandada por um relé a partir do CLP (Controlador Lógico Programável). Contudo, como se trata de um protótipo e por razões de segurança, achou-se conveniente acoplar ao eixo das pás, também um freio mecânico, o qual consiste de uma adaptação de um freio de moto (figura 68-a). Nesta condição, o Aerogerador encontra-se sempre travado, e somente a

partir de outro comando do CLP o mesmo é destravado, a partir de um atuador solenóide (figura 68-b) que, ao ser energizado, destrava o freio.

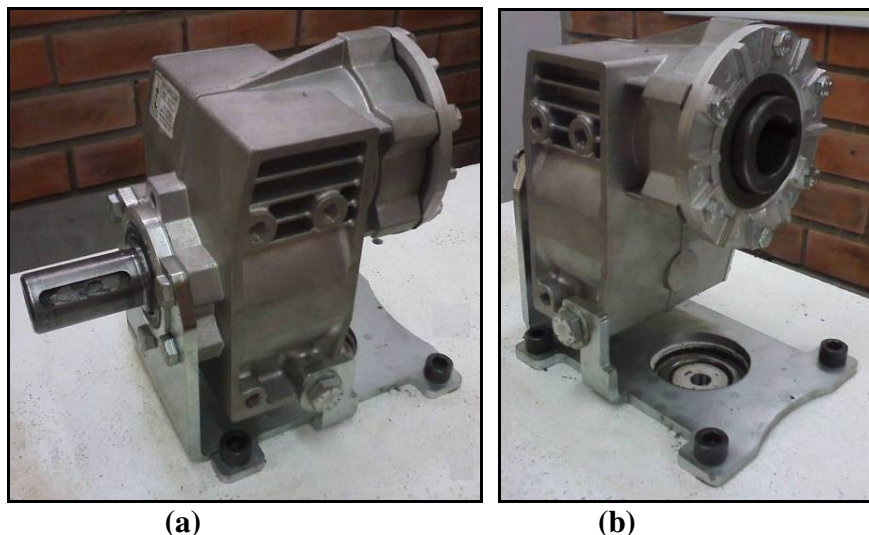


Figura 67 – Multiplicador de velocidades para ajustar as velocidades do eixo do gerador trifásico com o eixo do rotor das pás – (a) Vista da Esquerda – (b) Vista da Direita

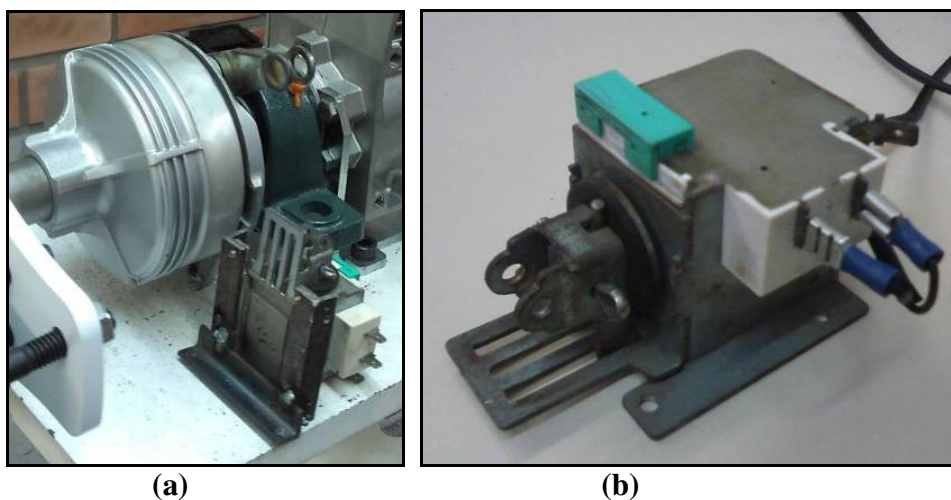
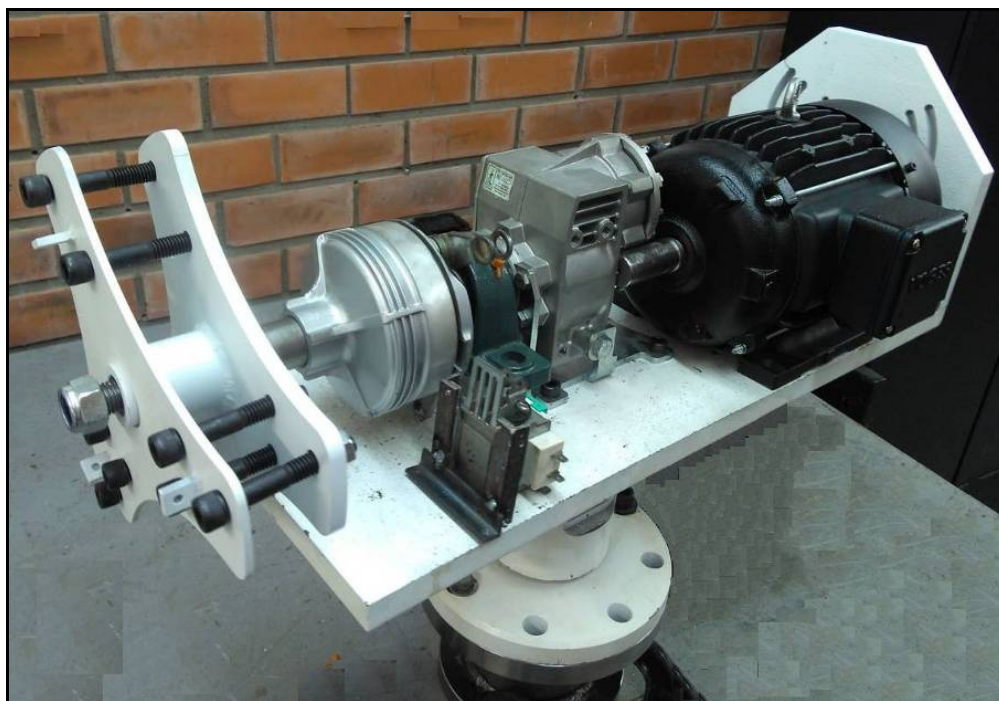


Figura 68 – Freio mecânico acoplado ao eixo das Pás do Aerogerador – (a) Tambor adaptado – (b) Solenoide Atuador

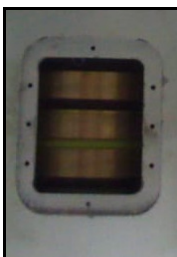
A figura 69-a mostra uma vista da parte superior do Aerogerador, a figura 69-b mostra o detalhe do flange para prender na torre, a figura 69-c mostra o detalhe dos anéis para as escovas para coleta da corrente trifásica gerada, a figura 69-d mostra o detalhe do leme, e a figura 69-e mostra a Aerogerador montado, com exceção das pás e carenagem.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 69 – Detalhes do Aerogerador – (a) Vista Superior – (b) Flange – (c) Anéis para as escovas – (d) Leme – (e) Parcialmente montado

3.4.2. Pás e Bico do Aerogerador

A figura 70-a mostra a estrutura das pás construídas, tomando como base o Aerogerador comercial de 2,5 kW modelo FD3.8-2.5kW da empresa Shandong Huaya e a figura 70-b mostra a estrutura do bico. Ambas peças foram construídas a partir de material compósito a base de resina epóxi reforçada e fibra de vidro, conforme material relacionado na tabela 6 e mostrados na figura 71.

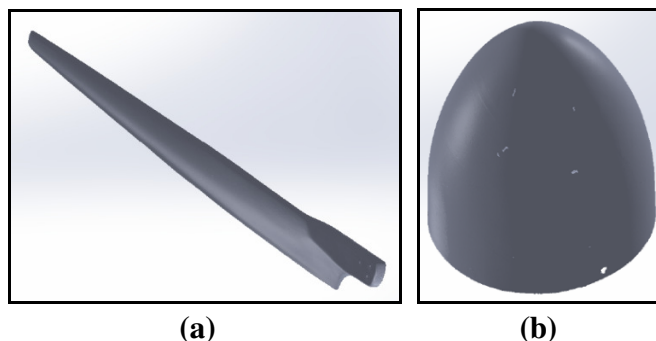


Figura 70 – Topologia – (a) Pás – (b) Bico

Tabela 6 – Relação de Material para Construção das Pás e Bico do Aerogerador

Material	Quantidade
Resina Resapol 10-316	50 kg
Catalisador Brasnox DM50 (P/Resina Poli)	2 kg
Manta de Fibra de Vidro 300 g/m ²	25 kg
Tecido de Fibra de Vidro 600 g/m ²	12 kg
Gel Norpol Isoftálico Branco NGA 2000S	20 kg
Gel Norpol Molde Vermelho / Laranja	20 kg
Alumina Tri-Hidratada (Saco 23 kg)	50 kg
Resina Epoxi 1316 BR	12 kg
Endurecedor 2963	6 kg
Divynycel H60 GPS 6mm	10 m ²
Filme de Vácuo	50 m ²

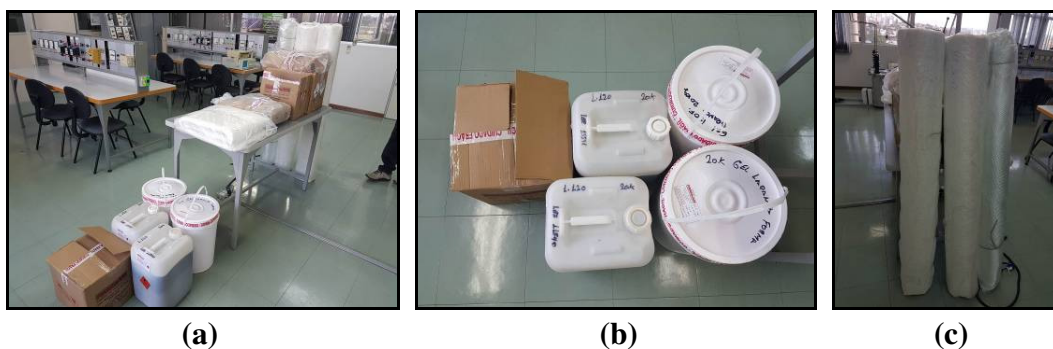


Figura 71 – Material utilizado para montagem das Pás e Bico do Aerogerador

A figura 72-a mostra o molde para construção das pás, onde pode-se observar o material depositado no interior do molde. A figura 72-b mostra uma das pás já pronta sobre ainda dentro do molde. A figura 72-c mostra as três pás prontas e a figura 72-d mostra as pás com o bico.

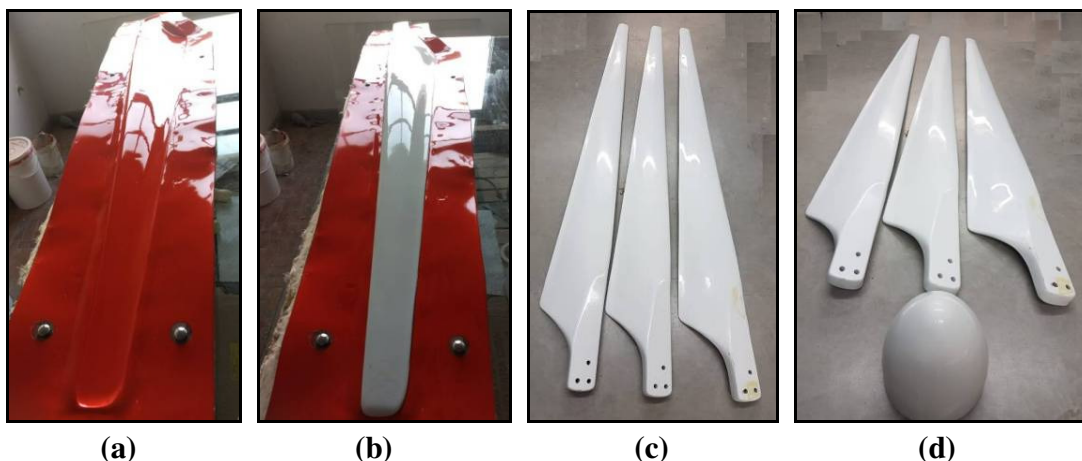


Figura 72 – **Construção das Pás – (a) Molde – (b) Pá sobre o Molde – (c) Vista das três pás – (d) Vista das três pás com o bico**

3.4.3. Torre do Aerogerador

A torre para o Aerogerador foi adquirida junto a empresa Bioserve, e possui as seguintes características e dimensões:

- **Material:** Aço;
- **Medidas:** Altura - 3,19m; Diam. Topo - 25,4cm; Diam. Base – 43,5cm.

A figura 73-a mostra a torre, a figura 73-b mostra o suporte de fixação do Aerogerador na torre, a figura 73-c mostra a torre presa em uma plataforma de concreto. A figura 74-a mostra a torre instalada, a figuras 74-b e 74-c mostram o desenho dimensional da torre.

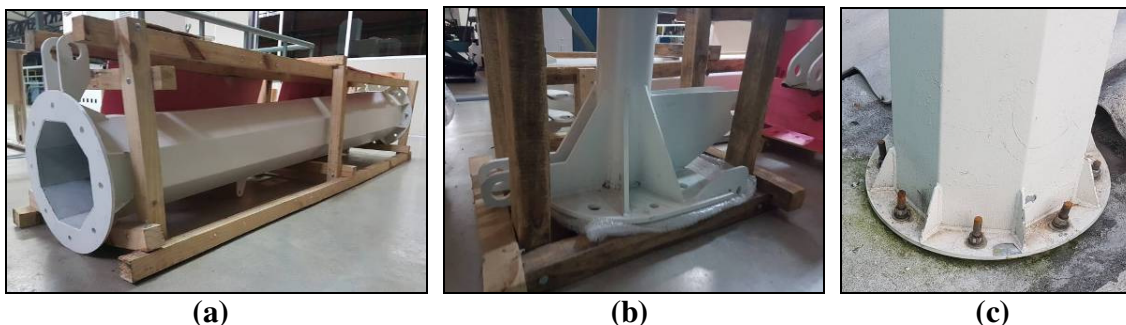


Figura 73 – **(a) Torre do Aerogerador – (b) Suporte do fixação do Aerogerador – (c) Instalada na Plataforma de Concreto**

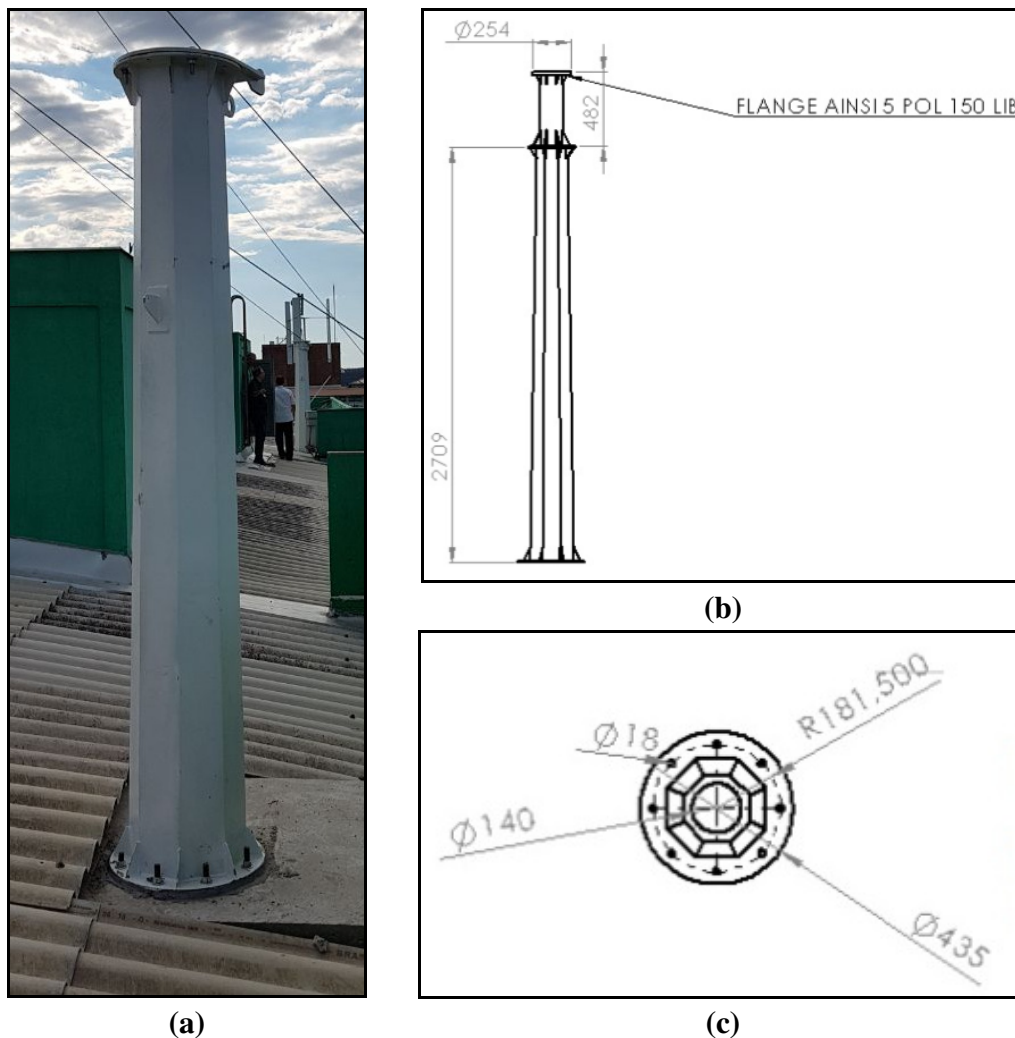


Figura 74 – Torre do Aerogerador – (a) Instalada – (b) Desenho dimensional lateral – (c) Desenho dimensional da base

3.5. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

O controlador do Aerogerador, (diagrama esquemático na figura 75), consiste em um sistema elétrico-eletrônico, capaz de ajustar a tensão de saída do Gerador do Aerogerador para níveis usuais como 127 ou 220 V e 60 Hz, monitorar tensão, corrente e potência gerada, carregar baterias e travar o giro do Aerogerador em caso de excesso de vento ou algum problema técnico. Cita-se, no entanto, que o Controlador tem uma base de tensão CC de 48 V, ou 4 baterias de 12 V, sendo basicamente composto das seguintes partes:

- Retificador das Tensões Geradas pela Máquina Síncrona (figura 76-a)
- Conjunto de três Transformadores para reduzir a tensão gerada (figura 76-b)
- Conversor CC-CC, Carregador de Baterias e Controlador de Carga figura 76-c)
- Circuito Comparador de Controle
- Freio Eletromagnético e Freio Mecânico

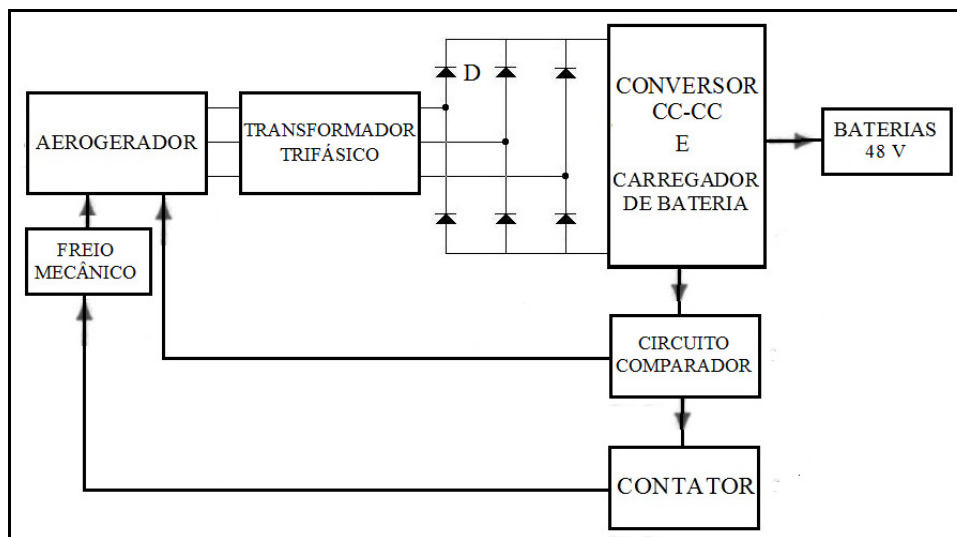


Figura 75 – Diagrama Elétrico do Controlador do Aerogerador



(a)



(b)



(c)

Figura 76 – Partes do Controlador II do Aerogerador – (a) Ponte Retificadora – (b) Transformador – (c) Controlador de Carga

A turbina eólica gera tensão trifásica nominal de 220 V / 60 Hz para a velocidade nominal das pás de 300 RPM, sendo esta, a limitação do Aerogerador. Para ventos mais intensos o Aerogerador é travado e para tensões menores, tanto a tensão quanto a frequência decaem. Para tensão muito baixa a saída do Aerogerador é desligada. Assim, a tensão gerada pela turbina eólica entra em um transformador trifásico e reduz de 220 para 127 e pelo fato de estar em uma ligação estrela-triângulo do primário para o secundário (figura 77-a) reduz mais ainda para 73 V. Com a retificação trifásica, resulta uma tensão contínua máxima de aproximadamente de 100 V, entretanto um circuito comparador (figura 77-b) irá limitar esta tensão em 95 V, uma que este é o limite do controlador de carga (figura 77-c) para que

o mesmo consiga carregar o banco de baterias de 48 V. A figura 78 mostra o sistema de travamento do Aerogerador, tanto o Freio Mecânico, como o Eletromagnético, a partir da ação dos relés.

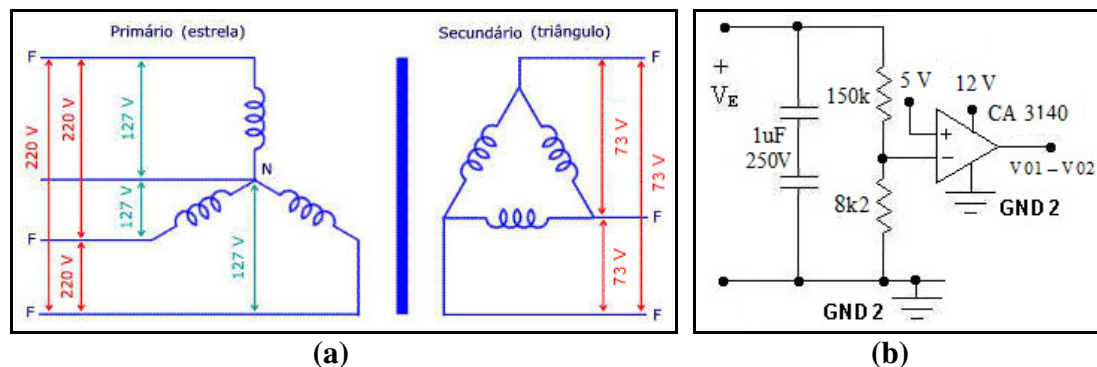


Figura 77 – Partes do Controlador do Aerogerador – (a) Ligação dos Transformadores – (b) Circuito Comparador de Controle

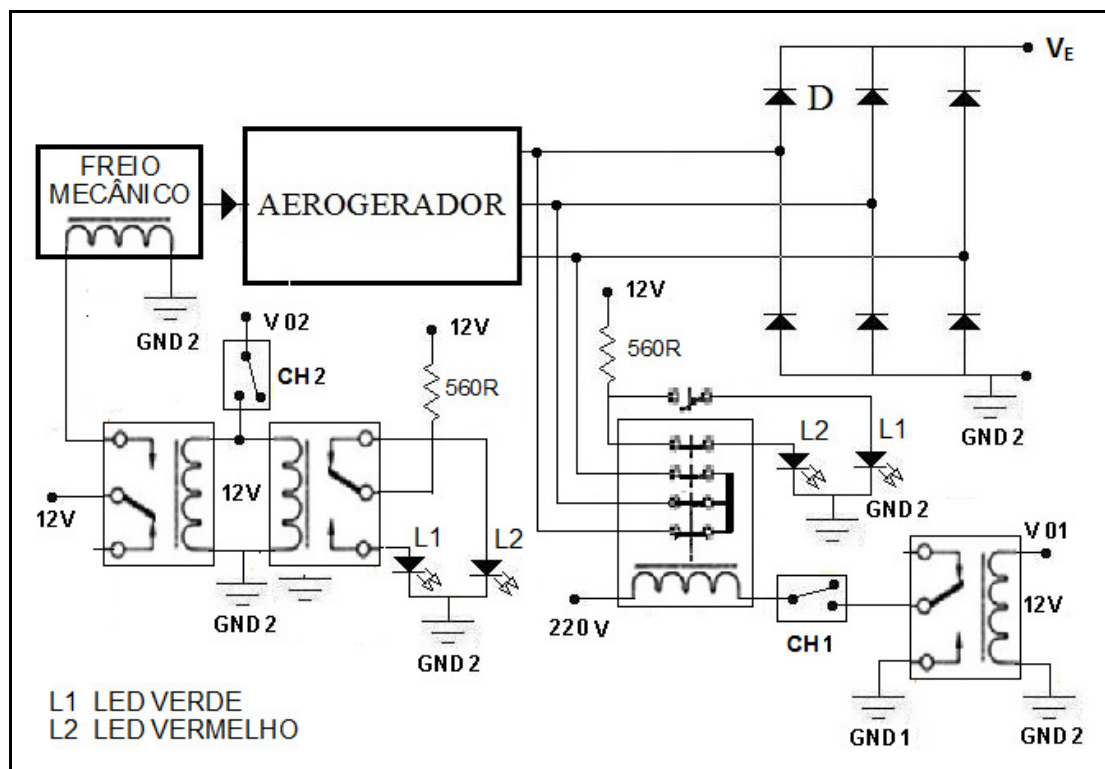


Figura 78 – Esquema Elétrico do Sistema de Travamento do Aerogerador

A figura 79-a mostra a placa onde estão o comparador, relés e fontes de 5 e 12 V. A figura 79-b mostra o gabinete onde foi montado o controlador e a figura 79-c mostra este controlador instalado na sala 309 do prédio Verde.

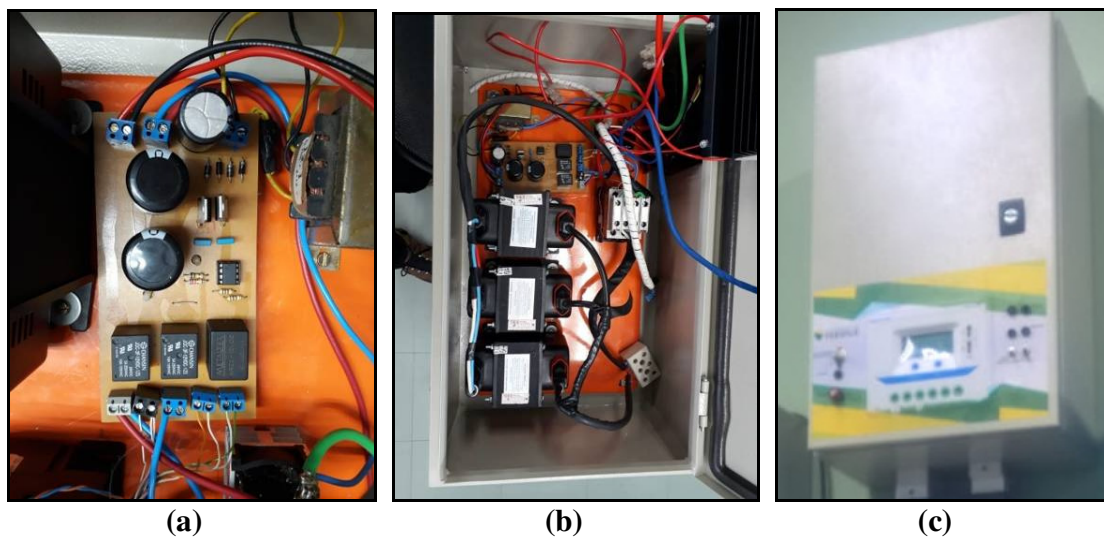


Figura 79 – Controlador II do Aerogerador – (a) Placa do Comparador, Fonte e Relés – (b) Vista Intera do Gabinete – (c) Instalado na sala 309 do prédio Verde

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA LIGA SINTERIZADA

Com relação aos corpos de prova de ferro sinterizado, foram obtidas propriedades magnéticas a partir das curvas magnéticas ou BxH (histerese e magnetização), resistividade elétrica, propriedades mecânicas, e análise micrográficas a partir de metalografia e MEV.

4.1.1. Análise Dimensional e Micrografias

A figura 80 mostra imagens da superfície polida do corpo de prova do Ferro puro, ampliado 200 vezes, sem reagente (a) e com reagente a base de Nital (b), e a figura 81 mostra imagens Ferro puro ampliada 400 vezes.

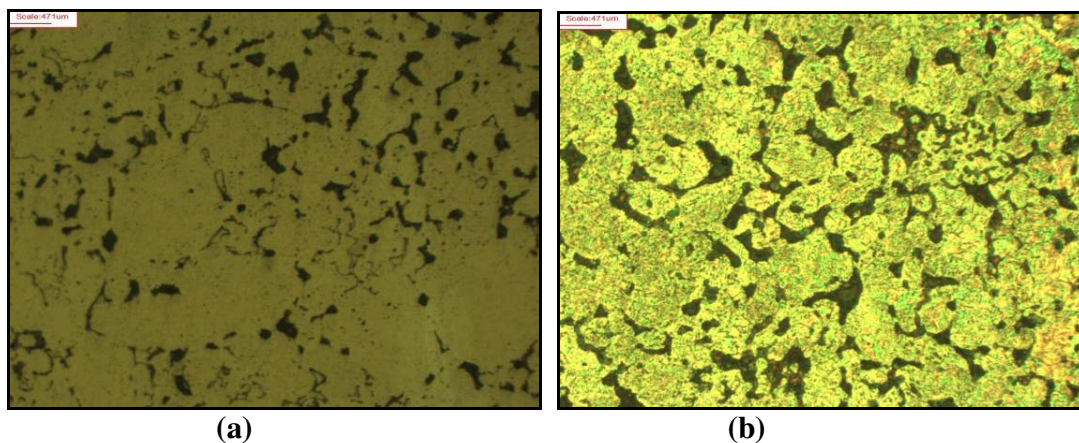


Figura 80 – **Imagens do compósito Ferro com ampliação 200X – (a) Sem reagente – (b) Com reagente a base Nital (escala 471 μm)**

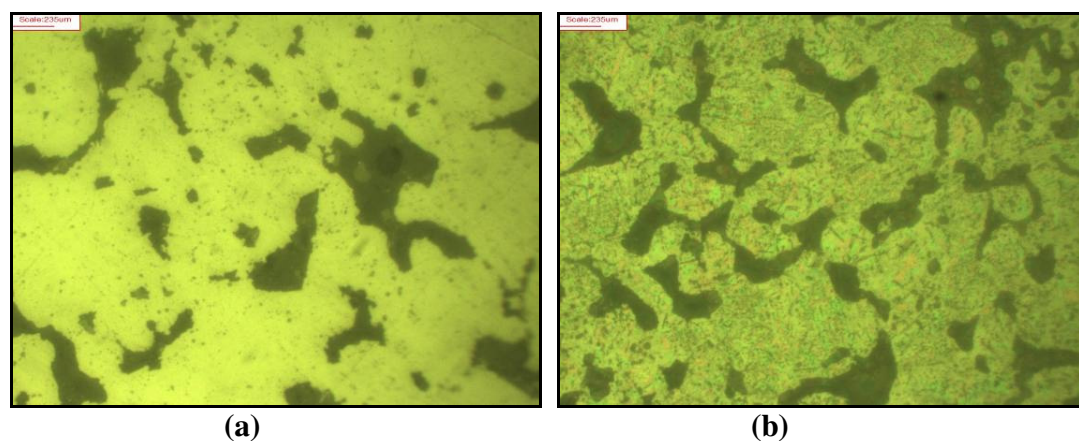


Figura 81 – **Imagens do compósito Ferro com ampliação 400X – (a) Sem reagente – (b) Com reagente a base Nital (escala 235 μm)**

Com relação as imagens da microestrutura das figuras 82 e 83 observa-se regiões escuras sendo a porosidade resultante de sinterização do ferro puro, apresentando poros em

quantidade próxima a 10% (análise visual em área). A morfologia dos pós se apresenta arredondada representando boa sinterização. As imagens levemente enevoadas foram causadas pela secagem parcial das amostras quando analisadas no microscópio óptico (ataque com Nital) [44].

A figura 82 mostra as imagens a partir do MEV do pó de Ferro puro aumentado em 50x, 100x, 300x e 1000x, e a figura 83 mostra as imagens a partir do MEV do Ferro puro compactado e sinterizado aumentado em 50x, 100x, 300x e 1.000x.

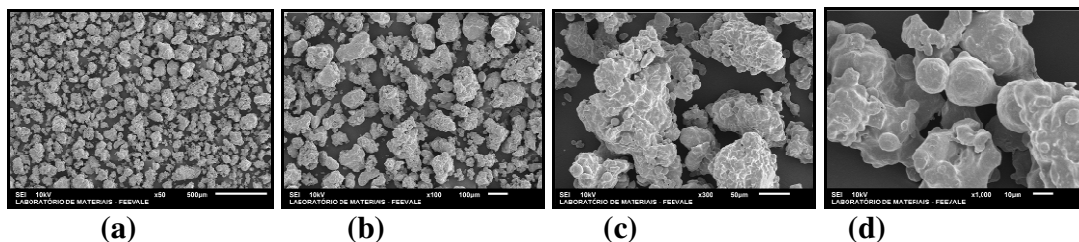


Figura 82 – Imagens do pó de Ferro puro (MEV) aumentado – (a) 50x – (b) 100x – (c) 300x – (d) 1.000 x

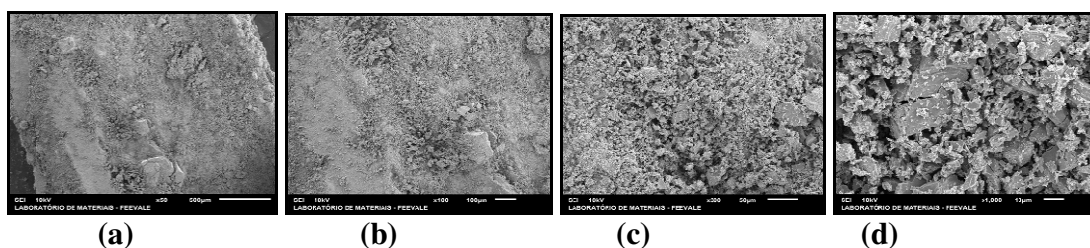


Figura 83 – Imagens do Ferro puro sinterizado (MEV) aumentado – (a) 50x – (b) 100x – (c) 300x – (d) 1.000 x

Nas imagens da figura 82, em diferentes magnificações, observa-se nas partículas de ferro puro uma combinação de superfície irregular, mas arredondadas, características da atomização a água do pó de ferro. Este tipo de formato contribui muito para uma boa compactação das amostras ajudando na união mecânica das mesmas. Nas imagens da figura 83, em diferentes magnificações, observa-se o efeito da sinterização, o qual compreende a difusão das partículas compactadas próximas, formando um material denso, mantendo, contudo, poros na sua estrutura, o que é característico dos processos da Metalurgia do Pó [45,46].

4.1.2. Análise das Propriedades Físicas do Ferro Sinterizado

A figura 84 mostra as curvas de histerese de três corpos de prova na forma de anel bobinado (figura 48), e a figura 85 mostra as curvas de magnetização.

A partir das curvas de histerese é possível observar a retentividade e a coercitividade magnéticas e a partir das curvas de magnetização é possível observar a permeabilidade magnética relativa e a indução de saturação (com campo magnético de 6 kA/m). A tabela 7 mostra os dados e a média destas grandezas magnéticas.

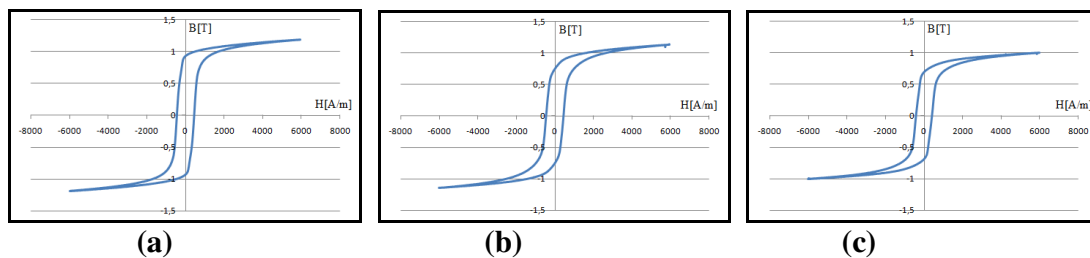


Figura 84 – Curvas de Histerese do ferro sinterizado

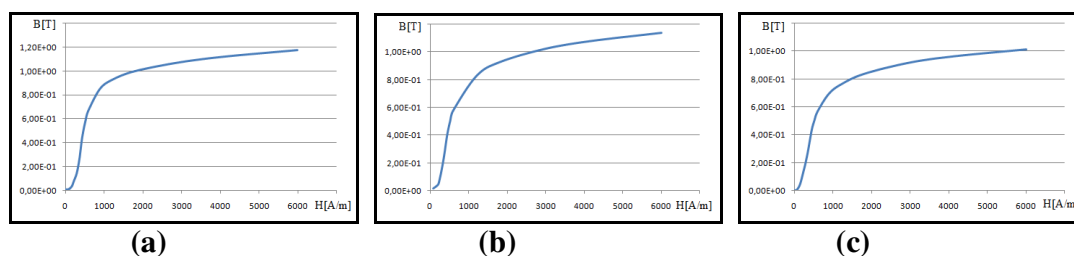


Figura 85 – Curvas de Magnetização do ferro sinterizado

Tabela 7 – Média das Grandezas Magnéticas

Amostra	B_r [T]	H_c [A/m]	B_{max} [T]	μ_r
A	0,93	440	1,18	912
B	0,75	455	1,14	771
C	0,69	417	1,01	778
Média	0,79	437	1,11	820

Obs: $B_{m\acute{a}x}$ foi observado com um campo magnético de 6 kA/m

A tabela 8 mostra os dados para a determinação da resistividade elétrica, no qual os anéis foram cortados (retirado um segmento) conforme figura 49.

Tabela 8 – Determinação da Resistividade Elétrica

Amostra	Área Seção Transversal [m ²]	Comprimento Médio [m]	Tensão [mV]	Corrente [A]	Resistividade [$\mu\Omega.m$]
A	$2,39 \times 10^{-5}$	0,134	7,1	10	0,127
B	$2,32 \times 10^{-5}$	0,133	7,7	10	0,134
C	$2,35 \times 10^{-5}$	0,134	7,3	10	0,128
Média					0,130

A tabela 9 mostra os dados para determinação de dureza, no qual pode-se observar que foram realizados três ensaios por corpo de prova.

A tabela 10 mostra os resultados da densidade, resistividade elétrica, das propriedades magnéticas e mecânicas observadas na forma de anel e cilindro, a partir dos valores médios de três corpos de prova de ferro puro sinterizado. Estas grandezas físicas de vital interesse para o desenvolvimento do Rotor da Máquina Síncrona Trifásica. Para efeito de análise comparativa, a tabela 11 mostra dados da literatura para o ferro puro sinterizado [47]

Tabela 10 – Propriedades físicas do Ferro Sinterizado

Amostra	ρ_m [g/cm ³]	ρ_e [$\mu\Omega\cdot m$]	B_r [T]	H_c [A/m]	B_{max} [T]	μ_r	HB	σ_e [kgf/mm ²]
A	6,83	0,127	0,93	440	1,18	912	76,4	20,67
B	6,76	0,134	0,75	455	1,14	771	47,2	17,32
C	6,81	0,128	0,69	417	1,01	778	51,5	17,37
Média	6,80	0,130	0,79	437	1,11	820	58,4	18,45

ρ_m é a densidade, ρ_e a resistividade elétrica, B_r a retentividade, H_c a coercitividade, B_{max} a indução de saturação (observada para campo de 6 kA/m), μ_r a permeabilidade magnética relativa, HB a dureza na escala Brinell, σ_e a tensão de escoamento.

Tabela 11 – Propriedades Físicas do Ferro Sinterizado [47]

Amostra	ρ_m [g/cm ³]	ρ_e [$\mu\Omega\cdot m$]	B_r [T]	H_c [A/m]	B_{max} [T]	μ_r
Ferro	6,8	0,14	0,96	131	1,14	2.900
Ferro	7,2	0,12	1,18	127	1,36	3.700
Ferro	7,4	0,11	1,29	119	1,47	4.700

A tabela 12 mostra que a média da densidade para três corpos de prova na forma de cilindro resultou em 6,80 g/cm³, e o Ferro puro sinterizado apresenta uma densidade entre 6,8 a 7,4 g/cm³. Os valores obtidos na tabela, diferem um pouco das referências bibliográficas [47]. Tal fato ocorreu devido às muitas variantes nos processos da M/P, na qual fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada [15-17]. Ademais, algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, sendo que em alguns estudos utilizam-se pressões de até 800 MPa para materiais compósitos por M/P [48], e tal pressão tende a aumentar a densidade.

Salienta-se que, a curva de histerese do Fe puro, tem características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais [26,29].

O Ferro sinterizado apresentou tensão de escoamento de 184,5 MPa (18,45 kgf/mm²). O aço 1008 utilizado na maioria de núcleos de máquinas elétricas rotativas [26,29] possui tensão de escoamento média de 170 MPa. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB [49]. A dureza do Ferro sinterizado foi 58,4 HB. Assim, com relação às propriedades mecânicas, o Ferro sinterizado apresenta parâmetros aceitáveis para sua utilização na construção de núcleos da maioria das máquinas elétricas rotativas [26,29].

4.2. GERADOR TRIFÁSICO

4.2.1. Resultados da Simulação

A tabela 12 mostra os valores máximos de densidade de fluxo de entreferro e torque desenvolvido na ponta de eixo, considerando a máquina funcionando como motor de uma máquina de cv de topologia idêntica.

Tabela 12 – **Simulação de Torque e Densidade de Fluxo de entreferro para núcleo de Ferro sinterizado e Chapas M15**

Material do Rotor	Torque [N.m]	Densidade de Fluxo [T]
Chapas Aço M15	15,60	2,17
Ferro Sinterizado	16,91	2,72

Os testes e simulações realizados com ferro sinterizado apresentou resultados muito semelhantes em comparação com motores construídos a partir do método convencional de chapas laminadas, conforme se pode observar na tabela 2. Contudo convém salientar que as simulações realizadas consideram somente o torque instantâneo, ou seja, estaticamente. Entretanto, como neste tipo de máquina a variação de fluxo magnético no rotor é pequena, este fica sujeito a baixas correntes parasitas, reduzindo assim as perdas magnéticas no ferro.

Em uma máquina elétrica rotativa, seja funcionando como motor ou gerador, o torque na ponta de eixo é função do fluxo magnético de entreferro (indução máxima) e da inclinação das linhas de fluxo magnético no entreferro, também conhecido como ângulo de carga para o caso das máquinas elétricas síncronas rotativas. Uma máquina elétrica rotativa é, portanto, um transdutor dinâmico de energia, ou seja, como motor, transforma energia elétrica dos enrolamentos de armadura em energia mecânica entregue a uma carga na ponta de eixo. Em um gerador, processa-se o contrário, isto é, transforma energia mecânica na ponta de eixo, a partir de uma turbina, por exemplo, em energia elétrica. Em ambos os casos, a conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa ocorre a partir do campo magnético, e o fluxo magnético de entreferro (ou indução máxima) é o fator determinante. Em razão disso, através da simulação, consideram-se como melhores resultados as máquinas que operam com maior fluxo magnético de entreferro e os maiores torques finais [26,29].

4.2.2. Resultados dos Ensaios em Bancada

Após a montagem final, o gerador para o Aero gerador foi levado para a Bancada de Ensaios para os testes de Potência, Tensão, Corrente Elétricas e Rendimento. A tabela 13 mostra os dados para o teste a vazio (gerador sem carga), e a tabela 14 mostra os dados para os testes com a saída do gerador ligado ao banco de carga resistiva de 2,5 kW, com variação de velocidade de rotação a partir do motor (máquina primária) alimentado com corrente alternada de 10 até 60 Hz.

Tabela 13 – Testes à Vazio da Máquina Elétrica Síncrona do Aeroerador

f [Hz]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_L [V]	I_L [A]	P_{ele} [W]	η [%]	P_d [W]
60,0	188,49	1,64	299,9	475,5	0,00	0,0	0,00	299,9

Tabela 14 – Testes com Carga Máquina Elétrica Síncrona do Aeroerador

f [Hz]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_L [V]	I_L [A]	P_{ele} [W]	η [%]	P_d [W]
10,0	31,42	3,65	111,2	75,0	0,20	26,0	23,36	85,2
20,0	62,83	6,96	424,2	150,3	1,23	320,2	75,49	104,0
30,0	94,25	10,25	937,0	223,2	2,01	777,1	82,93	160,0
40,0	125,66	12,94	1.577,3	292,3	2,75	1.392,3	88,27	185,0
50,0	157,08	15,49	2.360,1	357,8	3,40	2.107,1	89,28	253,0
60,0	188,49	17,75	3.245,3	419,4	4,03	2.927,5	90,21	317,9

Nas tabelas 13 e 14 os dados foram obtidos da seguinte maneira:

- Frequência f [Hz] obtida a partir do Inversor Trifásico
- Torque na entrada do Gerador τ [N.m] obtido a partir do sensor de Torque
- Tensão de Linha na Saída do Gerador V_L [V] obtido a partir de um Voltímetro
- Corrente de Linha na Saída do Gerador I_L [A] obtido a partir de um Amperímetro
- Velocidade angular dos eixos do Motor e Gerador ω_m [rad/s] calculada como [26,29]:

$$\omega_m = \pi \cdot f \quad \text{Equação [25]}$$

- Potência Mecânica na Entrada do Gerador P_{mec} [W] calculada como [26,29]:

$$P_{mec} = \tau \cdot \omega_m \cdot K \quad \text{Equação [26]}$$

Onde $K = 0,97$ é uma constante que considera a perda de potência no acoplamento entre os eixos da Célula de Carga do Sensor de Torque e o eixo do Gerador

- Potência Elétrica na Saída do Gerador P_{ele} [W] calculada como [26,29]:

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad \text{Equação [27]}$$

- Rendimento η [%] calculado como [26,29]:

$$\eta = \frac{P_{ele}}{P_{mec}} \times 100\% \quad \text{Equação [28]}$$

- Perdas P_d [W] calculadas como [26,29]:

$$P_d = P_{mec} - P_{ele} \quad \text{Equação [29]}$$

Os testes realizados na bancada de ensaios, demonstram que, quando o eixo das pás do Aerogerador girar a 300 RPM (velocidade nominal de giro das pás), o eixo do Gerador irá girar a 1.800 RPM (devido ao multiplicador de velocidade). Nesta condição, a plena carga, o gerador gera uma Tensão de linha de 419,4 V com 60 Hz de Freqüência, Corrente de linha de 4,03 A e Potência de 2.927,5 W, o que supera em 17% a potência para o Aerogerador indicado neste projeto o qual era de 2,5 kW. Observa-se também que, nesta freqüência, a máquina síncrona desenvolvida (ou gerador do Aerogerador) apresentou um rendimento de 90,21 % o que é um excelente valor para este tipo de máquina, salientando-se que a mesma foi totalmente desenvolvida em uma Universidade, em escala artesanal.

4.3. TESTES DO AEROGERADOR

Os testes preliminares foram realizados na **Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha** em Novo Hamburgo, em uma torre de tubos mecânicos de aço baixo carbono com 4,5 m de altura (figura 87-a em montagem e figura 87-b montado). As figuras 88 e 89 mostram o Aerogerador sendo montado na torre.

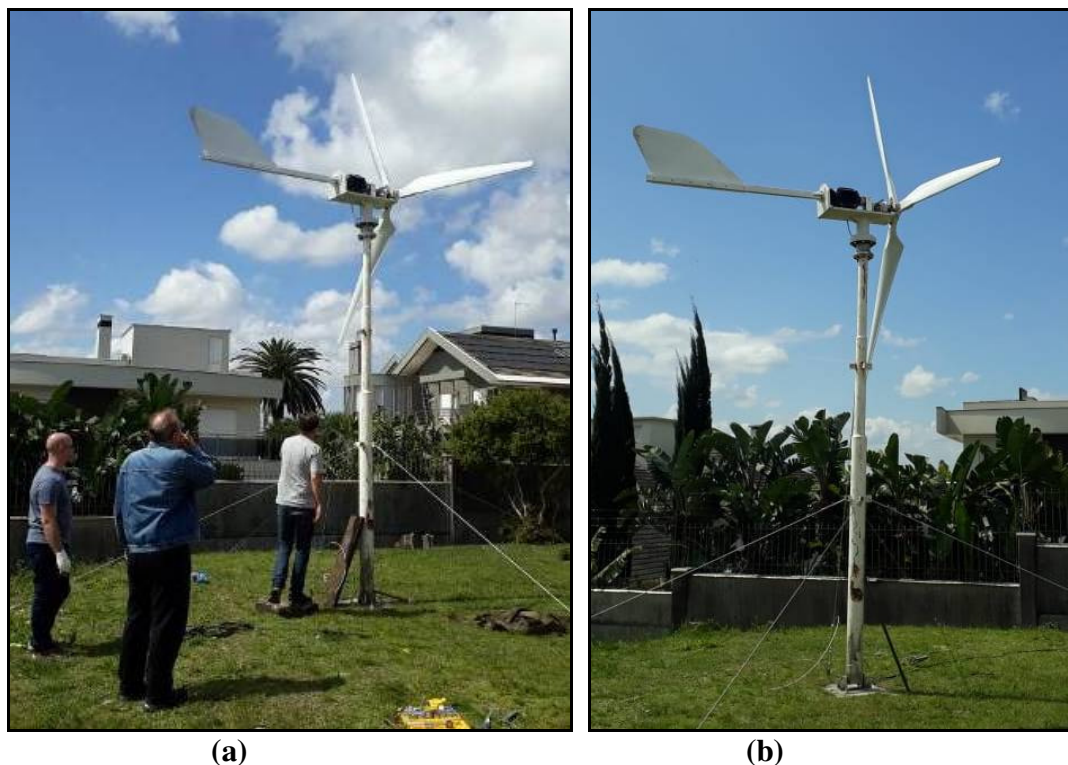


Figura 87 – Testes Preliminares do Aerogerador na Escola Liberato – (a) Em Montagem – (b) Montado



Figura 88 – Instalação Aerogerador Escola Liberato



Figura 89 – Instalação Aerogerador Escola Liberato

Após a verificação experimental, e a constatação de que a turbina eólica do Aeroogerador apresentava forte consistência mecânica, e funcionamento adequado, o Aeroogerador foi instalada em uma torre de aço galvanizada de 3,2 m (figuras 73 e 74), no telhado do prédio Verde da Universidade com altura aproximada de 12 m, conforme mostra a figura 90.



(a)



(b)



(c)

Figura 90 – Aeroogerador montado no telhado do Prédio Verde da Universidade Feevale

A partir de todos os testes (como aqueles em bancada também), constatou-se que, quando houver ventos capaz de girar o eixo das pás a velocidade nominal de 300 RPM, o Aerogerador gera 2.927,5 W. Entretanto, a partir do Controlador, a velocidade foi limitada para uma rotação menor, até a tensão nominal da máquina, ou seja, 220 V de tensão de fase, uma vez que, este valor de potência, extrapola a potência nominal do Aerogerador que foi idealizado para 2,5 kW.

O Aerogerador desenvolvido neste projeto foi comparado com o Aerogerador modelo FD3.8-2.5kW da empresa Shandong Huaya Ltda adquirido comercialmente, resultante nas seguintes considerações:

- O Aerogerador foi desenvolvido a partir do Aerogerador FD3.8-2.5kW, contudo, somente as dimensões das pás e portanto a potência nominal foram preservadas. O restante, como o Gerador Trifásico, o acoplamento entre o Eixo das Pás e o Eixo do Gerador, e o Controlador, são concepções completamente diferentes.
- O Aerogerador FD3.8-2.5kW possui um Gerador Multipolar com eixo diretamente acoplado ao eixo das pás, o que faz com que o rotor do gerador gire a baixa velocidade, ou seja a 300 RPM, e portanto o mesmo deve ter um número elevado de polos e também gerar baixos níveis de tensão, tipicamente na faixa dos 50 V. Este tipo de topologia possibilita que a turbina eólica e gerador sejam acoplados diretamente o que reduz o tamanho e peso do mesmo. Entretanto, neste tipo de concepção de projeto, este Aerogerador não pode ser ligado diretamente na rede elétrica trifásica, sendo necessário um controlador que retifique a tensão gerada para um nível CC, para carga de baterias por exemplo, e uso de inversor (dispositivo eletrônico capaz de transformar tensão contínua em tensão alternada). Assim, o Aerogerador desenvolvido neste projeto pode ser ligado diretamente a rede elétrica, funcionando como Motor para baixas velocidade dos ventos e como gerador quando aumenta a velocidade dos ventos. Neste caso, basta fazer uma pequena adaptação no Controlador deste Aerogerador, uma vez que Aerogerador não foi desenvolvido para ser ligado diretamente na rede.
- O Aerogerador desenvolvido neste projeto, possui topologia diferente pois o Gerador Trifásico é acoplado ao eixo das pás por meio de um multiplicador de velocidade de seis vezes. Nesta condição enquanto o eixo da turbina gira a 300 RPM, o eixo do Gerador gira a 1.800 RPM. Por este motivo o Gerador trifásico desenvolvido, foi uma Máquina Elétrica Síncrona Rotativa Trifásica com Ímãs Permanentes de 4 polos. Cita-se que máquinas com esta topologia, podem funcionar como Motor e como Gerador e são consideradas as melhores máquinas existentes, pois possuem alto rendimento (entre 90 a 95%) a plena carga, e a melhor relação Torque / Volume, ou seja, menores e mais leves para uma mesma potência gerada comparativamente às outras máquinas existentes.
- O Aerogerador desenvolvido neste projeto é duas vezes e meia mais pesado que o Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial, contudo, caso seja possível construir um segundo protótipo o peso deste poderá ser consideravelmente reduzido, pois, por se

tratar de um protótipo, sua estrutura mecânica foi superdimensionada, por questões de segurança, Para uma produção em escala industrial do Aerogerador desenvolvido neste projeto, algumas peças seriam consideravelmente reduzidas em tamanho e peso, o que certamente reduziria também suas dimensões e peso.

- O Aerogerador desenvolvido neste projeto possui perdas mecânicas no acoplamento entre o Eixos da Turbina e do Gerador Trifásico o que não ocorre no Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial, contudo, o Aerogerador comercial trabalha com níveis de tensão significativamente menores (da ordem de 50 V) contra os 220 V comparado ao Aerogerador deste projeto, e neste caso, as correntes elétricas do Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial, também são consideravelmente maiores, o que aumenta as perdas elétricas no cobre ou nos enrolamentos.

4.4. QUADRO COMPARATIVO COM AEROGERADORES COMERCIAIS

Um dos objetivos desta pesquisa é o uso da Máquina Elétrica Rotativa Trifásica, ou o Gerador Elétrico propriamente dito em um Gerador Eólico, ou Aerogerador na faixa dos 2,5 kW. A tabela 15 mostra os dados comparativos de três aerogeradores comerciais, a saber, o modelo FD3.8 de 2.5kW da empresa **Shandong Huaya** Ltda, o modelo **Antaris** cuja potência nominal de Manual é de 2,7 kW e o modelo **Skystream** de 2,4 kW. Cita-se, contudo, que para efeito de comparação, devido a diferença de potência nominal, foi utilizada a rotação da turbina em RPM para adequar as potências desenvolvidas pela turbina. Cita-se que a potência nominal ocorre para a carga nominal, contudo, um Aerogerador pode operar com cargas menores que a nominal.

Tabela 15 – **Dados Comparativos de três Aeroeadores comerciais**

Modelo / Características	Protótipo	FD3.8 Shandon 2,5 kW	Skystream 2,4 kW	Antaris 2,7 kW
Rotação Turbina [RPM]	275	350	325	380
Velocidade Nominal do Vento [m/s]	12	12	9,4	X
Diâmetro do Rotor [m]	3,80	3,80	3,72	3,5
Tensão Nominal de Linha [V]	388	380	380	330
Rotação da Turbina para Potência de 2,5 kW [RPM]	275	350	332	365
Tensão para Potência de 2,5 kW [V]	388	380	385	317

X – Não informado

5. CONCLUSÕES

Assim, comparando as duas topologias, ou seja do Aerogerador FD3.8-2.5kW adquirido no mercado e o Aerogerador desenvolvido neste projeto, resumidamente podem-se relacionar as seguintes diferenças, vantagens e desvantagens:

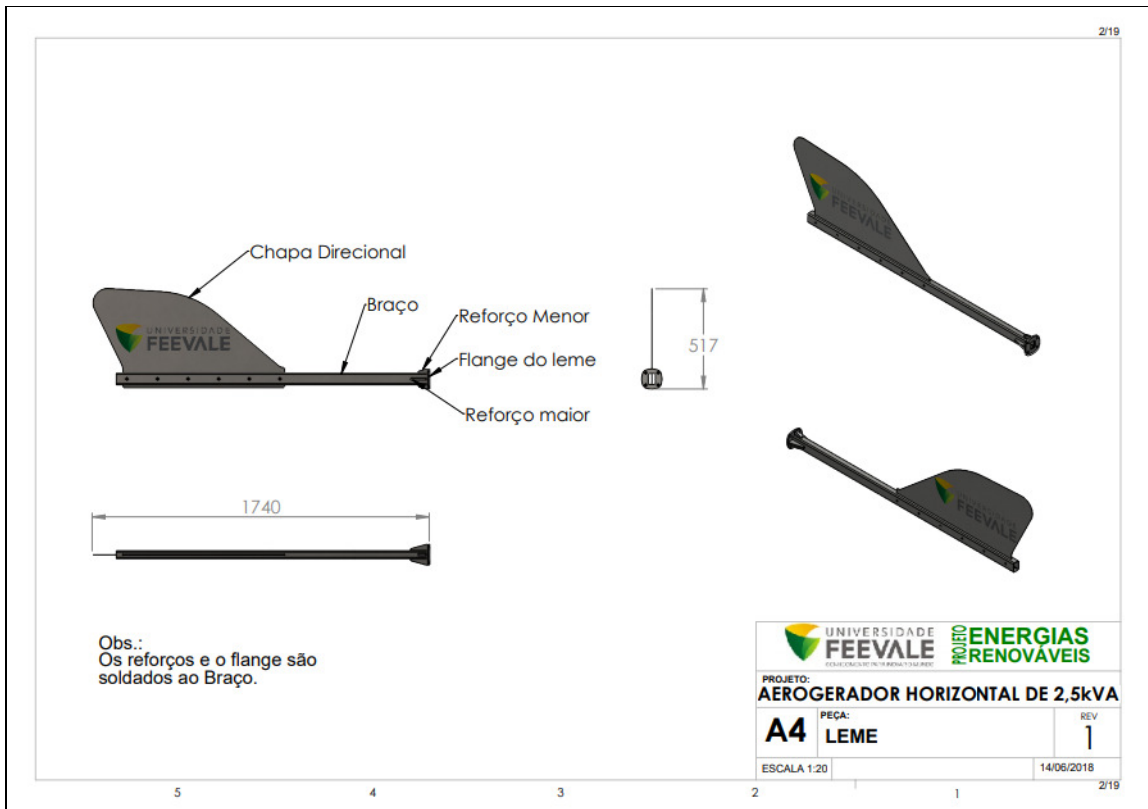
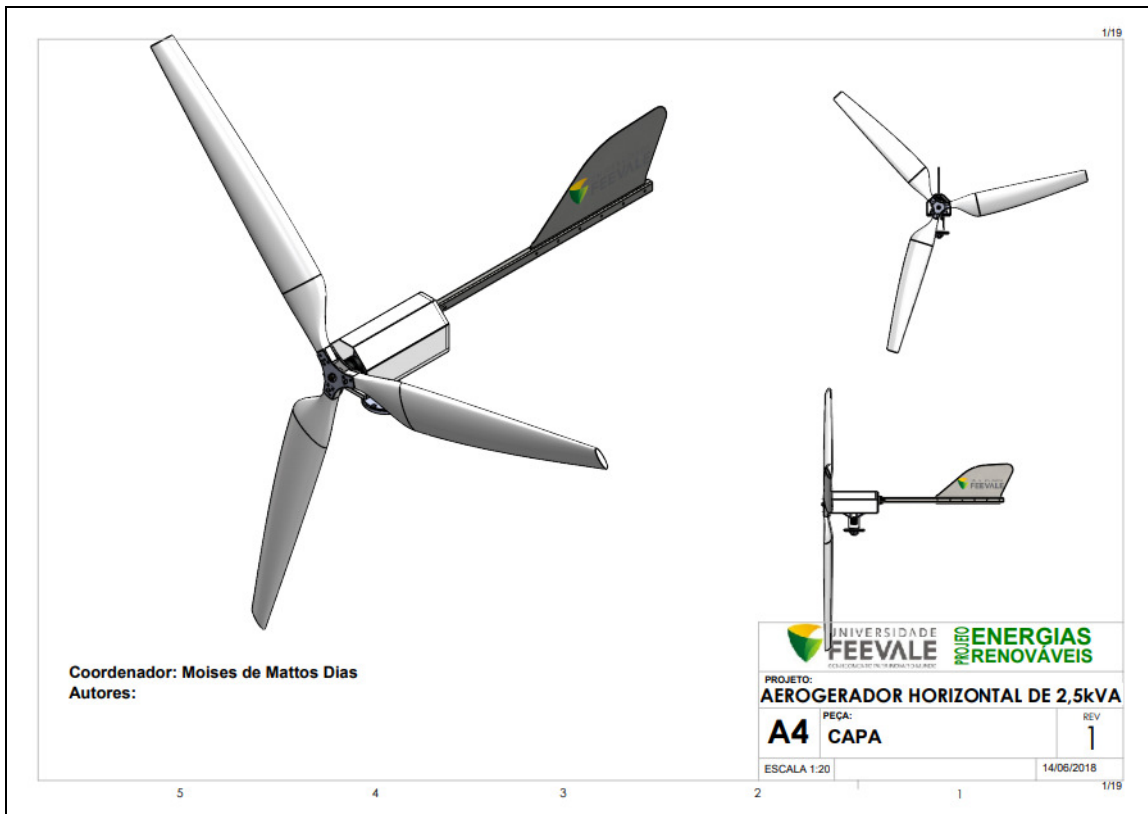
- O Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial possui menores perdas mecânicas e maiores perdas elétricas comparado ao Aerogerador desenvolvido neste projeto, o que acaba igualando o desempenho e as potências
- O Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial é mais leve (aproximadamente 40% do peso) comparado ao Aerogerador desenvolvido neste projeto, contudo, caso seja produzido escala industrial o peso poderá ser reduzido consideravelmente.
- O Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial não pode ser ligado diretamente na rede elétrica mas o Aerogerador desenvolvido neste projeto pode ser ligado à rede, bastando que se faça uma pequena adaptação no Controlador.
- As pás desenvolvidas para o Aerogerador deste projeto são mais leves que as pás do Aerogerador FD3.8-2.5kW comercial.
- Para uma produção em escala industrial, os custos seriam praticamente os mesmos comparando o Aerogerador FD3.8-2.5kW e este desenvolvido no projeto.

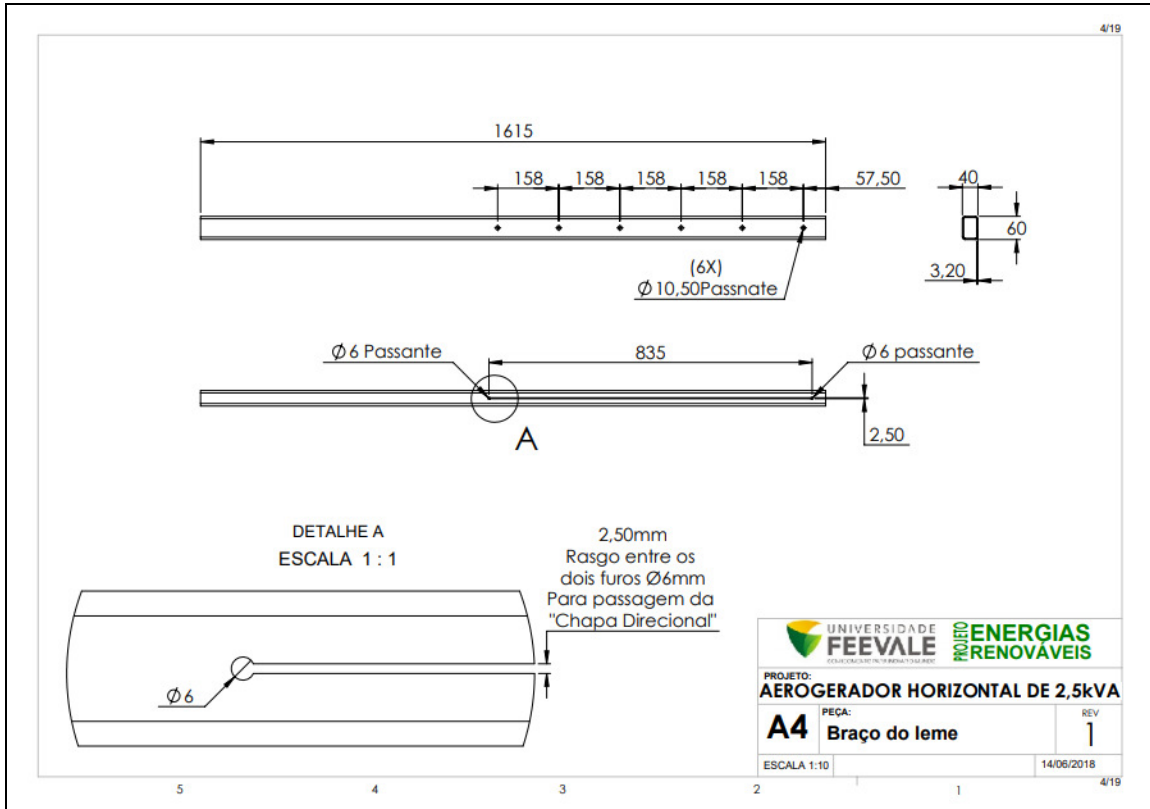
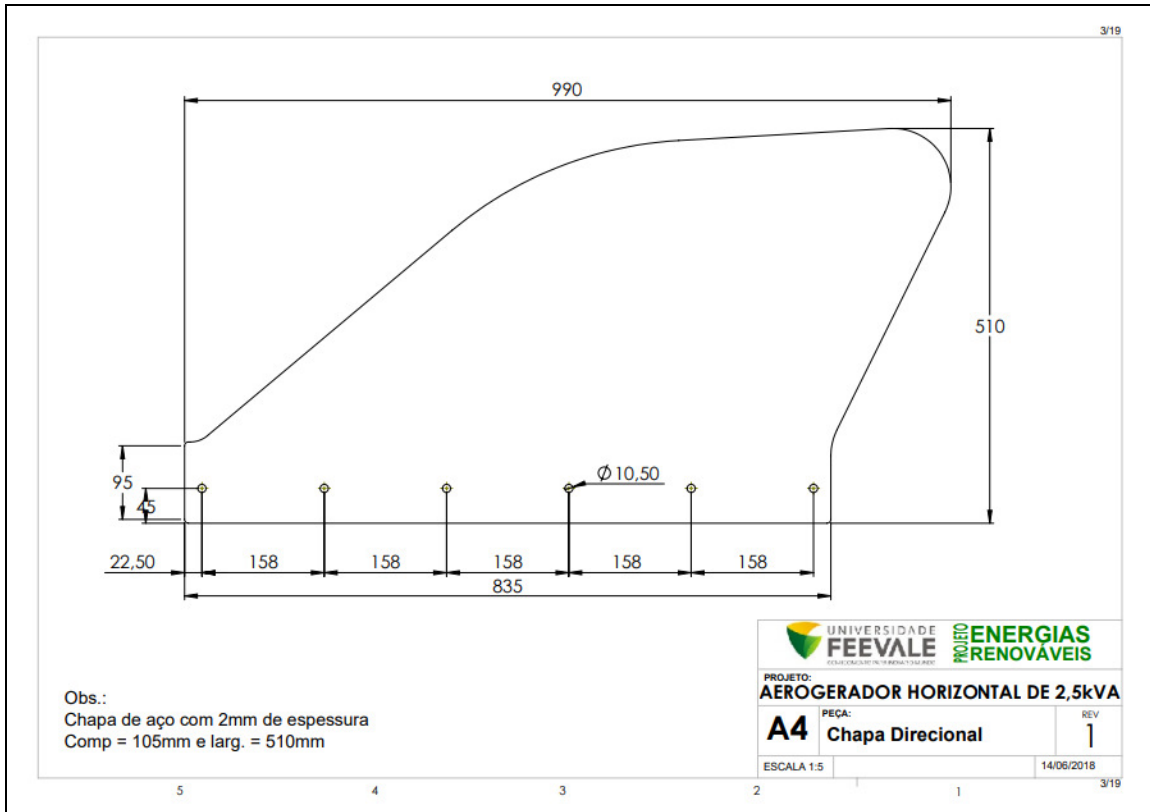
ANEXO – DESENHO DIMENSIONAL DAS PEÇAS DO AEROGERADOR

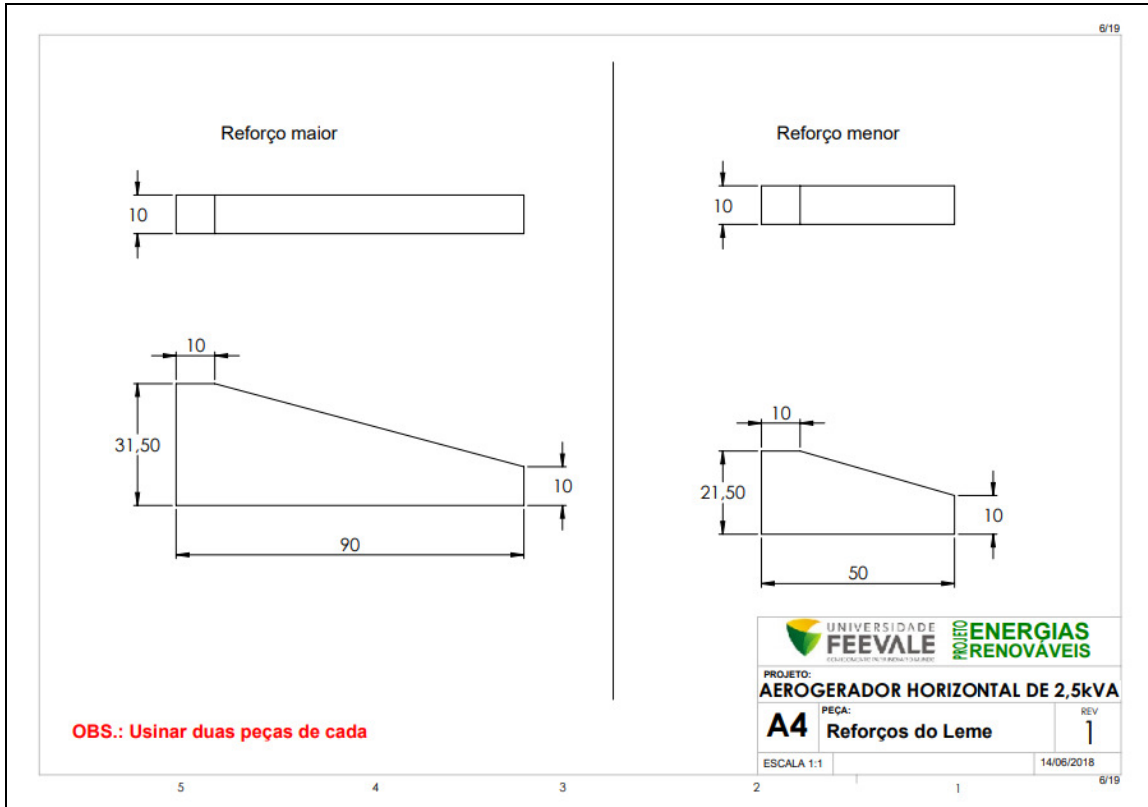
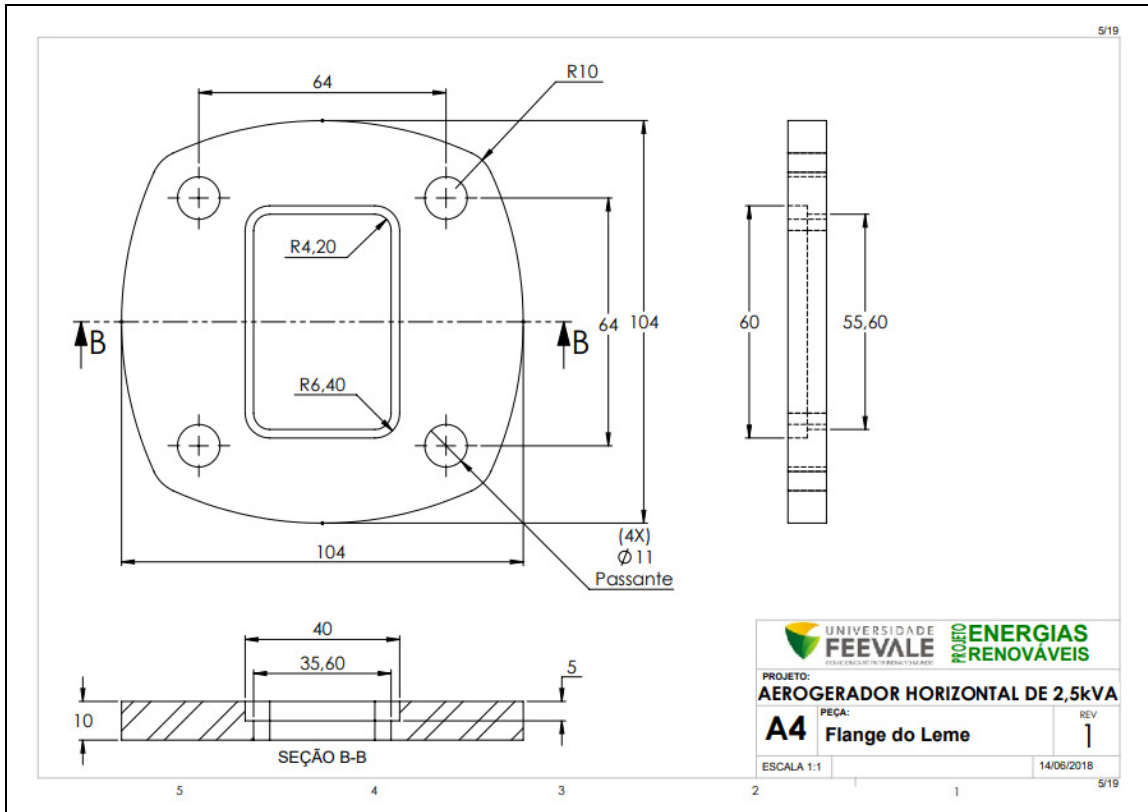
Os desenhos dimensionais a seguir, mostram o projeto das partes mecânicas do Aerogerador, e a tabela 1 a seguir mostra o Material utilizado para cada peça. A carenagem ou cobertura foi construída com chapa de alumínio de 2 mm.

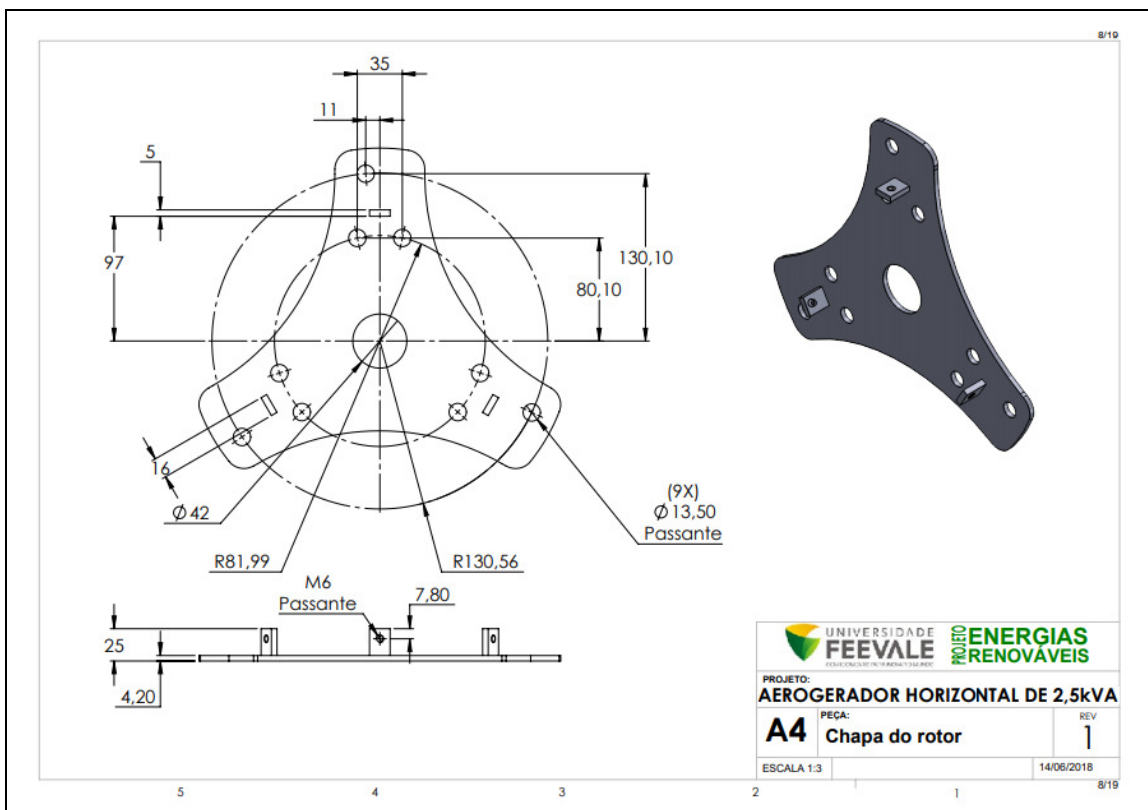
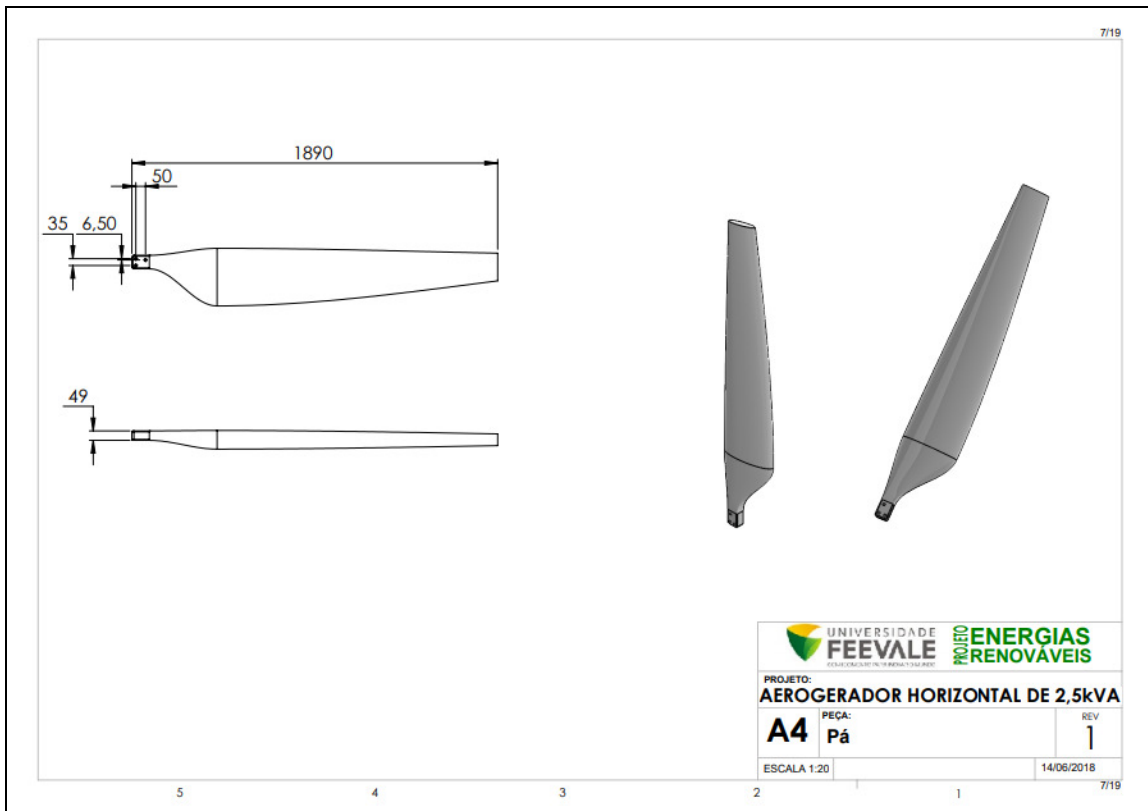
Tabela 1 – Relação de Peças Mecânicas do Aerogerador e Material Utilizado na Construção

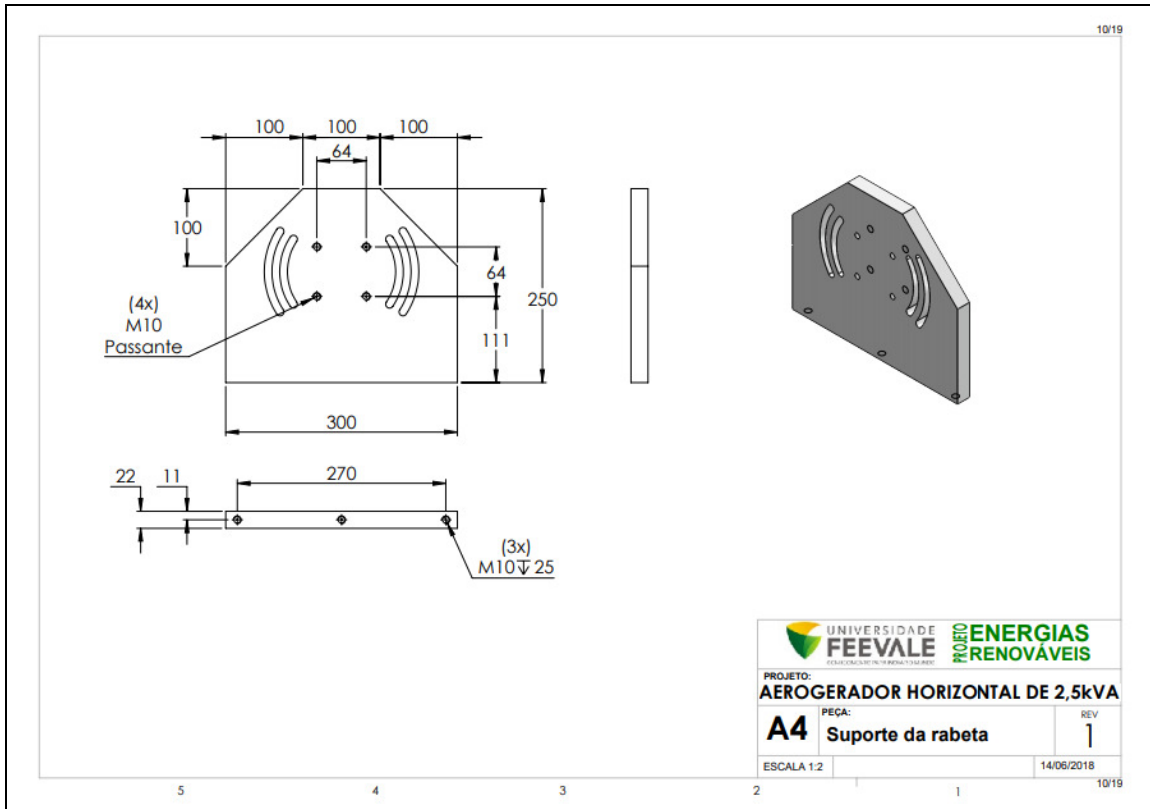
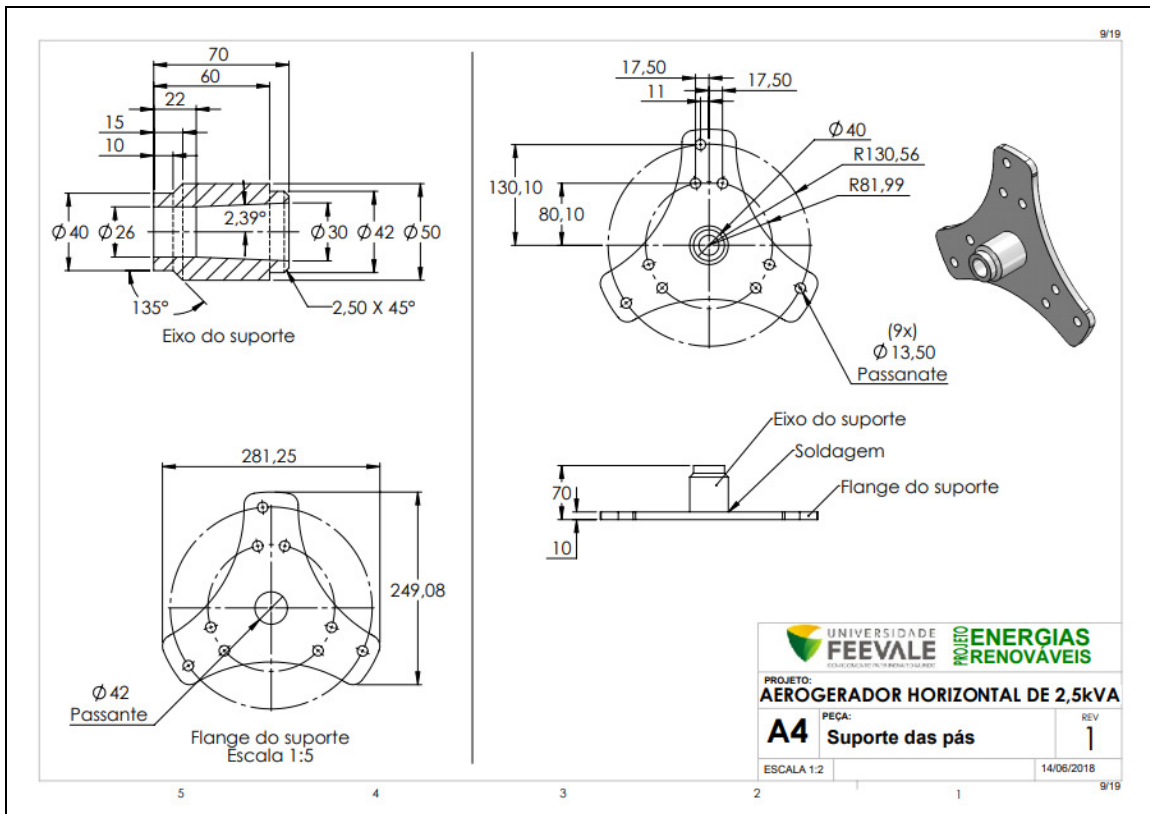
Fig.	Peça	Material Utilizado
1	Capa	-
2	Leme (Visão geral)	-
3	Chapa Direcional do Leme	Chapa de aço 1020 2mm
4	Braço do Leme	Tubo de aço 1020 laminado
5	Flange do Leme	Aço 1020
6	Reforços do Leme	Aço 1020
7	Pás	Fibra de Vidro e Resina Epóxi Reforçada
8	Chapa do Rotor (Cubo para prender as Pás – Peça 1)	Aço 1020
9	Suporte das Pás (Cubo para prender as Pás – Peça 2)	Aço 1020
10	Suporte da Rabeta (Suporte do Leme)	Aço 1020
11	Base Completa (Visão Geral)	-
12	Chapa da Base (Base Completa)	Aço 1020
13	Tubo (Base Completa)	Tubo Mecânico de aço 1020
14	Eixo de Sustentação (Base Aerogerador)	Aço 1020
15	Eixo (das Pás)	Aço 1020
16	Nervuras (para Reforço do Eixo de Sustentação)	Aço 1020
17	Suporte (Flange para prender Eixo de Sustentação)	Aço 1020
18	Pista das Escovas	Latão
19	Reforços (Base Completa)	Aço 1020
20	Torres de Teste e Definitiva	-

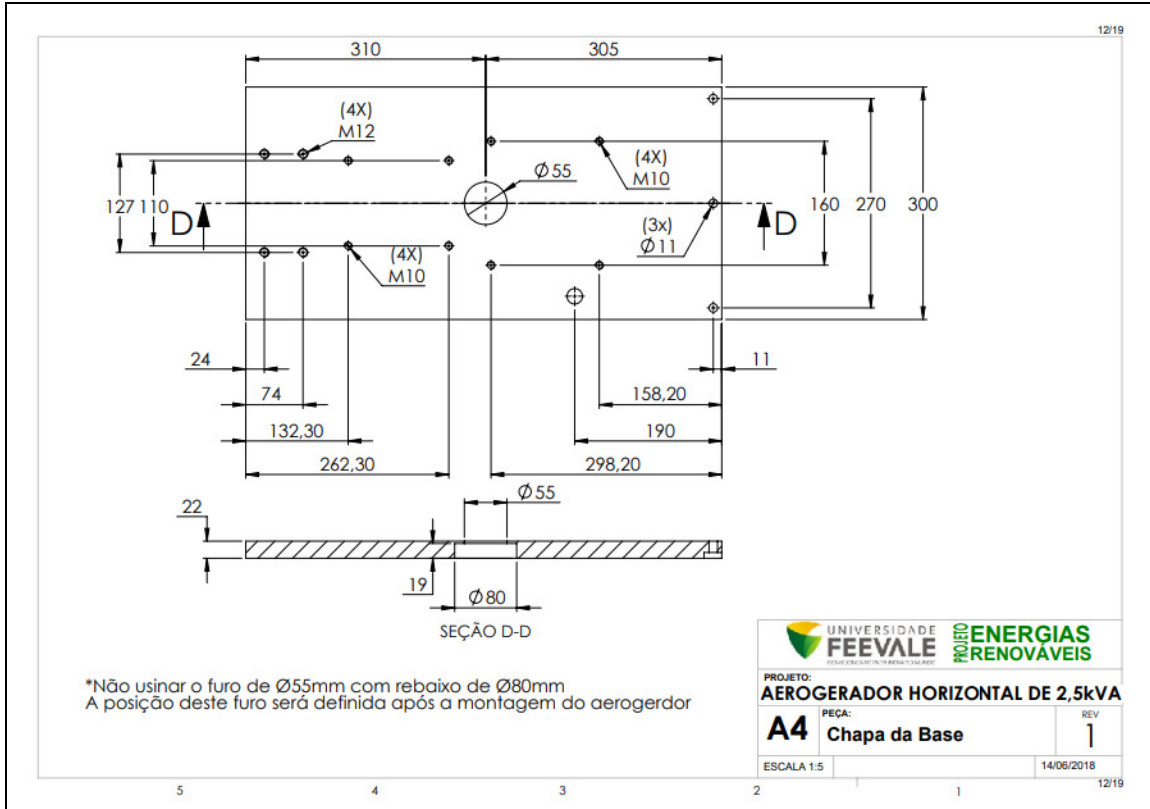
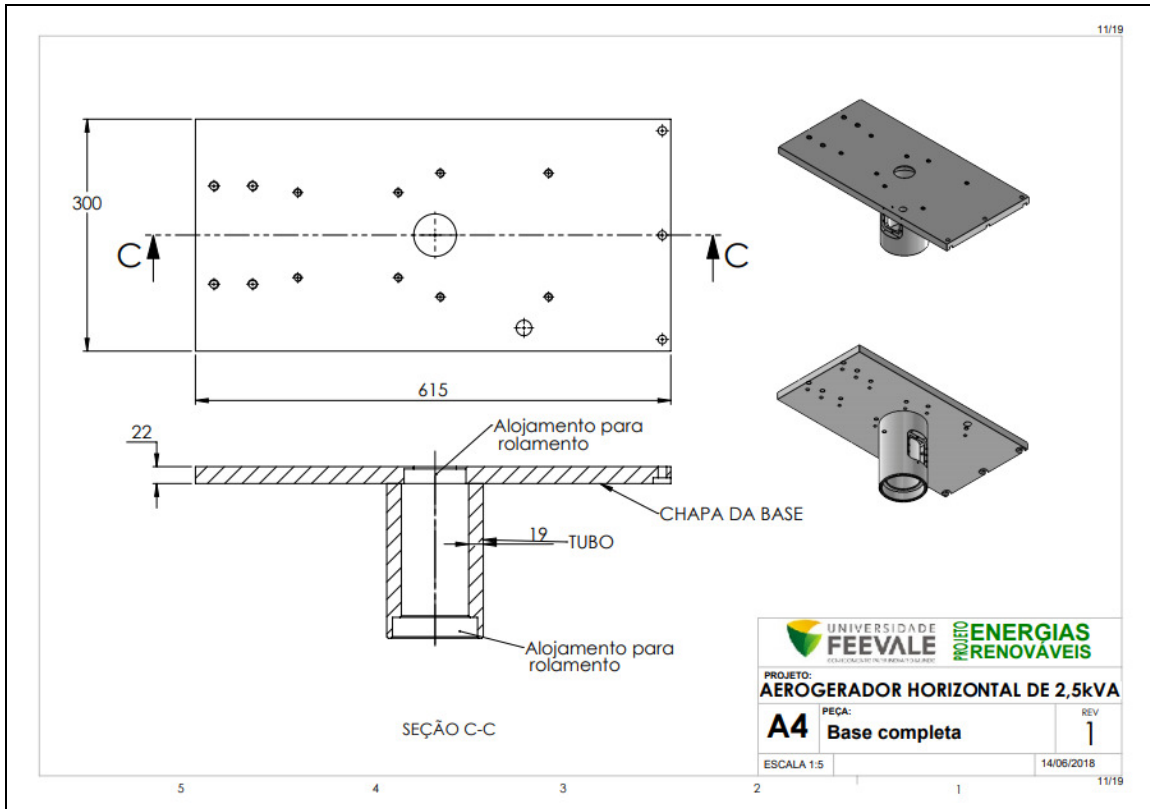


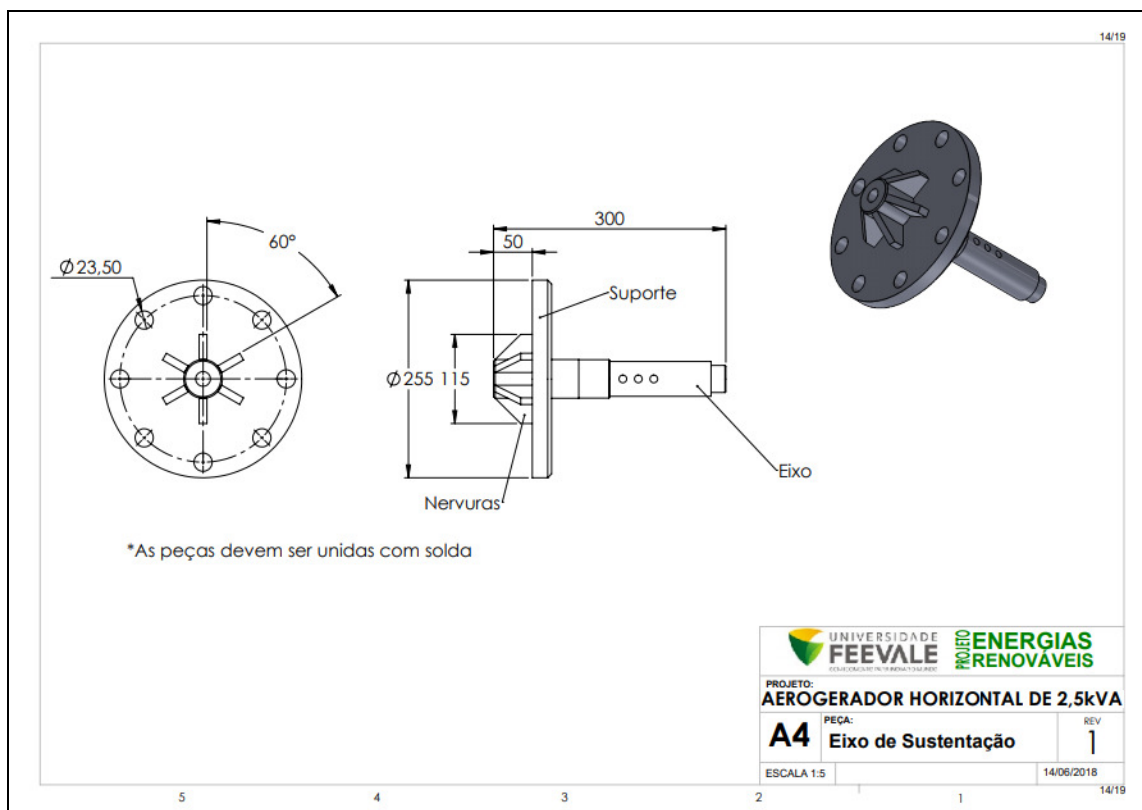
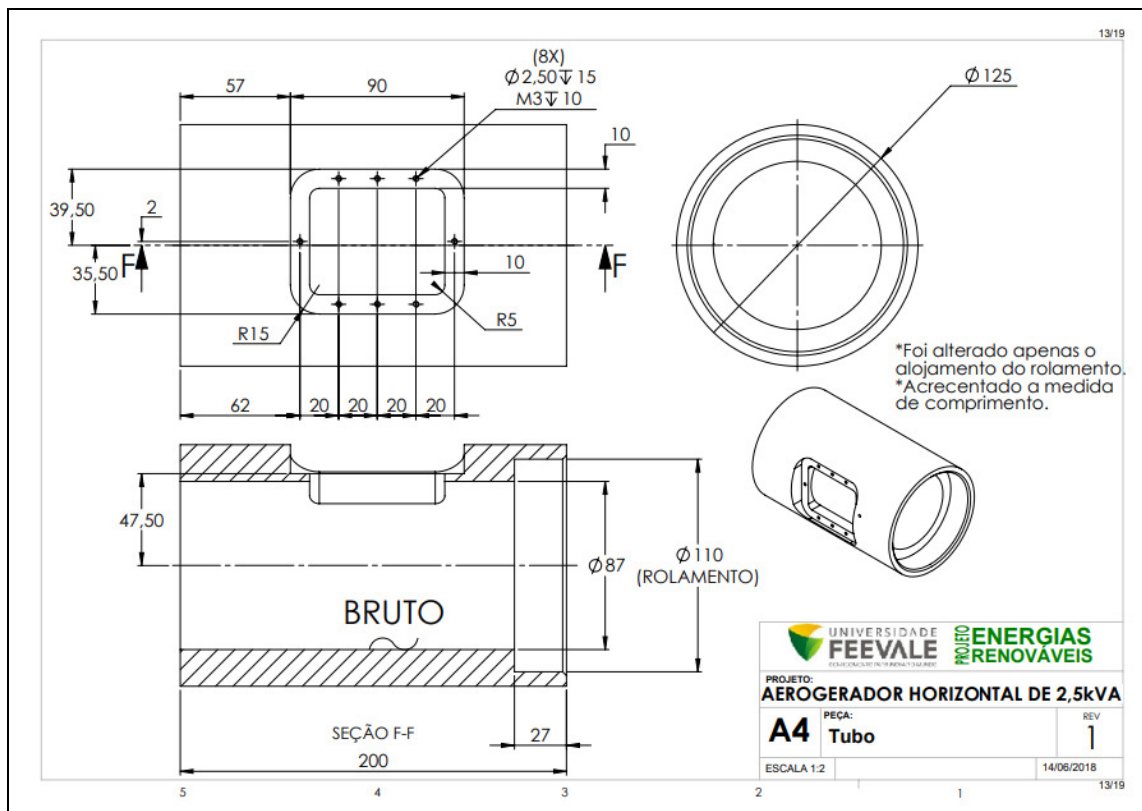


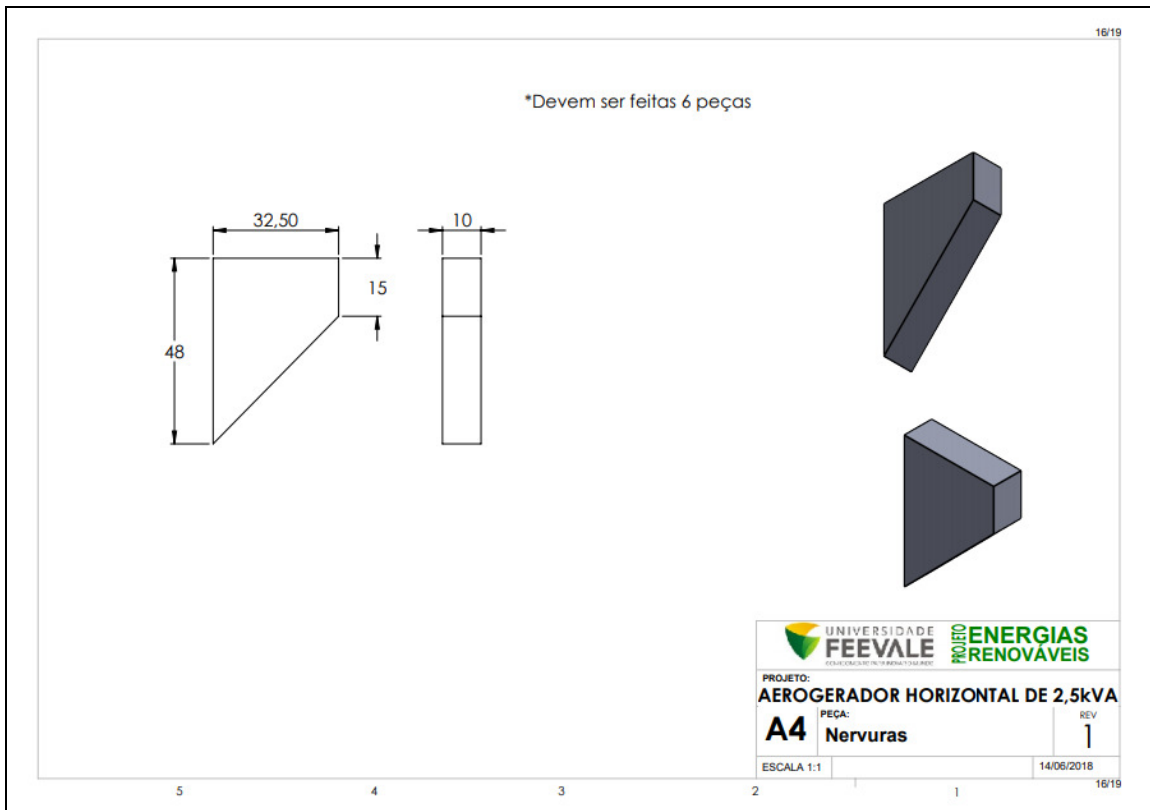
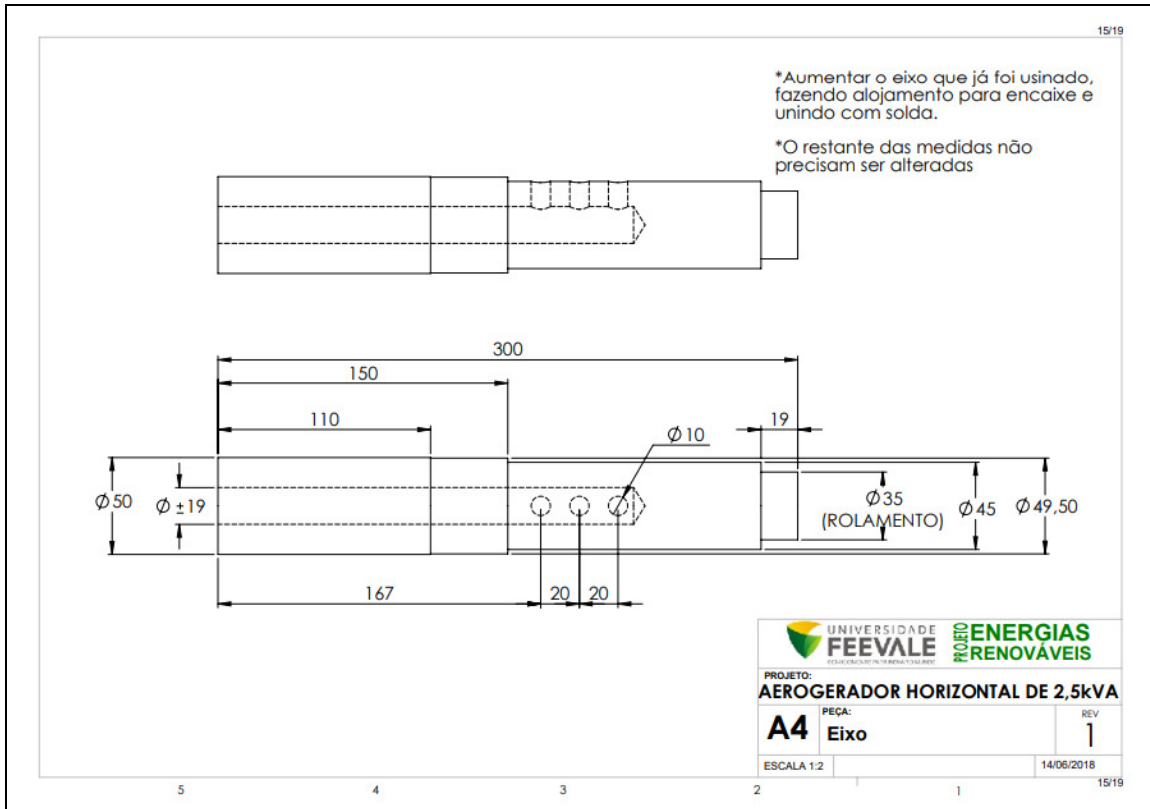


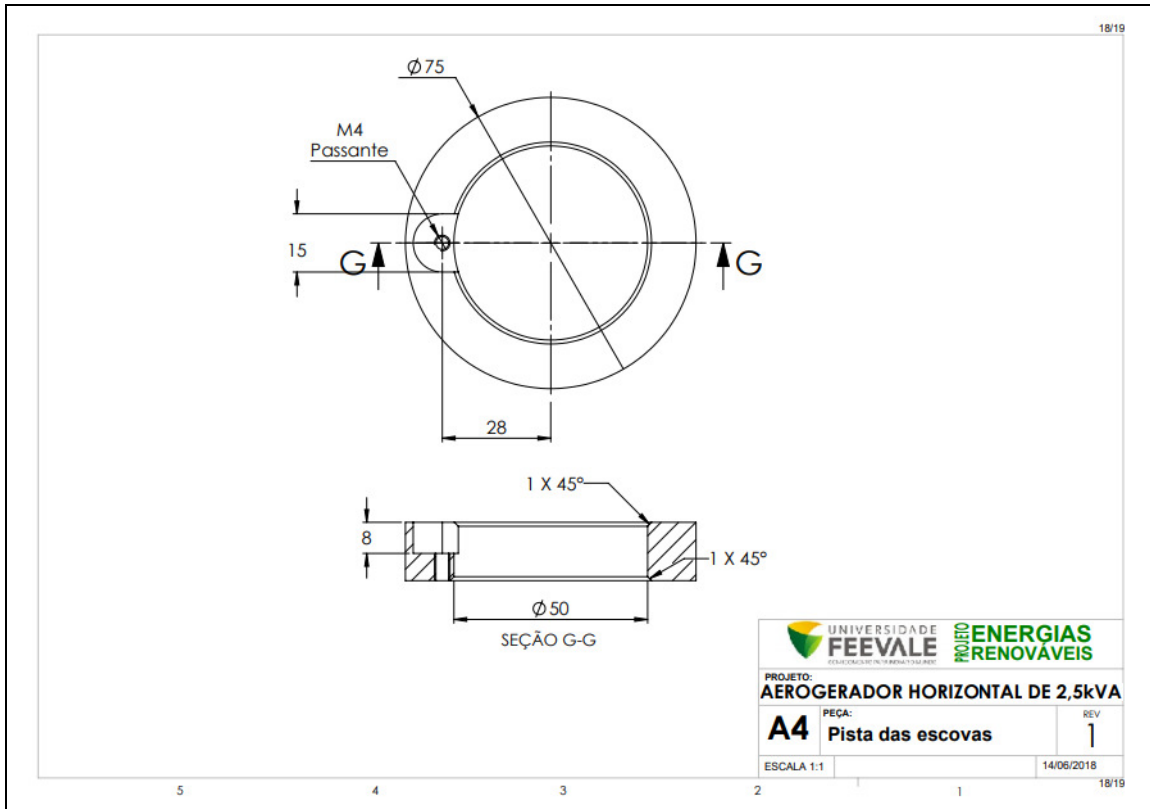
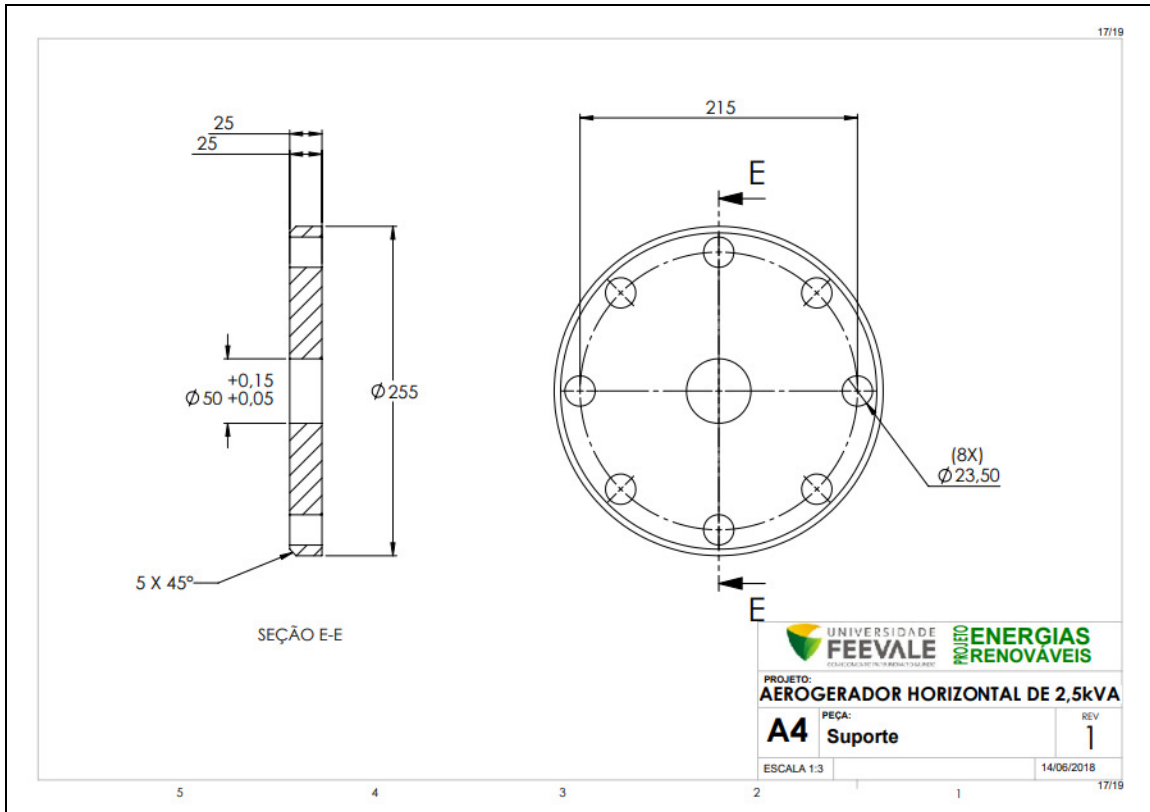


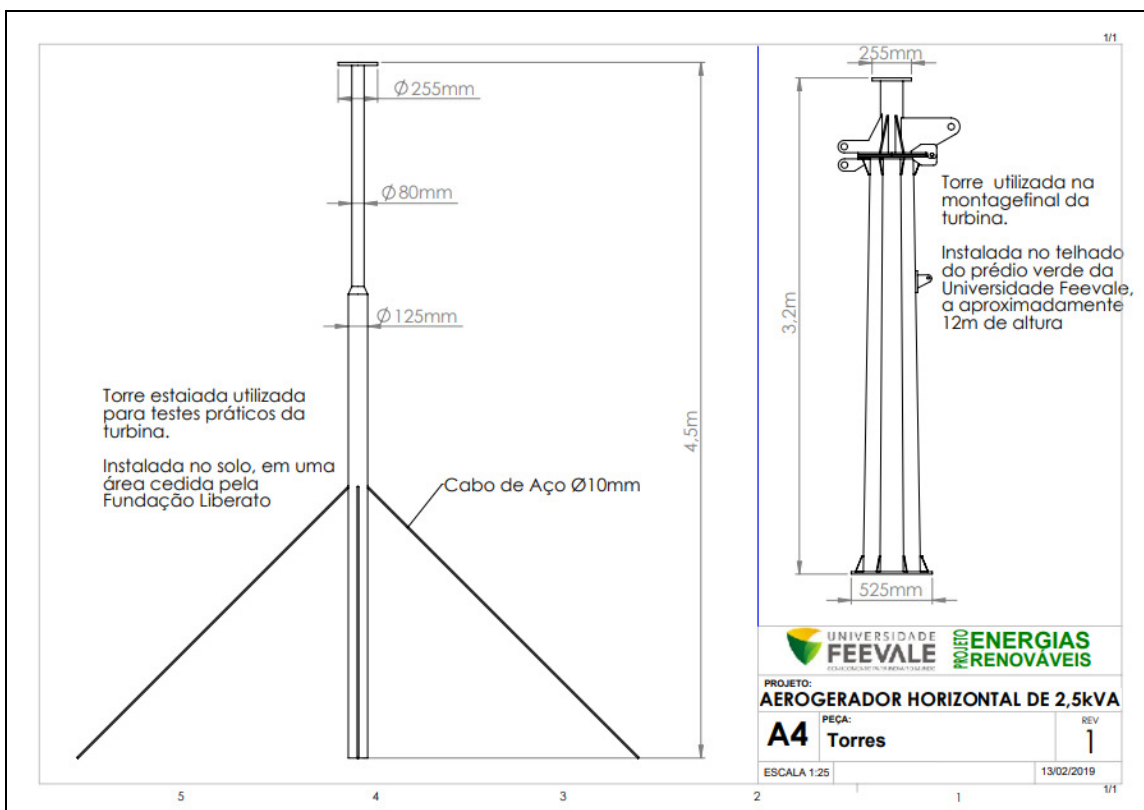
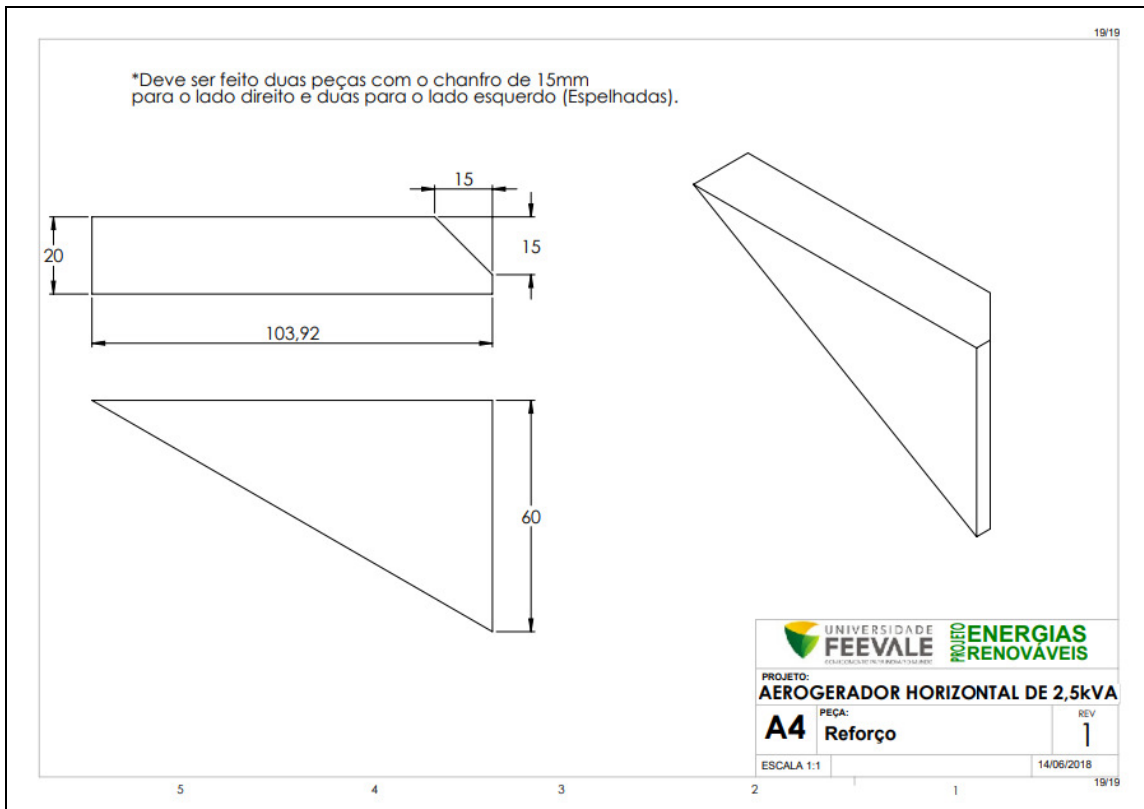












REFERÊNCIAS. BIBLIOGRÁFICAS

- [1]- <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> - Acessado em 27/05/2018
- [2]- FREITAS, B. M., & HOLLANDA, L. **Micro e Minigeração no Brasil: Viabilidade Econômica e Entraves do Setor**, Waithe Paper Nº 1, maio de 2015. FGV Energia: 2015, p.1-24. Disponível em:
<<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/13853/micro.pdf>> - Acessado em 28/05/ 2018.
- [3]- PERERMANS, G. et al. **Distributed generation: definition, benefits and issues**. Energy Policy, v. 33, n. 6, p.787-798, abril de 2005. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069>> - Acessado em 28/05/ 2018.
- [4]- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: Módulos do PRODIST, 2012. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> - Acessado em 28 de maio de 2018.
- [5]- ANEEL. **Nota Técnica Nº 0056/2017**. Brasília: SRD/ANEEL, 2017. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9> - Acessado em 28/05/ 2018.
- [6]- MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo**. Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia. Brasília: MME, 2014. p.1-8. Disponível em:
<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256600/Folder+Energia+Eolica.pdf>> - Acessado em: 30/05/2018.
- [7]- <https://umpoucodk.wordpress.com/2014/10/15/energia-eolica/> - acessado em 30/05/2018.
- [8]- MONTEIRO, D. SANTOS, A.S., DIAS, M.M., et al. **Desenvolvimento de Controladores para Aerogerador Horizontal de 2,5 kW**. 8.a Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis, RENOMAT 2018. p.1-19.
- [9]- DUTRA, Ricardo Marques. **VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA ENERGIA EÓLICA FACE AO NOVO MARCO REGULATÓRIO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**. 2001. 309 p. Tese (Mestrado) – Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em:
< <http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rmdutra.pdf>> - Acessado em 30/05/2018.
- [10]- PEREIRA, Marcello Monticelli. **UM ESTUDO DO AEROGERADOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL E SUA APLICAÇÃO PARA FORNECIMENTO DE POTÊNCIA ELÉTRICA CONSTANTE**. 2004, 86p. Dissertação (Mestrado) – Curso do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia,

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211037.pdf>>. Acesso em: 30/05/2018.

[11]- SGUAREZI, A. F.; & Cardoso, J. G. **Energia eólica**: tipos de geradores e conversores usados atualmente. Setor Elétrico, p.160-161, maio de 2014. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/artigo-do-espaco-do-IEEE-maio-2014.pdf>>. Acesso em 30 de maio de 2018.

[12]- PEREIRA, M. G.; DUTRA, R. M.; MONTEZANO, B. **Avaliação do Mercado de Aerogeradores de Pequeno Porte à Luz da Resolução ANEEL Nº 482/2012**: Resultado da Pesquisa Realizada com Agentes do Setor. XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, p.1-9, outubro de 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcio_Pereira6/publication/273760634_AVALIACAO_DO_MERCADO_DE_AEROGERADORES_DE_PEQUENO_PORTE_A_LUZ_DA_RESOLUCAO_ANEEL_N_4822012_RESULTADO_DA_PESQUISA_REALIZADA_COM_AGENTES_DO_SETOR/links/550ad2740cf285564095852a.pdf>. Acesso em 29 de maio de 2018.

[13]- VOGT, Hans Heirnrich. **ANÁLISE ESTRUTURAL DE PÁS DE GERADOR EÓLICO DE PEQUENO PORTE FEITA DE FIBRA VEGETAL BRASILEIRA**. 2010, 128 p. Dissertação (Mestrado) – Ciências Físicas Aplicadas do Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

[14]- DUTRA, Ricardo Marques. **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. CEPEL Sistema Eletrobras. 2008. p.1-59. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso: em 30 de maio de 2018.

[15]- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. S. Paulo, Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1992. 352p.

[16]- BRADBURY, S. **Powder Metallurgy Equipment Manual**. New Jersey, USA, MPIF, 1986. 199p.

[17]- GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science**. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 1984, 279p.

[18]- DIAS, M.M., MARTINS, R.M., AQUIM, P.M., et al. **Study of H100 Raw Materials to Obtainment of Isotropic and Anisotropic Magnets of Strontium Ferrite**. International Journal of Scientific & Engineering Research. v.10, n.3. 2019. p.1-9.

[19]- HÖGANÄS AB. **Höganäs Handbook for Machining Guidelines**, 135 p., 2004.

[20]- <http://www.combustol.com.br/metalpo.php?cod=54> – acessado em 03/07/2019

[21]- KRAUS, J.D. CARVER, K.R. **Eletromagnetismo**. R.Janeiro, Guanabara, 1978. 780p

- [22]- CULLITY, B.D. **Introduction to Magnetic Materials**. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
- [23]- JILES, D. **Introduction to Magnetismo and Magnetic Materials**. London, Chapman and Hall, 1991.440p.
- [24]- SARAIVA, D.B., **Materiais Elétricos**, R.Janeiro, Guanabara, 1988.
- [25]- SLEMON, G. R., **Equipamentos Magnetelétricos: Transdutores, Transformadores e Máquinas**, R. Janeiro, Universidade de São Paulo, 1974.
- [26]- FITZGERALD, A.E., KINGSLEY Jr., C. & KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. S. Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1973. 621p.
- [27]- PERMANENT MAGNET MATERIALS. **Special-Purpose Material**. Revised by J.W.Fiepeke, Crucible Magnetics, a Division ou Crucible Material Corporation. p.782-803.
- [28]- LANDGRAF, F.J.G. & RODRIGUES D. **Materiais Magnéticos Produzidos por M/P**. Artigo de Publicação Interna.- IPT. S.Paulo.
- [29]- NASAR, S.A. **Máquinas Elétricas**. S.Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1984. 216p.
- [30]- DIAS. M.M. **Conversão de Energia**. Apostila de Uso Interno. Universidade Feevale. 2017
- [31]- LÜDKE, E. **Estudando campos magnéticos e histerese com um anel de Rowland**. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.32, n.1, SP. 2010.
- [32] – FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- [33] – NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [34]- M. M. Dias, et al. **Aplicação de Materiais Magnéticos Macios Sinterizados em Máquinas Elétricas Rotativas Síncronas**. Tecnologia e Tendências, v. 10, n.2, 2014. P.1-19.
- [35]- JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
- [36]- KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. **New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications**. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.
- [37]- D. Meeker, **Finite Element Method Magnetics**. User's Manual, 2010.

- [38]- ASTM A773/A773M **American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs.**
- [39]- BITTENCOURT, S. D.; SCHAEFFER, L.; DIAS, M. M. **Ligas Magnéticas Sinterizadas Usadas em Máquinas Elétricas Rotativas.** 1. ed. Porto Alegre: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 105p.
- [40] – BOYLESTAD, R.L., NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory.** New Jersey, Prentice Hall, 894p, 2009.
- [41] – [ASTM E18](#) (Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials)
- [42] – ASTM E9 (Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature)
- [43]- Catálogo Motores Eberle - <http://www.eberle.com.br/catalogos/EBERLE-CatalogoMaquinasdeAplicacao.pdf> - Acessado em 31/01/2020
- [44]- SONGYUN MA, HUANG YUAN. **Damage evolution and modeling of sintered metals under multi-axialloading conditions.** Computational Materials Science, Volume 80, December 2013, Pages 123-133
- [45]- LAWLEY, A. **Atomization: the production of metal powders.** 1992. Princeton: MPIF.
- [46]- LEMOS, S. et al. **The use of radial constriction consolidation (RCC) process to obtain billets from iron powder.** REM, 2010, v. 63, n.3, p. 509-516.
- [47]- Jansson P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications.** Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
- [48] – ENESCU, E., SOPTEA, E., GAVRILIU, S., CRISTESCU, E. **New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores.** Cercet. Metal. Mater. (Metall. New Mater. Res.), II, (3), 1998, p.69-78.
- [49] – FLETCHER F.B. **Carbon and Low-Alloy Steel Plate in:** ASM Handbook, v.1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Materials Park, OH, 1995.